

# Implementacija i validacija mehanički regulariziranog FE DVC pristupa za heterogene materijale

---

Leljak, Dalibor

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*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:235:417816>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-05**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dalibor Lejak**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević

Student:

Dalibor Leļjak

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Zvonimiru Tomičeviću na fenomenalnom mentorstvu, savjetima, uloženom trudu i vremenu pa tako i na odličnoj radnoj atmosferi.

Posebnu zahvalu upućujem Ani Vrgoč, mag. ing. mech., na nesebičnoj pomoći, trudu, nemjerljivom strpljenju, razumijevanju, prenesenom znanju te na odličnom društvu.

Nadalje, zahvaljujem se Andriji Zaplatiću, mag. ing. mech., na podršci i korisnim savjetima.

Također se zahvaljujem svojim roditeljima Žarku i Tanji što su mi omogućili studiranje i bez kojih ne bi mogao završiti studij te svojoj sestri Lani na podršci.

Na kraju, zahvaljujem se svim svojim prijateljima Davidu, Filipu, Marinu i Dariu koji su mi uljepšali studiranje.

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

Dalibor Lejak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za diplomске 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 / 21 - 6 / 1        |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -           |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dalibor Leljak**

JMBAG: 0035209180

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Implementacija i validacija mehanički regulariziranog FE DVC pristupa za heterogene materijale**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Implementation and validation of the mechanically regularized FE DVC approach for heterogeneous materials**

Opis zadatka:

Primjena računalne tomografije rendgenskih zraka (*eng. X-Ray Computed Tomography - XCT*) u svrhu analize mikrostrukture heterogenih materijala značajno je porasla u posljednjem desetljeću. Naime, XCT nerazornom metodom ispitivanja moguće je dobiti vrlo točne trodimenzionalne slike koje pružaju uvid u heterogenu arhitekturu promatranog materijala, nesavršenosti materijala uslijed proizvodnog procesa i oštećenje akumulirano unutar mikrostrukture tijekom eksploatacije. Nadalje, uzastopnim zabilježavanjem volumetrijskih slika, otvorena je nova mogućnost analize ponašanja heterogenih materijala na površini i unutar promatranog objekta u različitim vremenskim intervalima primjenom metode korelacije digitalnih volumena (*eng. Digital Volume Correlation - DVC*). Korelacijske metode mjerenja cijelog polja pomaka temelje se na očuvanju sive nijanse boja zabilježene na registriranim 3D skenovima koji opisuju mikrostrukturu promatranog materijala. Različiti konstituenti heterogenog materijala rezultiraju različitim nijansama sive boje što ih čini prikladnim za klasični korelacijski algoritam jer je ostvaren značajan gradijent između susjednih voksela na slici.

U okviru ovog rada potrebno je implementirati mehaničku regularizaciju temeljenu na heterogenoj mikrostrukтури unutar postojećeg DVC korelacijskog algoritma *Correli 3.0*<sup>®</sup> temeljenog na konačnim elementima (*eng. Finite Element - FE*). 3D volumen zabilježen u referentnom, tj. neopterećenom stanju, je potrebno diskretizirati FE mrežom s obzirom na arhitekturu promatranog materijala. Naime, svaki konstituent heterogenog materijala imat će drugačiju nijansu sive skale boja na temelju koje je potrebno izvršiti segmentaciju digitalne 3D slike. Na temelju segmentiranog 3D volumena, potrebno je modelirati FE mrežu konzistentnu s pripadajućom mikrostrukturom tako da je svaki element definiran s oznakom odgovarajućeg konstituenta. Nadalje, pri implementaciji mehaničke regularizacije potrebno je uzeti u obzir razliku mehaničkih svojstva konstituenata. Budući da FE mreža razlikuje različite faze materijala, potrebno je u regularizacijskoj proceduri dodijeliti različita elastična svojstva (tj. module elastičnosti i Poissonov faktor) i tako uzeti u obzir heterogenu prirodu materijala. Predloženo poboljšanje FE DVC algoritma bit će validirano na 3D skenovima epoksidne smole ojačane mat staklenim vlaknima zabilježenim uslijed in-situ vlačnog testa.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. rujna 2021.

2. prosinca 2021.

13. – 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc.dr.sc. Zvonimir Tomičević

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

|  |     |
|--|-----|
| SADRŽAJ .....  | I   |
| POPIS SLIKA .....  | III |
| POPIS TABLICA.....   | VI  |
| POPIS OZNAKA .....   | VII |
| POPIS SKRAĆENICA .....   | IX  |
| SAŽETAK.....   | X   |
| SUMMARY .....  | XII |
| 1. Uvod .....  | 1   |
| 2. Vlaknima ojačani polimeri .....   | 3   |
| 2.1. Oštećenja u vlaknima ojačanim polimerima .....  | 3   |
| 2.2. Načini određivanja oštećenja u vlaknima ojačanim polimerima .....                               | 4   |
| 3. Korelacija digitalnih volumena .....  | 6   |
| 3.1. Mehanička regularizacija .....  | 8   |
| 3.2. Korelacija digitalnih volumena primjenom heterogene mehaničke regularizacije....                | 10  |
| 3.2.1. Segmentacija heterogene mikrostrukture.....   | 10  |
| 3.2.2. Izrada mreže konačnih elemenata .....   | 11  |
| 3.2.3. Dodjeljivanje materijalnih svojstava mreži konačnih elemenata.....                            | 12  |
| 4. <i>In-situ</i> eksperimentalni protokol određivanja oštećenja u vlaknima ojačanim polimerima..... | 13  |
| 4.1. Materijal .....   | 13  |
| 4.2. Eksperimentalni postav i provedba ispitivanja .....   | 14  |
| 5. Detekcija oštećenja u vlaknima ojačanim polimerima primjenom korelacije digitalnih volumena.....  | 18  |
| 5.1. Promatranje mehaničkog oštećenja u polimeru ojačanom vlaknima.....                              | 18  |
| 5.1.1. Mjerna nesigurnost.....   | 18  |
| 5.1.2. Deformacije i korelacijski reziduali.....   | 21  |
| 5.2. Mehanizmi oštećenja.....  | 24  |
| 6. Određivanje parametara heterogene regularizacije .....  | 28  |
| 6.1. Položaj promatranog pod-volumena .....  | 28  |
| 6.2. Primjena homogene regularizacije na mikrostrukturnoj mreži.....                                 | 30  |
| 6.2.1. Utjecaj regularizacijske duljine na homogeno regulariziran DVC .....                          | 31  |
| 6.2.2. Izmjerena polja pomaka .....  | 32  |
| 6.2.3. Polje najvećih glavnih deformacija i mapa korelacijskih reziduala.....                        | 32  |
| 6.2.4. Analiza oštećenja .....   | 33  |
| 6.3. Utjecaj kontrasta na heterogeno regularizirani DVC pristup.....                                 | 38  |
| 6.4. Utjecaj regularizacijske duljine na heterogeno regularizirani DVC pristup .....                 | 44  |
| 6.5. Analiza oštećenja kod heterogeno regulariziranog DVC pristupa.....                              | 46  |
| 6.5.1. Izmjerena polja pomaka .....  | 46  |
| 6.5.2. Polje najvećih glavnih deformacija i mapa korelacijskih reziduala.....                        | 47  |

---

|   |    |
|---|----|
| 6.5.3. Analiza oštećenja .....  | 47 |
| 7. Detekcija oštećenja u materijalu primjenom heterogeno regulariziranog DVC pristupa.. | 51 |
| 7.1. Analiza oštećenja kod različitih ciklusa opterećivanja .....                       | 53 |
| 8. Zaključak .....  | 58 |
| LITERATURA.....   | 61 |

**POPIS SLIKA**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. a) Prvi, b) drugi i c) treći stadij oštećenja kompozita ojačanog vlaknima [14].  | 4  |
| Slika 2. Ispitni uzorak prikazan u a) izometriji i b) presjeku.   | 7  |
| Slika 3. Mreža konačnih elemenata a) u izometriji i b) u presjeku koja se koristi kod standardnog pristupa DVC metode.  | 7  |
| Slika 4. Presjek a) mikrostrukture i b) segmentirane slike vlaknima ojačanog polimera.  | 10 |
| Slika 5. Presjek a) mikrostrukture i b) pripadajuće mreže konačnih elemenata kompozita.   | 11 |
| Slika 6. Mreža konačnih elemenata koja opisuje heterogenu mikrostrukturu.   | 12 |
| Slika 7. Dogbone ispitni uzorak.  | 13 |
| Slika 8. Presjek mikrostrukture kompozita.  | 14 |
| Slika 9. TTC Deben uređaj za testiranje [2].  | 14 |
| Slika 10. Povijest opterećivanja uzorka i dobivanja skenova kod cikličkog ispitivanja.  | 16 |
| Slika 11. Sken dobiven pri a) visokoj kvaliteti (sken 0) i b) niskoj kvaliteti (sken 000).  | 17 |
| Slika 12. a) Standardna devijacija pomaka u ovisnosti o veličini elemenata i b) standardna devijacija deformacija u ovisnosti o veličini elemenata. Crveni isprekidani pravokutnik označuje odabranu veličinu elemenata.  | 19 |
| Slika 13. Mreža konačnih elemenata pri veličini elemenata od 32 vx u a) izometriji i b) x-y ravnini.  | 19 |
| Slika 14. Mreža konačnih elemenata pri veličini elemenata od 32 vx, sa proguščenjem oko zareza sa veličinom elemenata od 16 vx u a) izometriji i b) x-y ravnini.  | 20 |
| Slika 15. Ovisnost deformacija – naprezanje za <i>in-situ</i> ciklički vlačni test.   | 22 |
| Slika 16. Polja deformacija za sken 1 u a) izometriji i b) x-z ravnini.   | 22 |
| Slika 17. Polja a) deformacija na razini voksela b) korelacijskih reziduala.  | 23 |
| Slika 18. Pogled polja reziduala u x-z za sken 1.   | 24 |
| Slika 19. a) Pozicija podskupa 1 unutar područja interesa na mapi korelacijskih reziduala, b) korelacijski reziduali podskupa 1 preklopljeni sa odgovarajućim područjem skena 0, c) referentni (sken 0), d) deformirani volumen (sken 1) korigiran izmjerenim poljima pomaka. Crvene isprekidane kružnice označuju područja povišenih reziduala.  | 25 |
| Slika 20. a) Pozicija podskupa 2 unutar područja interesa na mapi korelacijskih reziduala, b) korelacijski reziduali podskupa 2 preklopljeni sa odgovarajućim područjem skena 0 u dvije ravnine, c) referentni volumen (sken 0) u dvije ravnine i d) deformirani volumen (sken 1) korigiran izmjerenim poljima pomaka u dvije ravnine. Crvene isprekidane kružnice označuju područja povišenih reziduala. | 26 |
| Slika 21. a) Pozicija podskupa 3 unutar područja interesa na mapi korelacijskih reziduala, b) korelacijski reziduali podskupa 3 preklopljeni sa odgovarajućim područjem skena 0, c) referentni volumen (sken 0) i d) deformirani volumen (sken 1) korigiran izmjerenim poljima pomaka. Crvene isprekidane kružnice označuju područja povišenih reziduala.   | 27 |
| Slika 22. Položaj promatranog pod-volumena na mapi korelacijskih reziduala.   | 28 |
| Slika 23. Promatrani pod-volumen za a) sken 0 i b) sken 1.  | 29 |
| Slika 24. Presjek a) referentnog skena 0 i b) deformiranog skena 1.   | 29 |
| Slika 25. Polja najvećih glavnih deformacija dobivena sa regularizacijskom duljinom: a) $l_r=100$ vx, b) $l_r=70$ c) vx, $l_r=50$ vx i d) $l_r=30$ vx.  | 31 |
| Slika 26. Izmjerena polja pomaka u a) x smjeru, b) y smjeru i c) z smjeru.  | 32 |
| Slika 27. a) Polja najvećih glavnih deformacija, b) mapa korelacijskih reziduala za podvolumen skena 1.   | 33 |
| Slika 28. a) Presjek skena 0, b) presjek skena 1, c) korelacijski reziduali preklopljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane  |    |



|  |    |
|--|----|
| elipse su numerirane brojevima 1.-3. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine. ....   | 35 |
| Slika 29. a) Presjek početnog skena 0, b) presjek deformiranog skena 1, c) korelacijski reziduali preklapljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane elipse su numerirane 4.-6. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine. ....  | 36 |
| Slika 30. a) Presjek početnog skena 0, b) presjek deformiranog skena 1, c) korelacijski reziduali preklapljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane elipse su numerirane 7.-10. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine. .... | 37 |
| Slika 31. Korijen srednje pogreške reziduala u ovisnosti o regularizacijskoj duljini i kontrastu. Ovisnost različitih kontrasta i regularizacijskih duljina o divergenciji DVC analize. ....   | 39 |
| Slika 32. Standardna devijacija deformacija u ovisnosti o regularizacijskoj duljini i kontrastu. Ovisnost različitih kontrasta i regularizacijskih duljina o divergenciji DVC analize. ....  | 40 |
| Slika 33. Presjek polja najvećih glavnih deformacija pri regularizacijskoj duljini $l_r=100$ vx za kontraste a) $C=0,5$ , b) $C=1$ , c) $C=4$ , d) $C=8$ , e) $C=16$ i f) $C=30$ . ....  | 41 |
| Slika 34. Polja deformacija preklapljena sa početnim skenom 0 za vrijednost kontrasta a) $C=0,5$ ; b) $C=1$ , c) $C=4$ , d) $C=8$ , e) $C=16$ i f) $C=30$ . ....   | 42 |
| Slika 35. Korijen srednje pogreške reziduala kao funkcija kontrasta $C$ ( $l_r = 100$ vx). ....  | 43 |
| Slika 36. Standardna devijacija i srednja vrijednost najvećih glavnih deformacija kao funkcija kontrasta $C$ ( $l_r=100$ vx). ....   | 44 |
| Slika 37. Presjek polja glavnih deformacija za kontrast $C=4$ pri regularizacijskim duljinama a) $l_r=100$ vx, b) $l_r=70$ vx, c) $l_r=50$ vx i d) $l_r=30$ vx. ....   | 45 |
| Slika 38. Izmjerena polja pomaka u smjeru a) osi $x$ , b) osi $y$ i c) osi $z$ . ....  | 46 |
| Slika 39. a) Polja najvećih glavnih deformacija, b) mapa korelacijskih reziduala za podvolumen skena 1. ....   | 47 |
| Slika 40.a) Presjek početnog skena 0, b) presjek deformiranog skena 1, c) korelacijski reziduali preklapljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane elipse su numerirane 1.-3. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine. ....   | 48 |
| Slika 41. a) Presjek početnog skena 0, b) presjek deformiranog skena 1, c) korelacijski reziduali preklapljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane elipse su numerirane 4.-6. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine. ....  | 49 |
| Slika 42. a) Presjek početnog skena 0, b) presjek deformiranog skena 1, c) korelacijski reziduali preklapljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane elipse su numerirane 7.-10. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine. .... | 50 |
| Slika 43. Korijen srednje pogreške reziduala u ovisnosti o regularizacijskoj duljini i kvaliteti skenova. Ovisnost različitih kvaliteta skenova i regularizacijskih duljina o divergenciji DVC analize ( $C=4$ ). ....   | 52 |
| Slika 44. Standardna devijacija deformacija u ovisnosti o regularizacijskoj duljini i kontrastu. Ovisnost različitih kvaliteta skenova i regularizacijskih duljina o divergenciji DVC analize. ....  | 53 |
| Slika 45. Korelacijski reziduali preklapljeni sa početnim skenom 0 za a) sken 001, b) sken 002, c) sken 003, d) sken 004, e) sken 005, f) sken 006 i g) sken 007. Zelene elipse označuju zone unutar kojih su nastale pukotine. ....   | 55 |

---

Slika 46. Polja najvećih glavnih deformacija za a) sken 001, b) sken 002, c) sken 003, d) sken 004, e) sken 005, f) sken 006 i g) sken 007. Zelene elipse označuju zone unutar kojih su nastale pukotine. .... 57

---

**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Parametri skeniranja.....   | 15 |
| Tablica 2. Akvizicijski parametri.....   | 16 |
| Tablica 3. Mjerna nesigurnost.....   | 20 |
| Tablica 4. Mjerna nesigurnost progušćene mreže.....  | 20 |
| Tablica 5. Naprezanja i deformacije izračunate za skenove zabilježene tijekom <i>in-situ</i><br>cikličkog vlačnog testa..... | 21 |

**POPIS OZNAKA****Latiniĉke oznake**

| <b>Oznaka</b>            | <b>Jedinica</b> | <b>Opis</b>   |
|--------------------------|-----------------|---|
| $\{\mathbf{b}^i\}$       | GL              | Rezidualni vektor                                   |
| $C$                      | -               | Kontrast materijalnih svojstava                     |
| $E_f$                    | MPa             | Modul elastiĉnosti vlakana                          |
| $E_m$                    | MPa             | Modul elastiĉnosti matrice                          |
| $f(\mathbf{x})$          | GL              | Poĉetna (referentna) slika                          |
| $\nabla f$               | GL              | Gradijent slike                                     |
| $[\mathbf{f}]$           | N               | Vektor ĉvornih sila                                 |
| $g(\mathbf{x})$          | GL              | Deformirana slika                                   |
| $\tilde{g}(\mathbf{x})$  | GL              | Korigirana deformirana slika                        |
| $[\mathbf{K}]$           | MPa             | Matrica krutosti                                    |
| $[\mathbf{K}_m]$         | MPa             | Parcijalna matrica krutosti za Neumanove ĉvorove    |
| $[\mathbf{K}_s]$         | MPa             | Matrica krutosti za Dirichletove ĉvorove            |
| $\mathbf{k}$             | -               | Vektor posmiĉnih deformacija                        |
| $l_r$                    | vx              | Regularizacijska duljina                            |
| $l_m$                    | vx              | Regularizacijska duljina Neumanovih rubnih uvjeta   |
| $l_s$                    | vx              | Regularizacijska duljina Dirichletove rubnih uvjeta |
| $l_r^f$                  | vx              | Regularizacijska duljina vlakana                    |
| $l_r^m$                  | vx              | Regularizacijska duljina matrice                    |
| $[\mathbf{L}]$           | -               | Laplace-Beltrami operator                           |
| $[\mathbf{M}]$           | -               | Matrica korelacijske analize                        |
| $u_n$                    | vx              | Ĉvorni pomaci                                       |
| $u_x$                    | vx              | Pomaci u smjeru osi $x$                             |
| $u_y$                    | vx              | Pomaci u smjeru osi $y$                             |
| $u_z$                    | vx              | Pomaci u smjeru osi $z$                             |
| $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ | vx              | Polje pomaka  |
| $\{\delta\mathbf{u}\}$   | vx              | Inkrementalna promjena pomaka                       |
| $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ | vx              | Pomoĉno polje pomaka                                |
| $\mathbf{x}$             | vx              | Lokacija vokselā                                    |

**Grĉke oznake**

| <b>Oznaka</b>           | <b>Jedinica</b> | <b>Opis</b>   |
|-------------------------|-----------------|---|
| $\varepsilon_1$         | -               | Najveĉe glavne deformacije                                  |
| $\sigma$                | MPa             | Naprezanja  |
| $\varphi_c(\mathbf{x})$ | GL              | Polje korelacijskih rezidualā                               |
| $\Phi_c$                | GL              | Korelacijska funkcija cilja                                 |
| $\Phi_m$                | GL              | Funkcija cilja ravnoteŹne razlike za Neumanove rubne uvjete |

---

|                      |    |  |
|----------------------|----|--|
| $\Phi_s$             | GL | Funkcija cilja ravnotežne razlike za Dirichletove rubne uvjete |
| $\Phi_t$             | GL | Ukupna funkcija cilja  |
| $\Psi_n(\mathbf{x})$ | -  | Funkcije oblika  |
| $\omega_c$           | -  | Težinska funkcija za korelacijski funkcional                   |
| $\omega_m$           | vX | Težinska funkcija za Neumanovu funkciju cilja                  |
| $\omega_s$           | vX | Težinska funkcija za Dirichletovu funkciju cilja               |

---

**POPIS SKRAĆENICA**

| <b>Skraćenica</b> | <b>Značenje</b>                   |
|-------------------|-----------------------------------|
| DIC               | <i>Digital Image Correlation</i>  |
| DVC               | <i>Digital Volume Correlation</i> |
| GL                | <i>Grey Levels</i>                |
| HQ                | <i>High Quality</i>               |
| LQ                | <i>Low Quality</i>                |
| NDT               | <i>Non-destructive Testing</i>    |
| ROI               | <i>Region of Interest</i>         |
| RMS               | <i>Root Mean Square</i>           |
| STD               | <i>Standard Deviation</i>         |

---

**SAŽETAK**

Prisutnost različitih konstituenata koji posjeduju specifična materijalna svojstva u vlaknima ojačanim polimerima rezultira složenim fenomenima oštećenjima. Kod tih materijala je uslijed opterećivanja prisutan velik broj pukotina te različiti mehanizmi oštećenja koji se iniciraju te propagiraju na različitim razinama (mikro-, mezo- i makrorazina). Stoga detekcija oštećenja u ovim materijalima zahtijeva primjenu nerazornih metoda ispitivanja. U novije vrijeme, metoda korelacije digitalnih volumena u sprezi sa računalnom tomografijom se sve češće koristi za detekciju i praćenje rasta oštećenja u kompozitnim materijalima. Na ovaj način moguće je bilježiti i analizirati oštećenja na površini, ali i u unutrašnjosti ispitnih materijala.

U ovom radu analizirano je *in-situ* cikličko vlačno ispitivanje epoksidne smole ojačane mat staklenim vlaknima. Ispitni uzorak je skeniran u neopterećenom stanju, ali i pri različitim ciklusima opterećivanja. Osim toga, nakon loma ispitnog uzorka zabilježena su dva volumena s različitim parametrima skeniranja. Na skenovima zabilježenim kroz eksperimentalni protokol provedena je analiza oštećenja. Primjenom globalne metode korelacije digitalnih volumena na cijelom volumenu izmjerena su polja pomaka. Iz provedenog mjerenja, izračunata su polja najvećih glavnih deformacija te mape korelacijskih reziduala. Na temelju predložene analize identificirani su mehanizmi oštećenja te je određeno područje uzorka s maksimalnim lokalizacijskim zonama deformacija. Unutar tog područja je odabran manji pod-volumen koji služi za implementaciju mehaničke regularizacije te detaljnu analizu oštećenja. Nadalje, provedena je segmentacija odabranog pod-volumena s obzirom na pripadajuću mikrostrukturu, tj. iz segmentirane slike je izrađena mreža konačnih elemenata koja opisuje heterogenu mikrostrukturu. Izrađena mreža je korištena za provedbu analize oštećenja u promatranom pod-volumenu. Analiza je provedena globalnom metodom korelacije digitalnih volumena sa homogenom i heterogenom mehaničkom regularizacijom. Homogena regularizacija je provedena s jednakim vrijednostima materijalnih parametara različitih konstituenata. Kod analize sa homogenom regularizacijom promatran je utjecaj različitih regularizacijskih duljina te je provedena analiza iniciranja i rasta pukotina. Drugim riječima, iniciranje i rast pukotine određeni su promatranjem mapa korelacijskih reziduala i polja najvećih glavnih deformacija, ali i usporednom početnog (tj. nedeformiranog) skena te skena deformiranog uzorka. Nadalje, heterogena regularizacija implementirana je uvođenjem različitih materijalnih parametara za konstituente promatranog kompozitnog materijala. Osim toga, promatran je utjecaj različitih regularizacijskih duljina te različitih materijalnih parametara na rezultate analize korelacije digitalnih volumena. Nadalje, pri heterogenoj regularizaciji je provedena i analiza pukotina u

---

promatranom pod-volumenu te su prikazana polja deformacija i korelacijskih reziduala. Na kraju je provedena analiza sa heterogenom regularizacijom na skenovima kroz sve cikluse opterećivanja uzorka. Kod ove analize su promatrane promjene korelacijskih reziduala i polja deformacija kroz cijelu povijest opterećivanja ispitnog uzorka.

Ključne riječi: Korelacija digitalnih volumena, Mehanička regularizacija, Vlaknima ojačan kompozit, Računalna tomografija rendgenskih zraka, Heterogena mikrostruktura



---

**SUMMARY**

The presence of different constituents that possess specific material properties in fiber-reinforced polymers result with complex damage phenomena. When these materials are subjected to mechanical loading, a large number of cracks may occur accompanied with different damage mechanisms that initiate and propagate at different scales (micro-, meso- and macroscale). Therefore, the detection of damage in fiber reinforced polymers demands the use of advanced non-destructive testing methods. In recent years, Digital Volume Correlation combined with computed tomography is increasingly being used to detect and monitor damage initiation and growth in composite materials. In this way, it is possible to detect and analyze damage on the surface and in the bulk of the monitored object.

In this work, the test specimen subjected to *in-situ* cyclic tensile loading was analysed. The material studied herein is a glass fiber mat reinforced epoxy composite. The test specimen was scanned in the unloaded state, as well as during different loading regimes. Finally, two scans of the specimen after failure were acquired. Damage analysis was performed on scans acquired during the experimental protocol. The analysis was performed using global Digital Volume Correlation method over the entire specimen. The maximum principal strain fields and the correlation residual map were obtained from the correlation analysis. Based on the proposed correlation procedure, damage mechanisms were identified, and the critical region of the specimen was determined. Within the critical region, a small sub-volume was chosen for implementation of heterogeneous mechanical regularization and detailed damage analysis. Furthermore, segmentation of the selected sub-volume with respect to the corresponding microstructure was performed. From the segmented image, microscale finite element mesh accounting for morphology of the investigated material was generated. Microscale mesh was used to perform damage analysis in the observed sub-volume. The measurement protocol was performed employing the global Digital Volume Correlation approach with homogeneous and heterogeneous mechanical regularization. Homogeneous regularization was performed by using unique material properties for all constituents. In the correlation analysis with homogeneous regularization, the influence of different regularization lengths was studied. Furthermore, identification of crack initiation and propagation was performed. Such analysis was performed by observing the maps of correlation residuals and the main principal strain fields. Additionally, the microstructure of the initial and deformed scans was compared to identify the nature of the damage mechanism. Heterogeneous regularization was implemented by introducing different material properties for the constituents of the proposed composite

material. In addition, the influence of different regularization lengths and different material parameters on the results of correlation analysis was investigated. Furthermore, in the case of heterogeneous regularization, the damage mechanisms identification in the observed sub-volume was performed and the strain fields and correlation residuals were analyzed. Finally, the scans acquired over the entire loading history was analyzed with heterogeneous regularization. In the latter analysis, changes in correlation residuals and strain fields were investigated throughout the sample loading history to monitor damage initiation and growth.

Key words: Digital Volume Correlation, Mechanical regularization, Fiber reinforced polymers, X-Ray Computed Tomography, Heterogeneous microstructure

## 1. Uvod

Moderne konstrukcije i inženjerske komponente sve češće zahtijevaju razvoj i proizvodnju laganih materijala, koji mogu na efikasan način zamijeniti standardne inženjerske materijale. Primjer takve vrste materijala koji se sve češće primjenjuju u praksi su vlaknima ojačani polimeri [1, 2, 3]. Ovi materijali se odlikuju visokom čvrstoćom, a njihovu je mikrostrukturu moguće jednostavno modificirati s obzirom na narinuta opterećenja. No, heterogena mikrostruktura takvih materijala izaziva pojavu različitih mehanizama oštećenja koji nastaju i propagiraju na različitim razinama (mikro-, mezo- i makrorazina). Kod polimera ojačanih vlaknima oštećenja su vrlo složena i popraćena nizom različitih vrsta pukotina. Mehanizmi oštećenja uključuju pojave poput izvlačenja vlakana, loma vlakana ili matrice, odvajanje vlakana od matrice te delaminaciju slojeva [4]. Kako bi se na pravilan način odredili složeni mehanizmi oštećenja, sve češće se koriste korelacijske metode, poput korelacije digitalnih slika (eng. *Digital Image Correlation* - DIC). Spomenuta metoda omogućuje mjerenje polja pomaka promatranog materijala na površini uzorka, no ne pruža uvid u unutrašnjost materijala [2]. Zbog toga se koristi korelacija digitalnih volumena (eng. *Digital Volume Correlation* - DVC ), koja omogućuje analizu oštećenja u unutrašnjosti materijala [2, 5, 6].

U ovom radu je promatrano oštećenje u epoksidnoj smoli ojačanoj mat staklenim vlaknima. Za dobivanje skenova promatranog materijala korištena je računalna tomografija rendgenskih zraka (eng. *X-Ray Computed Tomography* - XCT). Ovom metodom je omogućeno dobivanje trodimenzionalne slike promatranog materijala te uvida u njegovu unutrašnjost i heterogenu mikrostrukturu [7]. Spomenuta nerazorna metoda će u ovom radu biti korištena kako bi se zabilježili skenovi kroz cijelu povijest opterećivanja i rasterećivanja promatranog ispitnog uzorka. Ispitni uzorak će biti podvrgnut *in-situ* cikličkom, jednoosnom vlačnom testu. Računalna tomografija rendgenskih zraka je korištena u kombinaciji sa globalnim pristupom metode korelacije digitalnih volumena. Ova korelacijska metoda omogućuje mjerenje polja pomaka na temelju dobivenih skenova. Izmjerena polja pomaka omogućuju izračun deformacija u 3D prostoru. Osim toga, globalni pristup korelacije digitalnih volumena omogućuje dobivanje mapa korelacijskih reziduala, odnosno uvid u oštećenje materijala [8].

U ovom radu će biti provedena analiza korelacije digitalnih volumena uz globalni pristup. Za provedbu analize će biti korišten algoritam *Correli 3.0* [9]. Za početak će se

provoditi analiza između skenova u neopterećenom stanju kako bi se odredila mjerna nesigurnost. Nakon toga će biti provedena DVC analiza između neopterećenog skena i deformiranih skenova kako bi se dobila polja najvećih glavnih deformacija te mape korelacijskih reziduala. Dobivenim rezultatima dobiti će se uvid u mehanizme oštećenja koji nastaju unutar predloženog materijala. Osim toga, usporedbom odabranog presjeka referentnog i deformiranog volumena promatrat će se identificirano oštećenje u interakciji s pripadajućom mikrostrukturom

Kako bi se omogućila implementacija mehaničke regularizacije temeljene na heterogenoj mikrostrukтури, na ispitnom uzorku će biti odabran jedan manji pod-volumen na kojem će biti provedena segmentacija 3D slike na temelju heterogene mikrostrukture. Iz segmentirane slike će se izraditi mreža konačnih elemenata, koja opisuje mikrostrukтуру promatranog pod-volumena. Mreža će biti izrađena programskim paketom *iso2mesh* [10], koji je implementiran u programski paket *MATLAB*. Posljednji korak implementacije heterogene regularizacije će biti zadavanje materijalnih svojstava različitim konstituentima promatranog kompozitnog materijala. Ona će biti definirana kontrastom koji predstavlja omjer modula elastičnosti različitih konstituenata predloženog materijala. Radi boljeg razumijevanja implementacije heterogene regularizacije, prvo će biti prikazani rezultati analize uz primjenu homogene regularizacije. Pri toj analizi će biti zadana jednaka materijalna svojstva različitih konstituenata i koristit će se mikrostrukturna mreža. Osim toga, bit će prikazan utjecaj različitih regularizacijskih duljina te će biti provedena analiza pukotina u promatranom pod-volumenu. Nakon toga će biti uvedena različita materijalna svojstva konstituenata, odnosno analiza će biti dalje provedena sa heterogenom regularizacijom. Provjeravat će se utjecaj različitih kontrasta te različitih regularizacijskih duljina. Uz to, provest će se i analiza pukotina u pod-volumenu. Na kraju će se na promatranom pod-volumenu provesti analiza korelacije digitalnih volumena sa heterogenom regularizacijom kroz cijelu povijest opterećivanja. Također, analizirat će se promjene u poljima korelacijskih reziduala kroz povijest opterećivanja uzorka. Isto tako, bit će analizirana izračunata polja najvećih glavnih deformacija kroz različite cikluse opterećivanja i rasterećivanja.

## 2. Vlaknima ojačani polimeri

Sve veća potreba za primjenom laganih konstrukcija je dovela do razvoja novih te modifikacije postojećih kompozitnih materijala koji mogu na efikasan način zamijeniti standardne inženjerske materijale [1]. Kompozitni materijali nastaju spajanjem dva ili više materijala sa različitim mehaničkim svojstvima, ali uz jasnu granicu između konstituenata [3, 7]. Navedeni heterogeni materijali koji imaju široku primjenu u automobilskoj, svemirskoj industriji, energetici i brodogradnji su vlaknima ojačani polimeri [11]. Oni pronalaze sve veću primjenu zbog svojih specifičnih svojstava. Takvi materijali omogućuju izradu laganih inženjerskih komponenti visoke čvrstoće [11]. Vlaknima ojačani polimeri nastaju spajanjem slojeva izrađenih od dva glavna konstituenta - vlakna i matrice. Heterogenu mikrostrukturu je moguće modificirati ovisno o djelovanju opterećenja [3, 12]. Nadalje, kod ovih materijala su vlakna glavni nosivi element kompozita te mu daju čvrstoću i krutost. Vlakna su najčešće staklena, ugljična ili aramidna, no svoju primjenu pronalaze i razne druge vrste [11]. Nadalje, matrica služi za prijenos opterećenja na vlakna, oblikovanje vanjske konture kompozitne konstrukcije i zaštitu od utjecaja okoline [3]. Polimerne matrice se dijele na dvije glavne skupine, tj. duromere i plastomere. Duromeri pri zagrijavanju stvaraju nepovratne kemijske veze što znači da nakon njihovog hlađenja i ponovnog zagrijavanja ne dolazi do omekšanja pa ih nije moguće oblikovati. S druge strane, plastomere je moguće nakon hlađenja zagrijati i ponovno oblikovati [3].

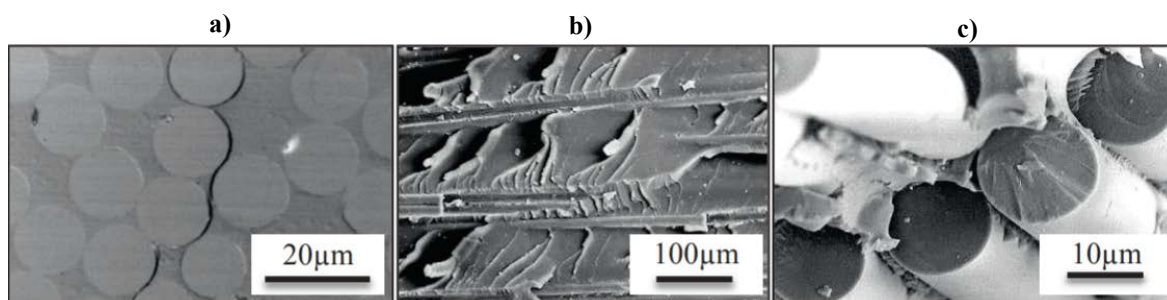
Kod ovih materijala lom se događa uslijed mikroskopskih pukotina te nije izraženo plastično tečenje [3, 13]. Isto tako, prisutnost različitih konstituenata te samim time različitih materijalnih svojstava rezultira pojavom složenih mehanizama oštećenja prilikom opterećivanja polimera ojačanih vlaknima [4]. Kako bi se ti mehanizmi mogli na pravilan način analizirati, u nastavku će biti opisana pojava i rast oštećenja u polimerima ojačanim vlaknima te načini kako se ta oštećenja mogu detektirati.

### 2.1. Oštećenja u vlaknima ojačanim polimerima

Mehanizmi oštećenja u kompozitima su vrlo kompleksni i promjenjivi ovisno o mehaničkim svojstvima heterogene mikrostrukture kompozita, odnosno o vrsti kompozita. [14]. U ovim materijalima se istovremeno razvijaju različiti mehanizmi oštećenja čija međusobna interakcija rezultira potpunim gubitkom mehaničkog integriteta kompozitne

konstrukcije. Kod različitih kompozitnih konstrukcija, režimi i načini opterećenja te okolišni uvjeti utječu na proces nastanka oštećenja [4, 14, 15].

Oštećenje u vlaknima ojačanih polimera je podijeljeno u tri glavna stadija. Prvi stadij oštećenja se događa u zonama niže čvrstoća, kao što su matrica ili granice matrica i vlakana. Ovaj stadij oštećenja nastupa u područjima materijala gdje orijentacija vlakana ne odgovara osi opterećenja te ova vrsta oštećenja ima mali utjecaj na konačni gubitak integriteta konstrukcije, no detekcija oštećenja u ovom stadiju omogućuje zaustavljanje daljnjeg širenja oštećenja. Primjer opisanog stadija je prikazan na Slici 1. a). Drugi stadij oštećenja, prikazan Slici 1. b), uključuje delaminaciju, ili drugim riječima razvoj pukotine kroz slojeve kompozita. Pri ovoj vrsti oštećenja, rast pukotine unutar jednog sloja je zaustavljen sa njemu susjednim slojem te dolazi do propagacije između samih slojeva. Potrebno je spomenuti kako su česti uzroci ovog stadija oštećenja defekti u proizvodnji. Na kraju, u trećem stadiju, dolazi do oštećenja unutar vlakana čija orijentacija odgovara smjeru opterećenja. Ovaj stadij oštećenja najčešće nastupa prilikom značajnih opterećenja kompozita te je primjer vidljiv na Slici 1. c) [14].



Slika 1. a) Prvi, b) drugi i c) treći stadij oštećenja kompozita ojačanog vlaknima [14].

Porast primjene polimera ojačanih vlaknima zahtjeva pouzdanu identifikaciju oštećenja koja se pojavljuju u tim materijalima. Iz tog razloga se koriste metode kojima se može detektirati oštećenje te će neke od njih biti spomenute u nastavku.

## 2.2. Načini određivanja oštećenja u vlaknima ojačanim polimerima

Kako bi se odredila kompleksna priroda oštećenja unutar polimera ojačanih vlaknima koriste se, na primjer, korelacijski algoritmi. DIC je metoda koja ima široku primjenu zbog mogućnosti mjerenja polja pomaka na površini opterećenog uzorka [2]. Usprkos tome, DIC metoda ne omogućuje analizu oštećenja u unutrašnjosti materijala. Iz tog razloga se koristi DVC

---

metoda u kombinaciji sa drugim nerazornim metodama kako bi se omogućila detekcija i analiza oštećenja materijala na više razina (mikro-, mezo- i makrorazina) [2, 5, 6].

Nerazorna ispitivanja predstavljaju skupinu metoda koje se koriste kako bi se odredila svojstva materijala bez uzrokovanja oštećenja. Neke od često korištenih NDT metoda su akustična emisija (AE), skenirajući elektronski mikroskop (SEM) te termografija (IR) [2, 5, 6]. Prethodno spomenute metode omogućuju učinkovitu karakterizaciju i analizu oštećenja.

Za detekciju oštećenja u unutrašnjosti materijala kod opterećivanja koristi se računalna tomografija rendgenskih zraka. Ova tehnika daje informacije o unutarnjoj strukturi materijala. Time je omogućeno dobivanje niza dvodimenzionalnih projekcija poprečnih presjeka uzoraka čijom se rekonstrukcijom dobivaju trodimenzionalne slike. Svaki voksel početnog i deformiranog volumena sadrži informaciju o sivoj skali prema koeficijentu rendgenske apsorpcije [16]. U ovom radu je za detekciju oštećenja korištena XCT tehnika u kombinaciji sa korelacijskim algoritmima [17]. Korelacijski algoritmi korišteni u ovom radu će biti opisani u sljedećem poglavlju.

### 3. Korelacija digitalnih volumena

Ubrzani razvoj tehnologije zabilježavanja i obrade digitalnih slika rezultirao je razvojem nove tehnike mjerenja cijelog polja pomaka, korelacije digitalne slike. DIC je beskontaktna optička metoda koja analizom i korelacijom niza digitalnih slika omogućuje određivanje polja pomaka te izračun polja deformacija u području interesa. Osim toga globalna DIC metoda omogućuje određivanje mapa korelacijskih reziduala, koji pružaju uvid u nastanak i rast oštećenja. Ekstenzija ove tehnike na treću dimenziju se naziva metoda korelacije digitalnih volumena [8]. DVC metoda ima prednost u odnosu na DIC metodu zbog mogućnosti mjerenja pomaka u trodimenzionalnom prostoru [18]. Ova metoda se temelji na očuvanju intenziteta sive skale između referentnog volumena i deformiranog volumena. 3D slike referentnog i deformiranih volumena dobivaju se računalnom tomografijom, opisanom u prethodnom poglavlju. Kod DVC tehnike se očuvanje sive skale između početne (referentne) slike  $f$  i deformirane slike  $g$ , može zapisati kao:

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

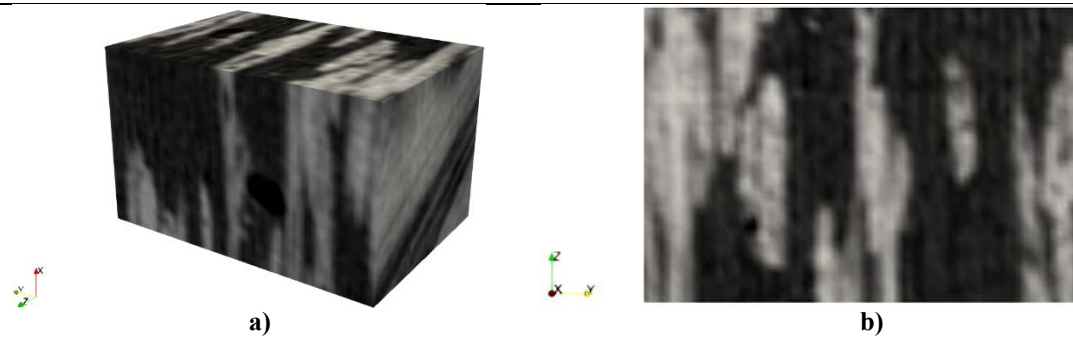
gdje je  $\mathbf{u}(\mathbf{x})$  traženo polje pomaka, a  $\mathbf{x}$  određuje lokaciju vokselu. Razlike raspodjele nijansi sive skale između referentne i korigirane deformirane slike nazivaju se reziduali. Traženo polje pomaka se pronalazi minimizacijom razlike nijansi sive skale prema:

$$\varphi_c(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})), \quad (3.2)$$

gdje je  $\varphi_c(\mathbf{x})$  polje korelacijskih reziduala s obzirom na kinematičke nepoznanice vezane uz parametrizaciju traženog polja pomaka [16].

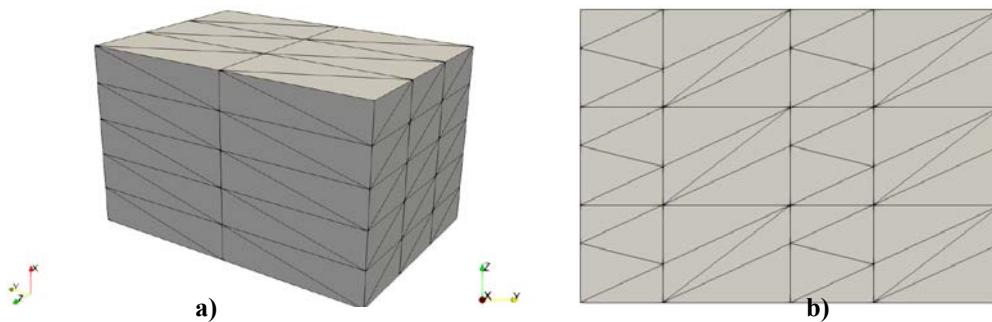
U ovom radu je za provedbu korelacijske analize korišten algoritam *Correli 3.0* [9]. Takav pristup mjeri cijela polja pomaka ispitnog uzorka koji je diskretiziran mrežom konačnih elemenata. Za primjer prikaza diskretizacije bit će uzet ispitni uzorak polimera ojačanog mat staklenim vlaknima. Također, veličina volumena prikazanog na Slici 2. a) iznosi  $84 \times 55 \times 61$  vokselu te je prikazan i jedan njegov presjek dimenzija  $84 \times 61$  vokselu (Slika 2. b)). Ovaj presjek je napravljen na lokaciji od 45 vokselu u smjeru  $x$  osi prikazane na Slici 2.





Slika 2. Ispitni uzorak prikazan u a) izometriji i b) presjeku.

Volumen prikazan na Slika 2. a) diskretiziran je mrežom konačnih elemenata (vidi Sliku 3.). Mreža konačnih elemenata služi kako bi se mogla na pouzdan način opisati kinematika uzorka tijekom njegovog opterećenja i deformiranja.



Slika 3. Mreža konačnih elemenata a) u izometriji i b) u presjeku koja se koristi kod standardnog pristupa DVC metode.

Kod globalnog DVC pristupa se provodi diskretizacija područja interesa (eng. *Region Of Interest* - ROI) na podskupove voksela uz međusobnu zavisnost te kontinuiranost polja pomaka. Razlika intenziteta raspodjele sive skale na referentnoj i deformiranoj slici je jednaka nuli u idealnom slučaju, no u realnim problemima to nikada nije slučaj. Kako bi se greška maksimalno smanjila globalni reziduali se minimiziraju prema [20]:

$$\Phi_C = \sum_{\text{ROI}} \varphi_C^2(\mathbf{x}), \quad (3.3)$$

pri čemu se polje pomaka može prikazati kao:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_n u_n \Psi_n(\mathbf{x}), \quad (3.4)$$

gdje su  $\Psi_n$  funkcije oblike vezane uz diskretizaciju polja pomaka konačnim elementima, a  $u_n$  odgovarajući čvorni pomaci. Korelacijska procedura minimizira  $\Phi_C^2$ , uzimajući u obzir sve

nepoznate čvorne pomake  $u_n$ , zapisane u vektoru  $\{\mathbf{u}\}$ . Kako bi se dobile inkrementalna promjena pomaka  $\{\delta\mathbf{u}\}$  potrebno je riješiti sustav linearnih jednadžbi:

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

gdje  $[\mathbf{M}]$  predstavlja DVC matricu koja je ovisna o funkcijama oblika  $\Psi_n$  i gradijentu slike  $\nabla f(\mathbf{x})$  te se računa prema:

$$M_{nm} = \sum_{\text{ROI}} (\nabla f(\mathbf{x}) \cdot \Psi_m(\mathbf{x})) (\nabla f(\mathbf{x}) \cdot \Psi_n(\mathbf{x})). \quad (3.6)$$

U jednadžbi (3.5) je  $\{\mathbf{b}^i\}$  rezidualni vektor, koji u iteraciji  $i$  sadrži trenutne rezidualne sive skale, odnosno razliku sivih razina između početnog volumena  $f$  i korigiranog deformiranog volumena  $\tilde{g}(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}^i(\mathbf{x}))$ , pri čemu je  $\mathbf{u}^i$  trenutna vrijednost polja pomaka [2]. Jednadžba rezidualnog vektora se može zapisati kao:

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

Nadogradnja opisane metode se vrši uvođenjem mehaničke regularizacije koja će biti objašnjena u nastavku.

### 3.1. Mehanička regularizacija

Prethodno opisana DVC metoda je loše postavljen problem te je u analizu potrebno uvesti mehaničku regularizaciju. Regularizacija se temelji na zadavanju mehaničkih zahtjeva u proceduru minimizacije uvođenjem dopunskih funkcija cilja koje se temelje na metodi ravnotežne razlike. Dopunske funkcije cilja omogućuju propuštanje samo mehanički uzrokovanih pomaka, a šum se filtrira (tj. briše) [21]. Za primjenu mehaničke regularizacije nije potrebna izrada nove mreže konačnih elemenata pa je tako primjerice za analizu uzorka prikazanog na Slici 2. moguće koristi istu mrežu koja je prethodno bila prikazana na Slici 3. Mehanička regularizacija ograničava polje pomaka na rješenje elastičnog problema s poznatim unutrašnjim silama prema:

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{f}\}, \quad (3.8)$$

gdje je  $[\mathbf{K}]$  matrica krutosti, a  $\{\mathbf{f}\}$  vektor sila u čvorovima.

Funkcija cilja ravnotežne razlike za stupnjeve slobode slobodnih čvorova se određuje prema:

$$\Phi_m(\{\mathbf{u}\}) = \{\mathbf{u}\}^T [\mathbf{K}_m]^T [\mathbf{K}_m] \{\mathbf{u}\}, \quad (3.9)$$

gdje je  $[\mathbf{K}_m]$  parcijalna matrica krutosti za spomenute slobodne čvorove, a  $\Phi_m$  ravnotežna razlika unutarnjih čvorova. Budući da vanjske sile nisu poznate, pretpostavka prikazana jednadžbom (3.9) ne vrijedi za stupnjeve slobode svih ostalih čvorova (tzv. Dirichletovi čvorovi) [21]. Zbog toga je potrebno dodati penalizaciju za opterećene čvorove te se funkcija cilja u tom slučaju zapisuje kao:

$$\Phi_s(\{\mathbf{u}\}) = \{\mathbf{u}\}^T [\mathbf{K}_s]^T [\mathbf{L}] [\mathbf{K}_s] \{\mathbf{u}\}, \quad (3.10)$$

gdje je  $[\mathbf{K}_s]$  matrica krutosti za Dirichletove čvorove, a  $[\mathbf{L}]$  Laplace-Beltrami operator [2]. Linearnom kombinacijom DVC funkcije  $\Phi_c$ , ravnotežne razlike  $\Phi_m$  i kaznenog izraza  $\Phi_s$  se dobiva ukupna funkcija cilja:

$$\Phi_t(\{\mathbf{u}\}) = \frac{\omega_c}{\omega_t} \hat{\Phi}_c(\{\mathbf{u}\}) + \frac{\omega_m}{\omega_t} \hat{\Phi}_m(\{\mathbf{u}\}) + \frac{\omega_s}{\omega_t} \hat{\Phi}_s(\{\mathbf{u}\}), \quad (3.11)$$

gdje su:

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_c(\{\mathbf{u}\}) &= \Phi_c(\{\mathbf{u}\}) / (\{\mathbf{v}\}^T [\mathbf{M}] \{\mathbf{v}\}), \\ \hat{\Phi}_m(\{\mathbf{u}\}) &= \Phi_m(\{\mathbf{u}\}) / \Phi_m(\{\mathbf{v}\}), \\ \hat{\Phi}_s(\{\mathbf{u}\}) &= \Phi_s(\{\mathbf{u}\}) / \Phi_s(\{\mathbf{v}\}). \end{aligned} \quad (3.12)$$

U jednadžbi (3.12)  $\{\mathbf{v}\}$  su čvorni pomaci vezani uz pomoćno polje pomaka koji omogućuje normaliziranje funkcija cilja. Spomenuto polje pomaka se određuje kao:

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \mathbf{v}_0 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}), \quad (3.13)$$

pri čemu je  $\mathbf{k}$  vektor odgovarajućih posmičnih deformacija [23]. Težinski izrazi, prethodno prikazani u jednadžbi (3.11), su vezani uz odgovarajuće regularizacijske duljine  $\xi$  te se zapisuju kao:

$$\omega_c = 1, \quad \omega_m = (l_m |\mathbf{k}|)^4, \quad \omega_s = (l_s |\mathbf{k}|)^4, \quad (3.14)$$

tako da vrijedi:

$$\omega_m = \omega_c + \omega_m + \omega_s. \quad (3.15)$$

Veća vrijednost regularizacijskih duljina  $l_m$  i  $l_s$  stavljaju veću težinu na svojstveni funkcional, te se samim time pojačava konvergencija korelacijskog algoritma. Kod diskretizacije konačnim elementima regularizacija se aktivira za svaku vrijednost regularizacijske duljine veću od karakteristične duljine elementa [2].

Prethodno opisana mehanički regularizirana DVC metoda, nije prikladna za primjer ispitnog uzorka sa Slike 2. jer ne može na pravilan način opisati heterogenu mikrostrukturu

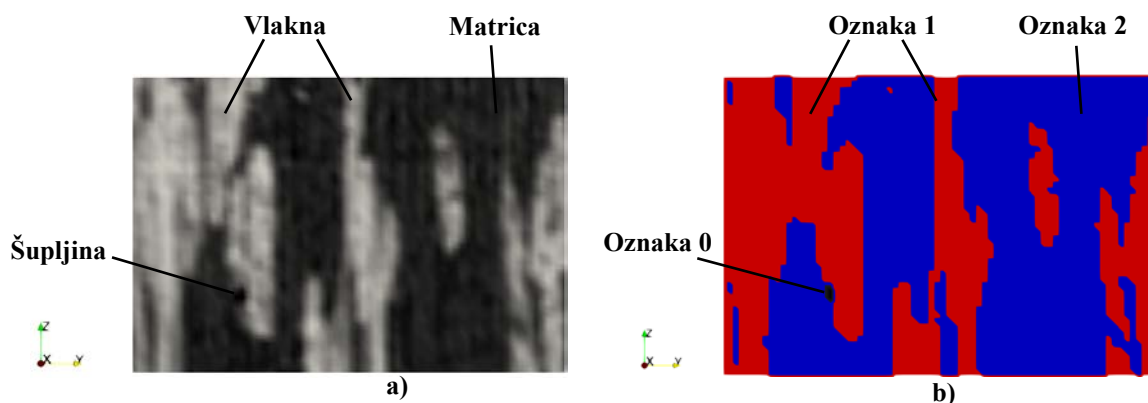
prikazanog kompozita. Iz tog razloga je potrebno uvesti heterogenu mehaničku regularizaciju koja će biti opisana u nastavku.

### 3.2. Korelacija digitalnih volumena primjenom heterogene mehaničke regularizacije

Budući da prethodno opisana metoda nije dovoljna za opis oštećenja unutar heterogenih materijala, u ovom poglavlju će biti opisana primjena heterogene regularizacije. Implementacija heterogene regularizacije je podijeljena na tri dijela koji uključuju segmentaciju, izradu mreže konačnih elemenata te zadavanje materijalnih svojstava.

#### 3.2.1. Segmentacija heterogene mikrostrukture

Za izradu mreže koja može na pravilan način opisati mikrostrukturu potrebno je provesti pravilnu segmentaciju odgovarajućeg volumena. Segmentacija se vrši na način da se izrađuje slika kod koje svaki konstituent heterogene mikrostrukture ima svoju odgovarajuću oznaku. Budući da je kontrast sivih skala između vlakana, matrica i šupljina dovoljno velik, moguća je automatska detekcija granica konstituenata. Za pronalazak granica korišten je programski paket *Fiji*, koji služi za obradu slike [24]. Nakon pronalaska granica izrađena je segmentirana slika kod koje vokseli koji predstavljaju vlakna kompozita imaju oznaku 1, vokseli koji predstavljaju matricu oznaku 2, a zračne šupljine oznaku 0. Primjer presjeka segmentiranog volumena prikazan je na Slici 4. b). Kod prikazane segmentacije su vokseli sa oznakom 1 prikazani crvenom bojom, vokseli sa oznakom 2 plavom, a vokseli sa oznakom 0 crnom. Usporedbom segmentirane slike sa presjekom mikrostrukture kompozita, prikazane na Slici 4. a), se može vidjeti vrlo dobro poklapanje matrice vlakana i šupljina sa odgovarajućom oznakom u segmentiranoj slici.

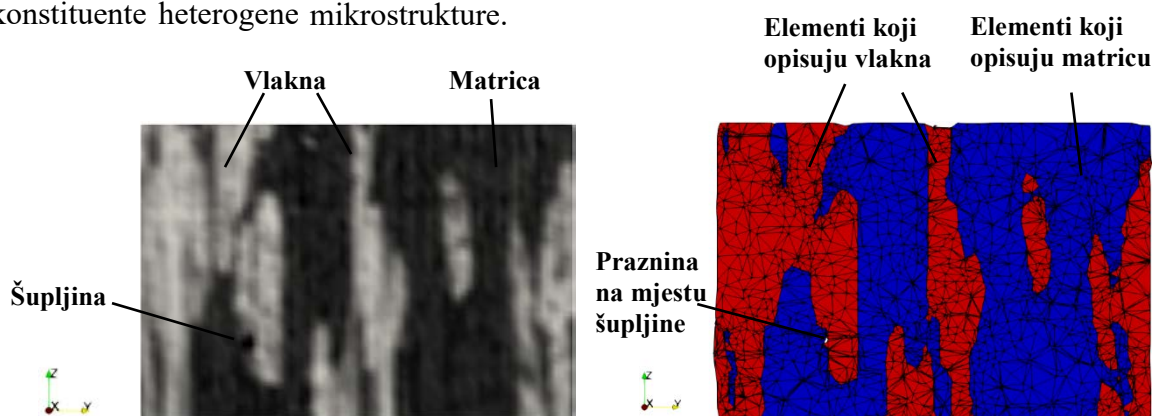


Slika 4. Presjek a) mikrostrukture i b) segmentirane slike vlaknima ojačanog polimera.

Segmentirana slika je bila izrađena kako bi bila omogućena izrada mreže konačnih elemenata koja opisuje heterogenu mikrostrukturu te će njezina izrada biti objašnjena u nastavku.

### 3.2.2. Izrada mreže konačnih elemenata

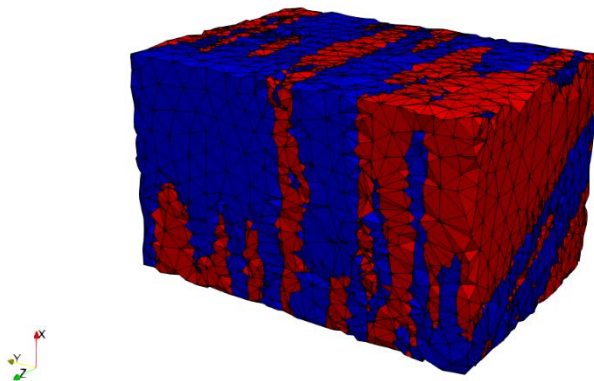
Mreža konačnih elemenata je bila izrađena primjenom programskog alata *iso2mesh* [10], koji se koristi za generiranje trodimenzionalnih tetraedarskih mreža konačnih elemenata iz trodimenzionalnih binarnih volumena i/ili volumena sivih skala. Spomenuti alat je implementiran u programski paket *MATLAB* [10]. Mreža konačnih elemenata je generirana na način da su elementima dodijeljene oznake prema konstituentima prethodno prikazane segmentirane slike. Prema tome, konačni elementi koji opisuju vlakna sadrže oznaku 1, elementi koji opisuju matricu sadrže oznaku 2. Programski alat *iso2mesh* automatski zanemaruje voksele koji imaju oznaku 0 pa prema tome zračne šupljine nisu bile diskretizirane konačnim elementima. Usporedba presjeka mikrostrukture kompozita i mreže konačnih elemenata prikazana je na Slici 5. Na Slici 5. b) je vidljivo kako su elementi sa oznakom 1, koji opisuju vlakna, prikazani crvenom bojom, elementi sa oznakom 2 plavom bojom, a mjesto na kojem se nalazi zračna šupljina nije diskretizirano konačnim elementima. Usporedbom se može zaključiti kako mreža konačnih elemenata vrlo dobro opisuje konstituente heterogene mikrostrukture.



Slika 5. Presjek a) mikrostrukture i b) pripadajuće mreže konačnih elemenata kompozita.

Mreža konačnih elemenata koja služi za diskretizaciju polimera ojačanog vlaknima, prethodno prikazanog na Slici 2., je na Slici 6. prikazana u izometriji. Budući da ova mreža dobro opisuje mikrostrukturu polimera ojačanog vlaknima, s njome je moguće analizirati različite mehanizme koji se javljaju u pojedinim konstituentima te na njihovim granicama. U

odnosu na standardni DVC pristup koji pretpostavlja homogena svojstva, dobivenom mrežom je moguće zadati različite materijalne parametre.



Slika 6. Mreža konačnih elemenata koja opisuje heterogenu mikrostrukturu.

### 3.2.3. Dodjeljivanje materijalnih svojstava mreži konačnih elemenata

Kako bi se na pravilan način opisala heterogena mikrostruktura potrebno je zadati različita materijalna svojstva koja odgovaraju pojedinoj fazi. Materijalna svojstva se kod DVC analize sa heterogenom regularizacijom zadaju kao omjer modula elastičnosti vlakna ( $E_f$ ) i matrice ( $E_m$ ). Spomenuti omjer se u nastavku naziva kontrast, a može se prikazati kao:

$$C = \frac{E_f}{E_m} = \left( \frac{l_r^f}{l_r^m} \right)^2, \quad (3.16)$$

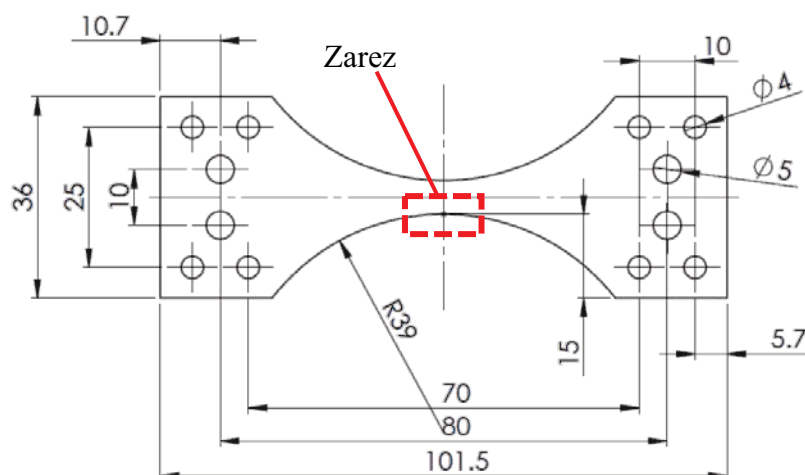
gdje  $l_r^f$  predstavlja duljinu regularizacije vlakna, a  $l_r^m$  duljinu regularizacije matrice. Ovaj način zadavanja je moguć zbog prethodno izrađene mreže konačnih elemenata koja opisuje heterogenu strukturu kompozita (Slika 6.). Postoje tri različite mogućnosti raspodjele materijalnih svojstava, odnosno slučaj kada je  $C$  veći od 1, manji od 1 ili jednak 1. Vrijednosti kontrasta  $C$  veće od 1 upućuju na to da vlakna imaju veću krutost od matrice pa će u tom slučaju elementima koji sadrže oznaku 1, odnosno elementima koji opisuju vlakna (elementi označeni crvenom bojom na Slici 6.) biti zadana krutost koja je nekoliko puta veća od krutosti matrice kolika je vrijednost kontrasta  $C$ . S druge strane, kada je vrijednosti  $C$  manja od 1, krutost matrice je veća od krutosti vlakna. Konačno, ako je  $C=1$  vrijednosti čvrstoća vlakna i matrice će biti jednaka, odnosno materijal se smatra homogen, što odgovara standardnom DVC pristupu.

#### 4. *In-situ* eksperimentalni protokol određivanja oštećenja u vlaknima ojačanim polimerima

U ovom poglavlju je opisan eksperiment koji se provodio na polimeru ojačanom mat staklenim vlaknima. Prvo je opisan korišteni ispitni uzorak te materijal iz kojeg je uzorak izrađen. Nadalje će biti opisan eksperimentalni postav te će biti opisana i provedba *in-situ* mehaničkog ispitivanja unutar CT skenera.

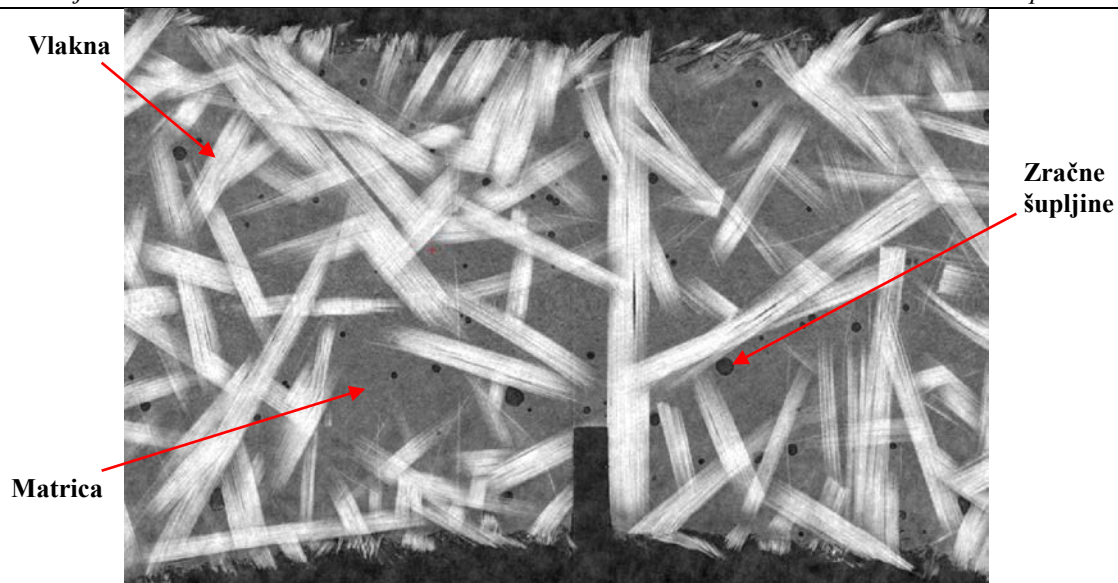
##### 4.1. Materijal

Eksperimentalno ispitivanje se provodilo na tzv. *dogbone* ispitnom uzorku (Slika 7.). *Dogbone* ispitni uzorak je bio izrezan iz kompozitne ploče debljine 5,6 mm, a kako bi se osigurao nastanak loma u središnji dijelu uzorka, taj dio je stanjen sa radijusom od 39 mm te je dodatno bio izrezan zarez na poziciji prikazanoj Slici 7.



Slika 7. Dogbone ispitni uzorak.

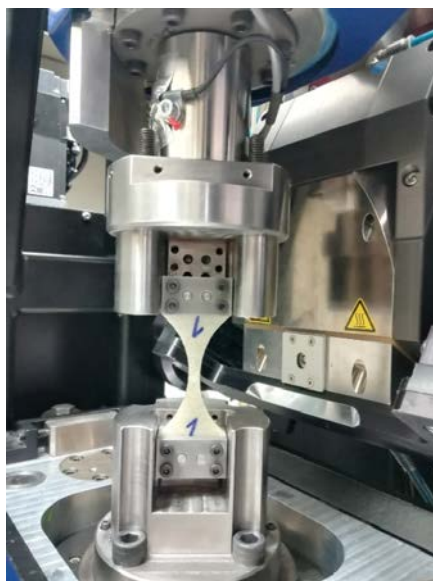
Ispitni uzorak je izrađen od epoksidne smole ojačane mat staklenim vlaknima. Materijal je bio izrađen od 12 slojeva staklenih vlakana unutar mješavine epoksidne smole. Koristila su se R staklena vlakna. Mješavina se držala pod pritiskom u periodu od 24 sata na sobnoj temperaturi. Nakon toga je mješavina, u periodu od 3 sata, stavljena na temperaturu od 100°C. Na Slici 8. je prikazan presjek kompozitnog materijala te je jasno vidljiva granica između vlakna, matrice i zračnih šupljina. Promjer jednog staklenog vlakana unutar pređe je iznosio 9  $\mu\text{m}$ . Na Slici 8. su jasno vidljive zračne šupljine koje su nastale zato što prilikom proizvodnje kompozita nije bio primijenjen vakuum [2].



Slika 8. Presjek mikrostrukture kompozita.

#### 4.2. Eksperimentalni postav i provedba ispitivanja

Ispitni uzorak je bio podvrgnut *in-situ* cikličkom testu, koji se provodio na TTC Deben uređaju za testiranje, prikazanom na Slici 9. Prednost *in-situ* mehaničkih ispitivanja je zabilježavanje skenova za vrijeme provedbe eksperimenta. Spomenuti uređaj za testiranje ima mogućnost provedbe eksperimentalnih ispitivanja pri vlačnom, tlačnom i torzijskom opterećenju [2].



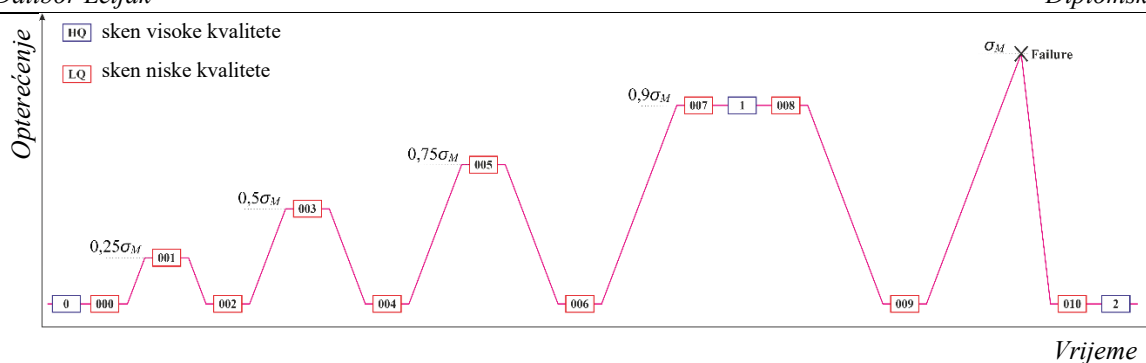
Slika 9. TTC Deben uređaj za testiranje [2].



Testiranje ispitnog uzorka prikazanog na Slici 7. se provelo u 4 ciklusa opterećenja, tj. pri iznosima opterećenja koji odgovaraju vrijednostima od 25%, 50%, 75% i 90% vlačne čvrstoće materijala. Vlačna čvrstoća za spomenuti materijal iznosi 127 MPa. Ispitivanje je provedeno u kontroli pomaka sa propisanom brzinom od 4  $\mu\text{m/s}$ . Za dobivanje skenova kod eksperimentalnog ispitivanja, koristio se X50+ North Star Imaging tomograf. Parametri spomenutog skenera prikazani u Tablici 1. Tijekom ispitivanja je zabilježeno 14 skenova. 6 skenova je dobiveno u neopterećenom stanju, 6 u opterećenom te 2 nakon loma uzorka. Povijest opterećivanja ispitnog uzorka tijekom eksperimenta je prikazana na Slika 10. Isto tako na Slika 10. je prikazana povijest zabilježavanja skenova. Skenovi 0, 1 i 2 su dobiveni pri s parametrima koji osiguravaju visoku kvalitetu (eng. *High Quality* - HQ) slike (tj. male razine akvizicijom uzrokovanih šumova). Kako bi se skratilo vrijeme provedbe eksperimenta, svi ostali skenovi (000-010) su dobiveni s višom razinom šuma koji odgovaraju skenovima niske kvalitete (eng. *Low Quality* - LQ). Za dobivanje skena visoke kvalitete je potrebno približno 2 sata, a skenova niske kvalitete približno 4 minute.

**Tablica 1. Parametri skeniranja**

|   |                         |
|---|-------------------------|
| Naziv uređaja                             | North Star Imaging X50+ |
| Rendgenski izvor                          | XRyWorX XWT-240-CT      |
| Anoda                                     | W (mod refleksije)      |
| Filter                                    | -                       |
| Napon                                     | 150 kV                  |
| Jakost struje                             | 77 $\mu\text{m}$        |
| Veličina žarišne točke                    | 5 $\mu\text{m}$         |
| Udaljenost detektora od izvora X zračenja | 910 mm                  |
| Udaljenost objekta od izvora X zračenja   | 53 mm                   |
| Detektor                                  | Dexela 2923             |
| Definicija                                | 1507 $\times$ 1849 vx   |

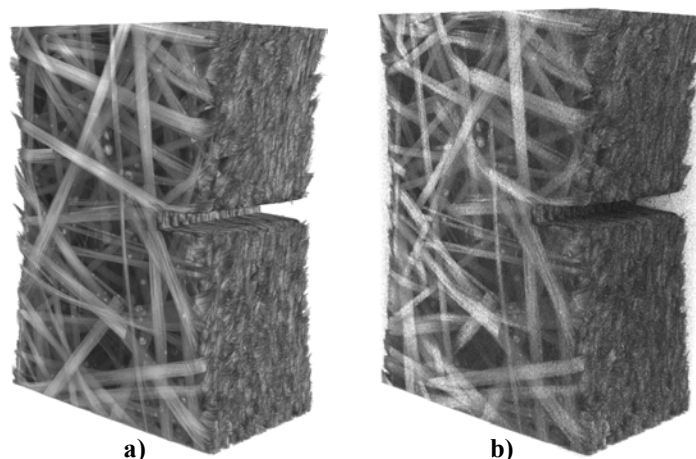


Slika 10. Povijest opterećivanja uzorka i dobivanja skenova kod cikličkog ispitivanja.

Akvizijski parametri za skenove visoke i niske kvalitete su prikazani u Tablici 2. Volumeni su rekonstruirani algoritmom filtrirane povratne projekcije te su enkodirani na 8 bitne nijanse sive skale. Veličina jednog voxela je iznosila  $14,6 \mu\text{m}$ . Slika 11. prikazuje usporedbu dobivenih skenova za dvije različite kvalitete uzorka prije početnog opterećivanja (skenovi sa oznakama 0 i 000 na Slici 10.).

Tablica 2. Akvizicijski parametri.

| Parametri skena                  | Visoka kvaliteta (HQ)                    | Niska kvaliteta (LQ)                     |
|----------------------------------|--|--|
| Broj projekcija                  | 800                                      | 768                                      |
| Kutna amplituda                  | $360^\circ$                              | Kontinuirana (1 po projekciji)           |
| Brzina zabilježavanja projekcija | 3 fps                                    | 3 fps                                    |
| Trajanje skeniranja              | 1h 46min 26s                             | 4min 26s                                 |
| Rekonstrukcijski algoritam       | Filtrirana povratna projekcija           | Filtrirana povratna projekcija           |
| Amplitude sivih skala            | 8 bitova                                 | 8 bitova                                 |
| Veličina volumena                | $465 \times 680 \times 1001 \text{ vx}$  | $465 \times 680 \times 1001 \text{ vx}$  |
| Vidno polje                      | $7,3 \times 10 \times 20,5 \text{ mm}^3$ | $7,3 \times 10 \times 20,5 \text{ mm}^3$ |
| Fizikalna veličina               | $15,6 \mu\text{m}/\text{vx}$             | $15,6 \mu\text{m}/\text{vx}$             |
| Uzorak                           | Prirodni                                 | Prirodni                                 |



**Slika 11. Sken dobiven pri a) visokoj kvaliteti (sken 0) i b) niskoj kvaliteti (sken 000).**

Sken visoke kvalitete rezultira manjim šumom i omogućuje detaljniju analizu mikrostrukture materijala, koja je moguća zbog kontrasta između različitih konstituenata (vlakna, matrica i šupljine). Isto tako, sken visoke kvalitete omogućuje generiranje mreže konačnih elemenata koja, u odnosu na sken niske kvalitete, s većom točnošću opisuje heterogenu mikrostrukturu kompozita [2].

## 5. Detekcija oštećenja u vlaknima ojačanim polimerima primjenom korelacije digitalnih volumena

U ovom poglavlju je provedena globalna detekcija mehanizama oštećenja unutar cijelog ispitnog uzorka. Na početku će biti opisana mjerna nesigurnost te prikazana polja deformacija i korelacijskih reziduala. Nakon toga će biti prikazane karakteristične zone u kojima je došlo do oštećenja te će biti analizirani mehanizmi koji su ih uzrokovali.

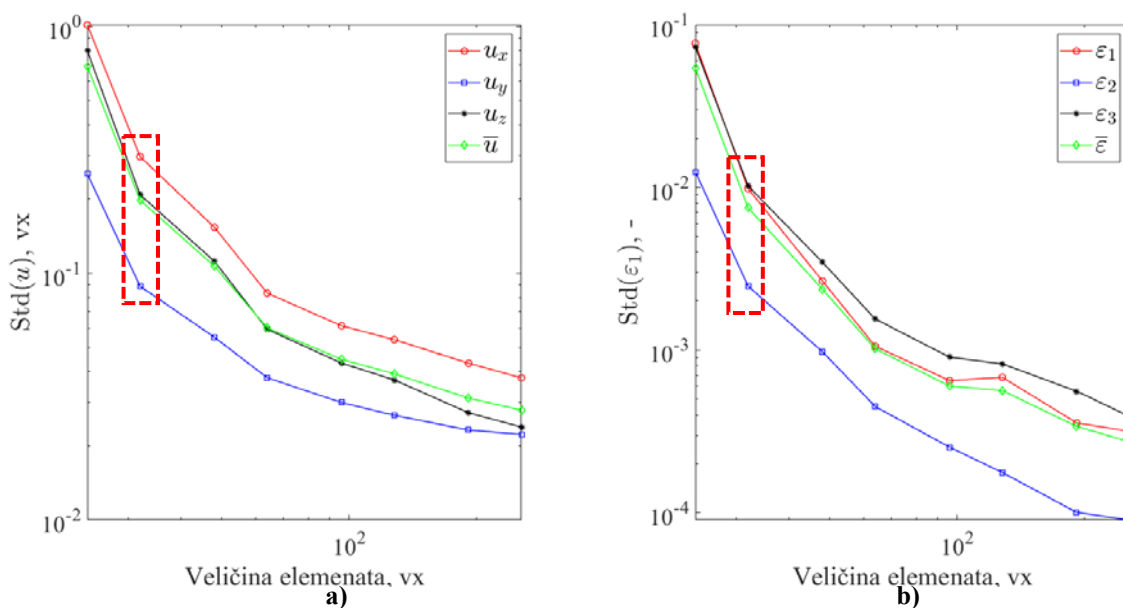
### 5.1. Promatranje mehaničkog oštećenja u polimeru ojačanom vlaknima

Analiza rekonstruiranih volumena provedena je u *Correli 3.0* algoritmu [9], u kojemu je implementirana metoda korelacijskih volumena bazirana na konačnim elementima [9]. Na taj način se omogućuje analiza trodimenzionalnih polja pomaka i deformacija unutar materijala, a ne samo na vanjskim površinama uzorka [25]. Područje interesa odgovara veličini  $465 \times 680 \times 1001$  voksela. U nastavku će prvo biti opisan postupak određivanja mjerne nesigurnosti, a nakon toga će biti prikazana polja deformacija izračunata iz izmjerenih polja pomaka te korelacijski reziduali.

#### 5.1.1. Mjerna nesigurnost

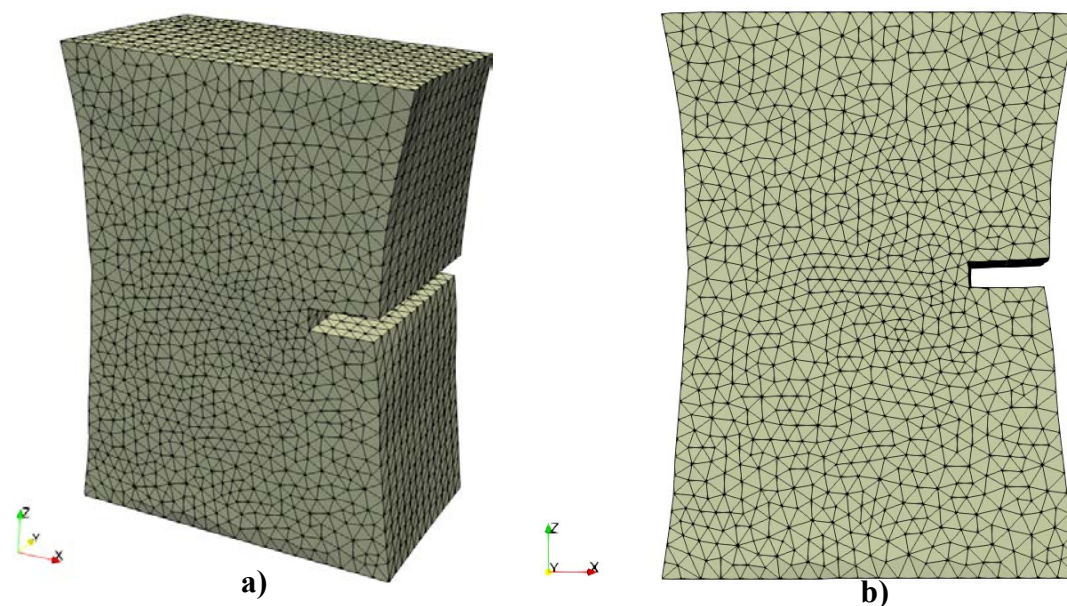
Mjerna nesigurnost je određena provedbom DVC analize između skena 0 i skena 000. Sken 0, visoke kvalitete, smatrao se referentnim. Mjerna nesigurnost je određena kao standardna devijacija (eng. *Standard deviation* - STD) izmjerenog polja pomaka i izračunatih polja deformacija. Područje interesa diskretizirano je tetraedarskim konačnim elementima prvog reda (T4), a analiza mjerne nesigurnosti je provedena pri veličinama konačnih elemenata od 256, 192, 128, 96, 64, 48, 32 i 24 voksela. Slika 12. a) prikazuje kako promjena veličine elemenata utječe na standardu devijaciju pomaka u  $x$ ,  $y$  i  $z$  smjeru te na srednju vrijednost. Vidljivo je kako povećanje veličine elemenata dovodi do smanjenja standardne devijacije pomaka u sva tri smjera. Slika 12. b) prikazuje kako smanjenje veličine elemenata utječe na standardnu devijaciju deformacija u smjeru tri glavne ravnine te na njihovu srednju vrijednost. Osim toga, zabilježeno je kako povećanjem veličine elemenata standardna devijacija deformacija pada za sve slučajeve. Kako bi se provela analiza na pravilan način, potrebno je odabrati veličinu elemenata kojom se može dovoljno dobro opisati kinematika, a da je pri tome srednja vrijednost mjerna nesigurnost pomaka manja od  $10^{-1}$  vx [26]. Iz tog razloga je za daljnju

analizu odabrana veličina elemenata 32 vx, a vrijednosti standardne devijacije za tu veličinu su prikazane na Slici 12. a) i b) crvenim isprekidanim pravokutnikom.



**Slika 12. a) Standardna devijacija pomaka u ovisnosti o veličini elemenata i b) standardna devijacija deformacija u ovisnosti o veličini elemenata. Crveni isprekidani pravokutnik označuje odabranu veličinu elemenata.**

Mreža konačnih elemenata sa odabranom veličinom od 32 vx je prikazana na Slici 13. Dobivena vrijednost mjerne nesigurnosti su prikazane u Tablici 3. Vrijednosti niže od prikazanih nisu uzrokovane mehaničkim signalom i smatraju se šumom.

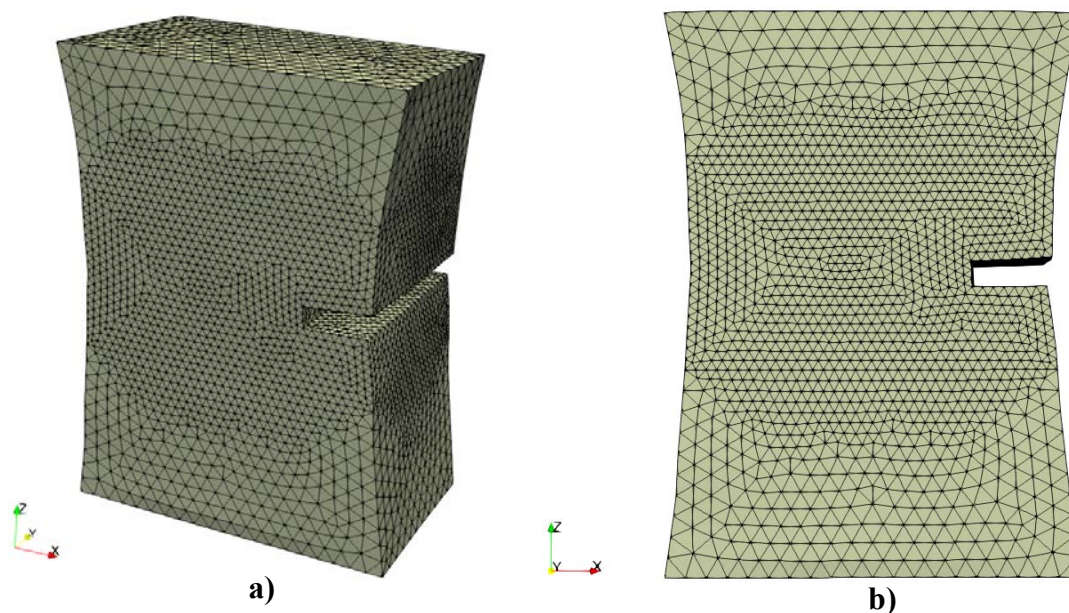


**Slika 13. Mreža konačnih elemenata pri veličini elemenata od 32 vx u a) izometriji i b) x-y ravnini.**

Tablica 3. Mjerna nesigurnost.

|  |          |           |            |
|--|----------|-----------|------------|
| Mjerna nesigurnost pomaka ( $u_x, u_y, u_z$ )      | 0,297 vx | 0,0886 vx | 0,02081 vx |
| Mjerna nesigurnost deofrmacija ( $\varepsilon_1$ ) | 0,0102   |           |            |

Nakon toga je provedeno progušćenje mreže konačnih elemenata oko zarez a uzorka. Progušćena mreža je prikazana na Slici 14. Uz to je još na spomenutu mrežu primijenjena regularizacija duljine 96 vx te je provedena analiza mjerne nesigurnosti, čije su vrijednosti prikazane u Tablici 4. Kao referenca mjerne nesigurnosti u praksi se uzima standardna devijacija pomaka od 0,01 vx [26]. Vidljivo je kako su vrijednosti u Tablici 4. malo više od referentne vrijednosti. Razlog tomu je provedba analize mjerne nesigurnosti na skenovima različite kvalitete, ali i činjenica da je sken 000 u pred-opterećenom stanju.



Slika 14. Mreža konačnih elemenata pri veličini elemenata od 32 vx, sa progušćenjem oko zarez a sa veličinom elemnata od 16 vx u a) izometriji i b) x-y ravnini.

Tablica 4. Mjerna nesigurnost progušćene mreže.

|  |                      |           |           |
|--|----------------------|-----------|-----------|
| Mjerna nesigurnost pomaka ( $u_x, u_y, u_z$ )      | 0,0305 vx            | 0,0292 vx | 0,0232 vx |
| Mjerna nesigurnost deofrmacija ( $\varepsilon_1$ ) | $8,25 \cdot 10^{-4}$ |           |           |

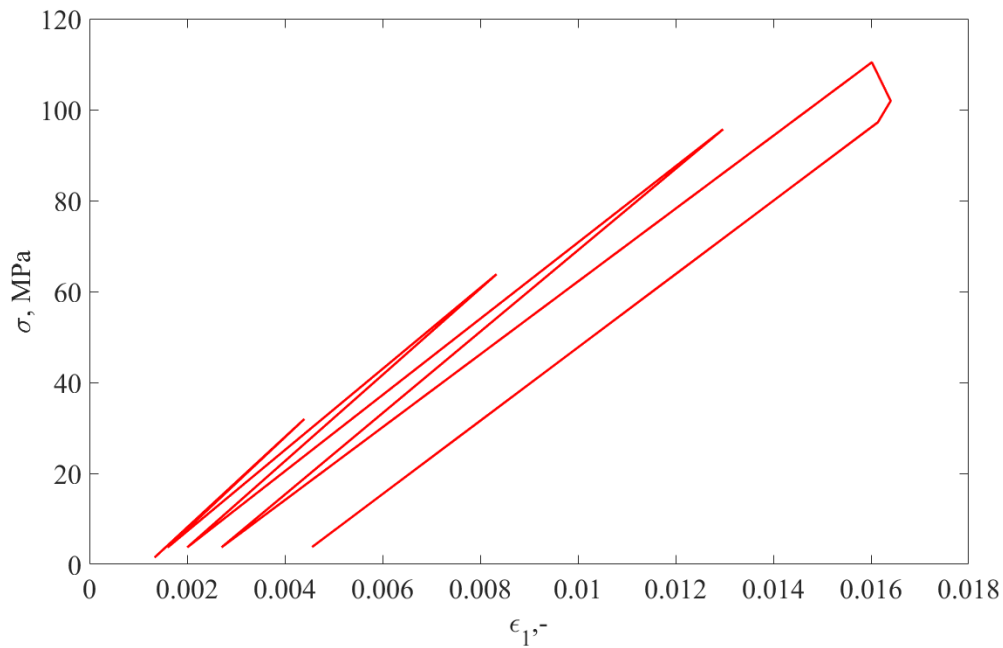
### 5.1.2. Deformacije i korelacijski reziduali

U ovom poglavlju su prikazane deformacije izračunate iz polja pomaka izmjerenih DVC analizom te korelacijski reziduali. DVC analiza je provedena između referentnog skena 0 i svih ostalih (tj. deformiranih) skenova (vidi Sliku 10.). Kako bi se odredio globalni odziv predloženog materijala prikazana je ovisnost naprezanja o deformacijama tijekom cijele povijesti opterećenja. Nakon toga su prikazana polja deformacija i mape korelacijskih reziduala za režim opterećenja koji odgovara 90% vlačne čvrstoće (tj. rezultati DVC analize provedene između skena 0 i skena 1). Skenovi spomenutog ciklusa opterećivanja su visoke kvalitete.

Tablica 5. prikazuje vrijednosti naprezanja i srednjih vrijednosti glavnih deformacija u zoni zarezā za svaki ciklus opterećenja, odnosno za svaki sken koji je zabilježen tijekom mehaničkog ispitivanja uzorka, čija je povijest opterećivanja prethodno prikazana Slikom 10. Prema vrijednostima prikazanim u Tablici 5. konstruirao se  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagram koji je prikazan na Slici 15.

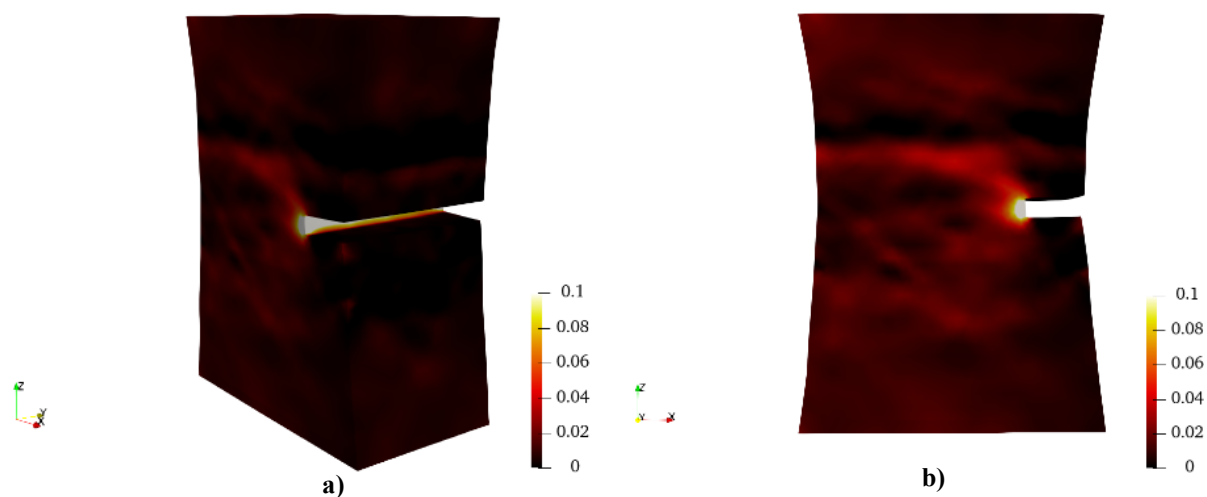
**Tablica 5. Naprezanja i deformacije izračunate za skenove zabilježene tijekom *in-situ* cikličkog vlačnog testa.**

| Broj skena | $\sigma$ , MPa | $\varepsilon_1$ , - |
|------------|----------------|---------------------|
| 000        | 1,4            | 0,0013              |
| 001        | 32             | 0,0042              |
| 002        | 3,6            | 0,0015              |
| 003        | 64             | 0,0081              |
| 004        | 3,7            | 0,0019              |
| 005        | 96             | 0,0127              |
| 006        | 3,7            | 0,0026              |
| 007        | 110            | 0,0156              |
| 1          | 100            | 0,016               |
| 008        | 97             | 0,0157              |
| 009        | 3,8            | 0,0047              |



Slika 15. Ovisnost deformacija – naprezanje za *in-situ* ciklički vlačni test.

Slika 16. prikazuje polje površinskih deformacija za sken 1, kod kojeg opterećenje odgovara vrijednosti 90% vlačne čvrstoće. Na Slici 16. a) su spomenute deformacije prikazane u izometriji, a na Slici 16. b) u bočnom pogledu, odnosno u  $x$ - $z$  ravini. Polja deformacija prikazuju povećanu koncentraciju deformacija u korijenu zarezata te oko zarezata. Osim toga, vidljive su značajne vrijednosti deformacija u ostatku uzorka.

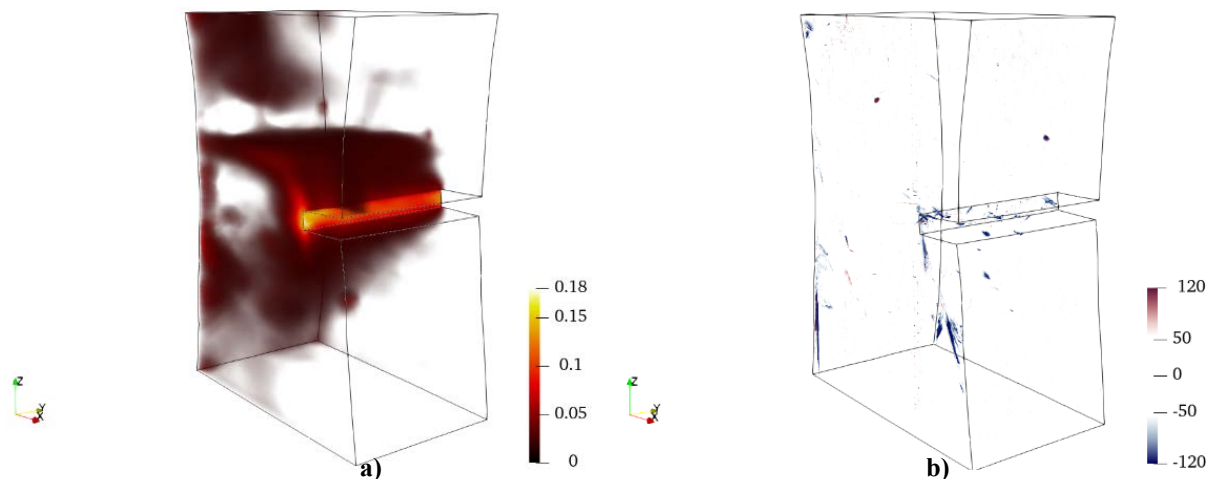


Slika 16. Polja deformacija za sken 1 u a) izometriji i b)  $x$ - $z$  ravnini.



Kako bi se ispitalo stanje materijala u njegovoj unutrašnjosti provedena je analiza polja deformacija na razini vokselu. Uz to je provedena analiza mapa korelacijskih reziduala unutar materijala te su navedene mape uspoređene sa poljima deformacija.

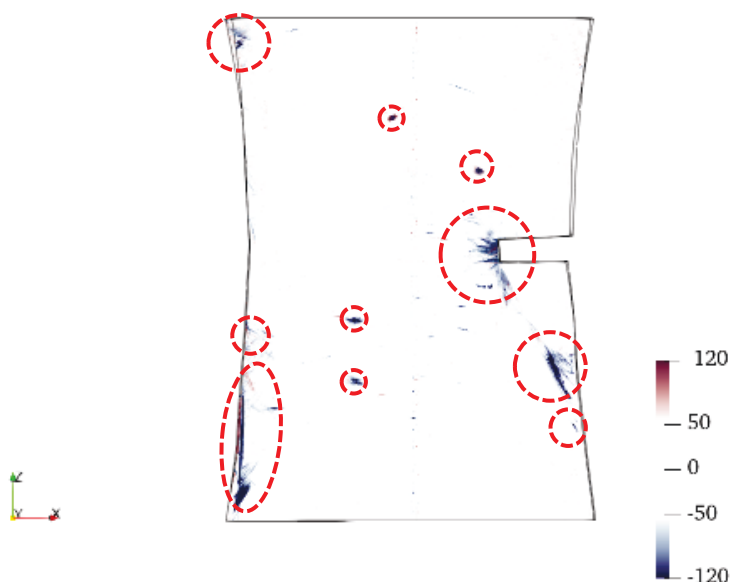
Slika 17. prikazuje polja deformacija na razini vokselu (Slika 17. a)) i korelacijskih reziduala (Slika 17. b)) za posljednji ciklus opterećivanja uzorka (sken 1). Na Slici 17. a) je vidljivo kako su najveće vrijednosti deformacija lokalizirane po cijeloj dužini zarezu ispitnog uzorka. Isto tako je vidljivo kako lokalizirane deformacije rastu od vanjske površine zarezu pa kroz cijelu njegovu unutrašnjost, kod najtanjeg dijela uzorka. Treba još primijetiti kako osim u najtanjem dijelu, koji je najkritičniji dio, dolazi do lokalizacija i na rubovima uzorka, za koje se pretpostavlja da nastaje prilikom izrade uzorka. Polje korelacijskih reziduala, prikazano na Slici 17. b), prikazuje najveći broj povišenih vrijednosti oko zarezu te po cijeloj njegovoj duljini. Povišene vrijednosti korelacijskih reziduala upućuju na pojavu oštećenja. Prema tome se može zaključiti kako je najveći broj oštećenja u zrezu, što je i očekivano s obzirom da se radi o najkritičnijem području. Osim toga potrebno je i primijetiti kako se pojavljuju zone povišenih reziduala na mnogim drugim lokacijama unutar uzorka. Vidljivo je kako su značajne lokalizirane zone nastale na rubovima uzorka.



**Slika 17. Polja a) deformacija na razini vokselu b) korelacijskih reziduala.**

Kako bi se provela detaljnija analiza pojava unutar testnog uzorka, polja korelacijskih reziduala koja su prethodno na Slici 17. b) bila prikazana u izometriji su sada na Slici 18. prikazani u bočnom pogledu ( $x$ - $z$  ravnini). Slika prikazuje polja korelacijskih reziduala za sken 1, odnosno za slučaj opterećenja sa 90% vlačne čvrstoće. Na Slici 18. su crvenom isprekidanim kružnicama i elipsama označeni povišeni reziduali te se može primijetiti kako su reziduali u

ostatku zone interesa zanemarivi. Iz toga se može zaključiti da je konvergencija DVC analize bila uspješna. Može se primijetiti kako su povišeni reziduali u i oko zarez, gdje je i očekivana koncentracija deformacija. Osim toga povišene lokalizacije nastaju i na rubovima uzorka što ponovno upućuje na to da izrada uzorka ima veliki utjecaj na pojavu oštećenja. Na kraju je još potrebno i primijetiti kako zbog heterogene mikrostrukture te geometrije matrice i vlakana oštećenja nastaju i na drugim lokacija unutar uzorka.



Slika 18. Pogled polja reziduala u  $x$ - $z$  za sken 1.

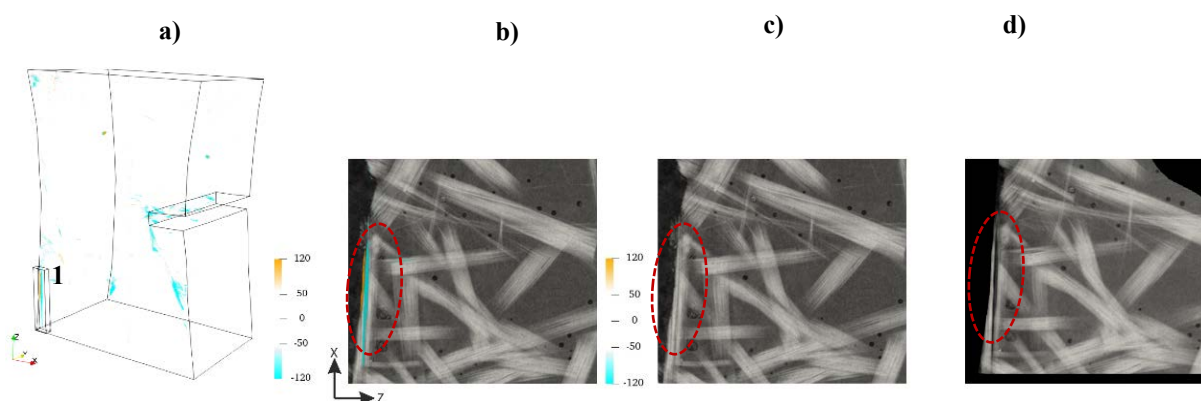
Iz prethodno prikazane analize je bilo vidljivo kako su oštećenja unutar polimera ojačanog mat staklenim vlaknima vrlo kompleksna te je zahtjevno predvidjeti lokaciju i način rasta istih. Stoga će u nastavku biti provedena analiza pojedinih mehanizama oštećenja unutar ispitnog uzorka.

## 5.2. Mehanizmi oštećenja

Analiza mehanizama oštećenja tijekom eksperimentalnog ispitivanja se provela preklapanjem korelacijskih reziduala unutar 3 karakteristična podskupa, te odgovarajućeg dijela strukture materijala na mezorazini. Potrebno je napomenuti kako analiza nije provedena za sva oštećenja koja su se pojavila. Za analizu su se koristili korelacijski reziduali dobiveni za sken 1. Uz to, još je prikazan referenti (nedeformirani) volumen te deformirani korigirani volumen kako bi se mogla provesti usporedba promjena mikrostrukture kompozitnog materijala. Spomenuti korigirani volumen je dobiven korekcijom deformiranog volumena za izmjereno polje pomaka. Pri svakom pokretanju DVC analize, deformirani volumen je bio

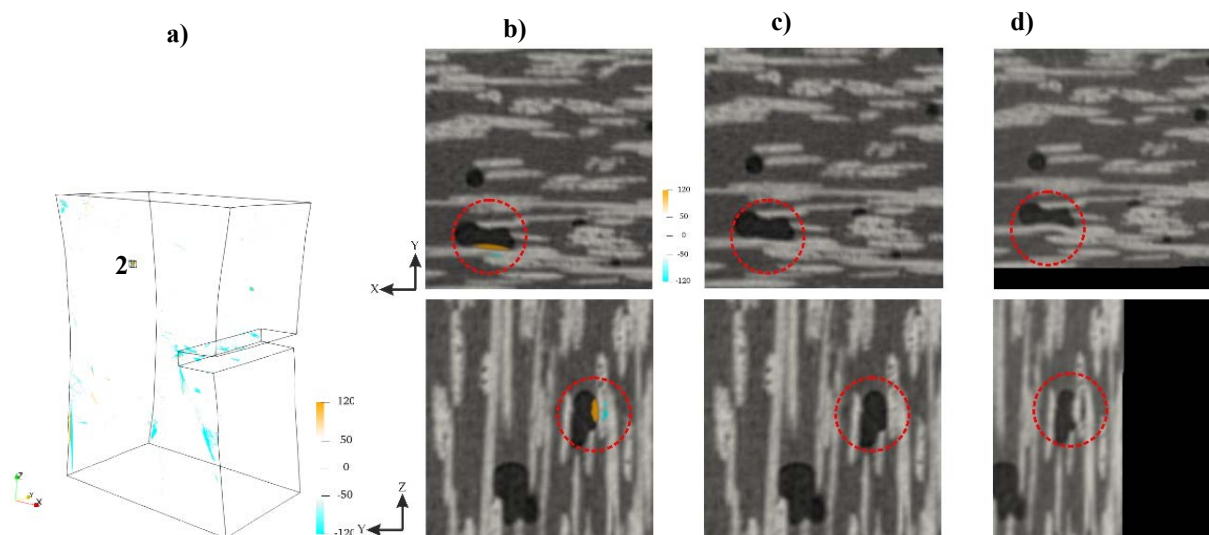
korigiran trenutnom procjenom polja pomaka. To je rezultiralo time da konačna razlika između referentnog i korigiranog volumena odgovara rezidualima sive skale.

Prvo se promatrao podskup 1 te je njegova lokacija označena na mapi korelacijskih reziduala prikazanih Slikom 19. a). Nadalje, na Slici 19. b) su prikazani povišeni korelacijski reziduali za podskup 1 preklopljeni sa odgovarajućom mezostrukturom skena 0. Slika 19. c) prikazuje referentni volumen dobiven skenom 0, a Slika 19. d) korigirani deformirani volumen. Visoki reziduali, tj. oštećenje su se pojavili na pređi koja se nalazi pri samom rubu uzorka (crvena isprekidana elipsa na Slici 19.) te se pretpostavlja da je do njega došlo prilikom rezanja ispitnog uzorka iz kompozitne ploče te njegovog stanjivanja na radijus od 39 mm, prethodno spomenutom u poglavlju 4.1.



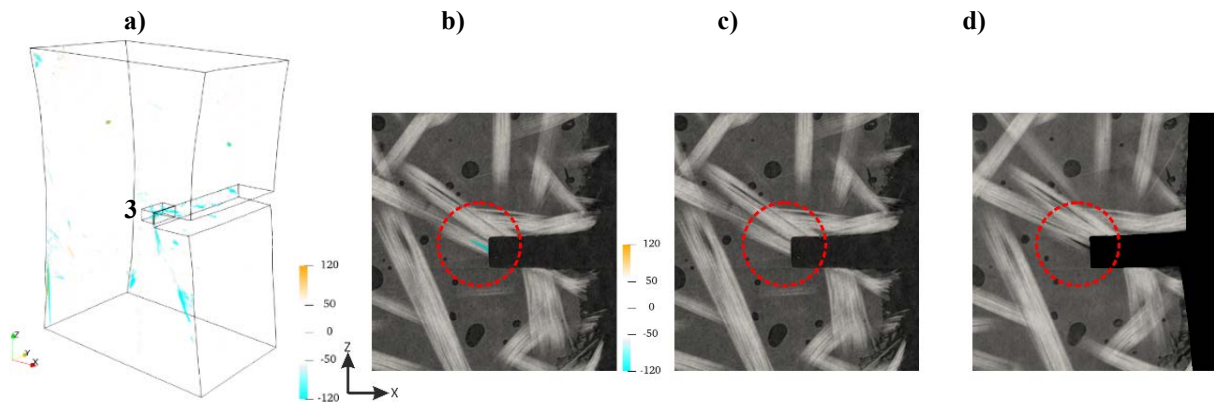
**Slika 19. a) Pozicija podskupa 1 unutar područja interesa na mapi korelacijskih reziduala, b) korelacijski reziduali podskupa 1 preklopljeni sa odgovarajućim područjem skena 0, c) referentni (sken 0), d) deformirani volumen (sken 1) korigiran izmjerenim poljima pomaka. Crvene isprekidane kružnice označuju područja povišenih reziduala.**

Lokacija podskupa 2 je vidljiva na mapi korelacijskih reziduala prikazanih na Slici 20. a). Na Slici 20. b) su prikazani reziduali podskupa 2 preklopljeni sa odgovarajućom mezostrukturom skena 0. Slika 20. c) prikazuje referentni volumen (sken 0), dok je Slikom 20. d) prikazan korigirani deformirani volumen. Potrebno je još napomenuti kako su korelacijski reziduali, referentni volumen i korigirani volumen prikazani u  $x$ - $y$  i  $y$ - $z$  ravnini. Visoki reziduali se pojavljuju kod vlakna koje prolazi ispod zračne šupljine (crvena isprekidana kružnica na Slici 20.). Usporedbom referentnog i korigiranog volumena (Slika 20. c) i d)) zaključeno je kako prisustvo je šupljine unutar kompozita pridonijelo razvoju oštećenja kod nametnutog opterećenja te dovelo do degradacije veze matrice i vlakna.



**Slika 20. a) Pozicija podskupa 2 unutar područja interesa na mapi korelacijskih reziduala, b) korelacijski reziduali podskupa 2 preklopljeni sa odgovarajućim područjem skena 0 u dvije ravnine, c) referentni volumen (sken 0) u dvije ravnine i d) deformirani volumen (sken 1) korigiran izmjerenim poljima pomaka u dvije ravnine. Crvene isprekidane kružnice označuju područja povišenih reziduala.**

Na vrlo sličan način je provedena analiza oštećenja u podskupu broj 3, prikazanom Slikom 21. a). Povišene vrijednosti korelacijskih reziduala se za ovaj slučaj pojavljuju unutar pređe koja se nalazi u dodiru sa vrhom zareza uzorka, kao što je prikazano na Slici 21. b). Usporedbom Slike 21. c) i Slike 21. d), odnosno referentnog i korigiranog volumena, vidljivo je odvajanje pojedinih vlakna unutar pređe. Oštećenje se u ovom slučaju pojavilo kod pređe koja se nalazi u najtanjem dijelu uzorka te kod zareza, gdje se zbog geometrije uzorka i očekuje inicijacija oštećenja. Budući da je dio uzorka oko zareza najkritičniji potrebno je provesti daljnju analizu oštećenja na toj lokaciji.



**Slika 21. a) Pozicija podskupa 3 unutar područja interesa na mapi korelacijskih reziduala, b) korelacijski reziduali podskupa 3 preklopljeni sa odgovarajućim područjem skena 0, c) referentni volumen (sken 0) i d) deformirani volumen (sken 1) korigiran izmjerenim poljima pomaka. Crvene isprekidane kružnice označuju područja povišenih reziduala.**

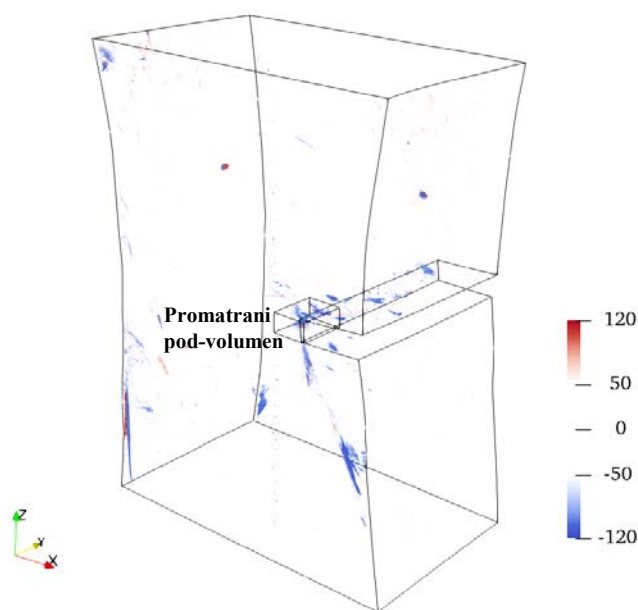
Prethodno prikazana analiza je rađena kako bi se detektirala globalna oštećenja na ispitnom uzorku. Kako bi se dovela u vezu heterogena mikrostruktura i odgovarajuće opterećenje, uzet je jedan manji pod-volumen u zarezu jednoosnog ispitnog uzorka. Oštećenja promatranog pod-volumena će biti analizirana u nastavku metodom korelacije digitalnih volumena koristeći homogenu i heterogenu regularizaciju. Isto tako položaj promatranog pod-volumena i njegova mezostruktura će također biti opisani u nastavku.

## 6. Određivanje parametara heterogene regularizacije

U početku ovog poglavlja biti će definiran prostorni položaj promatranog pod-volumena te promatranog presjeka u tom pod-volumenu. Na spomenutom presjeku će biti prikazan utjecaj regularizacijske duljine na DVC analizu uz homogenu regularizaciju. Nadalje, biti će prikazan utjecaj materijalnih parametara i regularizacijske duljine na DVC pristup sa heterogenom regularizacijom. Iz dobivenih rezultata primjenom homogene i heterogene regularizacije DVC metode, promatrati će se identificirano oštećenje i lokalizacija deformacija u odabranom pod-volumenu.

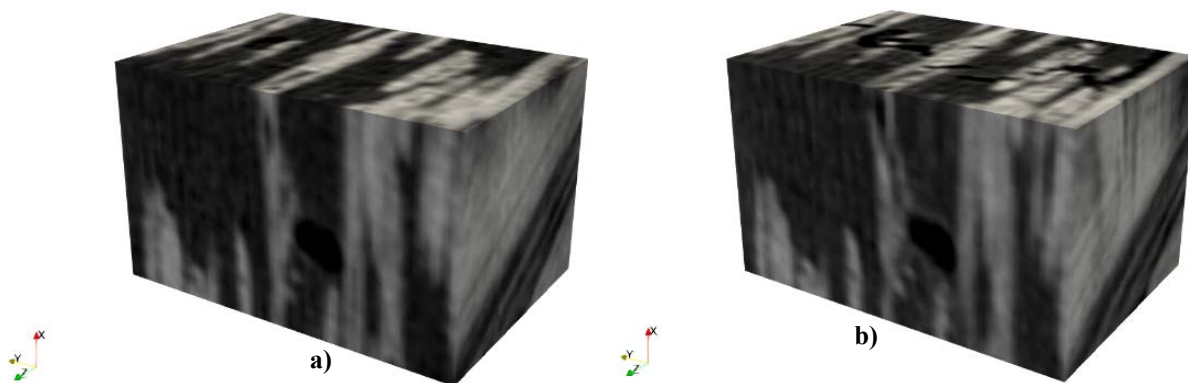
### 6.1. Položaj promatranog pod-volumena

Položaj pod-volumena koji će se promatrati označen je na mapi korelacijskih reziduala cijelog ispitnog uzorka (Slika 22.). Prikazana mapa korelacijskih reziduala odgovara analizi provedenoj između referentnog skena 0 i deformiranog skena 1. Pod-volumen odgovara rasponu koordinata 456-521 u smjeru osi  $x$ , 19-103 u smjeru osi  $y$  te 518-579 u smjeru osi  $z$ . Ova lokacija je odabrana jer se nalazi u najkritičnijem dijelu uzorka, tj. u korijenu zarez. Na ovoj lokaciji je, prema Slici 22., uočeno više lokaliziranih područja s povišenim vrijednostima korelacijskih reziduala. Zbog toga se unutar promatranog pod-volumena očekuje velik broj različitih mehanizama oštećenja.



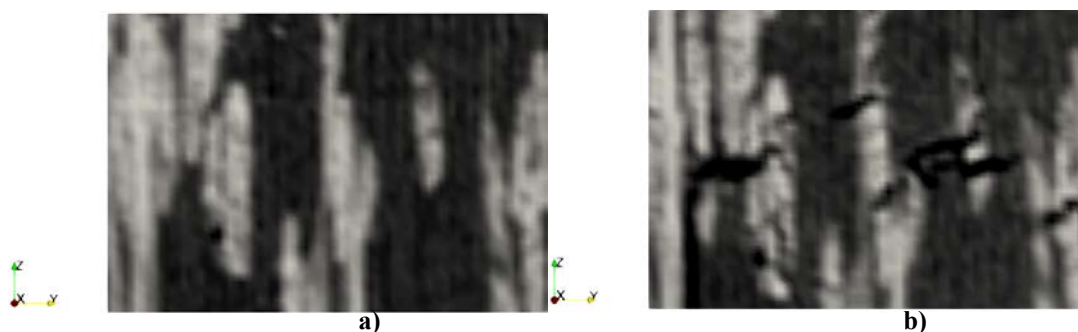
Slika 22. Položaj promatranog pod-volumena na mapi korelacijskih reziduala.

Nedeformirani sken (sken 0) promatranog pod-volumena je prikazan na Slici 23. a). U nastavku ovog poglavlja su sve analize provedene između referentnog skena 0 i deformiranog skena 1. Sken 1 je prikazan na Slici 23. b). Pod-volumeni oba skena, prikazana na Slici 23., odgovaraju veličini od  $84 \times 55 \times 61$  voksela.



Slika 23. Promatrani pod-volumen za a) sken 0 i b) sken 1.

Rezultati analize oštećenja će biti provjereni u interakciji sa usporedbom presjeka referentnog i deformiranog skena prikazanih na Slika 24. Presjek skena 0, prikazan na Slika 24. a) se nalazi na poziciji od 45 voksela u smjeru osi  $x$  prema orijentaciji koordinatnog sustava na Slici 23. a). Presjek skena 1 (Slika 24. b)) se također nalazi na poziciji 45 voksela u smjeru osi  $x$  deformiranog volumena, prikazanog Slici 23. b). Oba presjeka su dimenzija  $84 \times 61$  voksela.



Slika 24. Presjek a) referentnog skena 0 i b) deformiranog skena 1.

Sve analize u ovom poglavlju će biti provedene na mreži konačnih elemenata koja opisuje heterogenu mikrostrukturu epoksidne smole ojačane mat staklenim vlaknima. Izrada mreže konačnih elemenata je objašnjena u poglavlju 3.2.2, a sama mreža je prikazana na Slici 6. Negativna strana ovog načina izrade mreže je velik broj konačnih elemenata s malim

volumenom. Za usporedbu se moųe uzeti mreųa konačnih elemenata cijelog ispitnog uzorka, prikazanog na Slici 14. Ta mreųa sadri 118 880 elemenata i 22 817 ćvorova, a sluųi za diskretizaciju volumena dimenzija  $465 \times 680 \times 1001$  voksela. S druge strane, promatrani pod-volumen (Slika 23.) je dimenzija  $84 \times 55 \times 61$  voksela te je opisan mreųom konačnih elemenata koja sadri 72 642 elemenata te 14 567 ćvorova. Prema tome prosječna veličina elemenata mreųe ćelog uzorka iznosi 11,4 vx, a prosječna veličina elemenata mreųe pod-volumena 1,2 vx. Ovako velika razlika nastaje zbog kompleksne mezostrukture promatranog pod-volumena. Pod-volumen sadri mat staklena vlakna koja su na određenim dijelovima vrlo malih dimenzija. Manjim elementima je moguće bolje opisati kinematiku promatranog uzorka te heterogenu mikrostrukturu. S druge strane, manji elementi rezultiraju porastom mjerne nesigurnosti [2]. Stoga su iz mreųe prikazane na Slici 6. su izbrisani elementi manji od 0,5 voksela. Ova veličina je odabrana kako bi se do određene mjere smanjila mjerna nesigurnost i utjecaj šuma, a da se istovremeno ne naruši kvaliteta opisa heterogene mikrostrukture i kinematike pod-volumena. U nastavku će biti provedena standardna DVC analiza sa mikrostrukturnom mreųom, odnosno bit će zadana homogena materijalna svojstva. Prikazat će se utjecaj razlićitih regularizacijskih duljina na polja glavnih deformacija. Nakon toga će biti prikazana mapa korelacijskih reziduala te polja glavnih deformacija.

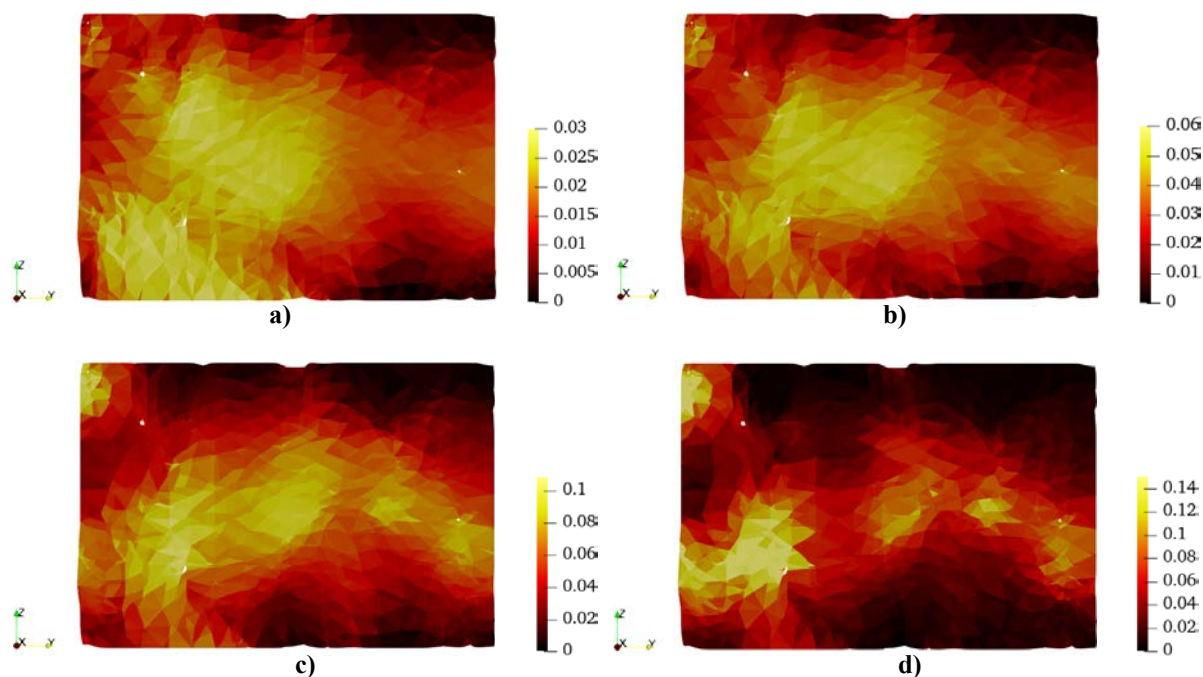
## 6.2. Primjena homogene regularizacije na mikrostrukturnoj mreųi

Zbog jasnijeg predoćenja implementacije heterogene regularizacije prvo je potrebno provesti homogenu DVC analizu. U ovom poglavlju su prikazani rezultati homogeno regularizirane DVC analize provedene na heterogenoj mikrostrukturnoj mreųi. Analize su provedene sa vrijednoću kontrasta  $C=1$ , prethodno objašnjelog u poglavlju 3.2.3. Za slućaj  $C=1$  prema jednadųbi (3.16) vrijedi jednakost materijalnih svojstava razlićitih konstituenata te se materijal smatra homogenim. Takva vrijednost kontrasta odgovara standardnom DVC pristupu. U ovom poglavlju je provedena analiza utjecaja razlićitih regularizacijskih duljina na homogeno regulariziran DVC pristup. Analiza razlićitih regularizacijskih duljina je provedena na poljima najvećih glavnih deformacija. Nakon toga su prikazana izmjerena polja pomaka. Iz polja pomaka su određene glavne deformacije te su joų dodatno određeni korelacijski reziduali, pomoću kojih je provedena analiza oštećenja u promatranom volumenu.



### 6.2.1. Utjecaj regularizacijske duljine na homogeno regulariziran DVC

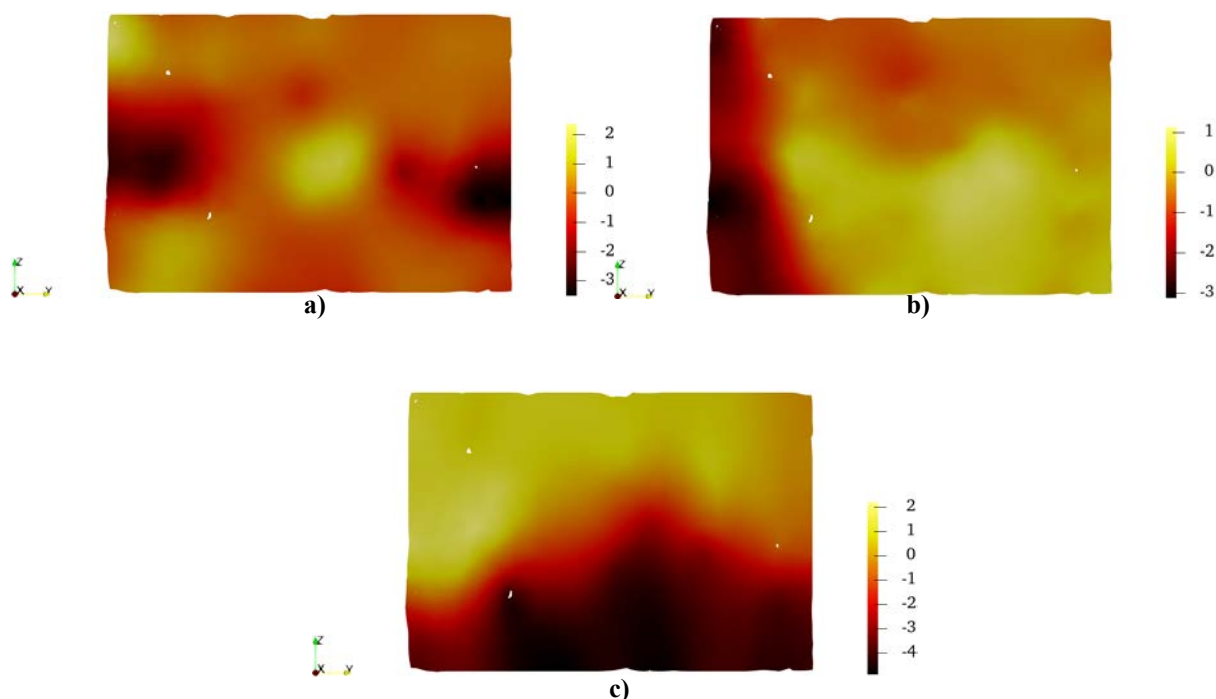
U ovom poglavlju je provedena procedura relaksacije za 4 različite vrijednosti regularizacijske duljine (100 vx, 70 vx, 50 vx i 30 vx). Analiziran je utjecaj regularizacijskih duljina na polja glavnih deformacija u presjeku. Položaj promatranog presjeka na poljima najvećih glavnih deformacija je 45 vokseli u smjeru osi  $x$ . Spomenuti položaj presjeka odgovara presjecima mezostrukture prikazane na Slici 24. Polja najvećih glavnih deformacija za različite duljine mehaničke regularizacije su prikazane na Slici 25. Polja deformacija za regularizacijsku duljinu  $l_r=100$  vx su prikazana na Slici 25. a). Može se vidjeti vrlo široka zona povišenih deformacija. Usporedbom Slike 25. a) (regularizacijska duljina  $l_r=100$  vx) sa Slikom 25. b) (regularizacijska duljina  $l_r=70$  vx) vidljivo je kako je zona povišenih deformacija stanjena na manju domenu pri nižoj vrijednosti regularizacijske duljine. Isto tako pri regularizaciji  $l_r=70$  vx su vrijednosti deformacija više u odnosu na deformacije pri regularizacijskoj duljini  $l_r=100$  vx. Slična pojava se može primijetiti usporedbom prethodna dva polja deformacija (Slika 25. a) i b)) sa deformacijama pri regularizacijskoj duljini  $l_r=50$  vx (Slika 25. c)). Ponovno je vidljivo smanjenje zone povišenih glavnih deformacija te rast vrijednosti istih. Na kraju, Slika 25. d), prikazuje slučaj regularizacijske duljine  $l_r=30$  vx. Vidljive su lokalizacije u puno manjim zonama u odnosu na prethodne slučajeve. Isto tako, vrijednosti deformacija u lokaliziranim zonama su značajno porasle. Iz toga se može zaključiti kako je relaksacijska procedura dovela do lokalizacija u manjoj domeni, odnosno deformacije su bile više lokalizirane i njihove vrijednosti su bile povišene.



Slika 25. Polja najvećih glavnih deformacija dobivena sa regularizacijskom duljinom: a)  $l_r=100$  vx, b)  $l_r=70$  c) vx,  $l_r=50$  vx i d)  $l_r=30$  vx.

### 6.2.2. Izmjerena polja pomaka

U ovom poglavlju su promatrana polja pomaka izmjerena homogenim DVC pristupom. Za DVC analizu je korištena regularizacijska duljina od  $l_r=30$  vx. Polja pomaka su prikazana u presjeku te u sva tri smjera koordinatnih osi ( $u_x$ ,  $u_y$  i  $u_z$ ). Slika 26. a) prikazuje izmjerena polja pomaka u smjeru osi  $x$ . Vidljive su dvije lokalizacije negativnih vrijednosti na lijevom i desnom rubu presjeka. Slika 26. b) prikazuje polja pomaka u smjeru osi  $y$ . Vidljivo je kako su negativne vrijednosti pomaka raspodijeljene po cijeloj dužini lijevog ruba presjeka te je vidljiv njihov porast prema suprotnoj strani. Na Slici 26. c) je prikazano polje pomaka u smjeru osi  $z$ . Iznos pomaka u smjeru osi  $z$  povećava se postepeno po visini promatranog presjeka. U donjem dijelu presjeka su vrijednosti pomaka negativne te rastu do pozitivnih u vrhu presjeka.



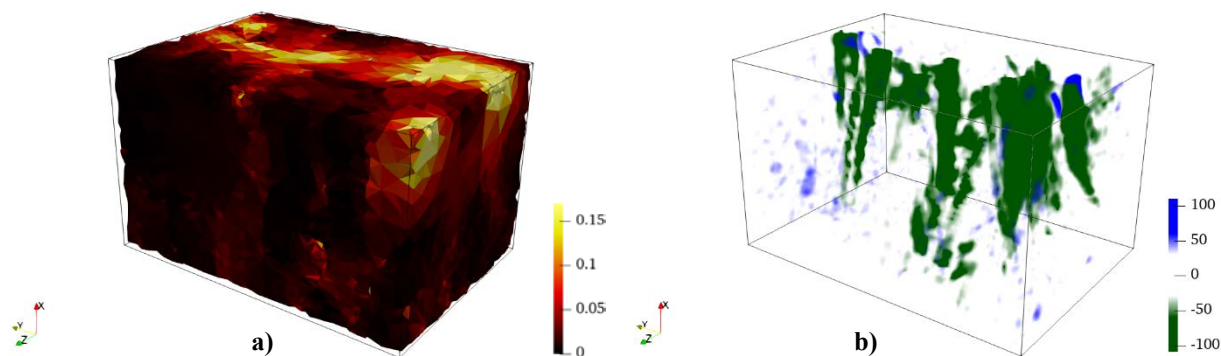
Slika 26. Izmjerena polja pomaka u a) x smjeru, b) y smjeru i c) z smjeru.

U nastavak će biti prikazano polje najvećih glavnih deformacija izračunate iz prethodno izmjerenih polja pomaka, prikazanih na Slici 26. Uz to će još biti prikazana mapa korelacijskih reziduala.

### 6.2.3. Polje najvećih glavnih deformacija i mapa korelacijskih reziduala

U prethodnom poglavlju su bila prikazana polja pomaka izmjerena DVC pristupom sa homogenom regularizacijom. Iz izmjerenih polja pomaka je sada moguće izračunati polje najvećih glavnih deformacija. Izračunata polja deformacija su prikazana na Slici 27. a), a mapa

korelacijskih reziduala na Slici 27. b). Potrebno je napomenuti da je mjerna jedinica korelacijskih reziduala, razina sive nijanse boje (eng. *Gray levels* - GL). Na Slici 27. a) je vidljivo kako su najveće deformacije lokalizirane na gornjoj plohi u smjeru osi  $x$ . Isto tako, mapa korelacijskih reziduala prikazuje najveći broj povišenih vrijednosti u blizine gornje plohe (Slika 27. b)). Ovakve raspodjele su i očekivane s obzirom na to da gornja ploha volumena prikazanog na Slici 23. odgovara korijenu zareza cijelog ispitnog uzorka.



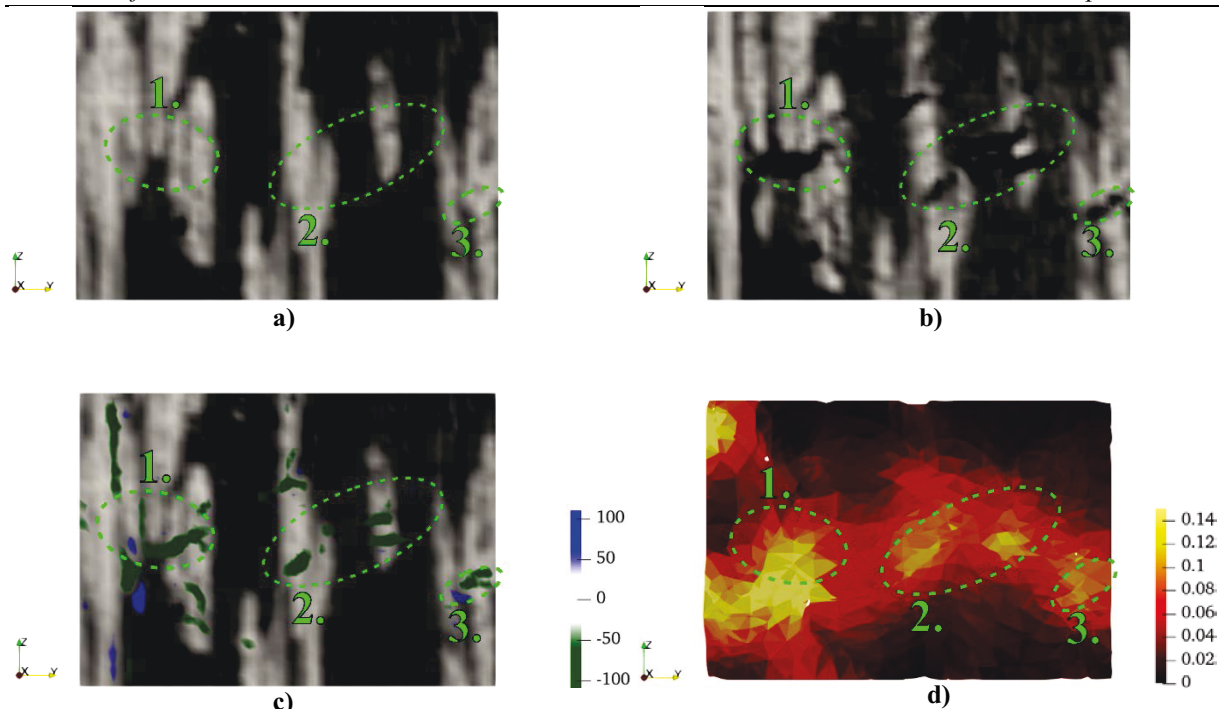
**Slika 27. a) Polja najvećih glavnih deformacija, b) mapa korelacijskih reziduala za podvolumen skena 1.**

U nastavku će biti prikazana analiza pukotina promatranog pod-volumena. Pukotine će biti prikazane u presjecima sa Slike 24. Osim toga, pukotine će biti opisane presjekom prethodno prikazanih polja najvećih glavnih deformacija i korelacijskih reziduala.

#### 6.2.4. Analiza oštećenja

S obzirom na to da je promatrani volumen izrađen od polimera ojačanog mat staklenim vlaknima, oštećenje je popraćeno nizom različitih mehanizama inicijacije i propagacije mikropukotina. Oštećenje u takvim materijalima je prethodno bilo objašnjeno u poglavlju 2.1, te su mehanizmi bili opisani u poglavlju 5.2 za konkretan slučaj ispitnog uzorka. Budući da se kod ove vrste materijala pojavljuje niz malih pukotina na različitim lokacijama potrebno je čim bolje opisati lokalizacije. Iz tog razloga će za analizu pukotina ove vrstu materijala biti prikladna regularizacijska duljina  $30 v_x$ . Pri toj vrijednosti su dobivene lokalizacije u najmanjoj domeni, kao što je bilo objašnjeno u poglavlju 6.2.1. Analiza oštećenja će biti provedena na mapi korelacijskih reziduala, polju najvećih glavnih deformacija. Provjeravat će se ponašanje mikrostrukture kod pojave oštećenja usporedbom početnog i deformiranog skena te njihova interakcija sa dobivenim rezultatima.

Na Slici 28. a) je prikazan nedeformirani sken 0 visoke kvalitete u presjeku prethodno opisanome u poglavlju 6.1. Na Slici 28. b) je prikazan isti presjek deformiranog skena 1 visoke kvalitete. Slika 28. c) prikazuje mapu korelacijskih reziduala preklopljenu sa presjekom nedeformiranog skena 0. Na kraju je još na Slici 28. d) prikazano polje najvećih glavnih deformacija u presjeku koji odgovara istoj poziciji kao i prethodni presjeci. Na Slici 28. su zelenom isprekidanom elipsom označene 3 zone unutar kojih su nastale najveće pukotine vidljive na promatranom presjeku. Spomenute zone su na Slici 28. numerirane brojevima 1.-3. Usporedbom početnog skena 0 (Slika 28. a)) i deformiranog skena 1 (Slika 28. b)) može se uočiti kako je oštećenje u 1. zoni nastala unutar vlakna te na granici vlakna i matrice. Korelacijski reziduali (Slika 28. b)) prikazuju povišene vrijednosti unutar 1. zone. Polja glavnih deformacija prikazuju u 1. zoni lokalizaciju s povišenim vrijednostima. Nadalje, ako se provede usporedba početnog skena 0 (Slika 28. b)) i deformiranog skena 1 (Slika 28. c)) vidljivo je kako 2. zona označuje pukotinu koja je proširena na vlakna, matricu i njihove granice. Slici 28. c) unutar 2. zone prikazuje povišene vrijednosti reziduala lokalizirane na mjestu na kojem je nastala pukotina. Na Slici 28. d) su unutar 2. zone vidljive lokalizacije povišenih vrijednosti deformacija. Kod 3. zone je pukotina nastala unutar vlakana. Ova pukotina se može uočiti usporedbom početnog i deformiranog skena (Slika 28. a) i b)). Promatranjem područja 3. zone na Slici 28. c) vidljiva je lokalizacija povišenih vrijednosti korelacijskih reziduala. Njihova lokacija odgovara mjestu pojave pukotine. Na kraju, ako se promatra presjek polja deformacija, na Slici 28. d) su unutar 3. zone ponovno vidljive lokalizacije povišenih vrijednosti.

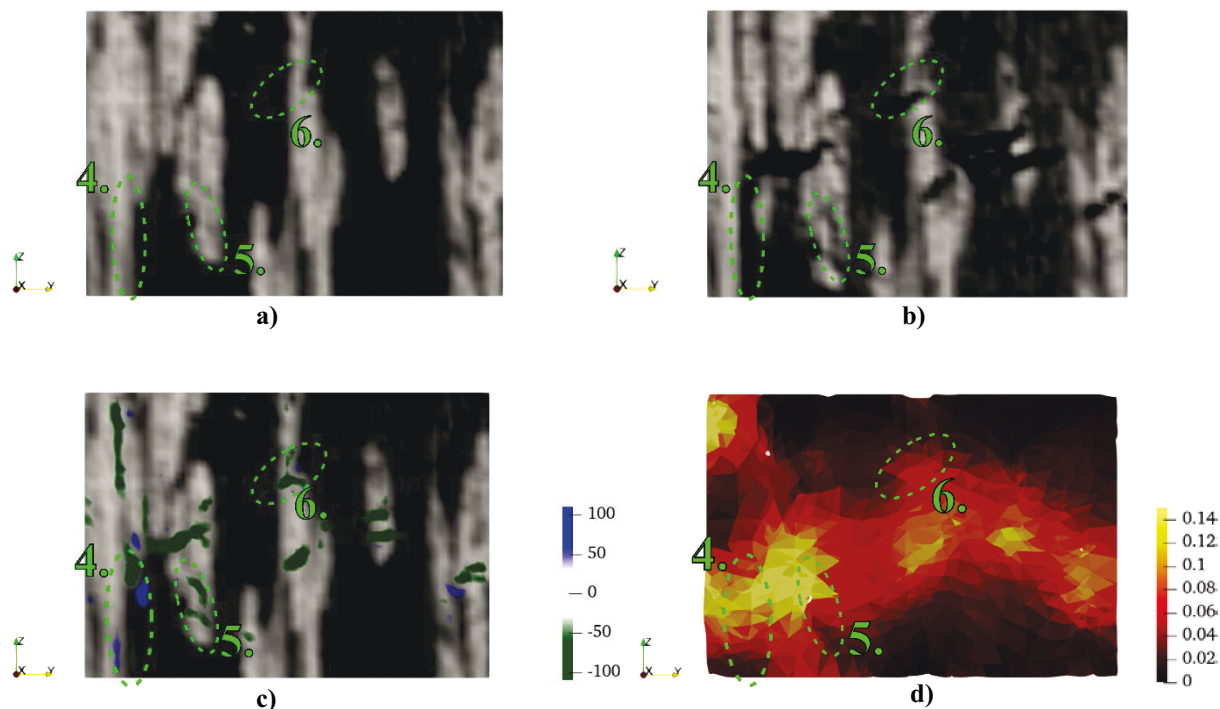


**Slika 28. a) Presjek skena 0, b) presjek skena 1, c) korelacijski reziduali preklopljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane elipse su numerirane brojevima 1.-3. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine.**

Prethodno su bile prikazane 3 zone pukotina na promatranom presjeku. Uz to je bilo prikazano na koji način su te zone opisane korelacijskim rezidualima te poljima deformacija. Prethodno opisane zone nisu jedine unutar kojih su nastale pukotine. Stoga će u nastavku biti provedena daljnja analiza pukotina na istom presjeku.

Slika 29. a) prikazuje presjek skena 0, a Slika 29. b) presjek skena 1. Na Slici 29. c) su prikazani korelacijski reziduali preklopljeni sa presjekom skena 0, a na Slici 29. d) je prikazan presjeka polja glavnih deformacija. Područja pukotina su na Slici 29. označena zelenim isprekidanim elipsama te numerirane brojevima 4.-6. Usporedbom skena 0, prikazanog na Slici 29. a), i skena 1, prikazanog na Slici 29. b), može se primijetiti kako je pukotina u 4. zoni nastala na granici vlakna i matrice. Polja korelacijskih reziduala (Slika 29. c)) prikazuju povišene vrijednosti na vrhu 4. zone. Isto tako je vidljiva lokalizacija reziduala na dnu 4. zone. Polja deformacija, na Slici 29. c), prikazuju povišene vrijednosti u vrhu 4. zone. Iako su polja deformacija na dnu promatrane zone nešto niža, ona još uvijek nisu zanemariva. Daljnjom analizom 5. zone može se, usporedbom početnog i deformiranog skena (Slika 29. a) i b)), uočiti kako je pukotina nastala u vlaknima. Slika 29. c) prikazuje kako je u promatranoj 5. zoni došlo do povećanja korelacijskih reziduala. Nadalje, Slika 29. d) prikazuje povišene deformacije u vrhu 5. zone te nešto niže vrijednosti pri dnu iste. Na kraju se može promatrati pukotina unutar

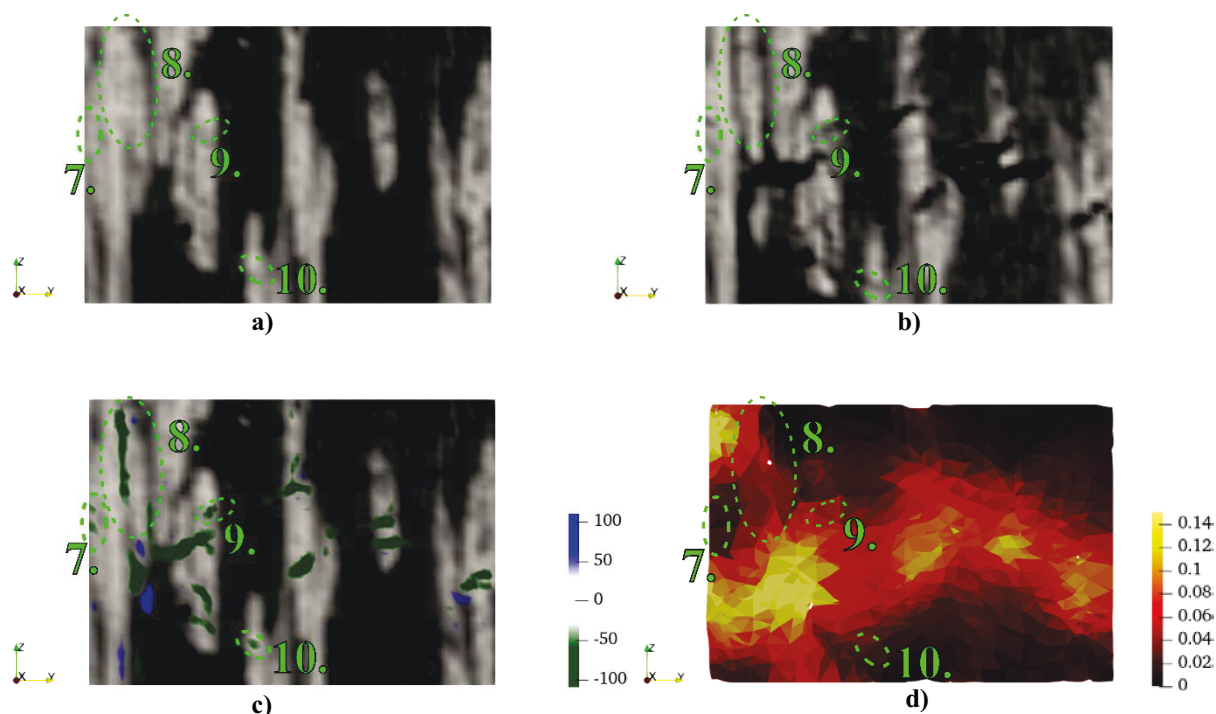
6. zone. Usporedbom skena 0 i skena 1 je vidljivo kako je pukotina nastala u vlaknima i matrici. Može se vidjeti kako su vrijednosti korelacijskih reziduala povišene unutar 6. zone (Slika 29. c)). Slika 29. d) prikazuje kako su polja deformacija povišena u 6. zoni. Potrebno je napomenuti kako su deformacije niže u 6. zoni nego u prethodno promatranim zonama, no daleko od toga da su zanemarive.



**Slika 29. a) Presjek početnog skena 0, b) presjek deformiranog skena 1, c) korelacijski reziduali preklapljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane elipse su numerirane 4.-6. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine.**

Slika 30. prikazuje presjeke skenova, korelacijskih reziduala i polja deformacija koja su prethodno mogla biti vidljiva na Slici 28. i Slici 29. Ovaj puta su zone pukotine na Slici 30. označene zelenim isprekidanim elipsama te numerirane brojevima 7.-10. Provede li se usporedba 7. zone presjeka skena 0 na Slici 30. a) i presjeka skena 1 na Slici 30. b), može se zaključiti kako je oštećenje nastala u vlaknu. Korelacijski reziduali su povišeni i lokalizirani na mjestu pojave pukotine unutar 7. zone (Slika 30. b)). Polje deformacija prikazuje malo povišenje vrijednosti u 7. zoni, kao što je vidljivo na Slici 30. c). Ponovnom usporedbom skena 0 i skena 1 vidljivo je kako su kod 8. zone pukotine nastale odvajanjem vlakana unutar pređe. Polja korelacijskih reziduala označuju povišene vrijednosti unutar spomenute 8. zone (Slika 30. c)). Nakon toga, na Slici 30. d) je unutar cijele 8. zone vidljiv porast vrijednosti deformacija. Nadalje, unutar 9. zone je vidljivo kako su pukotine nastale unutar vlakana i matrice. Polja korelacijskih reziduala prikazuju povišene vrijednosti u 9. zoni ( Slika 30. c)). Polja deformacija

prikazuju malo povišene vrijednosti u 9. zoni (Slika 30. d)). Posljednja zona pukotina na promatranom presjeku je označena brojem 10. na Slici 30. Postupkom usporedbe početnog i deformiranog skena može se primijetiti kako je pukotina u toj zoni nastala u vlaknima. Korelacijski reziduali su unutar 10. zone povišeni i lokalizirani (Slika 30. c)). Polja deformacija prikazuju malo povišene vrijednosti unutar 10. zone (Slika 30. c)). Polja deformacija su u promatranim zonama 7.-10. (Slika 30. d)) bila malo niža u usporedbi s prethodno prikazanim zonama 1.-6. (Slika 28. d) i Slika 29. d)). Ova pojava je i očekivana s obzirom na to da su se na Slici 30. promatrale zone sa najmanjim pukotinama.



**Slika 30. a) Presjek početnog skena 0, b) presjek deformiranog skena 1, c) korelacijski reziduali preklapljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane elipse su numerirane 7.-10. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine.**

Velik broj pukotina prikazanih u prethodnoj analizi naglašava složenost problema analize oštećenja u ovakvoj vrsti materijala. Iz prethodne analize se moglo vidjeti kako je unutar samo jednog presjeka manjeg pod-volumena nastalo 10 karakterističnih zona oštećenja. Još je potrebno napomenuti kako je prethodna analiza pukotina u pod-volumenu bila izvršena standardnim DVC pristupom. Pri tome su materijalna svojstva zadana kao homogena. U nastavku će u obzir biti uzeta različita materijalna svojstva konstituenata te će na taj način biti implementirana heterogena regularizacija.

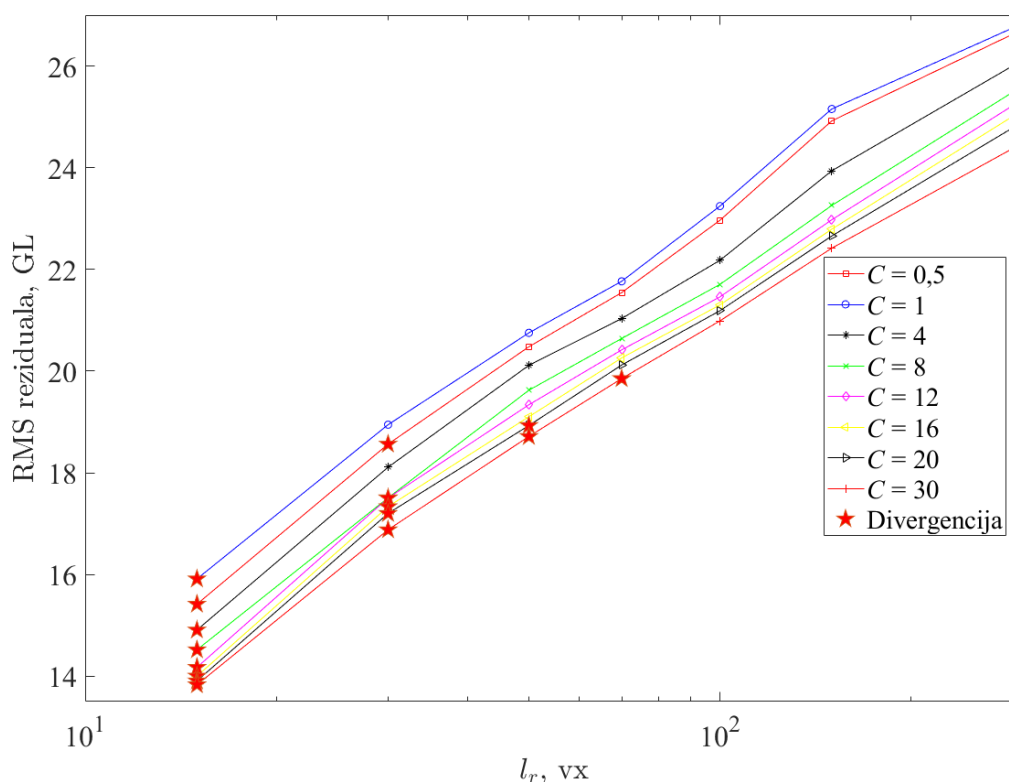
### 6.3. Utjecaj kontrasta na heterogeno regularizirani DVC pristup

Kao što je već prethodno bilo opisano u poglavlju 3.2.3., vrijednost kontrasta  $C$  definira odnos materijalnih parametara kod heterogeno regulariziranog DVC pristupa. U prethodnom poglavlju je provedena analiza sa standardnim DVC pristupom. Kod provedene analize je korištena mreža konačnih elemenata koja opisuje heterogenu mikrostrukturu. Budući da su materijalna svojstva bila zadana kao jednaka, utjecaj heterogene mikrostrukture nije došao do izražaja. Stoga je potrebno u DVC analizu uvesti kontrast  $C$  koji na pravilan način opisuje razliku svojstava konstituenata.

U ovom poglavlju će biti analiziran utjecaj kontrasta  $C$  na DVC analizu. Osim toga, bit će prikazan utjecaj kontrasta na kvadratnu srednju vrijednost (eng. *Root Mean Square* - RMS) reziduala i standardne devijacije najvećih glavnih deformacija. Uz to će biti prikana polja glavnih deformacija u presjeku za različite kontraste.

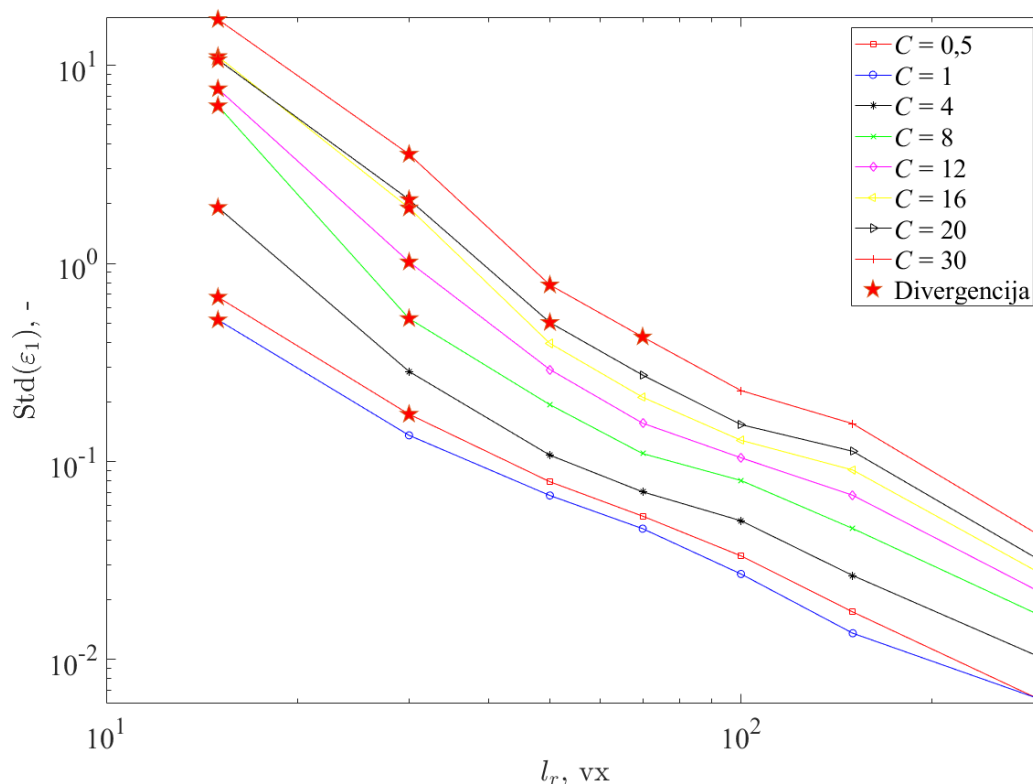
Provedene su analize sa 8 različitih vrijednosti kontrasta. Ako se uzmu u obzir stvarne vrijednosti modula elastičnosti epoksidne smole ( $E_m=5$  GPa [27]) i staklenih vlakana ( $E_f=80$  GPa [27]), kontrast iznosi  $C=16$ . Još su uzete u obzir vrijednosti 4, 8, 12, 20 i 30. Uz to je promatran slučaj  $C=0,5$ , za koji matrica ima veću krutost. Za usporedbu, su prikazani i rezultati pri homogenoj regularizaciji ( $C=1$ ). Prvo se promatrao utjecaj različitih kontrasta i različitih regularizacijskih duljina na RMS reziduala te su rezultati prikazani na Slici 31. Analiza se za svaku vrijednost kontrasta provela pri 7 različitih regularizacijskih duljina (15 vx, 30 vx, 50 vx, 70 vx, 100 vx, 150 vx i 300 vx). Na Slici 31. je vidljivo kako, za sve kontraste, povećanjem regularizacijske duljine vrijednosti RMS reziduala postepeno rastu. Ako se promatra utjecaj kontrasta na vrijednosti RMS reziduala može se primijetiti postepen pad za svaku vrijednost kontrasta različitu od 1. Iz toga se može zaključiti kako će sve heterogene regularizacije rezultirati korelacijskim rezidualima koji su lokalizirani u manjoj zoni. Na Slici 31. su još označene analize kod kojih konvergencija nije bila uspješna. Može se primijetiti kako su sve analize divergirale pri duljini regularizacije od 15 vokseli te su samo za dvije vrijednosti kontrasta konvergirale pri duljini od 30 vokseli ( $C=1$  i  $C=4$ ). Ova činjenica ponovno upućuje na kompleksnost oštećenja u polimerima ojačanim vlaknima te složenost analize provedene na promatranom pod-volumenu. Može se primijetiti kako trend divergencije raste sa smanjenjem regularizacijske duljine i povećanjem kontrasta. Na Slici 31. je vidljivo kako je pri vrlo visokom kontrastu  $C=30$  veći broj analiza divergirao (konvergencija je bila uspješna samo za regularizacijske duljine 100 vx, 150 vx i 300 vx). S druge strane niže vrijednosti kontrasta poput  $C=1$  i  $C=4$  divergiraju samo za najmanju zadanu regularizacijsku duljinu.





**Slika 31. Kvadratna srednja vrijednost reziduala u ovisnosti o regularizacijskoj duljini i kontrastu. Ovisnost različitih kontrasta i regularizacijskih duljina o divergenciji DVC analize.**

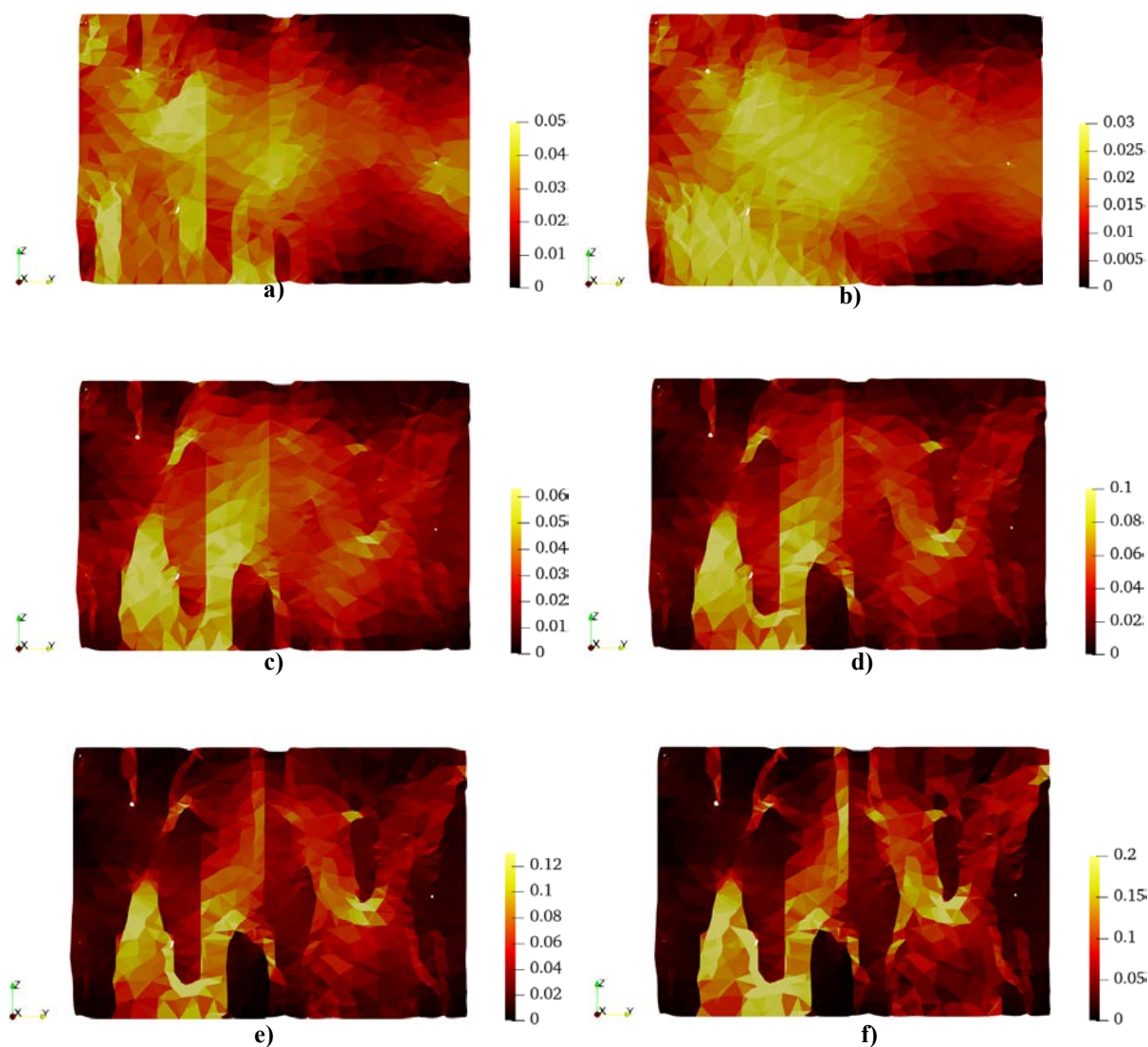
Na Slici 32. su prikazani rezultati prethodno predstavljenih analiza sa 8 različitih kontrasta i 7 različitih regularizacijskih duljina. Ovaj puta je prikazan utjecaj različitih regularizacijskih duljina i različitih vrijednosti kontrasta na standardnu devijaciju najvećih glavnih deformacija. Na Slici 32. je vidljivo kako za sve kontraste povećanjem regularizacijske duljine vrijednosti standardne devijacije najvećih glavnih deformacija postepeno padaju. Promatranjem utjecaja kontrasta vidljivo je kako je standardna devijacija najniža pri kontrastu  $C=1$ . Isto tako može se primijetiti kako primjena viših vrijednosti kontrasta rezultira višim vrijednostima standardne devijacije. Prema tome se može zaključiti kako će pri višim vrijednostima kontrasta biti bolje opisane nagle promjene deformacija između različitih konstituenata.



**Slika 32. Standardna devijacija deformacija u ovisnosti o regularizacijskoj duljini i kontrastu. Ovisnost različitih kontrasta i regularizacijskih duljina o divergenciji DVC analize.**

Daljnja analiza kontrasta je provedena za 6 različitih vrijednosti kontrasta (0,5, 1, 4, 8, 16 i 30). Na Slici 31. i Slici 32. je prikazano kako su sve analize konvergirale za regularizacijsku duljinu 100 vx, 150 vx i 300 vx. Budući da je  $l_r=100$  vx najniža od spomenutih vrijednosti, rezultati će biti prikazani za tu vrijednost regularizacijske duljine. Nadalje, promatran je utjecaj kontrasta na polja najvećih glavnih deformacija u presjeku. Rezultati analize su prikazani na Slici 33. Za početak je na Slici 33. a) prikazano polje deformacija za kontrast  $C=0,5$ . Ova vrijednost, prema jednadžbi (3.16), predstavlja slučaj kada matrica ima veću krutost od vlakna. Vidljive su lokalizacije u relativno maloj domeni. Nakon toga je na Slici 33. b) prikazano polje deformacija za kontrast  $C=1$ . Ovo je slučaj homogene raspodjele svojstava. Usporedbom tih rezultata sa prethodnim kontrastom ( $C=0,5$ ), vidljivo je kako je kod kontrasta  $C=1$  polje deformacija prošireno na puno veću domenu. Slika 33. c)-f) prikazuju polja deformacija za kontraste sa vrijednostima većim od 1. Takvi kontrasti predstavljaju slučaj kada vlakna imaju veću krutost od matrice. Kod vrijednosti kontrasta  $C=4$  (Slika 33. c)) su lokalizacije znatno izraženije, nego za slučaj prethodnih kontrasta 0,5 i 1. Osim toga na Slici 33. c) se može primijetiti značajan porast vrijednosti deformacija. Na Slici 33. d) ( $C=8$ ) su zone

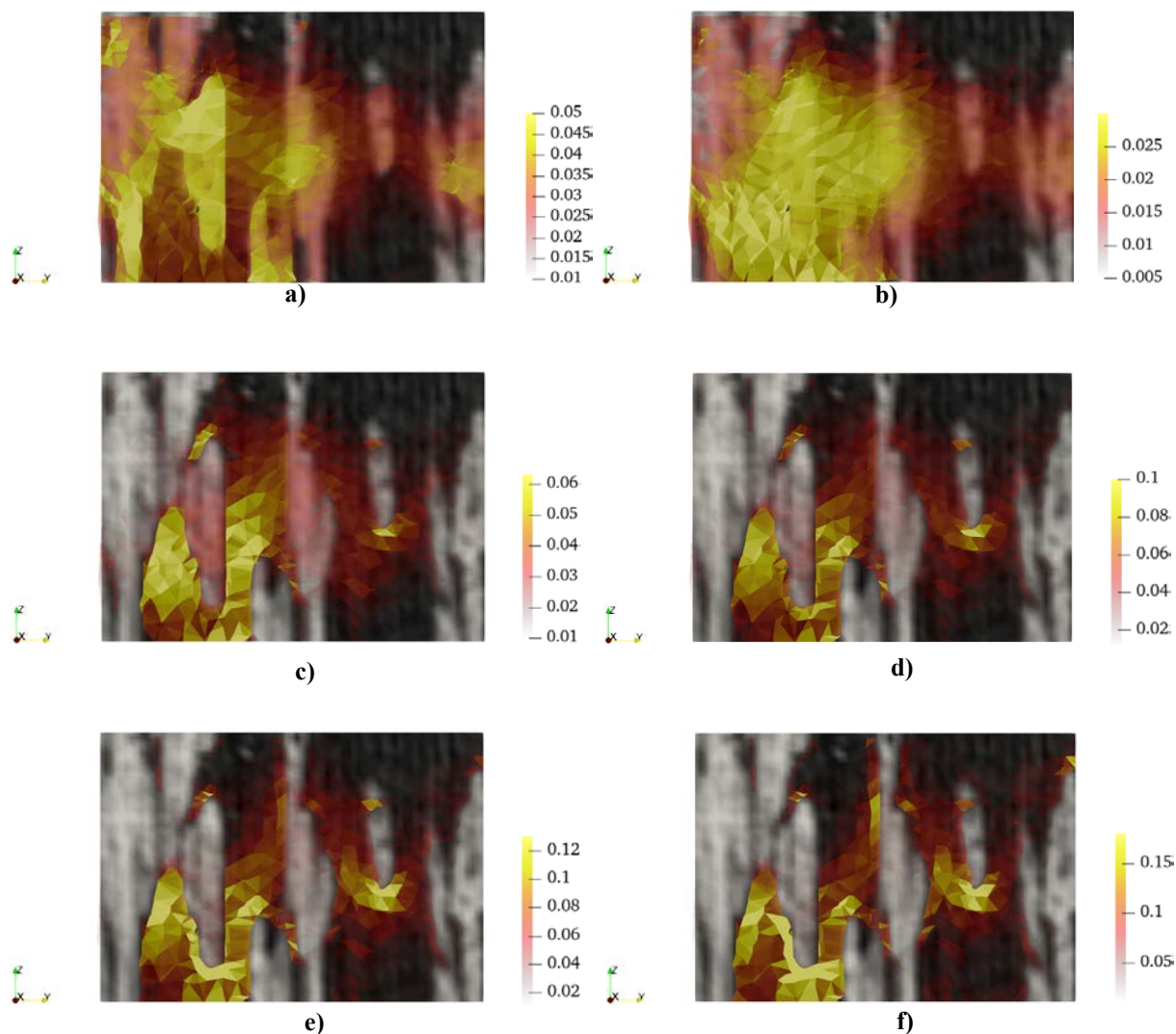
s povišenim deformacijama još više izražene nego za prethodne slučajeve. Ponovno se može primijetiti porast vrijednosti deformacija. Ova pojava je vidljiva i za posljednja dva kontrasta ( $C=16$  prikazan na Slici 33. e) te  $C=30$  prikazan na Slici 33. f)). Kod kontrasta  $C=30$  je vidljiva najveća razlika između područja povišenih deformacija te područja kod kojih su deformacije vrlo niske. Još treba spomenuti kako je vidljivo da su vrijednosti deformacija najviše kod kontrasta  $C=30$ .



**Slika 33. Presjek polja najvećih glavnih deformacija pri regularizacijskoj duljini  $l_r=100$  vx za kontraste a)  $C=0,5$ , b)  $C=1$ , c)  $C=4$ , d)  $C=8$ , e)  $C=16$  i f)  $C=30$ .**

Budući da vrijednost kontrasta definira odnos materijalnih svojstava vlakna i matrice materijala, u nastavku će se promatrati raspodjela deformacija u spomenutim konstituentima. Analiza će se provesti tako da se polja deformacija prikazana na Slici 33. preklape sa odgovarajućim presjekom mezostrukture. Spomenuti presjek je prikazan na Slici 24. a).

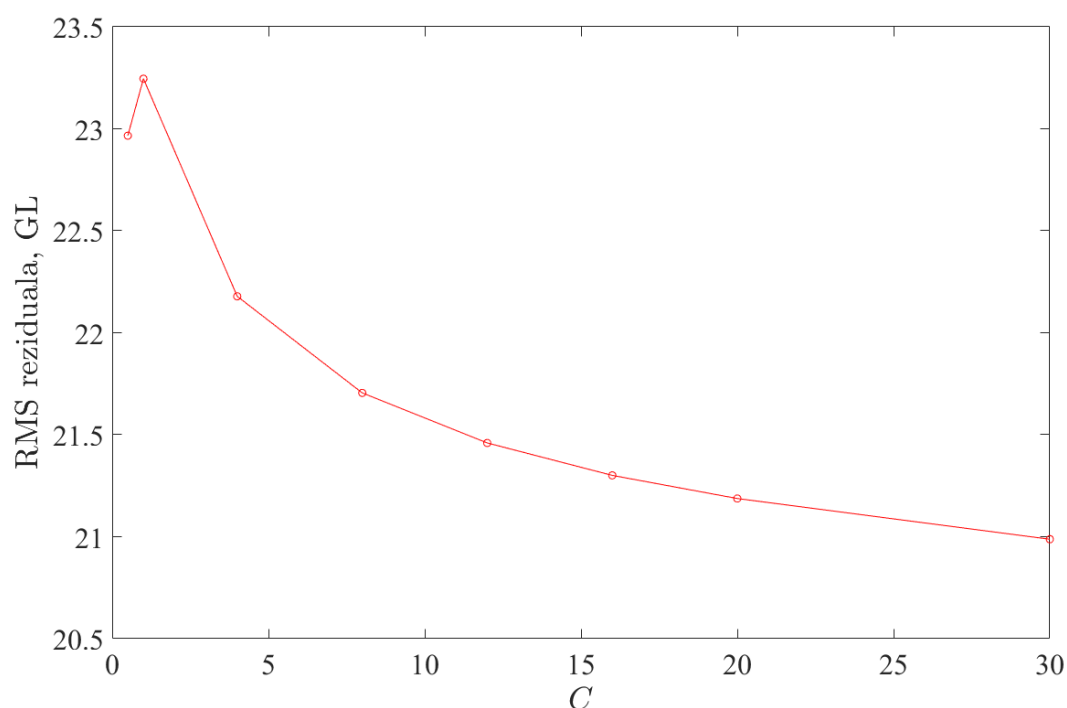
Na Slici 34. a) je prikazano polje najvećih glavnih deformacija za kontrast  $C=0,5$  preklapljeno sa presjekom skena 0. Vidljivo je kako su deformacije u vlaknima veće u odnosu na deformacije u matrici. Ovakva raspodjela je i očekivana s obzirom na to da se kontrastom manjim od 1 zadaje veća krutost matrice. Kod kontrasta  $C=1$  poljima deformacija nije jasno izražena granica između vlakna i matrice (Slika 34. b)). Razlog tome je homogena raspodjela svojstava. Na Slici 34. c) je vidljivo kako su deformacije povišene u matrici te su niže vrijednosti prisutne u vlaknima. Do ovakve raspodjele dolazi zato što vrijednosti kontrasta većeg od 1 označuju veću krutost vlakana. Nakon toga je prikazana raspodjela za kontrast  $C=8$  na Slici 34. d). U ovom slučaju su deformacije u matrici porasle, a u vlaknima se snizile. Ista pojava je u još većoj mjeri vidljiva za kontrast  $C=16$  (Slika 34. e)). Za kontrast  $C=30$  su vrijednosti deformacija u matrici još više povišene u odnosu na prethodne kontraste, a u vlaknima smanjene.



Slika 34. Polja deformacija preklapljena sa početnim skenom 0 za vrijednost kontrasta a)  $C=0,5$ ; b)  $C=1$ , c)  $C=4$ , d)  $C=8$ , e)  $C=16$  i f)  $C=30$ .

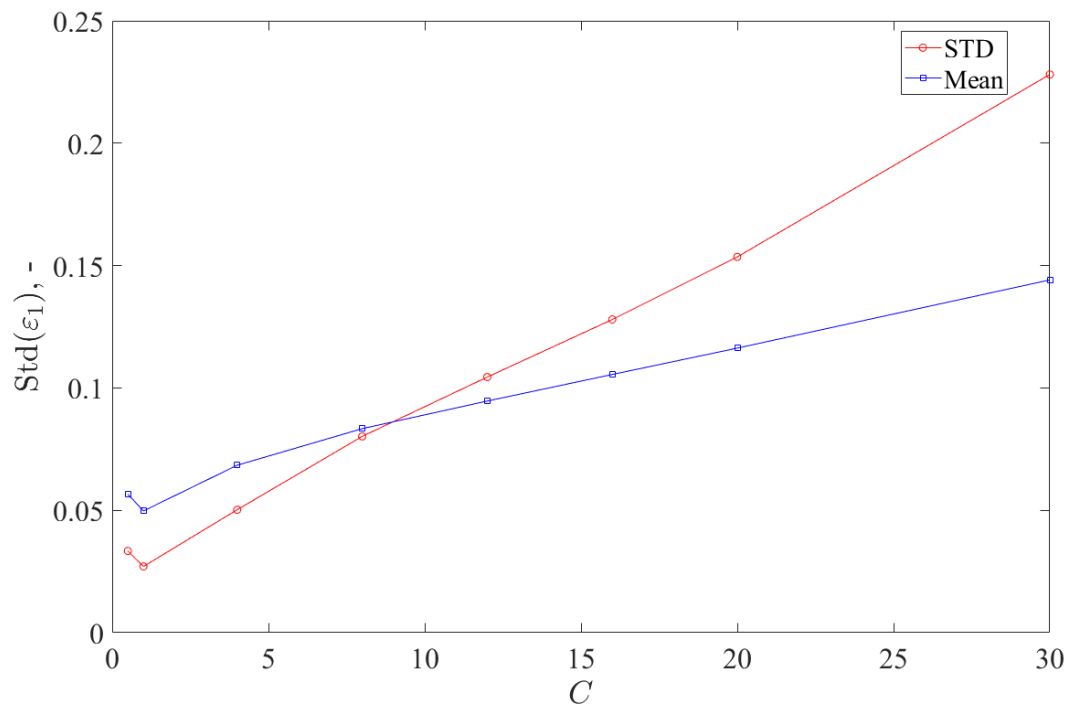
Iz prethodno provedene analize može se zaključiti kako će pri većim vrijednostima kontrasta lokalizacije deformacija biti veće u matrici. Isto tako u lokaliziranim područjima će povećanjem kontrasta vrijednosti deformacija rasti. Uz to povećanjem kontrasta dolazi do smanjenja deformacija u vlaknima.

Na Slici 35. su prikazane vrijednosti RMS reziduala u ovisnosti o kontrastu  $C$ . Rezultati analiza prikazani na Slici 35. su provedeni za regularizacijsku duljinu od 100 vokselā. Promatrao se utjecaj 8 razliĉitih vrijednosti kontrasta (0,5, 1, 4, 8, 12, 16, 20 i 30). Vidljivo je kako su najviše vrijednosti RMS reziduala pri kontrastu  $C=1$ . Porastom kontrasta dolazi do postepenog pada vrijednosti istih.



Slika 35. Korijen srednje pogreške reziduala kao funkcija kontrasta  $C$  ( $l_r = 100$  vx).

Na Slici 36. je prikazana ovisnost srednje vrijednosti (eng. *Mean value*) najvećih glavnih deformacija o promjeni kontrasta  $C$ . Na istoj slici je prikazana ovisnost standardne devijacije deformacija o iznosu kontrasta  $C$ . Vidljivo je kako je srednja vrijednost deformacija najmanja za homogenu vrijednost kontrasta ( $C=1$ ). Isto tako može se vidjeti kako porastom kontrasta raste i standardna devijacija deformacija. Porastom vrijednosti kontrasta srednja vrijednost deformacija također postepeno raste. Ako se uzmu u obzir polja deformacija prikazana na Slici 34. te rezultati prikazani na Slici 36. može se zaključiti da pri većim vrijednostima kontrasta može doći do previsokog porasta deformacija u matrici.



**Slika 36. Standardna devijacija i srednja vrijednost najvećih glavnih deformacija kao funkcija kontrasta  $C$  ( $l_r=100$  vx).**

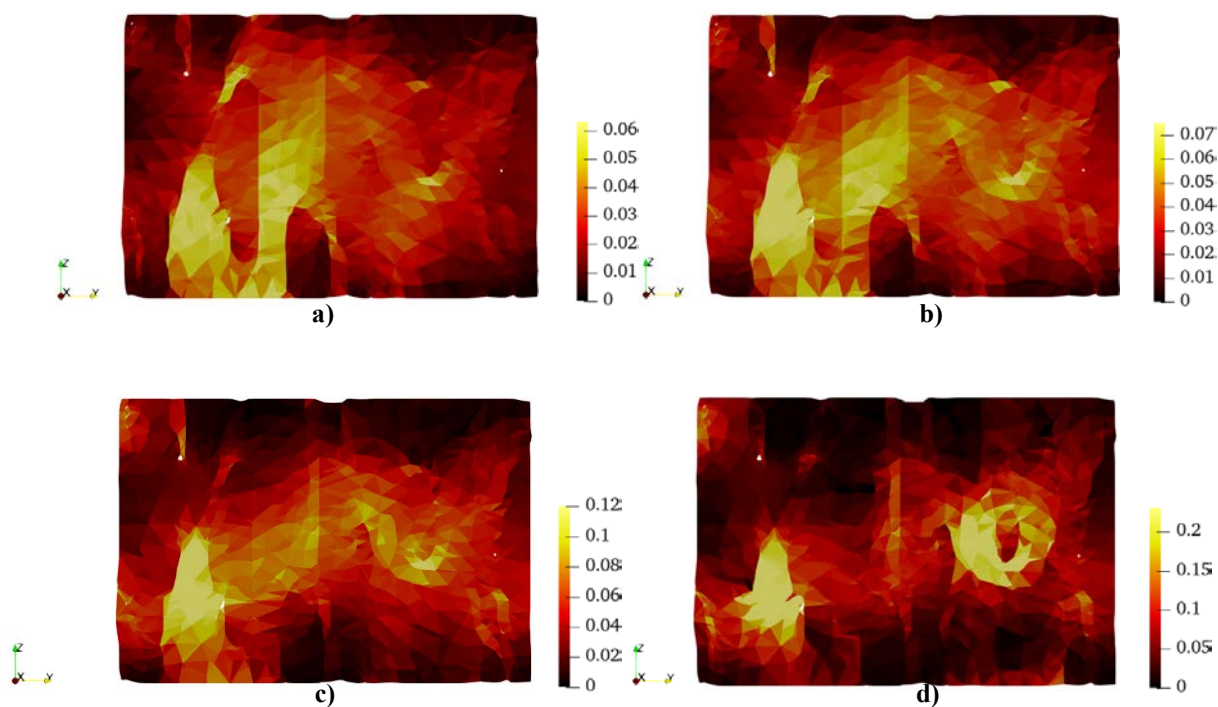
Već je u prethodnoj analizi moglo biti vidljivo kako je, osim kontrasta  $C$ , vrlo bitan parametar kod heterogeno regulariziranog DVC pristupa regularizacijska duljina  $l_r$ . Daljnja analiza utjecaja spomenutog parametra će biti provedena u nastavku.

#### 6.4. Utjecaj regularizacijske duljine na heterogeno regularizirani DVC pristup

Utjecaj različitih regularizacijskih duljina je već bio prethodno prikazan na Slici 31. i Slici 32. Iz spomenutih slika se moglo zaključiti kako porastom regularizacijske duljine standardne devijacije reziduala postepeno rastu, a standardne devijacije deformacija postepeno padaju.

Daljnja analiza utjecaja regularizacijske duljine će biti provedena za kontrast  $C=4$ . Ova vrijednost kontrasta je odabrana zato što dovoljno dobro opisuje razliku između vlakna i matrice, te istovremeno ne izaziva prevelike deformacije u matrici. Prikazan je utjecaj 4 različite regularizacijske duljine na polja najvećih glavnih deformacija. Rezultati su prikazani u presjeku na Slici 37. Na Slici 37. a) je prikazana raspodjela deformacija za regularizacijsku duljinu  $l_r=100$  vx. Budući da je zadan dovoljno visoki kontrast, raspodjela deformacija čak i pri relativno visokoj regularizacijskoj duljini prikazuje lokalizacije. Nadalje, na Slici 37. b) je

prikazana raspodjela deformacija za regularizacijsku duljinu  $l_r=70$  vx. U ovom slučaju su lokalizacije stanjene na malo manju domenu u odnosu na slučaj prikazan na Slici 37. b). Osim toga vrijednosti deformacija su u lokaliziranim zonama porasle. Povišenje lokaliziranih zona je još jasnije vidljivo na Slici 37. c) za slučaj  $l_r=50$  vx. Slika 37. d) prikazuje polja deformacija za  $l_r=30$  vx te su za ovaj slučaj lokalizacije još jasnije vidljive. Isto tako u ovom slučaju su vrijednosti deformacija najviše. Ovime se dolazi do zaključka da pri heterogeno regulariziranom DVC pristupu smanjenje regularizacijske duljine rezultira povišenom lokalizacijom deformacija u manjoj zoni. Isto tako se može zaključiti kako će vrijednosti deformacija u tim zonama rasti s porastom regularizacijske duljine. Potrebno je napomenuti kako su vrlo slične spoznaje bile prikazane kod DVC pristupa sa homogenom regularizacijom, tj. u poglavlju 6.2.1.



**Slika 37. Presjek polja glavnih deformacija za kontrast  $C=4$  pri regularizacijskim duljinama a)  $l_r=100$  vx, b)  $l_r=70$  vx, c)  $l_r=50$  vx i d)  $l_r=30$  vx.**

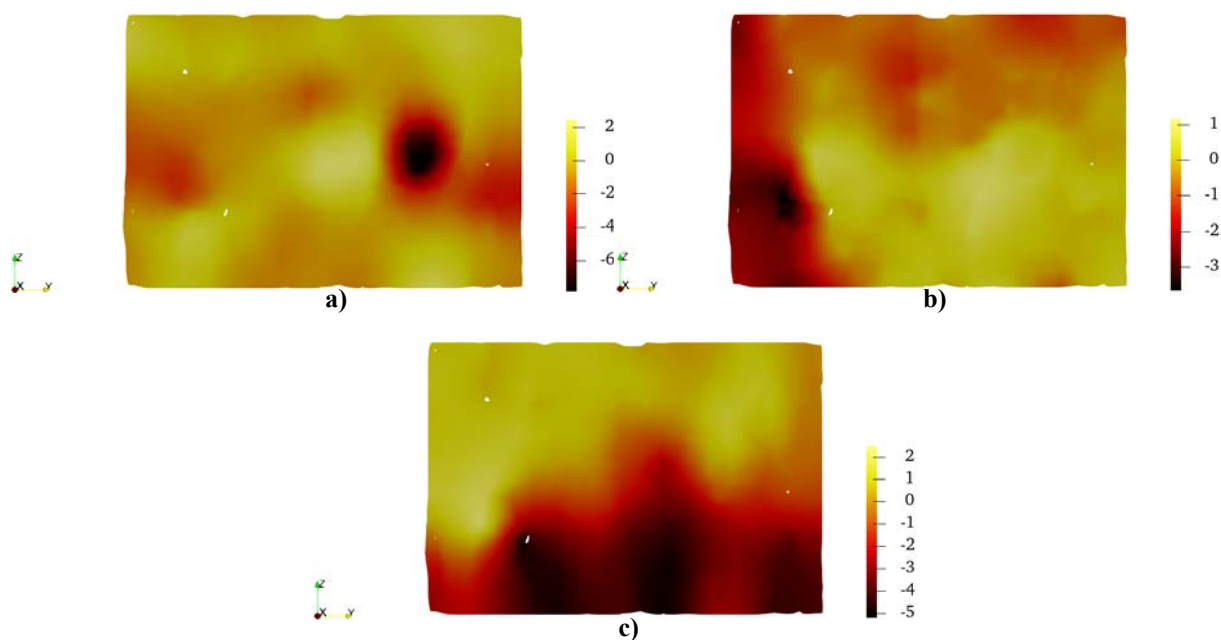
Iz prethodnih analiza se mogao vidjeti utjecaj kontrasta i regularizacijskih duljina na heterogenu DVC analizu. U nastavku će pomoću prethodno stečenih spoznaja biti opisano oštećenje u promatranom pod-volumenu.

## 6.5. Analiza oštećenja kod heterogeno regulariziranog DVC pristupa

U ovom poglavlju će biti provedena analiza pukotina. Procedura analize će biti vrlo slična analizi koja je bila prikazana u poglavlju 6.2.4. Bitna razlika u ovom slučaju je primjena heterogene regularizacije. Svi rezultati koji će biti prikazani u ovom poglavlju su dobiveni pri analizi sa vrijednošću kontrasta  $C=4$  te regularizacijskom duljinom  $l_r=30$  vx. U nastavku će biti prikazana izmjerena polja pomaka. Nakon toga će biti prikazano polje deformacija i mapa korelacijskih reziduala. Na kraju će biti analizirane pukotine unutar promatranog podvolumena.

### 6.5.1. Izmjerena polja pomaka

U ovom poglavlju su prikazana polja pomaka izmjerena DVC pristupom sa heterogenom regularizacijom. Za DVC analizu je korišten kontrast  $C=4$  i regularizacijska duljina  $l_r=30$  vx. Izmjerena polja pomaka su prikazana u presjeku te u sva tri smjera koordinatnih osi ( $u_x$ ,  $u_y$  i  $u_z$ ). Na Slici 38. a) su prikazana izmjerena polja pomaka u x smjeru. Može se vidjeti lokalizacija negativnih pomaka na vrlo maloj domeni. Na Slici 38. b) je prikazana raspodjela polja pomaka u smjeru osi y. Vidljivo je kako su negativne vrijednosti lokalizirane po cijeloj dužini lijevog ruba presjeka te je vidljiv njihov porast prema suprotnoj strani. Na kraju su još na Slici 38. c) prikazana polja pomaka u smjeru osi z. Iznos pomaka u smjeru osi z se postepeno povećava od donjeg dijelu presjeka u kojemu su vrijednosti negativne pa do pozitivnih u vrhu presjeka.



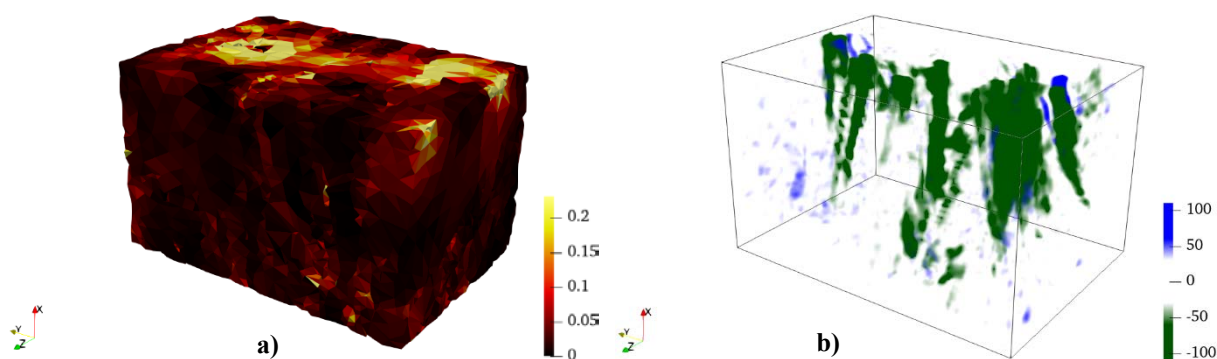
Slika 38. Izmjerena polja pomaka u smjeru a) osi x, b) osi y i c) osi z.



Nakon opisa izmjerenih polja pomaka, moguće je provesti izračun polja najvećih glavnih deformacija. Opis dobivenih deformacija te mape korelacijskih reziduala bit će izvršen u nastavku.

### 6.5.2. Polje najvećih glavnih deformacija i mapa korelacijskih reziduala

Iz polja pomaka, izmjerenih heterogenim DVC pristupom su bila određena polja najvećih glavnih deformacija i mape korelacijskih reziduala. Polje deformacija je prikazano na Slici 39. a), a mapa korelacijskih reziduala na Slici 39. b). Na Slici 39. a) su prikazane deformacije lokalizirane na gornjoj plohi, u smjeru osi  $x$ . Mapa korelacijskih reziduala, prikazana Slikom 39. b) prikazuje najveći broj povišenih vrijednosti u blizine gornje plohe.



Slika 39. a) Polja najvećih glavnih deformacija, b) mapa korelacijskih reziduala za podvolumen skena 1.

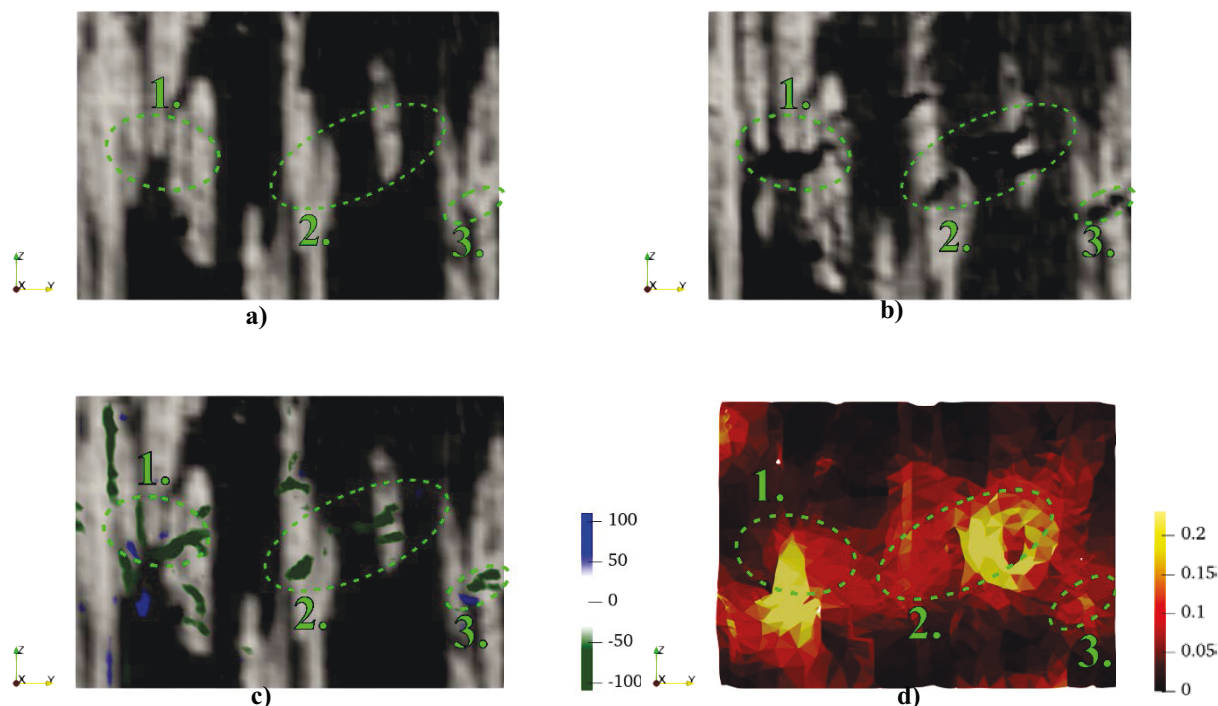
U idućem poglavlju će biti provedena analiza pukotina na presjeku promatranog podvolumena na poziciji  $x=45$  u smjeru osi  $x$ . U istom presjeku bit će prikazana polja najvećih glavnih deformacija i korelacijski reziduali.

### 6.5.3. Analiza oštećenja

Budući da je promatrani volumen izrađen od polimera ojačanog mat staklenim vlaknima, oštećenje je popraćeno nizom različitih pukotina. Kod ove vrste materijala je izazov niz malih pukotina na različitim lokacijama opisati na pouzdan način. U ovom poglavlju će biti prikazan opis pukotina unutar promatranog volumena DVC pristupom sa heterogenom regularizacijom. Analiza je provedena pri kontrastu  $C=4$  te regularizacijskoj duljini  $l_r=30$  vx. Također, bit će prikazana polja najvećih glavnih deformacija u presjeku, korelacijski reziduali preklapljeni sa početnim nedeformiranim presjekom skena 0. Uz to će biti provjerena

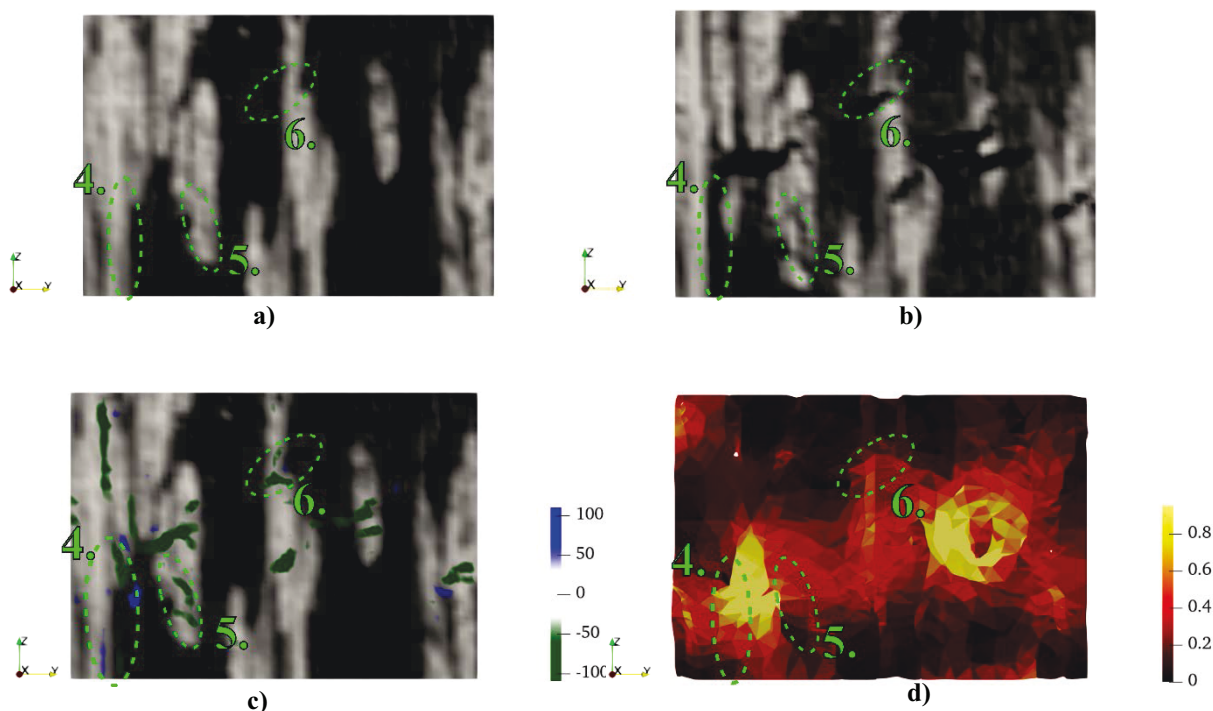
interakcija rezultata sa mikrostrukturom usporedbom presjeka referentnog i deformiranog skena.

Slika 40. a) prikazuje nedeformirani sken 0 visoke kvalitete u presjeku. Na Slici 40. b) je prikazan isti presjek deformiranog skena 1 visoke kvalitete. Slika 40. c) prikazuje korelacijskih reziduala preklopljene sa nedeformiranim skenom 0. Na Slici 40. d) je prikazano polje najvećih glavnih deformacija u presjeku. Na Slici 40. su zelenom isprekidanom elipsom označene 3 zone unutar kojih su nastale pukotine. Spomenute zone su na Slici 40. numerirane brojevima 1.-3. Može se primijetiti kako označene zone pukotina odgovaraju zonama prethodno prikazanim u poglavlju 6.2.4. Kod korelacijskih reziduala, prikazanih Slikom 40. b), su vidljive povišene vrijednosti unutar 1. zone. Na Slici 40. d) polja glavnih deformacija prikazuju u 1. zoni lokalizaciju s povišenim vrijednostima. Na Slici 40. c) su unutar 2. zone prikazane povišene vrijednosti reziduala lokalizirane na području matrice i vlakana na kojima je nastala pukotina. Slika 40. d) prikazuje povišene deformacije lokalizirane unutar cijelog područja 2. zone. Ako se promatra područje 3. zone na Slici 40. d), vidljive su lokalizacije povišenih vrijednosti korelacijskih reziduala unutar zone. Promatra li se presjek polja deformacija prikazanih na Slici 40. d), unutar 3. zone su ponovno vidljive lokalizirane i povišene vrijednosti.



**Slika 40.a) Presjek početnog skena 0, b) presjek deformiranog skena 1, c) korelacijski reziduali preklopljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane elipse su numerirane 1.-3. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine.**

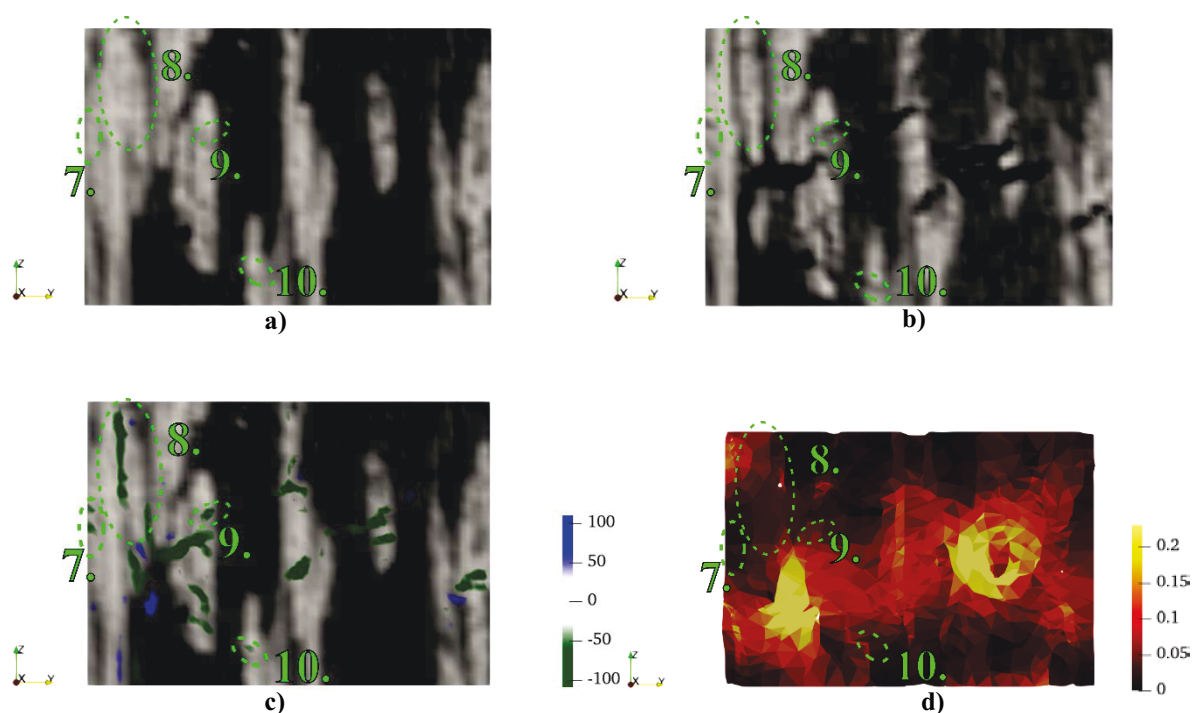
Procedura analize pukotina na promatranoj mezostrukтури se nastavlja na isti način kao i u poglavlju 6.2.4. Slika 41. a) prikazuje presjek skena 0, a Slika 41. b) presjek skena 1. Na Slici 41. c) su prikazani korelacijski reziduali preklopljeni sa odgovarajućom mezostrukturom skena 0, a na Slici 41. d) je prikazan presjek polja glavnih deformacija. Na Slici 41. su označene zone zelenim isprekidanim elipsama te su numerirane 4.-6. Može se uočiti kako promatrane zone odgovaraju zonama koje su opisane u poglavlju 6.2.4. Slika 41. c) prikazuje polja korelacijskih reziduala povišene na vrhu i na dnu 4. zone. Polja deformacija (Slika 41. d)) prikazuju povišene vrijednosti u 4. zoni. Analizom 5. zone može se na Slici 41. c) vidjeti povećanje korelacijskih reziduala unutar tog područja. Nadalje, Slika 41. d) prikazuje povišene vrijednosti najvećih glavnih deformacija u vrhu 5. zone. Isto tako su u nižem području zone vidljive lokalizacije sa nešto nižim vrijednostima. Promatra li se područje unutar 6. zone, na Slici 41. c) su ponovno vidljivi povišeni korelacijski reziduali. Slika 41. d) pokazuje povišena polja deformacija u 6. zoni.



**Slika 41. a) Presjek početnog skena 0, b) presjek deformiranog skena 1, c) korelacijski reziduali preklopljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane elipse su numerirane 4.-6. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine.**

Na Slici 42. su zone pukotina označene zelenim isprekidanim elipsama, označene brojevima 7.-10. Pukotine unutar prikazanih zona odgovaraju zonama prethodno objašnjenim u poglavlju 6.2.4. Slika 42. prikazuje presjeke skena 0 (Slika 42. a)) i skena 1 (Slika 42. b)). Osim toga, vidljivi su korelacijski reziduali preklopljeni sa početnim skenom (Slika 42. c)) te

polja najvećih glavnih deformacija (Slika 42. d)). Korelacijski reziduali su lokalizirani sa povišenim vrijednostima na mjestu pojave pukotine unutar 7. zone (Slika 42. c)). Na polju deformacija vidljiva je lokalizacija povišenih vrijednosti u 7. zoni (Slika 42. d)). Ako se promatra 8. zona, vidljivo je kako polja korelacijskih reziduala označuju povišene vrijednosti unutar promatrane zone. Na Slici 42. d) je vidljivo kako su unutar cijele 8. zone povišenije deformacije. Unutar 9. zone je vidljivo kako su polja korelacijskih reziduala ponovno povišene (Slika 42. c)). Polja deformacija prikazuju malo povišenije vrijednosti u 9. zoni (Slika 42. d)). Na kraju se promatrala 10. zona. Slika 42. c) prikazuje lokalizaciju korelacijskih reziduala unutar 10. zone. Polja deformacija prikazuju malo povišene vrijednosti unutar 10. zone (Slika 42. d)).

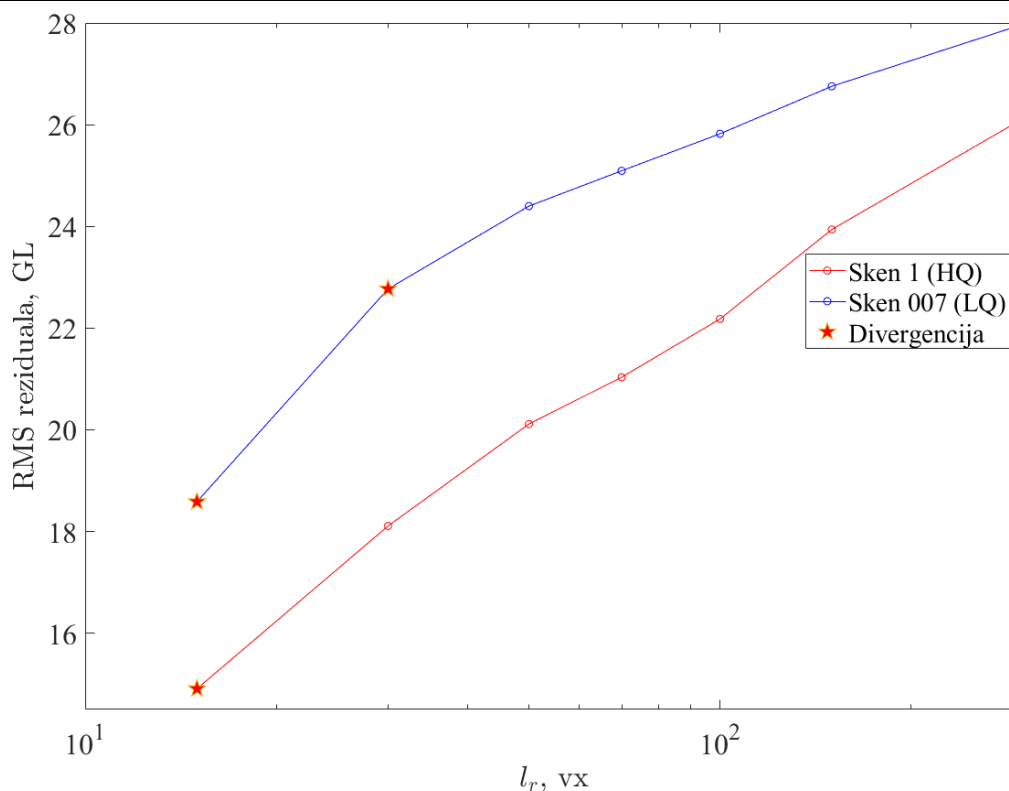


**Slika 42. a) Presjek početnog skena 0, b) presjek deformiranog skena 1, c) korelacijski reziduali preklapljeni sa presjekom skena 0 i d) presjek polja glavnih deformacija. Zelene isprekidane elipse su numerirane 7.-10. i prikazuju zone unutar kojih su nastale pukotine.**

## 7. Detekcija oštećenja u materijalu primjenom heterogeno regulariziranog DVC pristupa

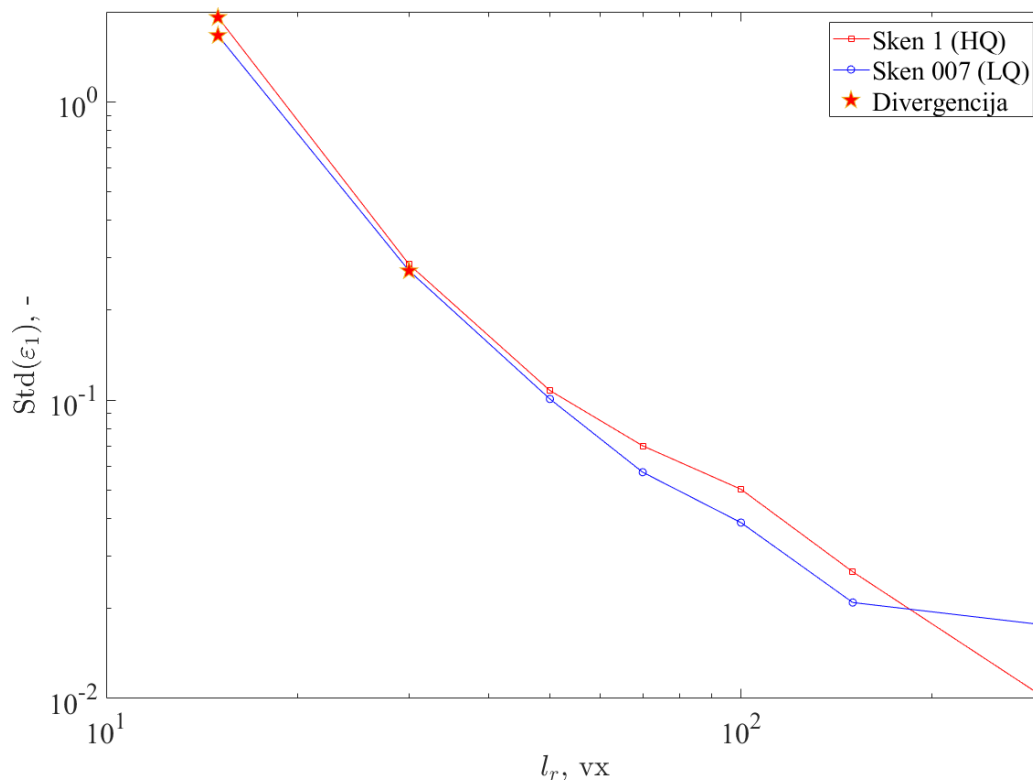
U prethodnom poglavlju su sve analize bile provedene na deformiranom skenu visoke kvalitete (sken 1). U ovom poglavlju će biti provedena DVC analiza deformiranih skenova niske kvalitete 001-007. Na taj način će se provesti analiza kroz cijeli ciklus opterećivanja prikazan na Slici 10. DVC analize će biti provedene sa heterogenom regularizacijom pri kontrastu  $C=4$ . Kao što je prethodno objašnjeno u poglavlju 6.4., ovim kontrastom se dobro opisuje razlika materijalnih svojstava konstituenata, a da istovremeno deformacije u matrici nisu previsoke. Kako bi se analiza oštećenja provela na pravilan način, prvo će biti prikazana usporedba rezultata pri visokoj kvaliteti i niskoj kvaliteti te utjecaj regularizacijske duljine.

Slika 43. prikazuje ovisnost vrijednosti srednjeg korijena pogreške reziduala o regularizacijskoj duljini te o kvaliteti skena. Analize su provedene za 7 različitih regularizacijskih duljina (15 vx, 30 vx, 50 vx, 70 vx, 100 vx, 150 vx i 300 vx) te sa kontrastom  $C=4$ . Prikazani su rezultati za sken niske kvalitete 007 i sken visoke kvalitete 1. Spomenuti skenovi su dobiveni pri istoj razini opterećenja (Slika 10.). Za obje kvalitete je vidljiv porast srednje pogreške reziduala pri porastu regularizacijske duljine. Isto tako može se primijetiti kako su vrijednosti reziduala više za sken niske kvalitete kod svih regularizacijskih duljina. Razlog tomu je veća količina šuma koja se pojavljuje pri skenu niske kvalitete, koji izaziva porast korelacijskih reziduala bez pojave oštećenja u materijalu. Nadalje, na Slici 43. je još prikazana ovisnost divergencije o regularizacijskoj duljini i kvaliteti skena. Vidljivo je kako je analiza skena 1 divergirala samo za najnižu regularizacijsku duljinu (15 vx). S druge strane pri niskoj kvaliteti se divergencija pojavila kod regularizacijskih duljina 15 vx, 30 vx te 300 vx. Ova činjenica upućuje na to da kompleksnost DVC analize raste korištenjem skenova niske kvalitete.



**Slika 43. Korijen srednje pogreške reziduala u ovisnosti o regularizacijskoj duljini i kvaliteti skenova. Ovisnost različitih kvaliteta skenova i regularizacijskih duljina o divergenciji DVC analize ( $C=4$ ).**

Na Slici 44. je prikazana ovisnost standardne devijacije najvećih glavnih deformacija o regularizacijskoj duljini i kvaliteti skena. Rezultati prikazani na Slici 44. i rezultati prethodno prikazani Slikom 43. su dobiveni pri istim analizama. Za obje kvalitete skenova je pri povišenju regularizacijske duljine došlo do pada standardne devijacije deformacija. Isto tako Slika 44. prikazuje koje su od provedenih analiza konvergirale te se mogu izvesti isti zaključci koji su prethodno predstavljeni za Sliku 43. Vidljivo je kako su za sve regularizacijske duljine vrijednosti standardne devijacije deformacija niže pri nižoj kvaliteti, osim pri najvećoj vrijednosti ( $l_r=300$  vx). Potrebno je napomenuti kako pri toj analizi konvergencija nije bila uspješna za sken niske kvalitete (sken 007). Za regularizacijske duljine 15 vx, 30 vx i 50 vx su razlike standardnih devijacija vrlo male te njihova razlika poraste sa posljednje 4 regularizacijske duljine (70 vx, 100 vx, 150 vx i 300 vx). Iz toga se može zaključiti kako se nagle promjene vrijednosti deformacija između različitih konstituenata mogu bolje opisati skenovima visoke kvalitete.



**Slika 44. Standardna devijacija deformacija u ovisnosti o regularizacijskoj duljini i kontrastu. Ovisnost različitih kvaliteta skenova i regularizacijskih duljina o divergenciji DVC analize.**

Kao što je već bilo prikazano u poglavlju 6.2.1. i poglavlju 6.4., niže regularizacijske duljine bolje opisuju lokalizacije najvećih glavnih deformacija. Kako bi se čim bolje opisala oštećenja koja karakteriziraju polimere ojačane vlaknima, za daljnju analizu će biti korištena regularizacijska duljina od 50 vx. Iz Slike 43. i Slike 44. se moglo vidjeti kako je to najniža regularizacijska duljina pri kojoj je DVC analiza konvergirala. Prema tome, u nastavku će biti provedena analiza oštećenja u skenovima kroz različite cikluse opterećivanja.

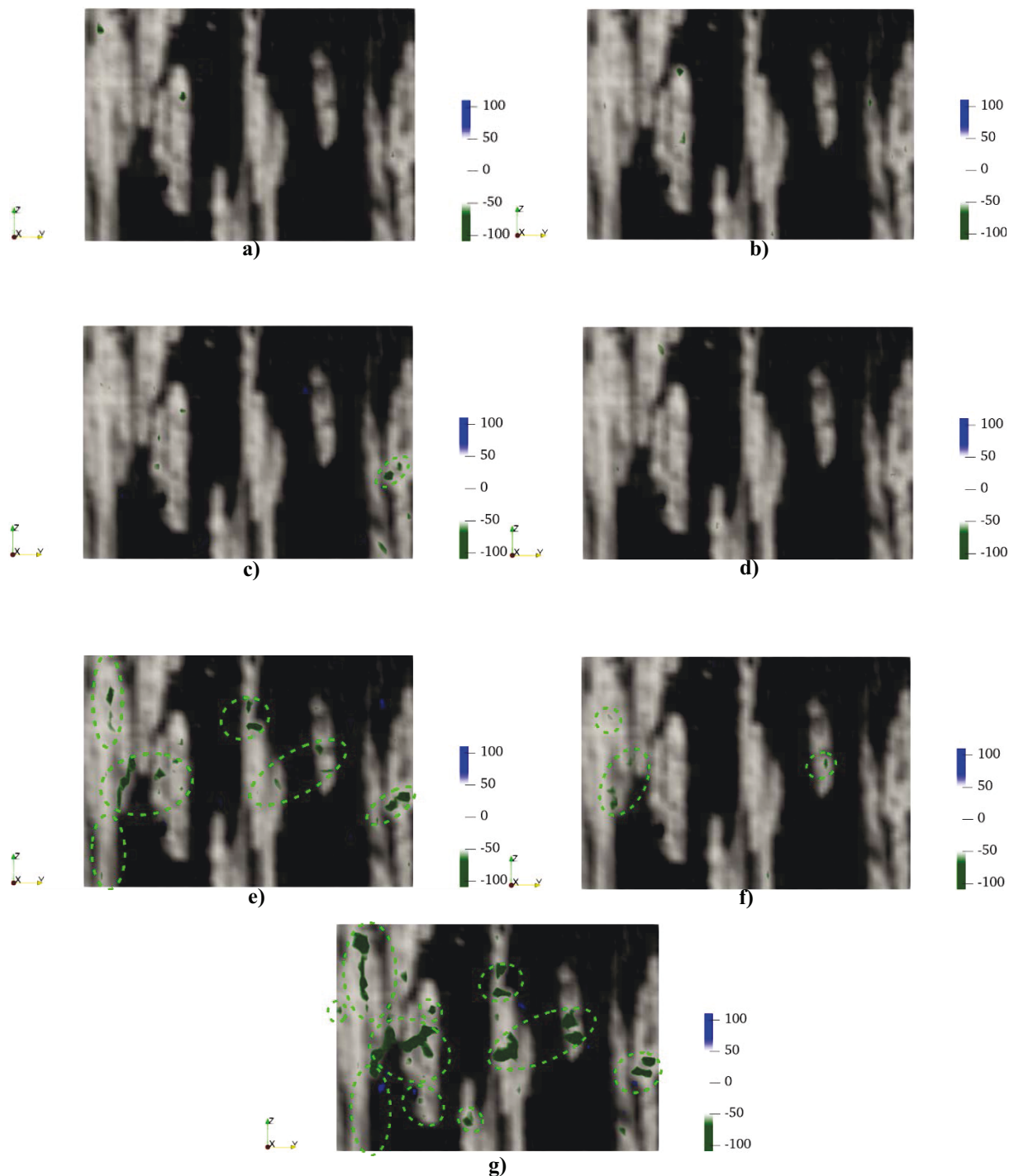
### 7.1. Analiza oštećenja kod različitih ciklusa opterećivanja

U ovom poglavlju će biti provedena analiza oštećenja pri ciklusima opterećivanja prethodno prikazanim na Slici 10. Skenovi za odgovarajuće cikluse opterećivanja, a na kojima će se provoditi analiza oštećenja su označeni brojevima 001-007. Svi skenovi na kojima će se provoditi DVC analiza su dobiveni pri niskoj kvaliteti. Kao što je već spomenuto u prethodnom poglavlju, sve analize će biti provedene pri heterogenoj regularizaciji uz vrijednost kontrasta  $C=4$  te regularizacijske duljine  $l_r=50$  vx. Analiza oštećenja je ponovno provedena na podvolumenu prikazanom u poglavlju 6.1. Isto tako, svi rezultati će ponovno biti prikazani u presjeku, čija je pozicija 45 vokselu u smjeru osi  $x$ , prema orijentaciji koordinatnog sustava prikazanog Slikom 23.

Za početak se analiza oštećenja provodila na poljima korelacijskih reziduala, prikazanim na Slici 45. Prvi ciklus opterećivanja se provodio pri opterećenju čija vrijednost odgovara 25% vlačne čvrstoće. Ovaj ciklus opterećivanja je zabilježen skenom 001. Na Slici 45. a) su prikazani korelacijski reziduali dobiveni analizom skena 001, pre kloppljeni sa početnim skenom 0. Iako Slika 45. a) prikazuje povišene rezidualne u određenim dijelovima presjeka, no oni su zanemarivi. Naime, procedurom usporedbe referentnog i deformiranog skena, koja je prethodno objašnjena u poglavlju 6.2.4. i 6.5.3., može se zaključiti kako je do povišenja reziduala došlo zbog niske kvalitete promatranog skena. Pri skenovima niske kvalitete se pojavljuje povećani šum, koji može izazvati povišenje reziduala bez prisutnosti pukotina. Slična pojava se može vidjeti na Slici 45. b), koja prikazuje korelacijske rezidualne za slučaj prvog rasterećivanja uzorka (sken 002). Ponovno su vidljiva mala povišenja korelacijskih reziduala do kojih dolazi zbog šuma. Slika 45. c) prikazuje korelacijske rezidualne dobivene pri drugom ciklusu opterećivanja pri kojem je vrijednost opterećenja odgovarala 50% vlačne čvrstoće materijala. Kod ovog ciklusa opterećivanja je dobiven sken 003. U ovom slučaju je došlo do inicijacije prvih pukotina. Zona pukotina je označena na Slici 45. c) zelenom isprekidanom elipsom te su unutar te zone vidljivi povišeni korelacijski reziduali. Promatra li se dalje Slika 45. d), vidljivo je kako korelacijski reziduali u spomenutoj zoni iščezavaju te su vidljivi samo reziduali izazvani šumom. Korelacijski reziduali prikazani Slikom 45. d) su dobiveni analizom skena 004. Nakon toga se promatrao slučaj trećeg ciklusa opterećivanja, koji je bio zabilježen skenom 005. Kod ovog ciklusa je opterećenje bilo ekvivalentno 75% vlačne čvrstoće materijala. Korelacijski reziduali za ovaj ciklus opterećivanja su prikazani Slikom 45. e), a zone unutar kojih su nastale pukotine su označene zelenim isprekidanim elipsama. Vidljivo je kako je došlo do povećanja korelacijskih reziduala u zoni koja je prethodno bila prikazana Slikom 45. c). Time se može zaključiti kako je na toj lokaciji došlo do proširenja pukotine. Osim toga, može se primijetiti 5 dodatnih zona unutar kojih su korelacijski reziduali povišeni. Ove zone označuju područja unutar kojih je došlo do inicijacije novonastalih pukotina. Na Slici 45. f) prikazani su korelacijski reziduali dobiveni pri trećem ciklusu rasterećivanja (sken 006). Postupkom usporedbe referentnog i deformiranog presjeka skena je ustanovljeno kako je u zonama označenim zelenim isprekidanim elipsama došlo do trajnog oštećenja. To znači da su u prethodnom ciklusu opterećivanja izazvane trajne plastične deformacije. Ova pojava se može vidjeti i na grafu prikazanom Slikom 15. Na kraju su još prikazani rezultati za sken 007, koji je dobiven kod četvrtog ciklusa opterećivanja. Taj ciklus se provodio pri opterećenju koje odgovara vrijednosti od 90% vlačne čvrstoće. Na Slici 45. g) su prikazani korelacijski reziduali dobiveni analizom skena 007 prekloppljeni sa početnim skenom 0. Zelenim isprekidanim elipsa-

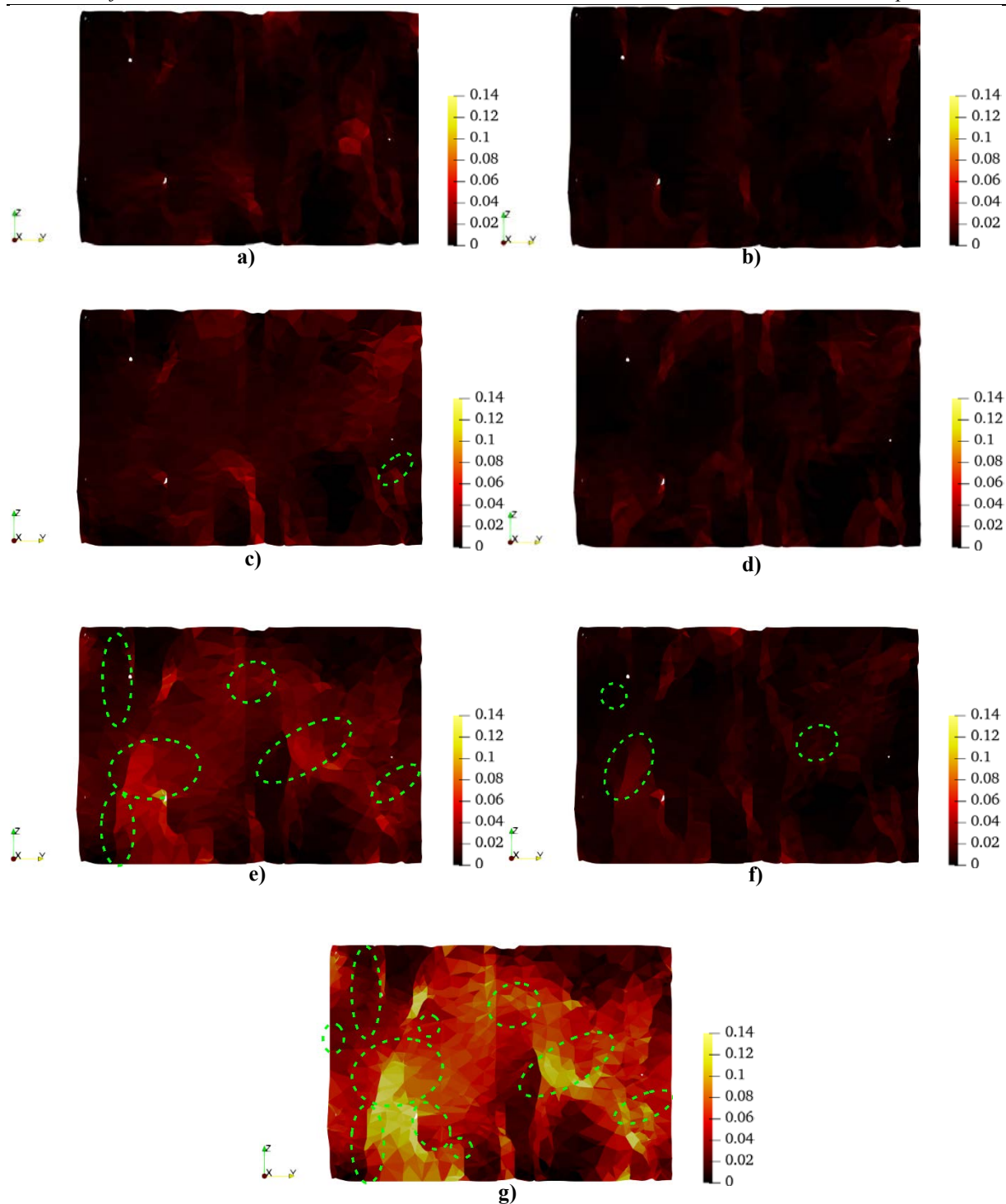


ma su označene sve zone pukotina koje su bile vidljive pri tom ciklusu opterećivanja. Vidljivo je kako je došlo do povećanja korelacijskih reziduala u zonama koje su već prethodno bile prikazane Slikama 45. c), e) i f). Iz toga se može zaključiti kako je ponovno došlo do proširenja i rasta pukotina u promatranim zonama. Osim toga, na Slici 45. g) su vidljive i zone novonastalih pukotina te se može primijetiti porast korelacijskih reziduala u tim zonama.



**Slika 45. Korelacijski reziduali preklapljeni sa početnim skenom 0 za a) sken 001, b) sken 002, c) sken 003, d) sken 004, e) sken 005, f) sken 006 i g) sken 007. Zelene elipse označuju zone unutar kojih su nastale pukotine.**

Daljnja analiza oštećenja se provodila na poljima najvećih glavnih deformacija. Slika 46. prikazuje presjeke polja najvećih glavnih deformacija dobivenih provedbom DVC analize za skenove 001-007. Svi skenovi su dobiveni pri ciklusima opterećivanja koji su prethodno bili opisani za polja korelacijskih reziduala prikazana Slikom 45. Na početku je Slici 46. a) prikazan presjek polja najvećih glavnih deformacija dobivenih analizom skena 001. Vidljive su lokalizacije sa niskim vrijednostima. Slika 46. b) prikazuje deformacije za sken 002 te je vidljivo kako je pri rasterećenju uzorka došlo do sniženja deformacija. Na Slici 46. c) je prikazan slučaj drugog ciklusa opterećivanja zabilježenog skenom 003. Ponovno je zona u kojoj su nastale pukotine označena zelenom isprekidanom elipsom. Unutar promatrane zone je vidljivo kako je došlo do malog povišenja deformacija. Na Slici 46. d) su prikazane deformacije za sken 004 te se može primijetiti kako su lokalizacije, prethodno prikazane Slikom 46. c), iščeznule. Isto tako su u određenim dijelovima presjeka vidljive zaostale deformacije. Nadalje, Slikom 46. e) je prikazano polje deformacija za sken 005. U ovom slučaju je vidljivo povišenje deformacija u cijelom presjeku te se lokalizacije s povišenim vrijednostima mogu jasnije vidjeti. Sukladno tome, došlo je do pojave većeg broja zona pukotina označenih zelenim elipsama na Slici 46. e). U sljedećem ciklusu rasterećenja zabilježenom skenom 006 vidljive su značajne zaostale deformacije (Slika 46. f)). Na Slici 46. f) su zelenim elipsama označena područja unutar kojih su nastale trajne pukotine. Na kraju je još analizirano polje deformacija za posljednji ciklus opterećivanja (sken 007). Polja deformacija za taj ciklus opterećivanja su prikazana na Slici 46. g). Vidljivo je povećanje vrijednosti deformacija po cijelom presjeku te je vidljivo povećanje broja zona lokalizacija povišenih deformacija. Isto tako, na Slici 46. g) je zelenim isprekidanim elipsama označeno 10 zona unutar kojih su bile vidljive pukotine. Unutar zona većih pukotina su vidljive lokalizacije povišenih vrijednosti deformacija. Kod zona manjih pukotina su deformacije malo niže. Isto tako, treba napomenuti kako je analiza provedena pri relativno velikoj vrijednosti regularizacijske duljine ( $l_r=50$  vx). Zbog toga prikazane lokalizacije nisu idealne. Prema tome je kod analize pukotina potrebno uzeti u obzir korelacijske reziduale, prethodno prikazane Slikom 45.



Slika 46. Polja najvećih glavnih deformacija za a) sken 001, b) sken 002, c) sken 003, d) sken 004, e) sken 005, f) sken 006 i g) sken 007. Zelene elipse označuju zone unutar kojih su nastale pukotine.

## 8. Zaključak

U ovom radu je bilo potrebno implementirati mehaničku regularizaciju u analizu oštećenja heterogenog materijala. Analiza oštećenja se provodila na 3D volumenu epoksidne smole ojačane mat staklenim vlaknima. Za dobivanje 3D volumena tijekom *in-situ* cikličkog testa korištena je računalna tomografija rendgenskih zraka [7]. 3D skenovi dobiveni na taj način su omogućili provedbu globalne DVC analize, koja je provedena algoritmom *Correli 3.0* [9]. Mjerna nesigurnost je dobivena provedbom analize između 2 skena visoke i niske kvalitete u neopterećenom stanju. Nadalje, provedena je analiza oštećenja između referentnog i deformiranog skena visoke kvalitete iz koje su dobivene mape korelacijskih reziduala te polja najvećih glavnih deformacija. Provedena analiza je omogućila identifikaciju mehanizama oštećenja. Na temelju polja deformacija te korelacijskih reziduala ustanovljeno je kako je najkritičniji dio uzorka zarez te područje oko zareza. Kako bi se mogla uvesti heterogena regularizacija bilo je potrebno odabrati jedan manji pod-volumen. Budući da je najkritičniji dio zarez uzorka, u tom području je i odabran pod-volumen za daljnju analizu.

Na temelju mikrostrukture promatranog pod-volumena provedena je segmentacija te je izrađena mreža konačnih elemenata. Izrada takve mreže je omogućila zadavanje različitih materijalnih svojstava vlakana i matrice. Materijalna svojstva su definirana kontrastom, koji predstavlja omjer modula elastičnosti vlakna i matrice. Na taj način je omogućena implementacija mehaničke regularizacije temeljene na heterogenoj mikrostrukтури. Za bolje predočenje utjecaja heterogene regularizacije, prvo je analiza provedena na promatranom pod-volumenu sa homogenom regularizacijom. Ovakva analiza odgovara standardnom DVC pristupu. Analiza je provedena između referentnog i deformiranog skena visoke kvalitete. Prvo je promatran utjecaj različitih regularizacijskih duljina na polja deformacija dobivena standardnim DVC pristupom. Zaključeno je kako smanjenje regularizacijske duljine dovodi do smanjenja područja lokalizacija deformacija (tj. dolazi do naglašavanja zona visokih deformacija). Osim toga, smanjenje regularizacijske duljine je dovelo i do povećanja vrijednosti deformacija. Nakon toga je provedena analiza oštećenja u promatranom pod-volumenu. Za analizu pukotina je korištena regularizacijska duljina  $l_r=30$  vx jer je zaključeno kako najbolje opisuje lokalizacije koje su prisutne u promatranom materijalu. Kako bi se pojednostavio prikaz rezultata, analiza oštećenja je provedena u samo jednom presjeku pod-volumena. U promatranom presjeku su bili prikazani korelacijski reziduali, polja najvećih glavnih deformacija. Naime, kako bi odredili ponašanje mikrostrukture uslijed narinutog opterećenja promatran je presjek referentnog i deformiranog skena u interakciji s izmjerenim poljima

deformacija i mapama korelacijskih reziduala. Uočeno je 10 karakterističnih zona pukotina. Osim toga, prikazano je kako korelacijski reziduali rezultiraju povišenim vrijednostima u karakterističnim zonama. Polja deformacija su rezultirala povišenim vrijednostima lokalizacija u zonama najvećih pukotina. U zonama manjih pukotina su lokalizirane vrijednosti deformacija rezultirale nižim vrijednostima.

Nadalje, promatran je utjecaj heterogene regularizacije te je ispitan utjecaj različitih vrijednosti kontrasta na rezultate DVC analize. Zaključeno je kako povišene vrijednosti kontrasta rezultiraju porastom lokalizacija deformacija u matrici te sniženjem deformacija u vlaknima. Kako bi se dovoljno dobro opisala razlika između konstituenata, a da istovremeno ne dođe do nerealno visokih vrijednosti deformacija u matrici, za daljnju analizu je bio korišten kontrast  $C=4$ . Pri navedenoj vrijednosti kontrasta je promatran utjecaj različitih regularizacijskih duljina na polja glavnih deformacija. Iz provedene analize slijede slični zaključci onima kod analize s homogenom regularizacijom. Deformacije su bile lokalizirane na manjem području sa višim vrijednostima. Za daljnju analizu pukotina je ponovno odabrana regularizacijska duljina  $l_r=30$  vx jer ima najmanji utjecaj na ograničavanje kinematike polja pomaka. Još je uz to zaključeno kako će zbog velikog broja različitih pukotina DVC analiza divergirati pri visokim vrijednostima kontrasta i niskim vrijednostima regularizacijske duljine. Nadalje je bila provedena analiza pukotina u promatranom pod-volumenu. Pukotine su opisane korelacijskim rezidualima, te poljima najvećih glavnih deformacija. Ponovno je provedena usporedba referentnog i deformiranog presjeka sa dobivenim rezultatima. Na promatranom presjeku je uočeno 10 zona pukotina unutar kojih su bila vidljiva povišenja korelacijskih reziduala. Uz to su bile prikazane lokalizacije povišenih deformacija u zonama većih pukotina, te malo niže deformacije u zonama manjih pukotina. Na kraju je bila provedena analiza oštećenja kroz različite cikluse opterećivanja. Za analizu je korištena heterogena regularizacija sa kontrastom  $C=4$  i regularizacijskom duljinom  $l_r=50$  vx. U ovom dijelu su analizirani i skenovi niske kvalitete. Uočeno je kako je uspješnost konvergencije DVC analize smanjena kod analiza skenova niže kvalitete. Promatrane su promjene korelacijskih reziduala te deformacije kroz različite cikluse opterećivanja. Zaključeno je kako skenovi niske kvalitete rezultiraju s više šuma pa se zbog toga kod nižih opterećenja mogu pojaviti povišeni reziduali bez pojave oštećenja. Ipak, kod vrijednosti opterećenja koje izazivaju oštećenja su u zonama pukotina karakterizirane s izrazito povišenim vrijednostima reziduala. Isto tako primijećeno je kako povišene vrijednosti korelacijskih reziduala iščezavaju kod svih ciklusa rasterećivanja uzorka, osim slučaja kada se su veličine pukotina značajno porasle. Polja deformacija, također,

prikazuju lokalizacije pri različitim ciklusima opterećivanja te njihov nestanak kod rasterećenja. Iščezavanje lokalizacije deformacija u neopterećenim režimima povijesti opterećenja uzrokovani su zatvaranjem mikropukotina. Isto tako poljima deformacija su bile prikazane lokalizacije sa povišenim vrijednostima za velike pukotine, i manje lokalizacije za male pukotine. Razlog tomu je relativno visoka duljina mehaničke regularizacije korištena za ovu vrstu analize. Stoga je potrebno uzeti u obzir i korelacijske rezidualne koji dobro opisuju pojavu oštećenja.

**LITERATURA**

- [1] Prashanth S, Km S, Nithin K, Sachhidan . Fiber reinforced composites - a review. *J Material Sci Eng* 2017.; 6:1–6.
- [2] Vrgoč A., Tomičević Z., Smaniotto B., Hild F.: Application of different imaging techniques for the characterization of damage in fiber reinforced polymer, University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 2021.
- [3] Smojver I.: *Mehanika kompozitnih materijala*, Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2007.
- [4] Brunner A.: Identification of damage mechanisms in fiber-reinforced polymer-matrix composites with acoustic emission and the challenge of assessing structural integrity and service-life. *Constr Build Mater* 2018.; 173:629–37.
- [5] Muc A, Barski M, Chwał M, Romanowicz P, Stawiarski A. Fatigue damage growth monitoring for composite structures with holes. *Compos Struct* 2018;189:117–26.
- [6] Kolanu NR, Raju G, Ramji M. Damage assessment studies in cfrp composite laminate with cut-out subjected to in-plane shear loading. *Compos Part B Eng* 2019;166:257–71.
- [7] Ngo T.: *Introduction to Composite Materials, Biomass Conversion and Processing Technologies*, Canada, 2016.
- [8] Bay B. K.: *Methods and applications of digital volume correlation*, Department of Mechanical Engineering, Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA, 2008.
- [9] Leclerc H, Neggers J, Mathieu F, Hild F, Roux S. *Correli 3.0*. IDDN.FR.001.520008.000.S.P.2015.000.31500; Agence pour la Protection des Programmes, Paris (France); 2015.
- [10] *Iso2mesh documentation*, 2021.
- [11] Masuelli M.: *Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes*, Universidad Nacional de San Luis-Instituto de Fisica Aplicada-CONICET, San Luis 2013.
- [12] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [13] Ilankeeran P., Mohite P., Kamle S.: *Axial Tensile Testing of Single Fibres*
- [14] Jolliveta T., Peyracb C., Lefebvreb F.: *Damage of composite materials*, Senlis, 2013.
- [15] Bolf D., Zamarin A., Basan R.: *Composite Material Damage Processes*, University of Rijeka, Faculty of Engineering, Rijeka, 2020.

- [16] Vrgoč A., Tomičević Z., Smaniotto B., Hild F.: Damage characterization in fiber reinforced polymer via Digital Volume Correlation, Laboratory of Experimental Mechanics, University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb 2019.
- [17] Mazi K., Tozzi G., Zhang Q., Jong J., Cossey A., Au A., Hollis D., Hild F.: Computation of full-field displacements in a scaffoldimplant using Digital Volume Correlation and FiniteElement Analysis, Mechanical Behaviour of Materials Laboratory, University of Portsmouth, UK, 2013.
- [18] Hild F, Bouterf A, Chamoin L, Mathieu F, Neggers J, Pled F, et al. Toward 4d mechanical correlation. *Adv Mech Simul Eng Sci* 2016.; 3(1):1–26.
- [19] Leclerc H, Neggers J, Mathieu F, Hild F, Roux S. Correli 3.0. IDDN.FR.001.520008.000.S.P.2015.000.31500; Agence pour la Protection des Programmes, Paris (France); 2015.
- [20] Hild F, Roux S. Comparison of local and global approaches to digital image correlation *Exp Mech* 2012.; 52:1503–19.
- [21] Tomičević Z, Hild F, Roux S. Mechanics-aided digital image correlation. *J Strain Anal Eng Des* 2013.; 48:330 –43.
- [22] Leclerc H, Perie J, Hild F, Roux S. Digital volume correlation: What are the limits to the spatial resolution?, *Mech & Indust* 2012;13:361–71.
- [23] Mendoza A, Neggers J, Hild F, Roux S. Complete mechanical regularization applied to digital image and volume correlation. *Comput Method Appl M* 2019.; 355:27–43.
- [24] Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., Kaynig V., Longair V., Pietzsch T., Preibisch S., Rueden C., Saalfeld S., Schmid B., Tinevez J., White D., Hartenstein V., Eliceiri K., Cardona A.: Fiji - an Open Source platform for biological image analysis, 2019.
- [25] Hild F, Bouterf A, Chamoin L, Mathieu F, Neggers J, Pled F, et al. Toward 4d mechanical correlation. *Adv Mech Simul Eng Sci* 2016.;3(1):1–26.
- [26] Buljac, A., Jailin, C., Mendoza, A., Neggers, J., Taillandier-Thomas, T., Bouterf, A., Smaniotto, B., Hild, F., Roux, S. (2018b), “Digital Volume Correlation: Review of Progress and Challenges”, *Exp. Mech.*, 58, 661-708.
- [27] Kollar L., Springer G.: *Mechanics of composite structures*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.