

Razvoj metode in-situ mehaničkoga ispitivanja vlaknima ojačanih polimera korištenjem računalne tomografije

Bartulović, Ante

Doctoral thesis / Disertacija

2024

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:235:070687>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-01**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Ante Bartulović

**RAZVOJ METODE IN-SITU
MEHANIČKOGA ISPITIVANJA
VLAKNIMA OJAČANIH POLIMERA
KORIŠTENJEM RAČUNALNE
TOMOGRFIJE**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Ante Bartulović

**RAZVOJ METODE IN-SITU
MEHANIČKOGA ISPITIVANJA
VLAKNIMA OJAČANIH POLIMERA
KORIŠTENJEM RAČUNALNE
TOMOGRAFIJE**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Tomičević

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture

Ante Bartulović

**DEVELOPMENT OF AN IN-SITU
MECHANICAL TESTING METHOD OF
FIBER REINFORCED POLYMERS USING
COMPUTED TOMOGRAPHY**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

Prof. Zvonimir Tomičević, PhD

Zagreb, 2024.

Podaci za bibliografsku karticu UDK:

- Ključne riječi: vlaknima ojačani polimeri
računalna tomografija
metoda korelacije digitalnih volumena
standardna mjerna nesigurnost
in-situ mehanička ispitivanja
- Znanstveno područje: Tehničke znanosti
- Znanstveno polje: Strojarsvo
- Institucija: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i
brodogradnje
- Mentor: Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Tomičević
- Broj stranica: 229
- Broj slika: 132
- Broj tablica: 31
- Broj korištenih bibliografskih jedinica: 146
- Datum obrane: 25. 10. 2024
- Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu
dokorskog rada: Izv. prof. dr. sc. Darko Ivančević – predsjednik
Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Tomičević – član
Prof. dr. sc. Lovre Krstulović-Opara – vanjski
član
- Institucija u kojoj je rad pohranjen: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i
brodogradnje

ZAHVALA

Najiskrenije se zahvaljujem svom mentoru izv. prof. dr. sc. Zvonimiru Tomičeviću na stručnoj i osobnoj potpori, poticajima i savjetima pružanim u svakom trenutku izrade ovog rada.

Također zahvaljujem članovima *Povjerenstva za ocjenu i obranu doktorskog rada* izv. prof. dr. sc. Darku Ivančeviću i prof. dr. sc. Lovri-Krstuloviću-Opari koji su svojim komentarima i prijedlozima poboljšali kvalitetu disertacije, kao i prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu koji je u praćenje mojeg istraživanja bio uključen do faze obrane preliminarne teme.

Srdačno se zahvaljujem gospodi iz *Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT – Cachan)* Francoisu Hildu i Benjaminu Smaniottu na savjetima i angažmanu vezanom uz skeniranje ispitnih uzoraka. Zahvalnost također dugujem firmi *Yazaki Europe Limited* kod koje izvršen prvi dio skeniranja, zatim prof. dr. sc. Tatjani Haramini i Mireli Petranović koji su u *Laboratoriju za polimere i kompozite* proveli test spaljivanja ispitnih uzoraka. Dodatno zahvaljujem firmi *HSTec d.d.* koja je proizvela *in-situ* kidalicu korištenu u drugom dijelu istraživanja te firmi *Probotika d.o.o.* koja je pomogla s pripremom kidalice za provođenje mehaničkih testova.

Iskreno se zahvaljujem zaposlenicima s *Katedre za eksperimentalnu mehaniku* Andriji Zaplatiću i Gordanu Plačku na podršci i savjetima te kolegi Gabrijelu Mađeriću koji je u sklopu svog diplomskog rada imao veliku ulogu u razvoju *in-situ* kidalice.

Posebno se želim zahvaliti firmi *HSTec d.d.* na preuzimanju dijela troškova mojeg doktorskog studija, kao i bivšim kolegama na kontinuiranoj podršci prilikom pisanja ovog rada. Isto tako, zahvaljujem bivšim kolegama iz firme *INETEC d.o.o.* Vinku Majiću, Josipi Pribanić i Matiji Roginiću na preuzimanju obveza u firmi tijekom izrade rada.

Koristim također priliku da zahvalim prijateljima i kolegama Anti Marušiću, Luki Bobanu, Anti Buljcu, Rajku Todiću i Anti Bakiću na pruženim savjetima i potpori tijekom izrade disertacije.

Posebnu zahvalnost želim izraziti svojoj obitelji – roditeljima Zdravku i Nediljki te braći Vicku i Ivanu.

Na kraju, najveću zahvalnost dugujem supruzi Josipi, kćeri Petri i sinu Gabrijelu. Josipina podrška i razumijevanje bili su moj oslonac kroz cijeli period pisanja rada, a Petra i Gabrijel su mi svojim osmijesima i prisutnošću davali snagu i inspiraciju.

POSEBNA ZAHVALA

Želim izraziti zahvalnost Hrvatskoj zakladi za znanost, koja je financirala istraživanje provedeno u ovom doktorskom radu u okviru projekta „Promatranje, identifikacija i kvantifikacija mehanizama mehaničkog oštećenja na kompozitima ojačanim staklenim vlaknima primjenom različitih metoda nerazornog ispitivanja“ (FULLINSPECT, UIP-2019-04-5460), pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Zvonimira Tomičevića.

SADRŽAJ

Predgovor	IV
Sažetak	V
Summary	VII
Popis slika	IX
Popis tablica	XVIII
Popis oznaka	XX
Popis kratica	XXIII
1. Uvod	1
1.1 Motivacija.....	1
1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja.....	3
1.2. Ciljevi i hipoteze istraživanja	7
1.3. Očekivani znanstveni doprinos.....	7
1.4. Struktura rada	7
2. Računalna tomografija X-zrakama	11
2.1. Uvod	11
2.2. Provedba skeniranja primjenom računalne tomografije X-zrakama	12
2.3. Izvedba laboratorijskih CT uređaja	13
2.4. Princip rada računalne tomografije.....	15
2.5. Artefakti.....	22
2.5.1. Artefakti otvrdnjivanja zračenja	22
2.5.2. Prstenasti artefakti	24
2.5.3. Artefakti pokreta	25
2.5.4. Artefakti raspršivanja	25
2.6. Utjecaj šuma na kvalitetu skeniranja	26
2.7. Klasifikacija CT uređaja.....	27
2.7.1. Utjecaj fizikalne veličine vokselna na rezoluciju CT skeniranja	28
2.7.2. Primjena računalne tomografije X-zrakama kod vlaknima ojačanih polimera ..	29
2.8. Mehanička ispitivanja primjenom računalne tomografije X-zrakama	30
2.8.1. Ex-situ mehaničko ispitivanje uz primjenu računalne tomografije.....	32
2.8.2. In-situ mehaničko ispitivanje uz primjenu računalne tomografije.....	34
2.9. Kidalice za in-situ mehanička ispitivanja primjenom računalne tomografije	38
2.9.1. In-situ kidalice s cjevastom potporom	38
2.9.2. In-situ kidalice s traverzama	46
3. Korelacija digitalnih volumena	49

3.1.	Uvod	49
3.2.	Korelacija digitalne slike	49
3.3.	Korelacija digitalnih volumena	53
3.3.1.	Lokalni DVC pristup	55
3.3.2.	Globalni DVC pristup	57
3.3.3.	Regularizirani DVC.....	61
3.4.	Mjerna nesigurnost DVC metode	63
3.4.1.	Utjecaj prostorne rezolucije DVC metode na mjernu nesigurnost.....	65
3.4.2.	Utjecaj ostalih faktora na mjernu nesigurnost DVC metode.....	69
3.4.3.	Mjerna nesigurnost DVC metode pri in-situ XCT ispitivanju FRP materijala ..	73
4.	Vlaknima ojačani polimeri	75
4.1.	Uvod	75
4.2.	Osnovne kategorije i karakteristike vlaknima ojačanih polimera	75
4.3.	Mehanizmi oštećenja u vlaknima ojačanim polimerima	81
4.3.1.	Pucanje matrice i odvajanje matrice i vlakna.....	81
4.3.2.	Delaminacija.....	82
4.3.3.	Lom vlakna.....	82
4.4.	Vinilesterska smola ojačana staklenim vlaknima različite arhitekture.....	83
4.4.1.	Vinilesterska smola ojačana staklenim vlaknima MAT arhitekture	86
4.4.2.	Vinilesterska smola ojačana staklenim vlaknima UD arhitekture	92
4.4.3.	Vinilesterska smola ojačana staklenim vlaknima WF arhitekture	98
4.4.4.	Vinilesterska smola ojačana staklenim vlaknima AP arhitekture	103
5.	Određivanje utjecaja arhitekture vlakana na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode kod ispitivanja staklenim vlaknima ojačanih polimera	110
5.1.	Ispitni uzorci	110
5.2.	Eksperimentalni protokol	111
5.3.	Mjerenje 3D polja pomaka	115
5.4.	Određivanje mjerne nesigurnosti DVC metode.....	123
5.4.1.	Procjena mjerne nesigurnosti standardnog DVC protokola.....	126
5.4.2.	Procjena mjerne nesigurnosti regulariziranog DVC protokola	133
5.5.	Zaključak i diskusija.....	139
6.	Određivanje utjecaja ispitnog okruženja na mjernu nesigurnost DVC metode i ispitivanje ponašanja materijala kod in-situ mehaničkog ispitivanja	143
6.1.	Određivanje utjecaja materijala cjevaste potpore in-situ ispitnog uređaja na mjernu nesigurnost DVC metode	144

6.1.1.	Eksperimentalni postav	145
6.1.2.	Ispitni uzorak.....	146
6.1.3.	Provedba eksperimentalnog istraživanja.....	146
6.1.4.	Mjerenje 3D polja pomaka i određivanje standardne mjerne nesigurnosti DVC metode ovisno o ispitnom okruženju	152
6.2.	Određivanje relaksacije naprezanja cjevaste potpore i vinilesterske smole ojačane različitom arhitekturom vlakana kod in-situ mehaničkih ispitivanja	159
6.2.1.	Eksperimentalni postav i mjerna oprema	161
6.2.2.	Ispitni uzorci.....	164
6.2.3.	Provedba ispitivanja	165
6.2.4.	Rezultati ispitivanja.....	167
6.3.	Zaključak i diskusija.....	170
7.	Određivanje utjecaja akvizicijskih parametara skeniranja na mjernu nesigurnost DVC metode	176
7.1.	Ispitni uzorak	177
7.2.	Provedba eksperimentalnog istraživanja	177
7.3.	Mjerenje 3D polja pomaka i određivanje mjerne nesigurnosti DVC metode kod skenova različite kvalitete	180
7.4.	Zaključak i diskusija.....	184
8.	Zaključak	188
8.1.	Znanstveni doprinos	192
8.2.	Buduća istraživanja.....	193
	Popis literature	195
	Životopis	204
	Curriculum vitae	205

PREDGOVOR

Računalna tomografija u kombinaciji s metodom korelacije digitalnih volumena pokazuje izniman potencijal kod istraživanja ponašanja vlaknima ojačanih polimera. Kompleksno ponašanje ovih heterogenih i anizotropnih materijala pri različitim uvjetima opterećenja nije dovoljno istraženo, a konvencionalne metode ne pružaju kompletan uvid u nastanak i rast oštećenja unutar ove vrste materijala. Naime, primjenom konvencionalnih metoda nije moguće u potpunosti zabilježiti ponašanje vlaknima ojačanih polimera, jer se oštećenja kod ovih materijala najčešće iniciraju u unutrašnjosti i postupno propagiraju prema površini. U ovom kontekstu, povezivanje računalne tomografije i metode korelacije digitalnih volumena s *in-situ* mehaničkim ispitivanjima otvara prostor za sveobuhvatnu karakterizaciju ove grupe materijala. Predložena metodologija omogućuje uvid u unutrašnjost ispitivanog materijala i kvantifikaciju cijelih polja pomaka. Također, omogućava praćenje pripadajuće lokalizacije deformacija nastalih kao posljedica narinutog mehaničkog opterećenja.

Ovaj je doktorski rad usmjeren na razvoj eksperimentalnog protokola i unaprjeđenje eksperimentalnog postava za mehanička *in-situ* ispitivanja vlaknima ojačanih polimera koji uključuje primjenu računalne tomografije i metode korelacije digitalnih volumena. U radu je provedena kvantifikacija standardne mjerne nesigurnosti metode korelacije digitalnih volumena za polimere ojačane staklenim vlaknima različite arhitekture, kao i mjerne nesigurnosti povezane s analizom skenova različitih kvaliteta. Time je omogućena značajna ušteda u vremenu trajanja mehaničkih ispitivanja. Dodatni doprinos ostvaren je kroz procjenu utjecaja okoline ispitnog uzorka, simulirajući uvjete mehaničkih *in-situ* ispitnih uređaja, što je doprinijelo pouzdanosti rezultata dobivenih korištenjem predložene metodologije. Rezultati dobiveni unutar ovog rada pružaju mogućnost optimiranja eksperimentalnog protokola pri ispitivanju vlaknima ojačanih polimera te na taj način stvaraju preduvjete za kvalitetnije razumijevanje globalnog ponašanja ove vrste materijala.

SAŽETAK

Unatoč rastućoj primjeni vlaknima ojačanih polimera (FRP) njihovo ponašanje pri različitim uvjetima opterećenja nije dovoljno istraženo. Zbog nedovoljnog poznavanja ponašanja vlaknima ojačanih polimera, često se propisuju visoki sigurnosni standardi pri dimenzioniranju konstrukcija. Pouzdana karakterizacija vlaknima ojačanih polimera otežana je budući da se oštećenje prvotno inicira u unutrašnjosti materijala, a zatim postupno propagira prema površini. Razvojem računalne tomografije (CT) omogućen je uvid u unutrašnjost promatranog materijala čime se otvara mogućnost sveobuhvatne identifikacije mehaničkog ponašanja. Spregom računalne tomografije i metode korelacije digitalnih volumena (DVC) u kombinaciji s *in-situ* mehaničkim ispitivanjima omogućena je trodimenzionalna kvantifikacija polja pomaka i pripadajućih deformacija. Primjena ove metodologije doprinosi novim spoznajama u znanosti o materijalima što u konačnici može dovesti do povećanja razumijevanja mehaničkog oštećenja. Naime, analizom inicijacije i propagacije oštećenja, u kombinaciji s promatranjem odgovarajuće lokalizacije deformacija i heterogene mikrostrukture ispitivanog materijala, pruža se uvid u kompleksno ponašanje vlaknima ojačanih polimera.

Pregledom relevantne znanstvene i stručne literature utvrđeno je kako nisu provedene studije koja se bave istraživanjem pouzdanosti mjerenja primjenom predložene metodologije kod analize ponašanja vlaknima ojačanih polimera. Iz tog su razloga unutar ovog doktorskog rada provedena eksperimentalna istraživanja s ciljem kvantificiranja standardnih mjernih nesigurnosti izmjerenih polja pomaka i pripadajućih polja deformacija za različite izvedbe vlaknima ojačanih polimera.

Primjenjujući globalni pristup DVC metode, u prvom su dijelu eksperimentalnog istraživanja definirane prihvatljive vrijednosti prostornih rezolucija pri mjerenju polja pomaka kod staklenim vlaknima ojačanih polimera definiranih različitom arhitekturom vlakana. Nadalje, pokazano je kako primjena mehaničke regularizacije može voditi povećanju pouzdanosti metode korelacije digitalnih volumena kroz smanjenje postignutih vrijednosti standardnih mjernih nesigurnosti. Drugi je dio eksperimentalnog istraživanja fokusiran na određivanje mjerne nesigurnosti predložene metodologije u ovisnosti o materijalu koji okružuje ispitni objekt prilikom skeniranja. Naime, simulirano je prisustvo cjevaste potpore, konstrukcijskog elementa koji se često koristi kod *in-situ* ispitnih uređaja. Ovaj element okružuje ispitni objekt i uzrokuje smanjenu kvalitetu trodimenzionalnih slika nastalih CT skeniranjem. U radu su kvantificirane standardne mjerne nesigurnosti pomaka i deformacija primijenjene DVC metode kada je ispitni uzorak izrađen od vlaknima ojačanih polimera okružen cijevima izrađenim od

različitih materijala. Osim toga, istražen je utjecaj relaksacije naprežanja materijala cjevaste potpore kao i odziv ponašanja FRP ispitnih uzoraka ojačanih različitom arhitekturom vlakana kod konstantnog opterećenja pri čemu je cilj bio odrediti pouzdanost *in-situ* ispitnog uređaja. U završnom su dijelu rada kvantificirane standardne mjerne nesigurnosti metode korelacije digitalnih volumena na CT skenovima dobivenim primjenom različitih akvizicijskih parametara s ciljem omogućavanja pouzdanog skraćivanja vremena trajanja *in-situ* mehaničkog ispitivanja unutar CT skenera.

Rezultati eksperimentalnih istraživanja provedenih u okviru ovog doktorskog rada doprinose razvoju eksperimentalnog protokola i unaprjeđenju *in-situ* mehaničkog postava za sveobuhvatnu karakterizaciju polimera ojačanih vlaknima. Predložena je metodologija generička i može se primijeniti na druge heterogene materijale. Primjenom ove metodologije omogućeno je pouzdanije određivanje globalnog ponašanja materijala, analiza lokalizacijskih fenomena te identifikacija i kvantifikacija mehanizama oštećenja. Nadalje, ovaj pristup istraživanja omogućava optimizaciju konstrukcija izrađenih od heterogenih materijala u različitim industrijskim područjima, čime se povećava učinkovitost i sigurnost u primjeni takvih materijala.

Ključne riječi:

vlaknima ojačani polimeri

računalna tomografija

metoda korelacije digitalnih volumena

standardna mjerna nesigurnost

in-situ mehanička ispitivanja

SUMMARY

Despite the increasing use of Fiber Reinforced Polymers (FRPs), their behavior under various loading conditions is not sufficiently investigated. This often leads to the application of high safety standards in structural design. Reliable characterization of FRPs is challenging because damage initially occurs in the bulk of the material and then gradually propagates to the surface. The development of X-Ray Computed Tomography (CT) has enabled insight into the internal structure of the observed material, enabling the comprehensive identification of mechanical damage. By combining XCT with Digital Volume Correlation (DVC) method and *in-situ* mechanical testing, three-dimensional quantification of displacement and corresponding strain fields is enabled. Furthermore, conducting the investigation with the proposed methodology contributes to new findings in material science, which can ultimately lead to a better understanding of mechanical damage. Specifically, the analysis of damage initiation and propagation, when coupled with the observation of the corresponding strain localization in interaction with the heterogeneous microstructure of the observed material, provides insight into the complex behavior of FRPs.

A review of the relevant scientific and technical literature revealed a lack of studies investigating the reliability of measurements obtained using the proposed methodology for analyzing the behavior of FRPs. To address this gap, this doctoral research conducted experimental investigations aimed at quantifying the standard measurement uncertainties of displacement and associated strain fields for various FRP configurations. In the initial phase of the experimental study, acceptable values for spatial resolutions of displacement field measurements were determined using a global approach to Digital Volume Correlation (DVC) for glass Fiber Reinforced Polymers with differing fiber architectures. Furthermore, the application of mechanical regularization was shown to enhance the reliability of the DVC method by reducing the standard uncertainties achieved. The second part of experimental investigation focused on assessing the measurement uncertainties of the proposed methodology based on the material surrounding the test object during scanning. Specifically, the presence of a tube support, a structural element commonly used in *in-situ* testing devices, was simulated. This support surrounds the test object and contributes to reduced quality of the three-dimensional images obtained from CT scanning. In this work, the standard measurement uncertainties of displacement and strain fields are quantified using the DVC method when FRP test samples were encased in tubes made from various materials. Additionally, the impact of stress relaxation of the tube support and the response of FRP samples with different fiber

architectures under constant loading were investigated to determine the reliability of the *in-situ* loading device. In the final part of the work, standard measurement uncertainties are evaluated on CT scans obtained with different acquisition parameters. The proposed investigation was conducted to facilitate reliable reduction of *in-situ* mechanical testing duration within the CT scanner.

The results of the experimental research conducted as part of this doctoral thesis contribute to the development of an experimental protocol and the enhancement of *in-situ* mechanical setup for comprehensive characterization of Fiber Reinforced Polymers. The proposed methodology is generic and can be applied to other heterogeneous materials. By employing this methodology, it becomes possible to more reliably determine the global behavior of materials, analyze localization phenomena, and identify and quantify damage mechanisms. Furthermore, this research approach enables the optimization of structures made from heterogeneous materials across various industrial fields, thereby increasing the efficiency and safety of such material applications.

Keywords:

Fiber Reinforced Polymers

Computed Tomography

Digital Volume Correlation

Standard measurement uncertainty

In-situ mechanical testing

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Shematski prikaz skeniranja objekta primjenom računalne tomografije [56]	13
Slika 2-2 Rekonstruirani volumen sačinjen od voksela [57].....	13
Slika 2-3 Konfiguracija (a) linijskog i (b) konusnog CT uređaja [57].....	14
Slika 2-4 Konfiguracija konusnog CT uređaja sa spiralnom trajektorijom skeniranja [59]	15
Slika 2-5 Spektar elektromagnetskog zračenja [60].....	15
Slika 2-6 Shematski prikaz rada rendgenske cijevi [54]	16
Slika 2-7 Spektar rendgenskog zračenja [61].....	17
Slika 2-8 Utjecaj veličine žarišta na rubove projicirane slike; (a) malo žarište i (b) veliko žarište [62]	18
Slika 2-9 Princip rada pravokutnog scintilatorskog detektora [64].....	19
Slika 2-10 Postupak formiranja sinograma [60]	20
Slika 2-11 Rekonstruirana slika nastala (a) bez upotrebe filtera i (b) upotrebom filtera [65] .	21
Slika 2-12 Stvarni (a) i idealizirani (b) prikaz 2D zapisa [66]	22
Slika 2-13 Artefakt izdubljivanja na cilindričnom objektu [54]	23
Slika 2-14 Prugasti artefakti u produžetku ravnih rubova na slici [55].....	23
Slika 2-15 Prstenasti artefakti na rekonstruiranoj slici [69].....	24
Slika 2-16 Primjeri artefakata pomaka: (a) artefakt horizontalnog pomaka, (b) dupli rubovi i zamućenje nastali kao posljedica vertikalnog pomaka [55].....	25
Slika 2-17 Princip nastajanja artefakta raspršivanja [73].....	26
Slika 2-18 Ovisnost rezolucije o mjernom području za određene vrste industrijskih uređaja [74]	27
Slika 2-19 Utjecaj položaja ispitivanog objekta na veličinu objekta na detektoru [77].....	29
Slika 2-20 Rekonstruirana slika ispitnog uzorka izrađenog od polimera ojačanog staklenim vlaknima MAT arhitekture vlakana. Rekonstruirana slika niske rezolucije (a) postignuta je zabilježavanjem jedne slike po projekciji uz ukupno trajanje skeniranja od 15 min. Rekonstruirana slika visoke rezolucije (b) postignuta je zabilježavanjem 20 slika po projekciji uz ukupno trajanje skeniranja od 110 min.	30
Slika 2-21 Shematski prikaz izvedbe <i>ex-situ</i> mehaničkog ispitivanja primjenom računalne tomografije	32
Slika 2-22 Shematski prikaz (a) isprekidane, (b) neprekinute i (c) kontinuirane izvedbe <i>in-situ</i> mehaničkog ispitivanja primjenom računalne tomografije	37
Slika 2-23 Glavne dimenzije <i>in-situ</i> kidalice s cjevastom potporom razvijene u sklopu HRZZ	

projekta <i>Fullinspect</i> (UIP-2019-04-5460).....	40
Slika 2-24 Osnovni dijelovi <i>in-situ</i> kidalice s cjevastom potporom razvijene u sklopu <i>HRZZ</i> projekta <i>Fullinspect</i> (UIP-2019-04-5460); (a) pogled u izometriji i (b) presjek kroz centralnu ravninu.....	41
Slika 2-25 Različite vrste cjevastih potpora kidalice razvijene u sklopu <i>HRZZ</i> projekta <i>Fullinspect</i> (UIP-2019-04-5460).....	42
Slika 2-26 Dimenzije korištenih cjevastih potpora izrađenih od (a) PMMA, polimera ojačanog ugljičnim vlaknima i od PEEK te od (b) aluminijskih.....	42
Slika 2-27 <i>In-situ</i> kidalica razvijena u sklopu <i>HRZZ</i> projekta <i>Fullinspect</i> (UIP-2019-04-5460) instalirana na laboratorijski CT uređaj <i>NIKON XT H 225</i>	43
Slika 2-28 Različite izvedbe <i>in-situ</i> ispitnih uređaja s cjevastom potporom: (a) komercijalno dostupna <i>in-situ</i> kidalica <i>CT5000</i> proizvođača <i>Deben UK Ltd.</i> [82]; (b) kidalica razvijena na Institutu za teorijsku i primjenjenu mehaniku u Pragu [83].....	45
Slika 2-29 Komercijalno dostupna kidalica <i>CT 20K</i> proizvođača <i>Deben UK Ltd.</i> [85]	47
Slika 3-1 Shematski prikaz 2D DIC optičkog sustava [94]	50
Slika 3-2 Shematski prikaz 3D DIC optičkog postava [95]	50
Slika 3-3 Diskretizacija digitalne slike primjenom lokalnog DIC pristupa u (a) referentnoj i (b) deformiranoj konfiguraciji [101].....	52
Slika 3-4 Osnovni princip lokalnog DVC-a: podudaranje referentnog i deformiranog podvolumena [110]	55
Slika 3-5 Standardna mjerna nesigurnost izmjerenih pomaka u ovisnosti o veličini elemenata ℓ ili regularizacijskoj duljini $\ell_m/2$ za Gaussov bijeli šum. [111].....	60
Slika 3-6 Primjer rezultata vlačnog testa gdje je a) ispitni uzorak od FRP materijala za zarezom na mjestu najmanjeg presjeka te b) mape korelacijskih reziduala čije su povišene vrijednosti prikazane strelicama [112]	61
Slika 3-7 Standardna rezolucija izmjerenih pomaka u (a) x -smjeru, (b) y - smjeru i (c) z -smjeru kao funkcija veličine elemenata/podvolumena za ispitne uzorke izrađene od različitih vrsta aluminijskih legura i čeličnog lijeva [26].....	67
Slika 3-8 Usporedba srednjih standardnih rezolucija pomaka za ispitne uzorke od aluminijskih legura i čeličnog lijeva. [26].....	68
Slika 3-9 Usporedba mjerne nesigurnosti DVC metode kod različitih istraživačkih timova izražena u (a) vokselima i (b) mikrometrima [122]	70
Slika 3-10 Utjecaj topline generirane unutar rendgenske cijevi na pojavu lažnih pomaka u	

rekonstruiranim volumenima [125].....	71
Slika 3-11 Prikaz (a) utjecaja broja zabilježenih projekcija i vremena izloženosti zračenju na kvalitetu rekonstruiranih volumena i (b) kvantificirane greške izmjerenih pomaka u ovisnosti o broju projekcija i vremenu izloženosti zračenju [122].....	73
Slika 4-1 Različite izvedbe vlaknima ojačanih polimera prema rasporedu vlakana: (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, (b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, (c) ortogonalno raspoređena vlakna i (d) višesmjerno usmjerena vlakna [129].....	77
Slika 4-2 Najčešće izvedbe poluproizvoda od staklenih vlakana (a) matovi, (b) tkanine, (c) višesmjerne tkanine (d) preprezi, (e) roving, i (f) pređe i niti.....	80
Slika 4-3 (a) Odvajanje vlakna od matrice i (b) nastanak poprečne pukotine [134].....	82
Slika 4-4 Delaminacijsko oštećenje nastalo uslijed spajanja dviju susjednih poprečnih pukotina u matrici [135].....	82
Slika 4-5 Lom vlakana [134].....	83
Slika 4-6 Izrada kompozitnih ploča primjenom vakuumske infuzije	84
Slika 4-7 Primjer jednoosnog ispitnog uzorka korištenog u istraživanju; (a) gornja, hrapava strana i (b) donja, glatka strana	85
Slika 4-8 Poprečni presjek ispitnog uzorka <i>MAT</i> arhitekture vlakana, debljine 5 mm, pri povećanju 100×.....	87
Slika 4-9 (a) Rekonstruirani volumen <i>MAT</i> ispitnog uzorka i (b) prikaz presjeka u težištu <i>MAT</i> ispitnog uzorka	87
Slika 4-10 Presjeci u težištu <i>MAT</i> ispitnog uzorka u (a) <i>y-z</i> , (b) <i>x-z</i> i (c) <i>x-y</i> ravnini	88
Slika 4-11 Rekonstruirani volumen <i>MAT</i> ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih slojeva s normalom koja odgovara osi <i>y</i>	89
Slika 4-12 Različiti presjeci <i>MAT</i> ispitnog uzorka koji su paralelni s polaganjem slojeva	89
Slika 4-13 Segmentirani volumetrijski prikaz <i>MAT</i> ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima	90
Slika 4-14 (a) <i>Presjek 141</i> s minimalnim udjelom vlakana i (b) <i>presjek 548</i> s maksimalnim udjelom vlakana	91
Slika 4-15 Poprečni presjek ispitnog uzorka <i>UD</i> arhitekture vlakana, debljine 5 mm, pri povećanju 100×	93
Slika 4-16 (a) Rekonstruirani volumen <i>UD</i> ispitnog uzorka i (b) prikaz presjeka u težištu <i>UD</i> ispitnog uzorka	93
Slika 4-17 Presjeci u težištu <i>UD</i> ispitnog uzorka u (a) <i>y-z</i> , (b) <i>x-z</i> i (c) <i>x-y</i> ravnini	94
Slika 4-18 Rekonstruirani volumen <i>UD</i> ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih	

slojeva s normalom koja odgovara osi y	95
Slika 4-19 Različiti presjeci <i>UD</i> ispitnog uzorka koji su paralelni s polaganjem slojeva.....	95
Slika 4-20 Segmentirani volumetrijski prikaz <i>UD</i> ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima	96
Slika 4-21 (a) <i>Presjek 326</i> s minimalnim udjelom vlakana i (b) <i>presjek 435</i> s maksimalnim udjelom vlakana	97
Slika 4-22 Poprečni presjek ispitnog uzorka <i>WF</i> arhitekture vlakana, debljine 5 mm, pri povećanju $100\times$	99
Slika 4-23 (a) Rekonstruirani volumen <i>WF</i> ispitnog uzorka i (b) prikaz presjeka u težištu <i>WF</i> ispitnog uzorka	99
Slika 4-24 Presjeci u težištu <i>WF</i> ispitnog uzorka u (a) y - z , (b) x - z i (c) x - y ravnini.....	100
Slika 4-25 Rekonstruirani volumen <i>WF</i> ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih slojeva s normalom koja odgovara osi y	101
Slika 4-26 Različiti presjeci <i>WF</i> ispitnog uzorka koji su paralelni s polaganjem slojeva.....	101
Slika 4-27 Segmentirani volumetrijski prikaz <i>WF</i> ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima	102
Slika 4-28 (a) <i>Presjek 317</i> s minimalnim udjelom vlakana i (b) <i>presjek 221</i> s maksimalnim udjelom vlakana	103
Slika 4-29 Poprečni presjek ispitnog uzorka <i>AP</i> arhitekture vlakana, debljine 5 mm, pri povećanju $100\times$	104
Slika 4-30 (a) Rekonstruirani volumen <i>AP</i> ispitnog uzorka i (b) prikaz presjeka u težištu <i>AP</i> ispitnog uzorka	105
Slika 4-31 Presjeci u težištu <i>AP</i> ispitnog uzorka u (a) y - z , (b) x - z i (c) x - y ravnini	105
Slika 4-32 Rekonstruirani volumen <i>AP</i> ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih slojeva s normalom koja odgovara osi y	106
Slika 4-33 Različiti presjeci <i>AP</i> ispitnog uzorka koji su paralelni s polaganjem slojeva	107
Slika 4-34 Segmentirani volumetrijski prikaz <i>AP</i> ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima	108
Slika 4-35 (a) <i>Presjek 58</i> s minimalnim udjelom vlakana i (b) <i>presjek 198</i> s maksimalnim udjelom vlakana	109
Slika 5-1 Geometrija i dimenzije (mm) ispitnih uzoraka korištenih za analizu utjecaja arhitekture vlakana na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode.....	111
Slika 5-2 Eksperimentalni postav korišten za određivanje utjecaja arhitekture vlakana na standardnu mjernu nesigurnost pomaka DVC metode.....	112

Slika 5-3 Središnji presjeci u $z-x$ i $y-x$ ravninama kod ispitnog uzorka (a) <i>MAT</i> , (b) <i>UD</i> , (c) <i>WF</i> i (d) <i>AP</i> arhitekture vlakana.....	114
Slika 5-4 Promatrano područje interesa ispitnog uzorka <i>MAT</i> arhitekture vlakana diskretizirano mrežom konačnih elemenata različite veličine	116
Slika 5-5 Izmjerena polja pomaka (voksela) u (a) x smjeru, (b) y smjeru i (c) z smjeru za ispitni uzor uzorak <i>MAT</i> arhitekture vlakana pri diskretizaciji konačnim elementima veličine 76 voksela.....	117
Slika 5-6 Izračunata polja glavnih deformacija (-) (a) ε_1 , (b) ε_2 i (c) ε_3 za <i>MAT</i> arhitekturu vlakana kod primjene mreže konačnih elemenata s prosječnom duljinom elementa $\ell = 76$ voksela.....	118
Slika 5-7 Izmjerena polja pomaka u z smjeru (voksela) kod ispitnog uzorka <i>MAT</i> arhitekture vlakana pri diskretizaciji konačnim elementima veličine (a) 97, (b) 56, (c) 30 i (d) 8 voksela	119
Slika 5-8 Izračunata polja najvećih glavnih deformacija (-) za <i>MAT</i> arhitekturu vlakana kod primjene mreža konačnih elemenata s prosječnom duljinom elementa (a) $\ell = 97$ voksela, (b) $\ell = 56$ voksela, (c) $\ell = 30$ voksela i (d) $\ell = 8$ voksela	120
Slika 5-9 Izmjerena polja pomaka u z smjeru (voksela) kod ispitnog uzorka <i>MAT</i> arhitekture vlakana korištenjem regulariziranog DVC algoritma, pri čemu su regularizacijske duljine iznosile (a) 256, (b) 128, (c) 64 i (d) 16 voksela. Područje interesa diskretizirano je mrežom konačnih elemenata veličine 12 voksela	122
Slika 5-10 Glavna deformacija (-) ε_3 za <i>MAT</i> ispitni uzorak izračunata korištenjem regulariziranog DVC algoritma, pri čemu su regularizacijske duljine iznosile (a) 256, (b) 128, (c) 64 i (d) 16 voksela. Područje interesa diskretizirano je mrežom konačnih elemenata veličine 12 voksela.....	123
Slika 5-11 Shematski prikaz postupka određivanja mjerne nesigurnosti DVC metode te formiranja dijagrama koji prikazuju ovisnost mjerne nesigurnosti o veličini korištenih konačnih elemenata. Primjer se odnosi na određivanje mjerne nesigurnosti pomaka kod <i>MAT</i> ispitnog uzorka kada je korištena diskretizacija mrežom konačnih elemenata veličine 96 voksela....	125
Slika 5-12 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitne uzorke <i>MAT</i> arhitekture vlakana.	127
Slika 5-13 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitne uzorke <i>UD</i> arhitekture vlakana.....	128

Slika 5-14 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitne uzorke <i>WF</i> arhitekture vlakana.....	128
Slika 5-15 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitne uzorke <i>AP</i> arhitekture vlakana.....	128
Slika 5-16 Srednja standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija u ovisnosti o veličini korištenih konačnih elemenata pri analizi ispitnih uzoraka različite arhitekture vlakana primjenom standardnog DVC protokola	130
Slika 5-17 Određivanje optimalne veličine elemenata ℓ pri ispitivanju polimernih kompozita s različitom arhitekturom vlakana primjenom standardnog DVC algoritma.....	131
Slika 5-18 Histogrami sive boje analiziranih ispitnih uzoraka nad cijelim područjem interesa	132
Slika 5-19 Standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija u ovisnosti o primijenjenim regularizacijskim duljinama kod ispitivanja uzorka s <i>MAT</i> arhitekturom vlakana	134
Slika 5-20 Standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija u ovisnosti o primijenjenim regularizacijskim duljinama kod ispitivanja uzorka s <i>UD</i> arhitekturom vlakana	134
Slika 5-21 Standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija u ovisnosti o primijenjenim regularizacijskim duljinama kod ispitivanja uzorka s <i>WF</i> arhitekturom vlakana	135
Slika 5-22 Standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija u ovisnosti o primijenjenim regularizacijskim duljinama kod ispitivanja uzorka s <i>AP</i> arhitekturom vlakana	135
Slika 5-23 Srednje standardne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija polimera ojačanih s četiri različite vrste arhitekture vlakana ostvarene primjenom regulariziranog DVC protokola	136
Slika 5-24 Određivanje minimalnih vrijednosti regularizacijskih duljina pri ispitivanju uzoraka različite arhitekture vlakana. Uzorci su diskretizirani mrežom konačnih elemenata veličine $\ell = 12$ voksel.....	137
Slika 5-25 Usporedba standardnog i regulariziranog DVC pristupa pri analizi GFRP kompozita s <i>MAT</i> arhitekturom vlakana. (a) Standardna nesigurnost izmjerenih pomaka i (b) standardna nesigurnost deformacija u ovisnosti o veličini elementa / regularizacijskoj duljini.	138
Slika 6-1 Prihvat za montažu ispitnog uzorka (a) bez instalirane cjevaste potpore i (b) s	

instaliranom cjevastom potporom	145
Slika 6-2 Cjevaste potpore izrađene iz (a) PMMA, (b) epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima, (c) aluminijske cijevi i (d) PEEK materijala.....	146
Slika 6-3 Eksperimentalni postav korišten za određivanje utjecaja okoline na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode	147
Slika 6-4 Rezultat skeniranja kada se ne koristi cjevasta potpora; (a) ispitni postav, (b) rekonstruirani volumen i (c) središnji presjek kroz x - z ravninu.....	150
Slika 6-5 Rezultat skeniranja kada se koristi cjevasta potpora od PMMA; (a) ispitni postav, (b) rekonstruirani volumen i (c) središnji presjek kroz x - z ravninu.....	150
Slika 6-6 Rezultat skeniranja kada se koristi cjevasta potpora od polimerne cijevi ojačane ugljičnim vlaknima; (a) ispitni postav, (b) rekonstruirani volumen i (c) središnji presjek kroz x - z ravninu	151
Slika 6-7 Rezultat skeniranja kada se koristi cjevasta potpora od aluminijske cijevi; (a) ispitni postav, (b) rekonstruirani volumen i (c) središnji presjek kroz x - z ravninu.....	151
Slika 6-8 Rezultat skeniranja kada se koristi cjevasta potpora od PEEK; (a) ispitni postav, (b) rekonstruirani volumen i (c) središnji presjek kroz x - z ravninu.....	152
Slika 6-9 Standardna mjerna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata kod polimera ojačanog staklenim vlaknima s <i>MAT</i> arhitekturom vlakana koji nije bio okružen s cijevi prilikom CT skeniranja.....	153
Slika 6-10 Standardna mjerna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata kod polimera ojačanog staklenim vlaknima s <i>MAT</i> arhitekturom vlakana, okružen cijevi od PMMA prilikom CT skeniranja	153
Slika 6-11 Standardna mjerna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata kod polimera ojačanog staklenim vlaknima s <i>MAT</i> arhitekturom vlakana, okružen cijevi od polimera ojačanog ugljičnim vlaknima prilikom CT skeniranja	154
Slika 6-12 Standardna mjerna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata kod polimera ojačanog staklenim vlaknima s <i>MAT</i> arhitekturom vlakana, okružen aluminijskom cijevi prilikom CT skeniranja.....	154
Slika 6-13 Standardna mjerna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata kod polimera ojačanog staklenim vlaknima s <i>MAT</i> arhitekturom vlakana, okružen cijevi od PEEK prilikom CT skeniranja.....	154
Slika 6-14 Srednje standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija kod različitih izvedbi cjevastih potpora. Standardne mjerne nesigurnosti pomaka i deformacija prikazane su	

u ovisnosti o veličini korištenih konačnih elemenata.....	156
Slika 6-15 Usporedba kvalitete dobivenih skenova za slučaj kada je ispitni uzorak okružen (a) aluminijskom cijevi te kada je skeniran (b) bez prisustva cijevi.....	157
Slika 6-16 Određivanje optimalne veličine konačnog elementa ℓ za različite konfiguracije okruženja ispitnog uzorka	158
Slika 6-17 Srednje standardne mjerne nesigurnosti izmjerenih pomaka DVC metode za slučaj korištenog ispitnog uzorka <i>MAT</i> arhitekture vlakana primjenom CT skenera <i>Werth TomoScope S i X50+North Star Imaging</i>	159
Slika 6-18 Mjerač sile <i>DYLF-102-800 kg</i> ugrađen unutar <i>in-situ</i> kidalice razvijene na Katedri za eksperimentalnu mehaniku [144].....	161
Slika 6-19 Konfiguracije eksperimentalnog postava za određivanje relaksacije naprezanja (a) vlaknima ojačanih polimera i (b) cjevaste potpore <i>in-situ</i> kidalice.....	162
Slika 6-20 Eksperimentalni postav za određivanje relaksacije naprezanja različitih cijevi <i>in-situ</i> ispitnog uređaja	163
Slika 6-21 Grafičko sučelje <i>in-situ</i> kidalice	163
Slika 6-22 Geometrija i dimenzije (mm) ispitnih uzoraka korištenih za određivanje relaksacije različitih vrsta vlaknima ojačanih polimera	164
Slika 6-23 Relaksacija naprezanja kod <i>Ispitivanja I</i> kada je korištena čelična cijev i čelični ispitni uzorak	167
Slika 6-24 Relaksacija naprezanja cjevastih potpora izrađenih iz različitih materijala	168
Slika 6-25 Relaksacije naprezanja vinilester smole ojačane s četiri različite arhitekture vlakana	169
Slika 7-1 Geometrija i dimenzije (mm) ispitnog uzorka korištenog za analizu utjecaja parametara skeniranja na standardnu mjernu nesigurnost pomaka DVC metode.....	177
Slika 7-2 Središnji presjeci rekonstruiranih volumena; (a) <i>HQ sken</i> , (b) <i>LQ sken</i> i (c) <i>kontinuirani sken</i>	180
Slika 7-3 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitni uzorak <i>MAT</i> arhitekture vlakana dobivene koreliranjem <i>HQ</i> referentnog skena i <i>HQ bis</i> deformiranog skena.....	182
Slika 7-4 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitni uzorak <i>MAT</i> arhitekture vlakana dobivene koreliranjem <i>HQ</i> referentnog skena i <i>LQ</i> deformiranog skena	182
Slika 7-5 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao	

funkcija veličine konačnih elemenata za ispitni uzorak <i>MAT</i> arhitekture vlakana dobivene koreliranjem <i>HQ</i> referentnog skena i <i>kontinuiranog</i> deformiranog skena.....	182
Slika 7-6 Srednje standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija za ispitni uzorak <i>MAT</i> arhitekture vlakana ostvarene koreliranjem skenova različite kvalitete. Mjerne nesigurnosti prikazane su kao funkcija veličine konačnih elemenata	183
Slika 7-7 Određivanje optimalne veličine konačnog elementa ℓ obzirom na kvalitetu registriranih skenova	184

POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Dimenzije korištenih cjevastih potpora	43
Tablica 4-1 Fizikalna i mehanička svojstva različitih tipova staklenih vlakana [133]	78
Tablica 4-2 Arhitekture vlakana ispitnih uzoraka	84
Tablica 4-3 Dimenzije kompozitne ploče s <i>MAT</i> arhitekturom vlakana i osnovne informacije o korištenim slojevima	86
Tablica 4-4 Volumni udio staklenih vlakana i vinilesterske smole kod <i>MAT</i> ispitnog uzorka, utvrđen segmentacijom slike dobivene CT skeniranjem ispitnog uzorka	90
Tablica 4-5 Rezultati utvrđivanja masenog udjela staklenih vlakana kod <i>MAT</i> ispitnih uzoraka	92
Tablica 4-6 Dimenzije kompozitne ploče s <i>UD</i> arhitekturom vlakana, orijentacija rezanja ispitnog uzorka u odnosu na orijentaciju vlakana te osnovne informacije o korištenim slojevima	92
Tablica 4-7 Volumni udio staklenih vlakana i vinilesterske smole kod <i>UD</i> ispitnog uzorka, utvrđen segmentacijom slike dobivene CT skeniranjem ispitnog uzorka	96
Tablica 4-8 Rezultati utvrđivanja masenog udjela staklenih vlakana kod <i>UD</i> ispitnih uzoraka	97
Tablica 4-9 Dimenzije kompozitne ploče s <i>WF</i> arhitekturom vlakana, orijentacija rezanja ispitnog uzorka u odnosu na orijentaciju vlakana te osnovne informacije o korištenim slojevima	98
Tablica 4-10 Volumni udio staklenih vlakana i vinilesterske smole kod <i>WF</i> ispitnog uzorka, utvrđen segmentacijom slike dobivene CT skeniranjem ispitnog uzorka	102
Tablica 4-11 Rezultati utvrđivanja masenog udjela staklenih vlakana kod <i>WF</i> ispitnih uzoraka	103
Tablica 4-12 Dimenzije kompozitne ploče s <i>AP</i> arhitekturom vlakana, orijentacija rezanja ispitnog uzorka u odnosu na orijentaciju vlakana te osnovne informacije o korištenim slojevima	104
Tablica 4-13 Volumni udio staklenih vlakana i vinilesterske smole kod <i>AP</i> ispitnog uzorka, utvrđen segmentacijom slike dobivene CT skeniranjem ispitnog uzorka	108
Tablica 4-14 Rezultati utvrđivanja masenog udjela staklenih vlakana kod <i>AP</i> ispitnih uzoraka	109
Tablica 5-1 Parametri CT skeniranja kod određivanja utjecaja arhitekture vlakana na standardnu mjernu nesigurnost pomaka DVC metode	113

Tablica 5-2 Parametri standardnog DVC protokola kod određivanja utjecaja arhitekture vlakana na mjernu nesigurnost DVC metode	116
Tablica 5-3 Parametri regulariziranog DVC protokola kod određivanja utjecaja arhitekture vlakana na mjernu nesigurnost DVC metode.....	121
Tablica 5-4 Srednje vrijednosti gradijenta slika (RMS) za različite arhitekture vlakana	129
Tablica 5-5 Preporučene veličine konačnih elemenata pri ispitivanju polimernih kompozita s različitom arhitekturom vlakana primjenom standardnog DVC algoritma.....	131
Tablica 5-6 Srednji kontrast analiziranih arhitektura vlakana.....	133
Tablica 5-7 Preporučene vrijednosti regularizacijskih duljina GFRP materijala s različitom arhitekturom vlakana za slučaj kada se koristi diskretizacija mrežom konačnih elemenata veličine $\ell = 12$ vokseli	137
Tablica 6-1 Parametri CT skeniranja kod određivanja utjecaja okoline na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode	148
Tablica 6-2 Parametri DVC analize kod određivanja utjecaja okoline na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode	152
Tablica 6-3 Srednje vrijednosti gradijenta slike (RMS) ostvarene skeniranjem ispitnog uzorka korištenjem parametara definiranim u tablici 6-1	155
Tablica 6-4 Preporučene veličine konačnih elemenata za različite vrste materijala korištenih cjevastih potpora	158
Tablica 6-5 Osnovne karakteristike mjerača sile <i>DYLF-102-800 kg</i> [144].....	161
Tablica 6-6 Plan pokusa za određivanje relaksacije naprezanja za ispitne uzorke različitih arhitektura vlakana i za cjevaste potpore izrađene od različitih materijala.....	166
Tablica 7-1 Parametri CT skeniranja kod određivanja utjecaja kvalitete registriranih skenova na standardnu mjernu nesigurnost pomaka DVC metode	178
Tablica 7-2 Parametri DVC analize kod određivanja utjecaja kvalitete registriranih skenova na standardnu mjernu nesigurnost pomaka DVC metode.....	181
Tablica 7-3 Preporučene veličine konačnih elemenata kod ispitivanja vinilesterske smole ojačane MAT arhitekturom vlakana obzirom na kvalitetu registriranih skenova	184

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
\mathbf{b}		vektor razlike vrijednosti sivih skala referentnog i deformiranog volumena nad kojim je izvršena korekcija
C_{ZNCC}		koeficijent normalizirane korelacije s nultom sredinom
d_u		korekcija pomaka
d	m	debljina predmeta, put kroz koji prolaze zrake
f		projekcijska funkcija
$f(x)$		referentna konfiguracija
f_m		srednja vrijednost intenziteta referentnog podvolumena
g_m		srednja vrijednost intenziteta deformiranog podvolumena
\hat{g}		volumen nad kojim je izvršena korekcija
$g(x)$		deformirana konfiguracija
$g(s, \theta)$		jednodimenzionalna projekcija funkcije pod kutom θ
I	W/sr	intenzitet preostalog zračenja koje je prošlo kroz predmet
I_0	W/sr	intenzitet početnog (emitiranog) zračenja
\mathbf{k}		valni vektor
ℓ	voksel	veličina konačnog elementa
M		veličina referentne slike kod korištenje kros-korelacijske funkcije
M_p		geometrijsko pojačanje CT skeniranja
$N_{proj.}$		broj zabilježenih projekcija
s, u		kartezijeve koordinate u koordinatnom sustavu zarotiranom za kut θ
T		transpozicijski operator
$t_{exp.}$	s	vrijeme izloženosti zračenju
u		polje pomaka
u_n		čvorni pomak mreže konačnih elemenata
u_0		pomak referentnog podvolumena u x smjeru (vokseli)
\mathbf{v}		probno polje pomaka
v_0		pomak referentnog podvolumena u y smjeru (vokseli)

w_0		pomak referentnog podvolumena u z smjeru (vokseli)
x		položaj piksela
x, y		kartezijeve koordinate
Z		atomski broj
θ	rad	kut projiciranja
μ	m^{-1}	koeficijent prigušenja prozračenog materijala
ξ	voksel	regularizacijska duljina
$\delta(x)$		Diracova distribucija
$\bar{\sigma}_U$	voksel	srednja standardna mjerna nesigurnost pomaka
σ_{Ux}	voksel	standardna mjerna nesigurnost pomaka u x smjeru
σ_{Uy}	voksel	standardna mjerna nesigurnost pomaka u y smjeru
σ_{Uz}	voksel	standardna mjerna nesigurnost pomaka u z smjeru
$\sigma_{\varepsilon 1}$		standardna mjerna nesigurnost glavnih deformacija ε_1
$\sigma_{\varepsilon 2}$		standardna mjerna nesigurnost glavnih deformacija ε_2
$\sigma_{\varepsilon 3}$		standardna mjerna nesigurnost glavnih deformacija ε_3
$\bar{\sigma}_\varepsilon$		srednja standardna mjerna nesigurnost glavnih deformacija
φ_c		korelacijski rezidual
Φ_c		linearna kombinacija DIC/DVC funkcije cilja
Φ_m		funkcija cilja ravnotežne razlike neopterećenih stupnjeva slobode
Φ_s		funkcija cilja ravnotežne razlike opterećenih stupnjeva slobode
Φ_t		ukupna funkcija cilja
ψ_n		funkcija oblika
ω_c		težinski faktor korelacijskog funkcionala
ω_m		težinski faktor za unutarnje stupnjeve slobode
ω_s		težinski faktor opterećene površine
ω_t		ukupni težinski faktor
[K]		matrica krutosti
[K _m]		parcijalna matrica krutosti za slobodne čvorove
[K _s]		matrica krutosti za Dirichlet-ove čvorove
[L]		Laplace-Beltrami operator
[M]		matrica koja sadrži funkciju oblika i gradijent referentne slike

$\{f\}$	vektor sila u čvorovima
$\{f_r\}$	vektor reziduala sile na unutarnjim čvorovima
$\{u\}$	vektor pomaka

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
2D	dvodimenzionalno
2D-CT	laboratorijski tomograf linijskog izvora zračenja
3D	trodimenzionalno
3D-CT	laboratorijski tomograf konusnog izvora zračenja
AP	kutno položena vlakna (eng. <i>Angle-ply Fibers</i>)
CT	računalna tomografija (eng. <i>Computed Tomography</i>)
CCC	kros-korelacijski koeficijent
CCD	vrsta mikročipa korištenog na digitalnoj kameri (eng. <i>Charge-coupled Device</i>)
CMOS	vrsta mikročipa korištenog na digitalnoj kameri (eng. <i>Complementary Metal-oxide-semiconductor</i>)
CSM	matovi (eng. <i>Chopped Strand Mats</i>)
DIC	korelacija digitalne slike (eng. <i>Digital Image Correlation</i>)
DVC	korelacija digitalnih volumena (eng. <i>Digital Volume Correlation</i>)
EGM	metoda minimiziranja ravnotežne razlike (eng. <i>Equilibrium Gap Method</i>)
FE-DVC	metode korelacije digitalnih volumena bazirana na metodi konačnih elemenata
FDD	udaljenost između fokusa i detektora (eng. <i>Focus-detector Distance</i>)
FOD	udaljenost između fokusa i objekta (eng. <i>Focus-object Distance</i>)
FRP	vlaknima ojačani polimeri (eng. <i>Fiber Reinforced Polymers</i>)
F.S.	cijela skala (eng. <i>Full Scale</i>)
GFRP	polimeri ojačani staklenim vlaknima (eng. <i>Glass Fiber Reinforced Polymers</i>)
GL	razina sive boje (eng. <i>Gray Level</i>)
HRZZ	Hrvatska zaklada za znanost
LVDT	linearni varijabilni diferencijalni transformator (eng. <i>Linear Variable Differential Transformer</i>)
MAT	stohastički raspoređena usmjerena vlakna
NDT	nerazorno ispitivanje (eng. <i>Non-destructive Testing</i>)
PMMA	polimetilmetakrilat
PEEK	poli(eter-eter-keton)
P-DVC	korelacija digitalnih volumena temeljena na 2D projekcijama (eng. <i>Projection-based Digital Volume Correlation</i>)
RBM	pomak krutog tijela (eng. <i>Rigid Body Motion</i>)

ROI	područje interesa (eng. <i>Region of Interest</i>)
RMS	srednja vrijednost gradijenta slike (eng. <i>Root Mean Squared Norm</i>)
SNR	omjer signala i šuma (eng. <i>Signal to Noise Ratio</i>)
SSD	suma kvadrata razlika (eng. <i>Sum of Squared Differences</i>)
UD	jednosmjerna vlakna (eng. <i>Unidirectional Fibers</i>)
UTM	univerzalni ispitni stroj (eng. <i>Universal Testing Machine</i>)
WF	pletena vlakna (eng. <i>Woven Fibers</i>)
ZNCC	koeficijent normalizirane korelacije s nultom sredinom (eng. <i>Zero Mean Normalized Cross-correlation</i>)
ZOI	zona interesa (eng. <i>Zone of Interest</i>)
XCT	računalna tomografija primjenom X-zračenja (eng. <i>X-ray Computed Tomography</i>)
μ XCT	računalna tomografija primjenom X-zračenja u mikro području (eng. <i>Micro X-ray Computed Tomography</i>)

1. UVOD

1.1 Motivacija

Iako je njihova upotreba u inženjerskim konstrukcijama u stalnom porastu [1], ponašanje vlaknima ojačanih polimera (eng. *Fiber Reinforced Polymers* – FRP) te inicijacija i propagacija različitih mehanizama oštećenja koji se javljaju tijekom mehaničkog opterećenja još je uvijek nedovoljno istraženo. Nedostatak adekvatnih eksperimentalnih tehnika za određivanje ponašanja vlaknima ojačanih polimera kao i nedovoljno razumijevanje mehanizama oštećenja faktori su koji sprječavaju optimalnu iskoristivost ove vrste materijala. Iz tog su razloga inženjerske konstrukcije i mehaničke komponente izrađene od FRP-a najčešće predimenzionirane [2]. Pri eksploatacijskim uvjetima opterećenja, a uslijed heterogene mikrostrukture i nesavršenosti tijekom procesa proizvodnje javljaju se kod vlaknima ojačanih polimera različiti mehanizmi oštećenja i to najčešće na mikrorazini. Kombinacije različitih mehanizama oštećenja (npr. pucanje matrice, odvajanje matrice i vlakana, delaminacija, lom vlakna) iniciraju se u unutrašnjosti materijala te postupno propagiraju na različitim razinama (tj. od mikro do makro razine) [3]. U trenutku kad se na površini mehaničke komponente mogu uočiti promjene, već se radi o oštećenjima koja su popraćena značajnim gubitkom mehaničkog integriteta i bitnim smanjivanjem mehaničkih svojstava. Uzimajući u obzir gore navedeno, a s ciljem identifikacije mehanizama oštećenja kao i praćenja njihova rasta, nameće se potreba za primjenom naprednih metoda nerazornih ispitivanja (eng. *Non-destructive Testing* - NDT). S obzirom na radne uvjete i instalacijske karakteristike, monitoring mehaničkih komponenti izrađenih od vlaknima ojačanih polimera najčešće se provodi metodama akustične emisije (eng. *Acoustic Emission Testing*), ultrazvučnim ispitivanjem (eng. *Ultrasonic Testing*), metodama mjerenja cijelog polja pomaka (eng. *Full-field Measurement Methods*), infracrvenom termografijom (eng. *Infrared Thermography*) i računalnom tomografijom X-zrakama (eng. *X-ray Computed Tomography*). Nerijetko se, u svrhu pouzdanijeg praćenja cjelovitosti konstrukcija istovremeno koristi više različitih nerazornih metoda. Većina istraživanja vezana uz promatranje oštećenja kod materijala ojačanih vlaknima provedena je na makroskopskoj razini, s ciljem procjene utjecaja akumulacije oštećenja na degradaciju svojstava materijala.

U posljednje su vrijeme mnoga istraživanja usmjerena na poboljšanje razumijevanja mikromehaničkog ponašanja vlaknima ojačanih polimera što je potaknuto sve većom dostupnošću mikro računalne tomografije X-zraka (eng. *Micro X-ray Computed Tomography* - μ XCT). Predložena se NDT tehnika oslanja na računalnu rekonstrukciju rendgenskih 2D snimaka (tj. projekcija) dobivenih pod različitim kutovima snimanja čime se dobivaju

trodimenzijske slike promatranog uzorka. Ovako zabilježene volumetrijske slike sadrže informacije o mikrostrukturi materijala u unutrašnjosti ispitnog objekta pri čemu kontrast slike ovisi o razlikama u apsorpciji X-zraka prilikom prolaska kroz promatrani objekt koji se skenira [4]. Štoviše, μ -XCT konfiguracije mogu pružiti uvid u 3D strukturu heterogenih materijala pri višim rezolucijama (npr. mikrometerska veličina voksel). U većini dosadašnjih istraživanja, određivanje razine oštećenja pri analizi 3D skenova zabilježenih μ XCT skenerom obavljalo se vizualnom metodom. Ovako dobivene procjene oštećenja ne mogu izravno doprinijeti kvantitativnim analizama pošto su temeljene na subjektivnoj prosudbi promatrača. Međutim, primjenom metoda mjerenja cijelog polja pomaka na registriranim CT volumenima moguće je kvantificirati ponašanje materijala uslijed mehaničkog opterećenja. Naime, primjenom metode korelacije digitalnih volumena (eng. *Digital Volume Correlation* - DVC) moguće je izmjeriti trodimenzionalne pomake na površini i u unutrašnjosti promatranog volumena interesa te izračunati polja deformacija. Pritom se u suštini DVC metoda oslanja na usporedbu karakterističnog podvolumena na referentnom i deformiranom CT skenu [5]. Monitoring mehaničkih ispitivanja primjenom μ XCT skenera u kombinaciji s DVC metodom rezultirao je novim spoznajama u znanosti o vlaknima ojačanim materijalima budući da volumetrijske slike pružaju kvalitativne i kvantitativne informacije kojima je omogućeno bolje razumijevanje inicijacije i rasta oštećenja na različitim razinama.

Unatoč tome, određene specifičnosti samog procesa skeniranja mogu rezultirati smanjenom učinkovitošću DVC metode. Naime, kod analize volumetrijskih CT skenova ne postoji mogućnost kontrole mikrostrukture promatranog materijala, što može rezultirati niskim vrijednostima gradijenta između susjednih voksel. Ovo nameće potrebu definiranja odgovarajuće veličine podvolumena (tj. fasete, elementa) pri diskretizaciji volumetrijske slike. Upotrebom većih podvolumena smanjit će se mjerna nesigurnost, ali će se istovremeno smanjiti i mogućnost detekcije mikrooštećenja unutar FRP materijala. Manja diskretizacija volumetrijske slike povećava mogućnost detekcija mikrooštećenja, ali vodi i povećanom utjecaju šuma na registriranim 3D volumenima. Osim toga, zabilježavanje CT skenova visoke kvalitete dugotrajan je proces koji može potrajati i više od dva sata. Dodatno ograničenje DVC metode je pojava šuma i artefakata koji nastaju uslijed procesa skeniranja. Pritom valja napomenuti kako volumetrijske slike pokazuju više razine šuma uslijed registracije 2D projekcija nego što je slučaj kod analiziranja površine uzorka kada se koriste vizijske digitalne kamere. Akvizicijski šum očituje se kao ne-mehanička fluktuacija nijansi sive boje. Mehanička ispitivanja unutar CT skenera provode se pomoću specifičnih ispitnih uređaja (tj. kidalica), koje

moraju zadovoljiti niz kriterija kako bi osigurale da X-zrake mogu neometano proći kroz ispitni uzorak tijekom rotacije za puni krug (tj. 360°). Konstrukcijska izvedba *in-situ* uređaja za mehanička ispitivanja najčešće uključuje cjevastu potporu koja prenosi opterećenje na ispitni uzorak, a ujedno mora biti transparentna za X-zrake. Predložena potpora može uzrokovati smanjenu propusnost X-zraka ili unijeti dodatnu relaksaciju materijala kod registracije 2D projekcija. Navedeni nedostaci mogu uzrokovati nestvarne fenomene na rekonstruiranim 3D slikama koji posljedično rezultiraju lažnim pomacima u materijalu.

Računalna tomografija u kombinaciji s DVC metodom izuzetno je koristan alat za sveobuhvatnu karakterizaciju vlaknima ojačanih materijala pošto je glavni cilj ovog eksperimentalnog protokola dovesti u korelaciju heterogenu mikrostrukturu i ponašanje materijala (tj. lokalizaciju deformacija i načine popuštanja materijala). Gore navedene karakteristike i ograničenja vezane uz primjenu ove metodologije nameću potrebu za pouzdanim definiranjem odgovarajućih parametara CT skeniranja kao i potrebu za određivanjem utjecaja eksperimentalnog postava i promatrane mikrostrukture ispitnog materijala na rezultate ispitivanja. Parametri *in-situ* mehaničkog ispitivanja materijala primjenom računalne tomografije izuzetno su bitni za pouzdanu karakterizaciju vlaknima ojačanih polimera, budući da direktno utječu na mjernu nesigurnost DVC metode, a samim time ograničavaju mogućnost kvantificiranja lokalizacije deformacija i određivanja mehanizama oštećenja.

1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja

Dva su osnovna pristupa korištenja računalne tomografije u kontekstu mehaničkih ispitivanja. Kod *ex-situ* pristupa eksperimentalni postav za opterećivanje uzorka nalazi se izvan radnog područja CT uređaja. Nakon završetka ciklusa opterećenja, uzorak se pozicionira unutar CT uređaja te se pristupa procesu skeniranja. Glavni nedostatak ovog pristupa vezan je uz činjenicu da se uzorak skenira u rasterećenom stanju [2]. Monitoring vlaknima ojačanih polimera primjenom *ex-situ* pristupa skeniranja onemogućava potpuni uvid u oštećenje materijala budući da dolazi do zatvaranja pojedinih mikropukotina iniciranih mehaničkim opterećenjem [6]. Stoga su *in-situ* mehanička ispitivanja prikladnija za promatranje fenomena oštećenja unutar vlaknima ojačanih materijala primjenom računalne tomografije jer dozvoljavaju skeniranje ispitnog uzorka u opterećenom stanju. Naime, kod *in-situ* pristupa, ispitni uređaj smješten je unutar CT skenera što omogućava istovremeno opterećenje i skeniranje ispitnog uzorka. Registraciju 3D slika primjenom *in-situ* pristupa moguće je ostvariti u isprekidanoj, neprekinutoj i kontinuiranoj konfiguraciji. Isprekidani se *in-situ* test tijekom opterećivanja

zaustavlja na unaprijed definiranim razinama naprezanja kako bi se pristupilo zabilježavanju CT skena [7]. Navedeni pristup, često korišten kod laboratorijskih CT skenera, popraćen je fenomenom relaksacije materijala što može dovesti do smanjene kvalitete skena. Iz tog razloga akvizicija skenova ne započinje odmah nakon zaustavljanja opterećenja, već nakon stabilizacije naprezanja [8]. Ovisno o ispitnom materijalu odgoda skeniranja uslijed relaksacije može trajati od nekoliko minuta [9] pa sve do jednog sata [10]. Kod neprekinutog *in-situ* mehaničkog ispitivanja, opterećivanje uzorka je kontinuirano, a diskretan broj skenova se izuzima po definiranoj sekvenci radiografa, simultano s rotacijom uzorka. U kombinaciji s odgovarajućim brzinama akvizicije, na ovaj se način može značajno skratiti vrijeme ispitivanja [11, 12]. Kod kontinuiranog *in-situ* ispitivanja tijekom narinutog mehaničkog opterećenja registriraju se 2D projekcije iz kojih se tijekom cijele povijesti opterećenja rekonstruiraju CT volumeni [6]. Kontinuirani *in-situ* test često je korišten u uvjetima sinkrotronske tomografije (eng. *Synchrotron Tomography*), koja, za razliku od laboratorijskih CT skenera, postiže značajno veću brzinu akvizicije 2D radiografa. Kontinuirana konfiguracija *in-situ* skeniranja posebno je pogodna za ispitivanje materijala kod kojih dolazi do brzih strukturalnih promjena [13] ili kada se želi zabilježiti unutrašnjost materijala neposredno prije loma [14, 15].

Analiza zabilježenih CT skenova primjenom DVC metode pruža mogućnost kvantificiranja cijelog prostornog polja pomaka promatranog materijala, a time i računanje pripadajućih polja deformacija [16, 17]. Skenovi referentnog (tj. neopterećenog) i deformiranog stanja diskretiziraju se na grupe vokseli, tj. podvolumena. Traženje savršenog preklapanja između slika zabilježenih u referentnoj i deformiranoj konfiguraciji provodi se usporedbom raspodjele intenziteta nijansi sive boje svakog podvolumena [18]. Mjerenje polja pomaka primjenom korelacijskih metoda moguće je ostvariti primjenom lokalnog i globalnog DVC pristupa [4]. Lokalnim DVC pristupom pomaci se mjere u središtu svakog podvolumena, primjenom kros-korelacijske funkcije, neovisno o susjednim podvolumenima. Nadalje, polja pomaka određuju se naknadnom interpolacijom izmjenjenih pomaka u središtu svih podvolumena [19]. Kod globalnog se pristupa minimizira suma razlike kvadrata na cijelom području interesa 3D slike koja je diskretizirana mrežom konačnih elemenata. Osim izmjenjenih polja pomaka i izračunatih polja deformacija, ovaj pristup omogućava uvid u polja korelacijskih reziduala pomoću kojih se može pratiti inicijacija i razvoj oštećenja na površini i unutar ispitnog uzorka [20, 21]. Početni korak u primjeni svakog mjernog postupka, tako i DVC metode, jest utvrđivanje standardne mjerne nesigurnosti [22], odnosno pripadajuće rezolucije pomaka i deformacija. Budući da se mjerenje polja pomaka primjenom DVC metode zasniva na analizi digitalne slike,

evidentno je kako će pojava šuma povećati mjernu nesigurnost generirajući pomake koji nisu posljedica mehaničkog opterećenja [23, 24]. Osim toga, diskretizacija slike (tj. veličina podvolumena) utječe na razinu mjerne nesigurnosti. Naime, polja pomaka izmjerena manjim elementima generiraju veću mjernu nesigurnost. Nasuprot tome, primjenom većih podvolumena smanjuje se mjerna nesigurnost, ali se ujedno otežava detekcija lokalizacijskih fenomena (diskontinuitet u poljima pomaka, lokalizacija deformacija, plastičnost itd.) [25]. Stoga je izuzetno bitno pronaći kompromis između mjerne nesigurnosti i korištene diskretizacije volumetrijske slike [26]. Na razine mjerne nesigurnosti također utječe i tekstura/mikrostruktura ispitivanog materijala. Za razliku od površinskih mjerenja kod kojih se nanošenjem odgovarajućeg sredstva na površinu ispitnog uzorka može kontrolirati tekstura, a time i gradijent susjednih piksela digitalne slike, kod 3D mjerenja polja pomaka nemoguće je kontrolirati predefiniranu mikrostrukturu materijala [27]. Shodno tome, provedba DVC mjerenja cijelog polja pomaka izazovnija je za materijale sa siromašnom mikrostrukturom s obzirom na gradijent sive nijanse boje između susjednih vokseli [28, 29]. Zbog navedenih je ograničenja izuzetno važno procijeniti mjernu nesigurnost predložene mjerne metode budući da je u izrazitoj korelaciji s veličinom podvolumena i mikrostrukturom materijala.

Osim diskretizacije slike većim podvolumenima, mjernu nesigurnost DVC metode moguće je smanjiti primjenom mehaničke regularizacije [29]. Mehanička regularizacija zasniva se na pretpostavci elastičnog rješenja traženog polja pomaka, a djeluje kao filter koji propušta samo mehanički signal zabilježen na slikama (tj. filtrira sve nemehaničke pojave, npr. šum uslijed akvizicije slika). Nadalje, primjenom mehaničke regularizacije prevladana su ograničenja prostorne rezolucije i kvalitete promatrane mikrostrukture. Naime, moguće je analizirati materijale sa siromašnom teksturom korištenjem finije mreže konačnih elemenata, čime je dozvoljeno kvantitativno opisivanje lokalizacije deformacija [4, 30].

Mjerenje polja pomaka DVC metodom uobičajeno se primjenjuje na CT skenovima visoke kvalitete čije vrijeme akvizicije može biti izrazito dugotrajan proces, pogotovo kada se radi o laboratorijskoj tomografiji [31]. Jedan pristup rješavanju ovog problema jest razvoj naprednijih laboratorijskih CT skenera s mogućnosti brže akvizicije 2D projekcija, dok drugi pristup podrazumijeva optimiranje broja projekcija ovisno o željenoj vremenskoj rezoluciji i razini akvizicijskog šuma [32]. Naime, rekonstruiranje 3D volumena primjenom manjeg broja radiografa uzrokovat će više razine šuma na slikama, što će posljedično rezultirati višim razinama mjerne nesigurnosti DVC metode. Slijedom toga, potrebno je registrirati skenove različite kvalitete kako bi se *in-situ* mehaničko ispitivanje provelo u realnom vremenu i sa

zadovoljavajućom standardnom mjernom nesigurnosti DVC metode.

Rastuća zastupljenost FRP materijala u mehaničkim konstrukcijama kao i činjenica da se pri eksploatacijskim uvjetima nastanak oštećenja uobičajeno inicira u unutrašnjosti te se postupno širi prema van, uvjetuju potrebu definiranja materijalnih modela koji će opisati ponašanje ovih materijala pri različitim uvjetima opterećenja. U tom smislu, povezivanje računalne tomografije i mehaničkih ispitivanja čini alat za sveobuhvatnu karakterizaciju vlaknima ojačanih materijala [2, 33]. Osim identifikacije materijalnih parametara, analizom CT skenova primjenom DVC metode omogućena je detekcija [34, 35] i kvantifikacija mehanizama oštećenja [36, 37]. Štoviše, DVC metodom mjerenja cijelog polja pomaka moguće je odrediti anomalije [38] i utjecaj tehnološkog procesa izrade FRP materijala na mehanički integritet inženjerske komponente [39].

Na mjernu rezoluciju DVC metode, osim parametara skeniranja i mikrostrukture promatranog materijala, utječe i eksperimentalni postav unutar CT skenera. Ispitni uređaji korišteni pri *in-situ* ispitivanjima svojom konstrukcijskom izvedbom ne smiju ni za jedan kut rotacije zaklanjati prolaz X-zraka. Ovo je jedan od osnovnih zahtjeva koji se postavljaju na konstrukciju uređaja za prihvat i opterećivanje ispitnog uzorka [4]. Zbog toga se povezivanje pomičnog i nepomičnog dijela ispitnog uređaja najčešće izvodi preko cijevi transparentne za X-zrake. Osim transparentnosti, cijevi moraju imati dovoljnu krutost i čvrstoću kako bi prenijele narinuto opterećenje na ispitni uzorak. Pregledom dostupne literature uočeno je da su potporne cijevi *in-situ* uređaja za ispitivanje materijala najčešće izrađene iz polimetilmetakrilata (PMMA) [40, 41, 42, 43, 44, 45] aluminijske [46, 47] i polimera ojačanih ugljičnim vlaknima [48, 49, 50]. Ispitivanje različitih potpornih materijala na propusnost X-zraka [51], pokazalo je kako je cjevasta potpora izrađena od berilija optimalan izbor u smislu zanemarivog prigušenja zračenja u usporedbi s aluminijem, magnezijem i PMMA. Međutim, zbog smanjene dostupnosti i troškova materijala rijetko se koristi. Nadalje, prihvatni uređaji za opterećivanje ispitnih uzoraka koji penetriraju u materijal često su izvedeni iz poli(eter-eter-ke-ton)-a (PEEK) koji ima izuzetna mehanička svojstva i malu apsorpcijom X-zraka [52]. Optimiranje mehaničkog postava za *in-situ* ispitivanja unutar CT skenera može uvelike pomoći pouzdanijoj karakterizaciji FRP materijala. Naime, smanjena apsorpcija X-zraka i otpornost materijala na relaksaciju temeljni su kriterij za odabir materijala potporne cijevi. Stoga je izuzetno bitno ispitati mjernu nesigurnost DVC metode s obzirom na različite materijale cijevi te utjecaj relaksacije potpore na globalni odziv FRP materijala.

1.2. Ciljevi i hipoteze istraživanja

Interpretacija izmjerenih polja pomaka i izračunatih polja deformacija zahtjeva provedbu *a priori* analize primijenjene DVC metode kako bi se odredila njezina standardna mjerna nesigurnost i kvaliteta registracije pomaka izmjerenih iz volumetrijskih slika. Cilj je ovog istraživanja optimirati parametre *in-situ* eksperimentalnog protokola i DVC analize za sveobuhvatnu karakterizaciju vlaknima ojačanih polimera. Istraživanje će biti ograničeno na polimere ojačane staklenim vlaknima.

Hipoteze istraživanja:

1. Kvantifikacija standardne mjerne nesigurnosti DVC metode korištene za karakterizaciju vlaknima ojačanih polimera omogućit će primjenu veće prostorne rezolucije kod mjerenja polja pomaka ove vrste materijala pri uvjetima opterećenja.
2. Optimalne parametre računalne tomografije s obzirom na vrijeme provedbe *in-situ* mehaničkog ispitivanja moguće je odrediti zadovoljavanjem propisanih vrijednosti standardne rezolucije izmjerenih pomaka i izračunatih deformacija DVC metode na volumetrijskim slikama različite kvalitete.

1.3. Očekivani znanstveni doprinos

Očekivani znanstveni doprinosi istraživanja su:

1. Izračun standardne mjerne nesigurnosti DVC metode s obzirom na kontrast volumetrijske slike koji je određen arhitekturom vlakana FRP materijala.
2. Metoda za optimizaciju parametara CT skeniranja koja će omogućiti provedbu DVC analize na volumetrijskim slikama različite kvalitete. Također, na ovaj način značajno će se skratiti vrijeme provedbe *in-situ* mehaničkog ispitivanja primjenom CT skenera.
3. Unapređenje eksperimentalnog postava za mehanička *in-situ* ispitivanja vlaknima ojačanih polimera promatranih računalnom tomografijom.

1.4. Struktura rada

Rad je podijeljen u osam međusobno povezanih cjelina. U uvodnom je dijelu iznesena motivacija nakon čega je opisano trenutno stanje područja istraživanja. Identificirana je rastuća upotreba vlaknima ojačanih polimera u inženjerskim konstrukcijama te je definirana nužnost primjene nerazornih metoda za njihovu pouzdanu karakterizaciju. Opisan je potencijal primjene računalne tomografije u kombinaciji s metodom korelacije digitalnih volumena u svrhu poboljšanja razumijevanja mikromehaničkog ponašanja vlaknima ojačanih polimera. Pregledom dosadašnjih istraživanja detektirani su različiti načini primjene računalne tomografije kod mehaničkih ispitivanja. Ukratko su problematizirani faktori koji utječu na

pouzdanost mjernih rezultata dobivenih metodom korelacije digitalnih volumena s naglaskom na nužnost definiranja parametara koji će u slučaju primjene kod vlaknima ojačanih polimera DVC metodu učiniti optimalno iskoristivom. Nastavno na spoznaje izvedene iz pregleda dosadašnjih istraživanja, definirani su ciljevi istraživanja te su postavljene hipoteze rada.

U drugom su poglavlju početno prikazane dvije osnovne izvedbe laboratorijskih CT uređaja, nakon čega se pristupilo opisu postupka skeniranja primjenom rendgenskog zračenja. Detaljno su objašnjen osnovne faze procesa skeniranja pri čemu je naglasak stavljen na laboratorijsku tomografiju, koja je zbog jednostavnije dostupnosti primijenjena unutar eksperimentalnog dijela ovog rada. Dodatno su objašnjeni artefakati koji se mogu javiti kao posljedica slučajnih ili sustavnih pogrešaka prilikom procesa skeniranja. Ukratko su prezentirani *ex-situ* i *in-situ* pristupi primjene računalne tomografije u kontekstu mehaničkih ispitivanja te je u završnom dijelu poglavlja dan pregled najčešćih izvedbi *in-situ* uređaja. Nešto je detaljnije opisana *in-situ* kidalica za statički vlačno-tlačni test razvijena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje pošto je na primjeru ove kidalice analiziran utjecaj materijala cjevaste potpore na pouzdanost rezultata dobivenih metodom korelacije digitalnih volumena.

U trećem je poglavlju dan detaljan opis metode korelacije digitalnih volumena. Opisan je lokalni i globalni pristup te je pokazano kako dostupnost polja korelacijskih reziduala kod globalnog pristupa može poslužiti za detekciju mjesta nastanka oštećenja unutar materijala. Predstavljena su tri osnovna načina određivanja mjerne nesigurnosti DVC metode pri čemu je naglašena glavna prednost pristupa koji je korišten u eksperimentalnom dijelu ovog rada, a koji uključuje korelacijsku analizu dvaju uzastopno registriranih skenova. Značajan dio poglavlja usmjeren je na analizu faktora koji utječu na razine standardne mjerne nesigurnosti DVC metode. Ovo se u prvom redu odnosi na utjecaj veličine diskretizacije mreže konačnih elemenata, ali je također problematiziran utjecaj mikrostrukture/teksture ispitivanog materijala, zatim utjecaj topline generirane unutar rendgenske cijevi CT skenera kao i utjecaj kvalitete rekonstruiranih skenova. U poglavlju je isto tako opisan regularizacijski pristup čija primjena može voditi nižoj mjernoj nesigurnosti DVC metode.

U četvrtom je poglavlju dan opis vlaknima ojačanih polimera. Prikazane su različite klasifikacije vlaknima ojačanih polimera te su ukratko prezentirana ugljična, staklena i aramidna vlakna - tri najčešće korištena ojačala kod vlaknima ojačanih polimera. Opisani su pucanje matrice, odvajanje matrice i vlakna, delaminacija te lom vlakna kao najčešći mehanizmi oštećenja ovih materijala. Nadalje, dan je detaljan opis vinilesterske smole ojačane slojevima staklenih vlakana *MAT* (tj. stohastički raspoređena kontinuirana vlakna), *UD* (tj.

kontinuirana vlakna paralelna s uzdužnim smjerom), *WF* (tj. uzdužno i poprečno pletena vlakna) i *AP* (tj. kontinuirana jednosmjerna vlakna naizmjenice okretana $+45^\circ/-45^\circ$) arhitekture koja je korištena u eksperimentalnom dijelu rada. Objašnjen je proces proizvodnje kompozitnih ploča iz kojih su kasnije rezani ispitni uzorci, dan je detaljan pregled mikrostrukture ostvaren primjenom optičkog mikroskopa te primjenom CT skeniranja te su navedeni volumni i maseni udjeli konstituenata za svaku od promatranih arhitektura.

Peto poglavlje odnosi se na eksperimentalnu kampanju kod koje se određivala mjerna nesigurnost DVC metode primijenjene kod različitih izvedbi staklenim vlaknima ojačanih polimera. Izvedba različitih vrsta staklenim vlaknima ojačanih polimera ostvarena je primjenom specifičnih arhitektura vlakana. Skeniranjem ispitnih uzoraka četiri različite arhitekture vlakana postignuti su različiti kontrasti na rekonstruiranim volumenima. Primjenom globalnog DVC pristupa, korelirajući dva uzastopno zabilježena skena neopterećenog stanja, pristupilo se potom određivanju mjerne nesigurnosti DVC metode. Dobiveni rezultati ukazuju na značajne razlike u ostvarenim mjernim nesigurnostima metode ovisno o primijenjenoj arhitekturi vlakana. Dodatno je unutar ovog poglavlja analizirana primjena mehaničke regularizacije u svrhu dodatnog sniženja standardne mjerne nesigurnosti kod različite arhitekture vlakana.

U šestom se poglavlju eksperimentalnim ispitivanjem pristupilo procjeni utjecaja ispitnog okruženja na vrijednosti standardne mjerne nesigurnosti DVC metode. Ispitivanje je ograničeno na staklenim vlaknima ojačane polimere *MAT* arhitekture vlakana, a istraživan je utjecaj materijala cjevaste potpore *in-situ* ispitnog uređaja na mjernu nesigurnost DVC metode te su definirane optimalne veličine diskretizacije mrežom konačnih elemenata ovisno o korištenom materijalu cjevaste potpore. Dodatno je provedeno mehaničko ispitivanje s ciljem određivanja relaksacije materijala predloženih za izradu cjevaste potpore *in-situ* kidalice kao i relaksacije samog ispitnog uzorka. Viskoelastično ponašanje vlaknima ojačanih polimera, u kombinaciji s relaksacijom cjevaste potpore ispitnog uređaja, može uzrokovati pogrešna izmjerena stanja naprezanja u materijalu. Zbog toga su provedena tlačna ispitivanja s četiri različite vrste cjevastih potpora kako bi se simuliralo reakcijsko opterećenje tijekom *in-situ* vlačnih ispitivanja. Na taj su način dobiveni rezultati relaksacije za svaku pojedinu izvedbu (materijal) cjevaste potpore. Kako bi se ispitaio relaksacijski karakter staklenim vlaknima ojačanih polimera dodatno su provedeni statički vlačni testovi na ispitnim uzorcima različite arhitekture vlakana.

U sedmom je poglavlju analiziran utjecaj različitih parametara skeniranja na mjerne

nesigurnosti globalnog DVC protokola. Dobivenim rezultatima kvantificirani su iznosi mjernih nesigurnosti koje su za *MAT* arhitekturu vlakana ostvarene analizom skenova različite kvalitete te je demonstrirano kako se značajne vremenske uštede mogu ostvariti primjenom kontinuiranog akvizicijskog protokola ili snimanjem skenova niže kvalitete.

U završnom su poglavlju sumirani najbitniji zaključci izvedeni iz ovog istraživanja te su definirane smjernice za buduća istraživanja.

2. RAČUNALNA TOMOGRAFIJA X-ZRAKAMA

2.1. Uvod

Računalna tomografija (eng. *Computed Tomography – CT*) jedna je od radiografskih tehnika koja koristi snop ionizirajućeg zračenja (X-zrake) za snimanje niza dvodimenzionalnih projekcija (radiografa) promatranog predmeta pri različitim kutovima gledanja. Naziv dolazi od grčkih riječi „*tomos*“ što znači presjek i „*graphein*“ što znači pisati, pa bi doslovan prijevod pojma „*tomografija*“ bio „*zapis o presjeku*“. Rekonstruiranjem zabilježenih radiografa pomoću rekonstrukcijskih algoritama dobiva se 3D prikaz kompletnog volumena ispitnog objekta. Omogućivši promatranje kako površine, tako i kompletne unutrašnjosti promatranog predmeta, računalna tomografija postaje izuzetno koristan alat koji rastuću primjenu nalazi u brojnim područjima. Počevši od prvotne primjene u medicini, gdje se njena implementacija smatra najznačajnijom inovacijom u području radiološke dijagnostike u dvadesetom stoljeću [53], računalna tomografija svoju primjenu danas nalazi u područjima znanosti o materijalima, elektronike, arheologije, zrakoplovne industrije, automobilske industrije, itd. Ovisno o području primjene, postoje značajne razlike u pogledu izvedbe CT uređaja i pripadajućih protokola ispitivanja, pošto se istraživački ciljevi također razlikuju. Zone radijacije u medicini primjerice trebaju biti snižene kako bi se zaštitio pacijent od opasnog zračenja, dok su u dimenzijskom mjeriteljstvu potrebne velike penetrirajuće snage kako bi se skenirali veći objekti izvedeni od slabije propusnih materijala (npr. metala) ili kako bi se udovoljilo zahtjevima o traženim točnostima koji su u industrijskoj praksi znatno izraženiji nego što je to slučaj u medicini [54].

U kontekstu ovog doktorskog rada zanimljiva je primjena računalne tomografije kao tehnike nerazornog ispitivanja jer omogućuje praćenje i kvantificiranje ponašanja materijala pri simuliranim eksploatacijskim uvjetima. U kombinaciji s metodom korelacije digitalnih volumena, koja je opisana u sljedećem poglavlju, primjenom računalne tomografije moguće je kvantificirati cijela polja pomaka koja nastaju unutar i na površini ispitivanog materijala kao posljedica narinutog mehaničkog opterećenja. Nadalje, iz izmjerenih polja pomaka moguće je izračunati pripadajuća polja deformacija. Ovim je pristupom moguće odrediti globalni odziv materijala uslijed narinutog opterećenja, što je jedan od temeljnih zadataka eksperimentalne mehanike.

Ovisno o primijenjenom izvoru X-zračenja, dvije su osnovne izvedbe korištenja računalne tomografije u eksperimentalnoj mehanici: laboratorijska tomografija i sinkrotronska tomografija. Primjenom sinkrotronske tomografije moguće je postići značajne uštede u

vremenu skeniranja zahvaljujući nekoliko redova veličina većem protoku rendgenskih zraka u usporedbi s laboratorijskom tomografijom [8]. Iz tog je razloga primjenom sinkrotronske tomografije moguće koristiti monokromatsko X-zračenje, čime se mogu izbjeći neki neželjeni efekti pri rekonstrukciji slike [55], kao što je pojava artefakata otvrdnjivanja, o čemu će biti riječ dalje u radu. Glavni nedostatak sinkrotronske tomografije vezan je uz njenu dostupnost. U svijetu, naime, postoji malen broj postrojenja u kojima se generiraju zrake sinkrotronskog zračenja, pa su istraživački timovi značajno limitirani u pogledu njegovog korištenja. Neki od istraživačima dostupnih postrojenja za generiranje sinkrotronskog zračenja su *European Synchrotron Radiation Facility* u Francuskoj, *SPRING-8* u Japanu, *Advanced Photon Source* u Sjedinjenim Američkim Državama, *Synchrotron Light Source* u Švicarskoj, *Diamond Light Source* u Ujedinjenom Kraljevstvu.

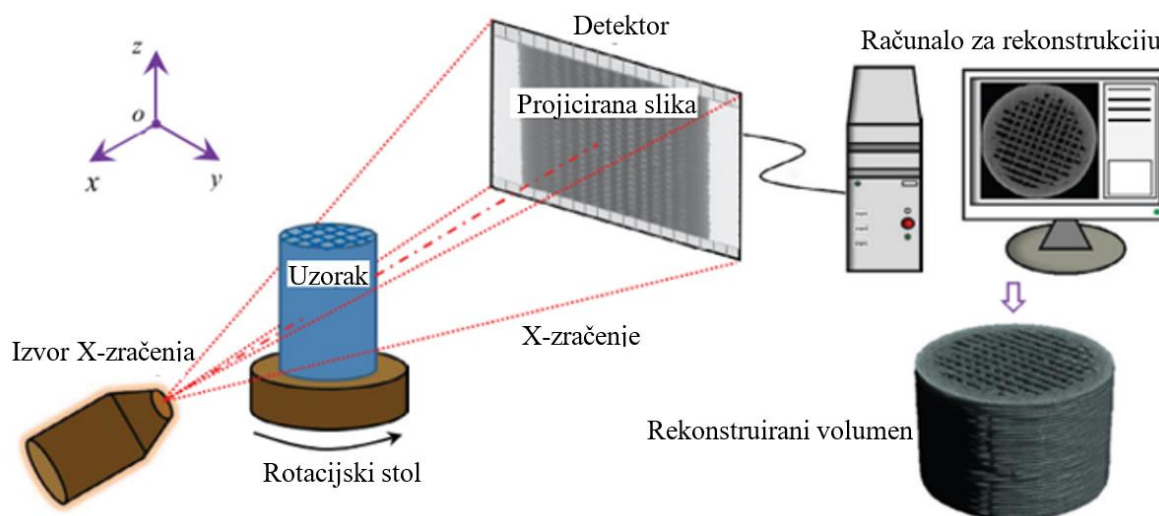
Pošto će se u eksperimentalnom dijelu ovog rada kompletno skeniranje ispitnih uzoraka vršiti primjenom laboratorijskih CT uređaja, daljnji opisi tehnike računalne tomografije odnosit će se upravo na laboratorijsku tomografiju.

2.2. Provedba skeniranja primjenom računalne tomografije X-zrakama

Uređaji korišteni za ispitivanje materijala primjenom laboratorijske tomografije mogu se nazivati laboratorijskim CT uređajima ili industrijskim CT uređajima, ili jednostavno tomografima. Njihove su glavne komponente izvor zračenja, detektor rendgenskih zraka, rotacijski stol koji se nalazi između izvora zračenja i detektora te računalna jedinica koja služi za prikupljanje, obradu i vizualizaciju zabilježenih podataka (vidi sliku 2-1).

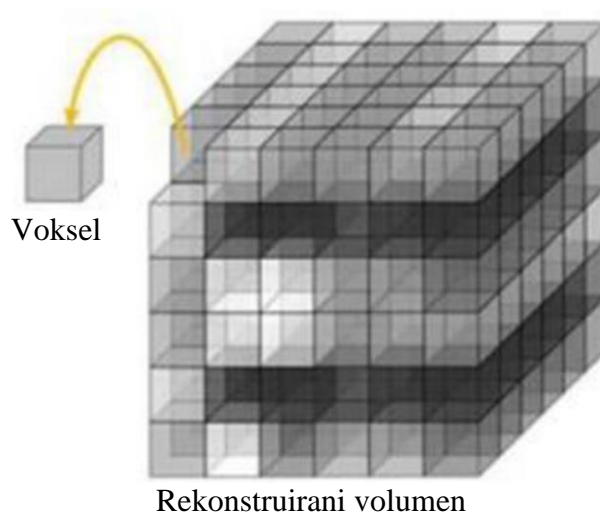
Princip rada laboratorijskog CT skenera temelji se na prolasku rendgenskog zračenja kroz ispitivani objekt koji se za jedan puni krug rotira na zakretnom stolu CT uređaja. Kako se ispitni objekt nalazi na putanji emitiranih X-zraka (tj. emitiranih fotona), prilikom prodiranja kroz objekt jedan dio rendgenskog zračenja biva apsorbiran, jedan dio reflektiran, a jedan dio prolazi kroz sami objekt do detektora. Proces u kojem se rendgensko zračenje prolaskom kroz ispitni objekt djelomično apsorbira, a djelomično raspršuje naziva se prigušenje zračenja ili atenuacija i nastaje kao posljedica interakcije fotona s materijalom ispitivanog objekta. Mjerenjem intenziteta oslabljenog zračenja koje prolazi kroz predmet i dolazi do detektora dobivaju se dvodimenzionalne slike sive nijanse boja. Ovisno o vrsti detektora, mogu se registrirati i jednodimenzionalni profili sivih nijansi. Drugim riječima, svakom pikselu ovako dobivenih projekcija pridružuje se određena vrijednost skale sivih tonova koja zapravo predstavlja mjeru intenziteta detektiranog zračenja na konkretnoj lokaciji. Skeniranjem objekta pod različitim kutovima, dok rotira na zakretnom stolu, bilježi se veliki broj projekcija. Matematičkom

rekonstrukcijom tih projekcija kreira se trodimenzionalni model promatranog objekta.



Slika 2-1 Shematski prikaz skeniranja objekta primjenom računalne tomografije [56]

Ovako kreirani model prikazan je na slici 2-2, a definira trodimenzionalnu sliku koja se sastoji od matrice voksela, što je zapravo prostorni ekvivalent piksela. Pritom vrijedi analogija s 2D slikom – svakom vokselu dodijeljena je vrijednost skale sivih tonova koja predstavlja lokalnu gustoću apsorpcije X-zraka.



Slika 2-2 Rekonstruirani volumen sačinjen od voksela [57]

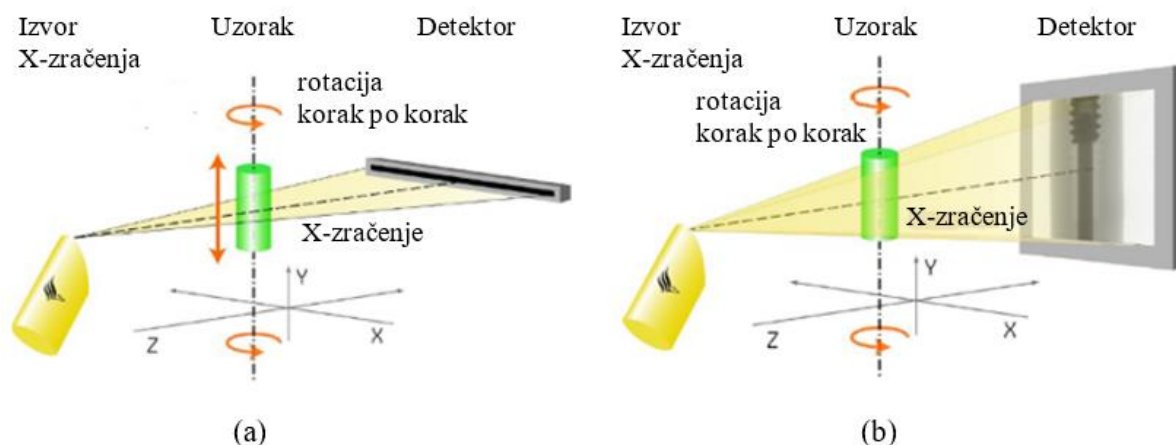
2.3. Izvedba laboratorijskih CT uređaja

Ovisno o konfiguraciji izvora zračenja i detektora te posredno o poprečnom presjeku rendgenske zrake, laboratorijski CT uređaji pojavljuju se u dvije konfiguracije:

- linijski ili 2D-CT uređaji
- konusni ili paralelni ili 3D-CT uređaji.

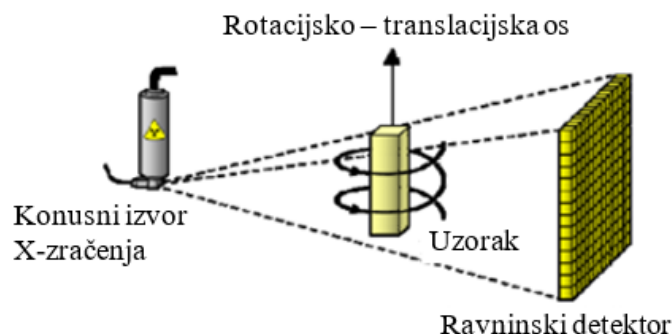
Linijski CT uređaji, čiji je princip rada prikazan na slici 2-3(a), koriste linijski detektor i ravninski izvor zračenja, pri čemu rendgenska zraka poprima lepezasti oblik. Zabilježavanje jedne projekcije vrši se translacijom rendgenske zrake po visini ispitivanog objekta. Pritom se sinkronizirano transliraju izvor zračenja i detektor dok ispitni objekt ostaje na rotacijskom stolu. Prije svakog translatornog skeniranja ispitni objekt inkrementalno se zarotira zauzimajući novu orijentaciju za skeniranje. Ovakav postupak snimanja projekcija ponavlja se do onog trenutka dok ispitni objekt ne učini puni zakret (tj. 360°). Broj zabilježenih projekcija pritom ovisi o inkrementu rotacije objekta. Glavni je nedostatak ove vrste uređaja dugotrajnost postupka skeniranja koja proizlazi iz potrebe za translacijskim kretanjem.

Konusni ili paralelni CT uređaji, čiji je princip rada prikazan na slici 2-3(b), koriste konusni ili paralelni izvor zračenja i detektor pravokutnog oblika. Iz tog razloga, kod konusnih ili paralelnih CT uređaja za uzimanje jedne projekcije nije potrebno ostvarivati translacijsko gibanje, kao što je to slučaj kod linijskih CT uređaja. Ovo dovodi do skraćivanja vremena skeniranja. Kod konusnih CT uređaja, u usporedbi s paralelnim, javljaju se nedostaci upravo zbog konusnog oblika emitiranog zračenja. Naime, konusni oblik zračenja uzrokuje rasipanje rendgenskih zraka na rubovima ispitnog objekta, što izravno utječe na kvalitetu rekonstruirane geometrije.



Slika 2-3 Konfiguracija (a) linijskog i (b) konusnog CT uređaja [57]

Dodatan problem kod konusnih CT uređaja povezan je s kvalitetom rekonstruirane geometrije koja opada što je veća udaljenost promatranog dijela objekta od centra tog istog objekta [58]. Ovaj se problem može riješiti dodavanjem dodatne translacijske osi koja je paralelna s rotacijskom osi CT uređaja (slika 2-4). Na taj se način može postići spiralna trajektorija skeniranja koja osigurava da svaki dio rekonstruiranog volumena bude projiciran na središnjem dijelu detektora. Ovo je posebno korisno kod skeniranja objekata većih dimenzija.

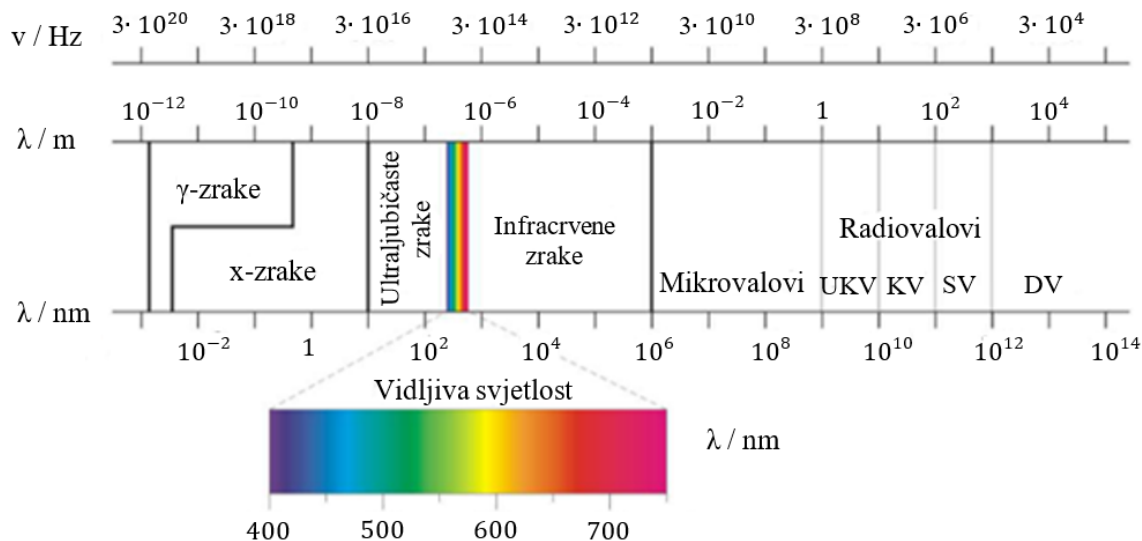


Slika 2-4 Konfiguracija konusnog CT uređaja sa spiralnom trajektorijom skeniranja [59]

U eksperimentalnom dijelu ovog doktorskog rada skeniranje ispitnih uzoraka provedeno je u CT uređajima s konusnim izvorima zračenja. U sljedećem poglavlju opisan je princip rada računalne tomografije, koji je u suštini jednak za slučaj konusne/paralelne i linijske izvedbe CT uređaja. Naglasak je stavljen na slučaj konusne izvedbe CT uređaja, koja je daleko zastupljenija u laboratorijskim i inženjerskim primjenama.

2.4. Princip rada računalne tomografije

Princip rada računalne tomografije temelji se na prolasku rendgenskih zraka (tj. X-zraka) kroz ispitni objekt, čime se vrši njegovo skeniranje. Rendgenske zrake pripadaju spektru elektromagnetskog zračenja (slika 2-5) s valnim duljinama između 0,01 nm i 10 nm, što približno odgovara području između ultraljubičastog i gama zračenja.

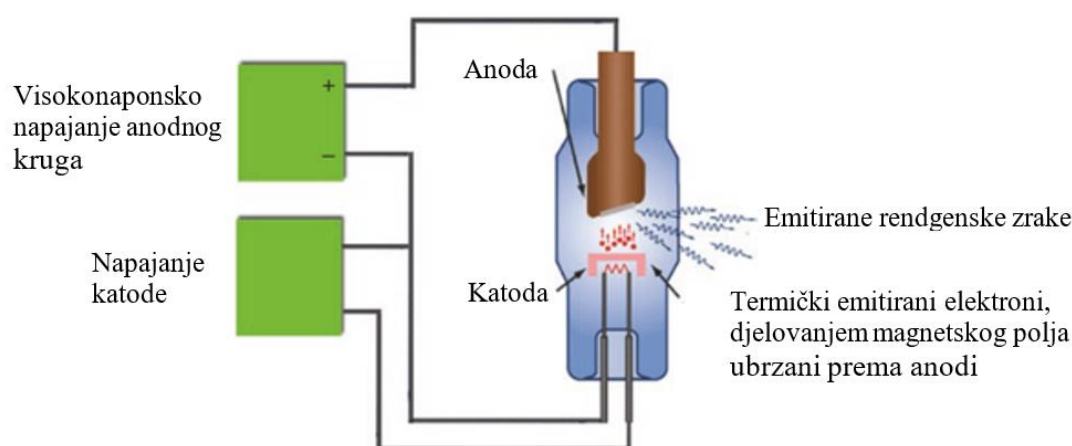


Slika 2-5 Spektar elektromagnetskog zračenja [60]

U laboratorijskim CT uređajima rendgenske se zrake generiraju u rendgenskim cijevima koju sačinjavaju dvije elektrode: katoda i anoda. Shematski prikaz rendgenske cijevi dan je na slici 2-6. Prilikom rada, kroz katodu prolazi struja žarenja, ili katodna struja. Zbog omskog otpora katode razvija se na njoj toplina uslijed koje se temperatura katode povećava iznad 2000 K, pri

čemu dolazi do pojave termičke emisije elektrona. Ako se uspostavi napon pravilnog polariteta između katode i anode, na elektrone koji su emitirani iz katode djelovat će sila koja ih ubrzava prema anodi. Do dolaska na anodu elektroni će imati relativno velike kinetičke energije. Međudjelovanjem ubrzanih elektrona i atoma mete dolazi do emisije rendgenskog zračenja uslijed djelovanja tri odvojena procesa [60]:

- usporavanja elektrona u procesu približavanja jezgri atoma mete
- izbacivanja elektrona s elektronskog omotača atoma mete te popunjavanja ispražnjenog mjesta u ljusci elektronskog omotača
- interakcije elektrona s jezgrom atoma mete.

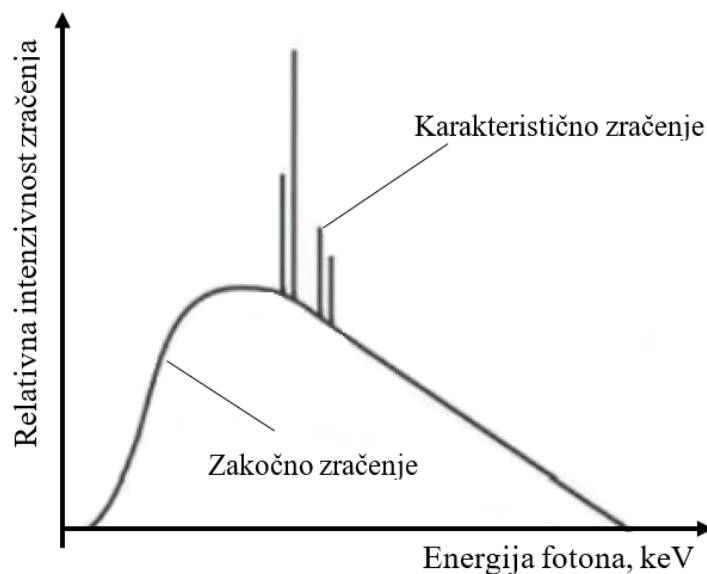


Slika 2-6 Shematski prikaz rada rendgenske cijevi [54]

Spektar rendgenskog zračenja sastoji se od kontinuiranog (zakočnog) i linijskog (karakterističnog) zračenja.

Zakočno zračenje (njem. *Bremsstrahlung*) nastaje kada se elektron jako približi jezgri atoma mete, ali se ne sudara izravno s njom. Tijekom ovog procesa, elektron je pod utjecajem snažnih nuklearnih sila, pri čemu pozitivno nabijena jezgra privlači negativno nabijeni elektron. Gubitak energije uslijed ove interakcije rezultira emisijom fotona s jednakom energijom. Ovaj nagli gubitak brzine elektrona uzrokuje radijaciju poznatu kao zakočno zračenje. Vjerojatnost ovog tipa radijacije povećava se s atomskim brojem (Z) mete i s povećanjem energije elektrona. S obzirom na prostornu razdiobu elektronskog snopa, postiže se kontinuiran spektar zračenja. Karakteristično zračenje nastaje izbacivanjem elektrona iz ljuske elektronskog omotača atoma anode tj. mete. Tada se ulazni elektron izravno sudari s jednim od elektrona unutar ljuske, stvarajući prazninu u elektronima. Kada se ta praznina popuni elektronima iz vanjske ljuske, emitira se diskretni spektar rendgenskih zraka. Karakteristično zračenje, ovisno o atomskom broju mete, stvara energetske šiljke koji se preklapaju sa zakočnim zračenjem (slika 2-7).

Karakteristična X-zračenja svojstvena su materijalu mete. Kako se smanjuje valna duljina korištenih X-zraka, energija po fotonu se povećava stvarajući mogućnost veće prostorne rezolucije [61].

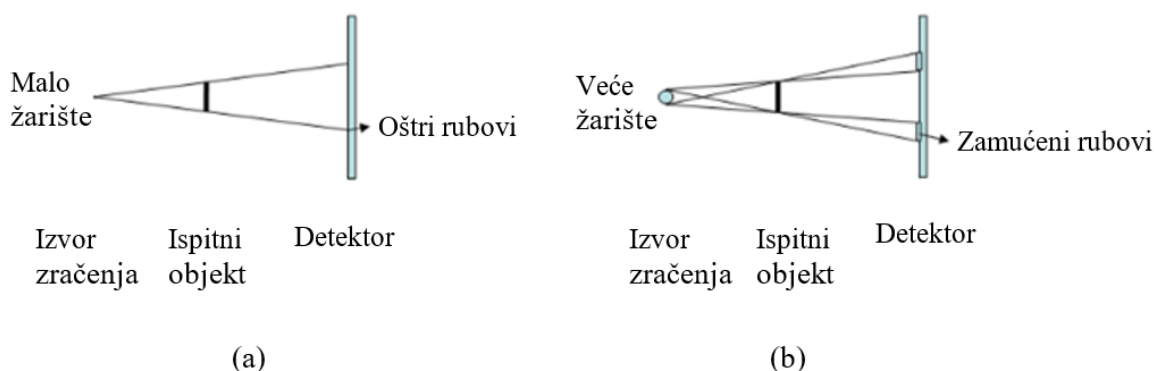


Slika 2-7 Spektar rendgenskog zračenja [61]

Vrijednosti energija karakterističnog zračenja posljedica su odabranog materijala mete. Najčešće korišteni materijali mete su: volfram, krom, željezo, kobalt, bakar, molibden te srebro [60]. Odabirom i promjenom materijala mete moguće je mijenjati spektar rendgenskog zračenja ovisno o potrebama skeniranja.

Rendgenske cijevi korištene u laboratorijskim CT uređajima uobičajeno rade na naponima do 450 kV [61]. Za skeniranje materijala većih dimenzija ili veće gustoće često su potrebni veći naponi jer se time poboljšava kvaliteta i razlučivost slika. S druge strane, prevelik napon rendgenskog zračenja može u nekim slučajevima uzrokovati nisku rezoluciju, slab kontrast i pojavu neželjenih artefakata na slikama. Iz tog je razloga potrebno pažljivo odabrati napon rendgenskog zračenja kako bi se postigla najbolja moguća kvaliteta zabilježene slike.

Zrake nastale u rendgenskoj cijevi usmjeravaju se prema žarištu (eng. *Focal Spot*). Vrijedi napomenuti kako su veličina i oblik žarišta ključni za postizanje visokokvalitetnih skenova, a posljedično i za kvalitetu rezultata ispitivanja. Veličina žarišta pritom se odnosi na površinu na kojoj se elektroni fokusiraju na anodi prije nego što emitiraju rendgenske zrake. Manje žarište, prikazano na slici 2-8(a), rezultirat će boljom rezolucijom slike pošto omogućuje fokusiranje rendgenskih zraka na manji prostor. Također, manje žarište generirat će oštrije rubove na projiciranoj slici za razliku od većeg žarišta, koje je prikazano na slici 2-8(b), a čija će primjena dovesti do pojave zamućenih rubova na projiciranoj slici.



Slika 2-8 Utjecaj veličine žarišta na rubove projicirane slike; (a) malo žarište i (b) veliko žarište [62]

Korištenje manjeg žarišta može rezultirati neželjenom koncentracijom topline na anodi unutar rendgenske cijevi. Iz tog razloga, industrijske izvedbe CT uređaja obično uključuju sustave za odvođenje topline s rendgenskih cijevi, kao što su sustavi rotirajuće anode ili sustavi za cirkulaciju vode ili drugih medija [61].

U interakciji s ispitnim objektom, dio se rendgenskog zračenja apsorbira, dio rasprši, a preostali dio biva prigušen (atenuiran) i kao takav ide prema detektoru. Uzimajući u obzir nehomogenost ispitnog materijala i činjenicu kako se kod laboratorijske tomografije koristi polikromatski spektar zračenja, približan intenzitet preostalog zračenja može se prikazati preko izraza (2-1) preuzetog iz [57]:

$$I(d) = I_0 e^{-\int_0^d \mu(x) dx}, \quad (2-1)$$

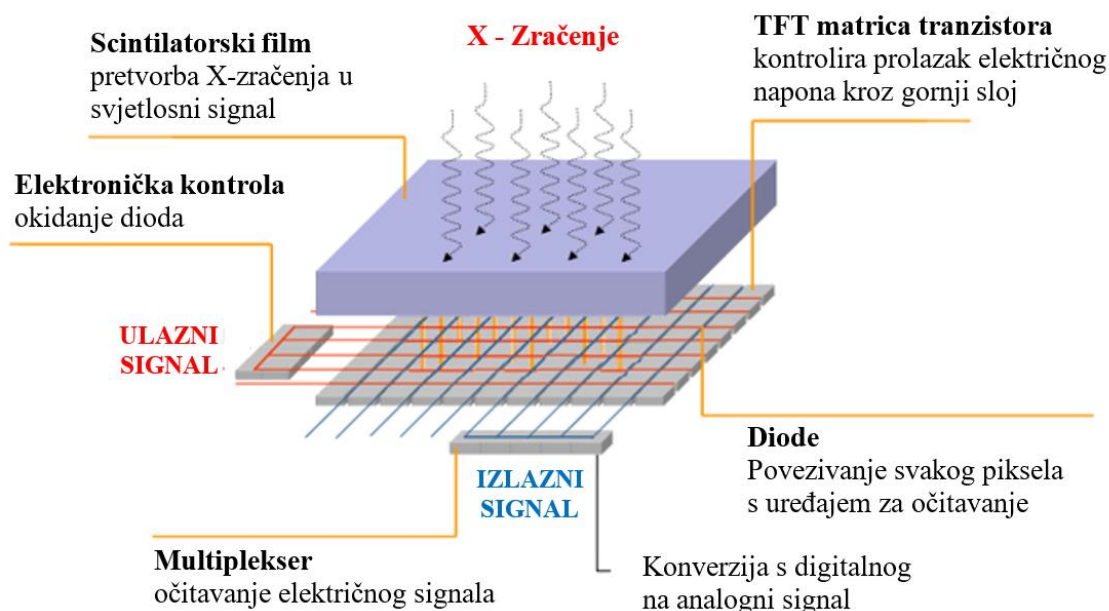
pri čemu je:

I	W/sr	intenzitet preostalog zračenja koje je prošlo kroz predmet
I_0	W/sr	intenzitet početnog (emitiranog) zračenja
μ	m^{-1}	koeficijent prigušenja prozračenog materijala
d	m	debljina predmeta, put koji prolaze zrake.

Rendgensko zračenje, koje je oslabljeno prolaskom kroz ispitivani materijal, dolazi do detektora. Detektori mjere intenzitet prolaznog zračenja i generiraju električne signale. Obradom tih signala stvaraju se 2D projekcije ispitivanog objekta.

Kod laboratorijskih CT uređaja s konusnim izvorom zračenja koriste se pravokutni detektori (eng. *Flat Panel Detector*) sastavljeni od mreže senzora, pri čemu svaki pojedini senzor pozicijom i veličinom odgovara pripadajućem slikovnom zapisu. Rad detektora korištenih kod laboratorijskih 3D-CT skenera temelji se na procesu scintilacije, tj. svojstvu fluorescirajućih i fosforescirajućih tvari da nakon prolaska ionizirajućeg zračenja emitiraju elektromagnetske valove u području vidljivog i ultraljubičastog spektra [63]. Pri prolasku rendgenskog zračenja

kroz scintilator dolazi do interakcije s atomima u scintilatoru. Ovi atomi apsorbiraju energiju zračenja i brzo ju oslobađaju u obliku kratkotrajnog bljeska vidljive svjetlosti. Taj bljesak svjetlosti detektira se preko fotodioda ili fotomultiplikatora te se pretvara u električni signal koji se može dalje elektronički obrađivati. Princip rada pravokutnog scintilatorskog detektora prikazan je na slici 2-9.



Slika 2-9 Princip rada pravokutnog scintilatorskog detektora [64]

Nakon što detektor zabilježi 2D projekcije ispitivanog objekta, idući je korak rekonstrukcija ispitnog volumena koja se temelji na tehnici filtrirane inverzne projekcije (eng. *Filtered Back Projection*). U zabilježenim 2D projekcijama, svakom pikselu pridružuje se određena vrijednost skale sive boje koja odražava iznos detektiranog zračenja. Napredni matematički algoritmi kombiniraju podatke iz niza 2D projekcija kako bi se generirao 3D voksel model s različitim vrijednostima skale sivih tonova.

Matematička podloga rekonstrukcijskih algoritama jest Radonova transformacija koja povezuje prostorne koordinate (x, y) točaka ispitivanog objekta i projekcijske koordinate (s, θ) :

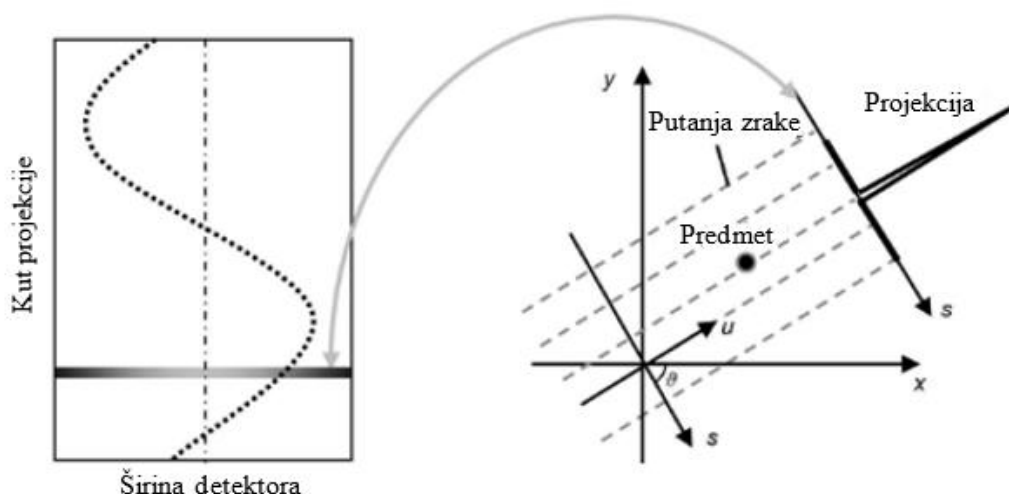
$$g(s, \theta) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s) dx dy \quad (2-2)$$

za sve:

$$-\infty < \infty, 0 \leq \theta \leq \pi. \quad (2-3)$$

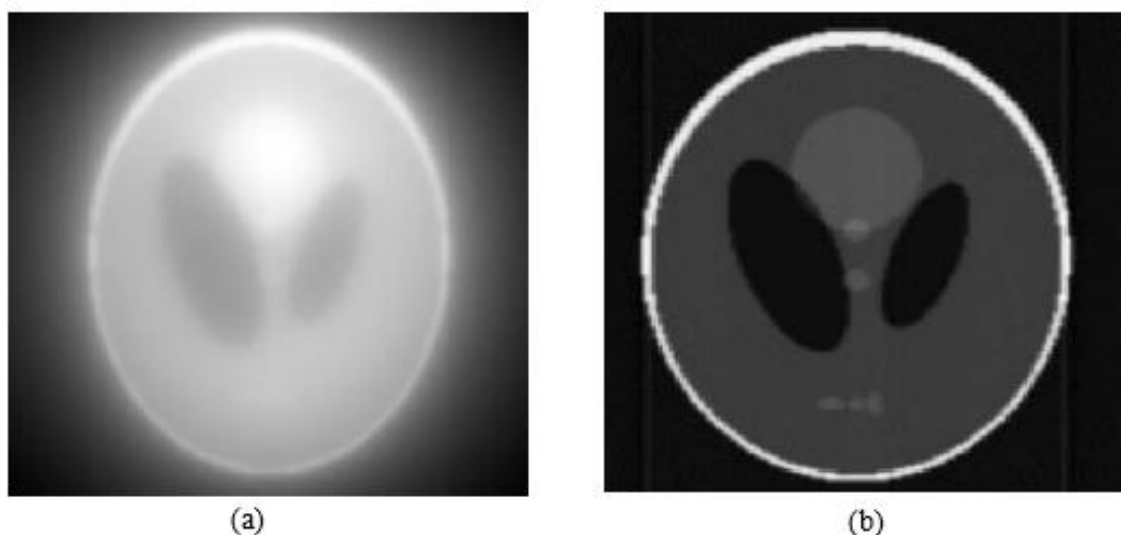
U gornjem izrazu funkcija $g(s, \theta)$ predstavlja Radonovu transformaciju projekcije funkcije $f(x, y)$ pod kutom θ , dok $\delta(x)$ predstavlja Diracovu distribuciju.

Budući da točka u prostornoj domeni (x,y) odgovara sinusoidi u projekcijskoj domeni (s, θ) , rezultat Radonove transformacije naziva se sinogram. Sinogram predstavlja 2D zapis odabranog poprečnog presjeka (engl. *Cross-section*) pri čemu ordinata predstavlja kut projekcije, a apscisa linijsku projekciju po širini detektora. Sinogram se sastoji od naslaganih projekcija iz različitih kutova, tako da svaka horizontalna linija u sinogramu prikazuje jednu projekciju [60]. Projekcija točke preslikava se u sinusoidnu krivulju kako je prikazano na slici 2-10.



Slika 2-10 Postupak formiranja sinograma [60]

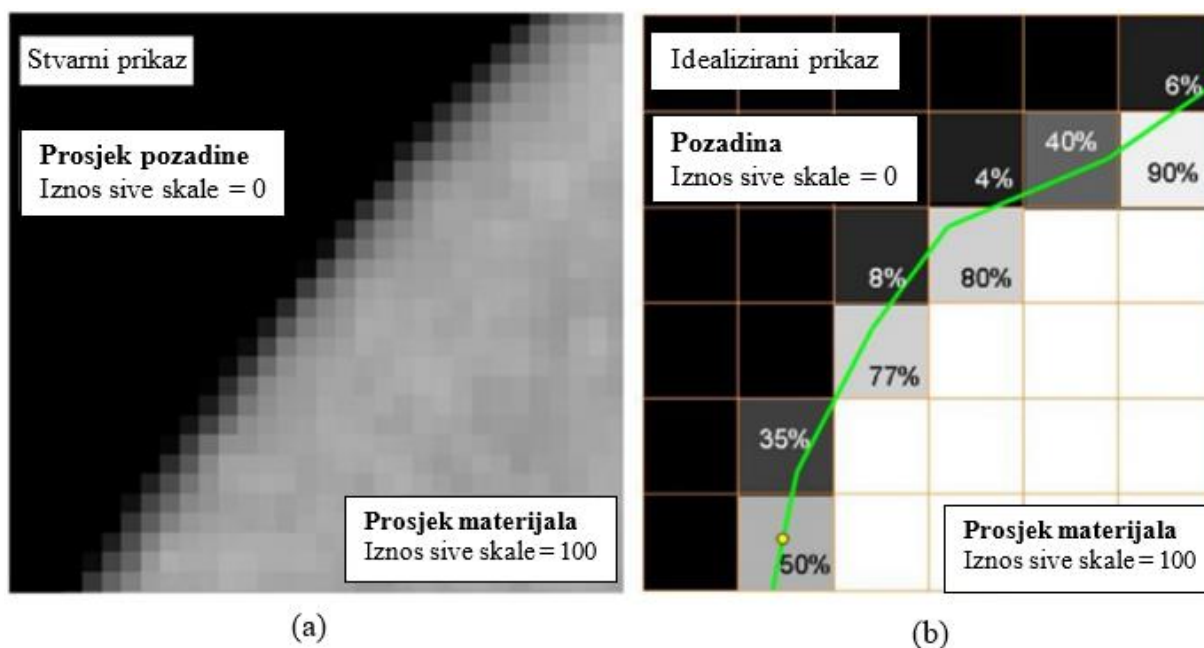
Primjenjujući tzv. inverznu Radonovu transformaciju moguće je realizirati obrnut proces (eng. *Back Projection*) te iz sinograma, zabilježenih iz konačnog broja projekcija, rekonstruirati početni volumen. Kako bi se pritom eliminirale pojave zamućenja slike potrebno je provesti proces filtriranja. Nužnost provođenja procesa filtriranja ilustrirana je usporedbom između slike 2-11(b), koja prikazuje rekonstruiranu sliku nastalu upotrebom filtriranja i slike 2-11(a) na kojoj je prikazana rekonstruirana slika nastala bez upotrebe filtriranja.



Slika 2-11 Rekonstruirana slika nastala (a) bez upotrebe filtera i (b) upotrebom filtera [65]

Usporedbom ovih dvaju slučajeva evidentno je kako provedba filtriranja eliminira zamućenost rekonstruirane slike, čime se postiže veća kvaliteta slike, a posljedično se time pruža mogućnost efikasnije analize ispitivanog objekta. Proces filtriranja može biti proveden prije ili nakon inverzne transformacije, a važno je napomenuti kako su iz prethodnih istraživanja proizašli rezultati koji ukazuju na veću točnost algoritama koji provode filtriranje prije inverzne transformacije [65]. Za bolje razumijevanje vrsta filtera korištenih pri inverznoj transformaciji, čitatelja se upućuje na rad [65], gdje su predstavljene različite vrste filtera te su analizirane prednosti i nedostaci njihove primjene u procesu rekonstrukcije slike.

Za uspješnu analizu rekonstruiranih modela nužno je prvo odrediti površine ispitnog objekta, odnosno razgraničiti voksele s različitim vrijednostima sivih tonova koji pripadaju materijalu (tj. promatranom predmetu interesa) od onih koji pripadaju pozadini. To se postiže određivanjem granične vrijednosti sive skale (eng. *Threshold Value*). Granična vrijednost predstavlja kritičan parametar koji se koristi za preciznu segmentaciju i određivanje površinskih podataka koji su bitni za rekonstrukciju slike. Ovaj kriterij pretvara vrijednosti sivih tonova u binarne, stvarajući sliku koja se sastoji od dva seta - jedan koji predstavlja pozadinu (npr. crno) i drugi koji predstavlja objekt (npr. bijelo). Granična vrijednost ima ključnu ulogu u određivanju rubova skeniranog objekta i pozadine te se primjenjuje na svakom vokselu unutar volumena [57]. Postupak određivanja granice predmeta prikazana je preko slike 2-12(b) pri čemu zelena linija predstavlja površinu ispitnog objekta. Prikazani postoci predstavljaju preklapanje odgovarajućeg vokselu s objektom i sivu vrijednost vokselu istovremeno.



Slika 2-12 Stvarni (a) i idealizirani (b) prikaz 2D zapisa [66]

2.5. Artefakti

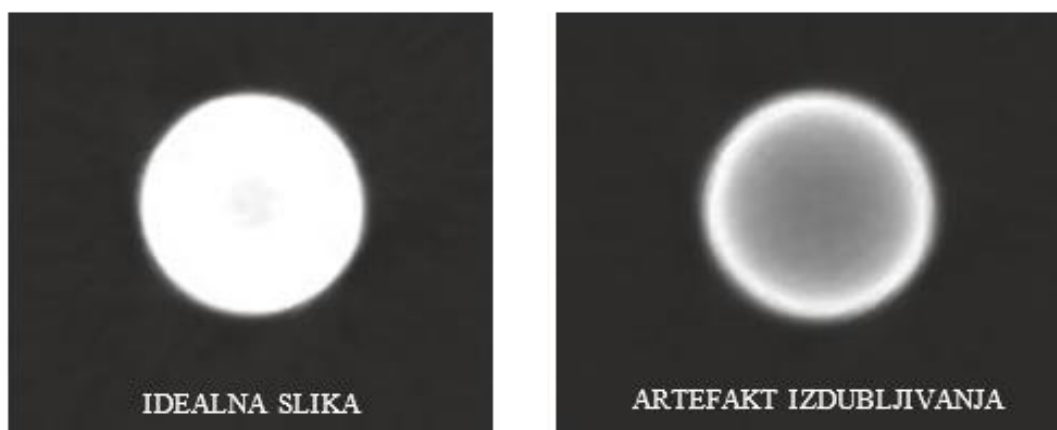
Prilikom provedbe CT skeniranja, mogu se iz različitih razloga pojaviti slučajne ili sustavne pogreške koje će za posljedicu imati pojavu artefakata na rekonstruiranim slikama. Prema [67], artefaktima se smatraju sve nepodudarnosti između stvarnog stanja ispitivanog predmeta i očitavanja na digitalnim zapisima dobivenim procesom CT rekonstrukcije. Razumijevanjem uzroka nastanka artefakata i načina njihovog prepoznavanja na rekonstruiranoj slici, omogućuje se razlučivanje stvarnih fenomena prisutnih unutar ispitivanog materijala od utjecaja koji proizlaze iz same provedbe skeniranja. Na taj način, kroz odabir odgovarajuće ispitne opreme, pažljivim planiranjem eksperimenta i primjenom adekvatne matematičke obrade podataka, omogućuje se smanjenje utjecaja artefakata i pogrešaka pri rekonstrukciji slike. Neki od najučestalijih artefakata povezanih s laboratorijskom tomografijom konusnog izvora zračenja opisani su u nastavku.

2.5.1. Artefakti otvrdnjivanja zračenja

Otvrdnjivanje zračenja (eng. *Beam Hardening*) fenomen je koji se javlja u laboratorijskoj tomografiji uslijed zračenja polikromatskim rendgenskim spektrom, pri kojem ispitivani objekt selektivno apsorbira niskofrekventne rendgenske zrake (tj. zrake niskih energija; odnosno *mekše zračenje*), dok visokofrekventne zrake (tj. zrake visokih energija, odnosno *tvrđe zračenje*) prodiru kroz objekt s manje apsorpcije. Kao rezultat, povećava se prosječna energija rendgenskog snopa te u snopu ostaje zračenje viših energija (tj. tvrđe zračenje), uzrokujući time promjene u izgledu rekonstruirane slike. Iz navedenog se razloga ova fizikalna pojava naziva

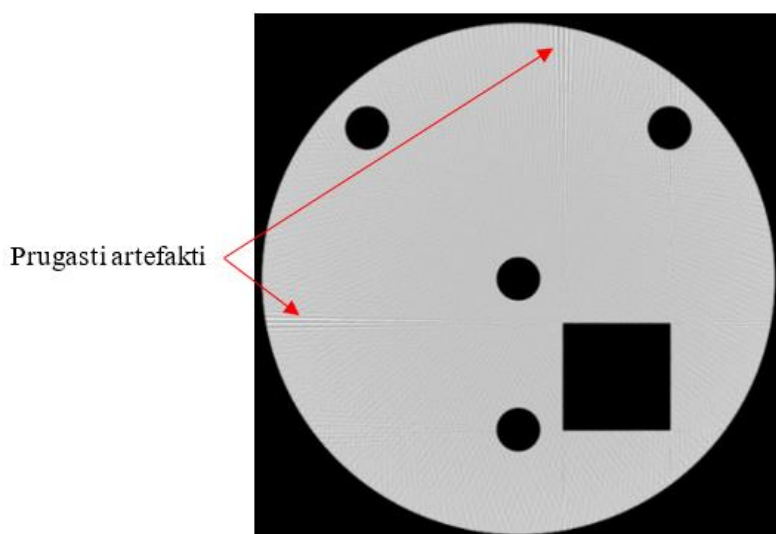
otvrdnjavanje zračenja. Najčešći artefakti uzrokovani efektom otvrdnjavanja zračenja jesu artefakti izdubljivanja i artefakti pruga.

Artefakt izdubljivanja (eng. *Cupping Artifact*) prikazan je na primjeru snimanja homogenog cilindričnog objekta (slika 2-13). Prilikom snimanja ovog objekta, područja koja su se našla na putanji snopa s većim stupnjem otvrdnjavanja prikazana su nižim sivim tonovima, stvarajući efekt izdubljivanja u centru objekta na slici.



Slika 2-13 Artefakt izdubljivanja na cilindričnom objektu [54]

Artefakti pruga (eng. *Streak Artifacts*) nastaju zbog prisutnosti ravnih rubova kada se koristi mali broj projekcija pri rekonstrukciji. Ovi se artefakti manifestiraju kao pruge koje se šire iz rubova na slici. Često su povezani s prisutnošću malih, visoko apsorbirajućih karakteristika unutar objekta koji se skenira. Kada se koristi ograničen broj projekcija prisutnost oštih rubova i sitnih značajki može rezultirati netočnim rekonstrukcijama i stvaranjem vidljivih artefakata u konačnoj slici. Primjer prugastih artefakata dan je na slici 2-14.



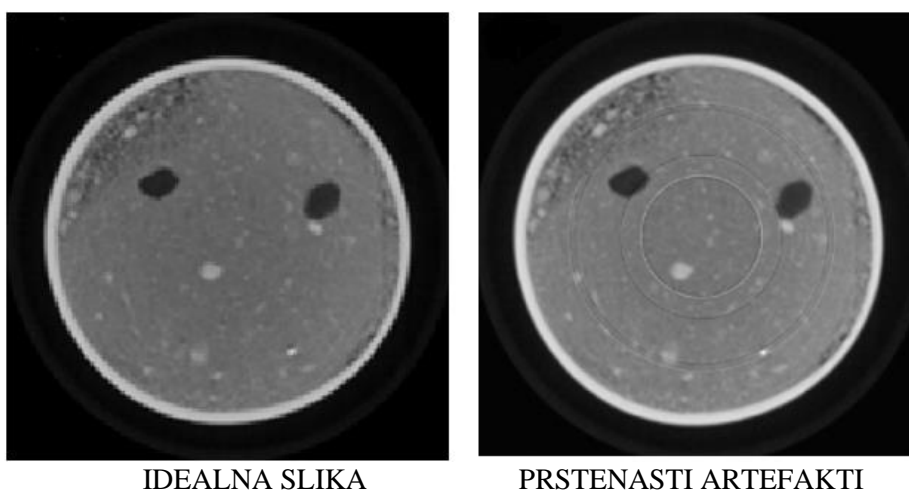
Slika 2-14 Prugasti artefakti u produžetku ravnih rubova na slici [55]

Kako bi se smanjila ili eliminirala učestalost pojave artefakata povezanih s efektom otvrdnjavanja zračenja koriste se različite korekcijske metode. Jedan pristup podrazumijeva upotrebu filtera, pri čemu se niža energija apsorbira putem filtera omogućujući direktnu kompenzaciju otvrdnjavanja, no istovremeno se smanjuje omjer signala i šuma. Ovaj pristup stoga ne može kompletno eliminirati učinak otvrdnjavanja zračenja. Drugi pristup uključuje linearizaciju uz pomoć predprocesiranja i postprocesiranja što je široko primijenjeno u industrijskoj tomografiji. Linearizacijom je moguće postići visok omjer signala i šuma, međutim kada je potrebno izvršiti korekcije na višekomponentnim materijalima, primjena može postati zahtjevna.

Također, metoda Monte Carlo simulacije koristi se kao empirijski način provjere eksperimentalnih mjerenja i verifikacije korekcija. Ova metoda pruža visoku preciznost i fleksibilnost u vezi s promjenama u incidentnom snopu kao i u geometriji objekta [68].

2.5.2. Prstenasti artefakti

Prstenasti artefakti (eng. *Ring Artifacts*) nastaju uslijed nepravilnosti u detekciji rendgenskog zračenja tijekom skeniranja objekta koji se rotira oko vlastite osi. Prilikom rotacije promatranog objekta, detektori CT uređaja bilježe prolazak rendgenskog zračenja kroz objekt iz različitih kutova. Ako postoji problem s detektorima (npr. neujednačenost osjetljivosti pojedinih detektorskih elemenata ili nepravilna kalibracija), kao rezultat se može pojaviti nepravilno očitavanje intenziteta rendgenskog zračenja. To može uzrokovati neujednačenost u intenzitetu detektirane energije zračenja tijekom rotacije kao i stvaranje prstenastih struktura na slici. Primjer pojave prstenastih artefakata na rekonstruiranoj slici prikazan je na slici 2-15.



Slika 2-15 Prstenasti artefakti na rekonstruiranoj slici [69]

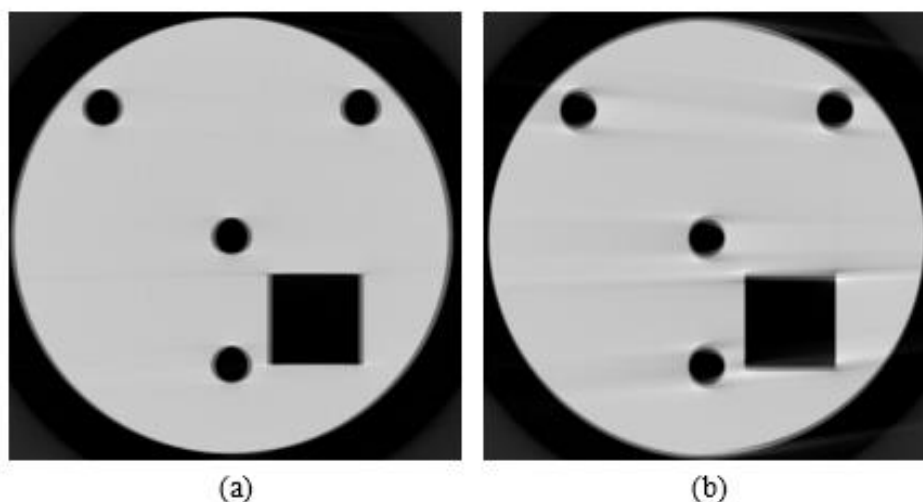
Postoji veći broj tehnika koje vode smanjenju ili eliminaciji pojava prstenastih artefakata na CT slikama. To uključuje redovitu kalibraciju detektora, horizontalno pomicanje detektora tijekom

skeniranja, povećanje broja projekcija, optimizaciju geometrije uzorka te primjenu naprednih algoritama korekcije slike. Kombinacija ovih pristupa također može značajno poboljšati kvalitetu dobivenih slika i smanjiti vjerojatnost pojave prstenastih artefakata [70].

2.5.3. Artefakti pokreta

Artefakti pokreta (eng. *Motion Artifacts*) obično su uzrokovani pomicanjem ispitnog uzorka tijekom skeniranja. U laboratorijskoj tomografiji ovo je najčešće posljedica loše učvršćenog ispitnog objekata na rotacijskom stolu CT uređaja [71].

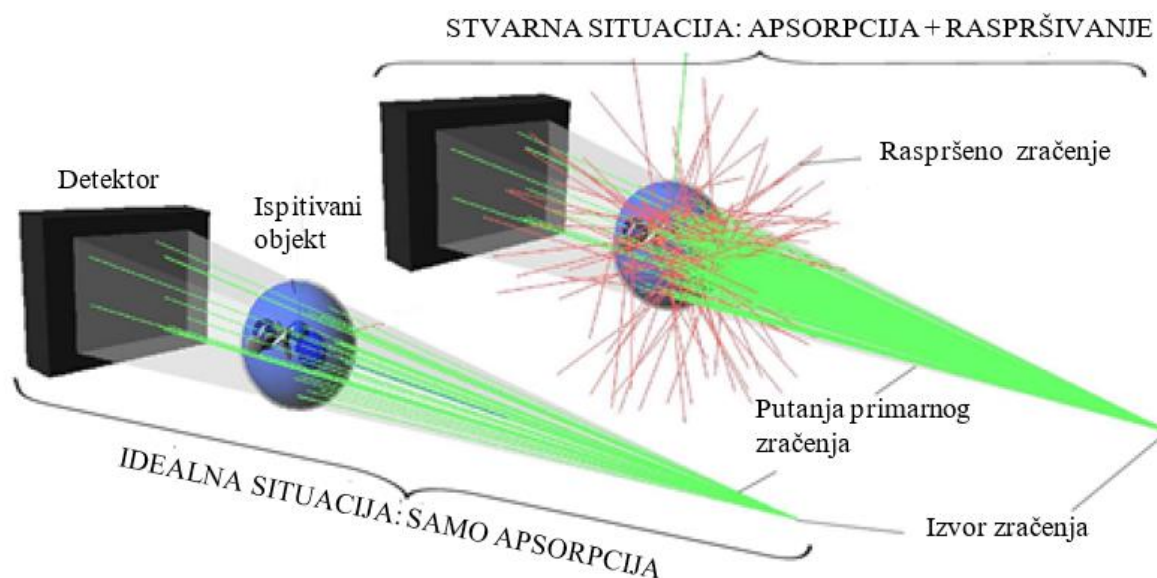
Primjer artefakta pomaka dan je na slici 2-16(a), a nastao je kao rezultat horizontalnog pomicanja uzorka za ukupno 10 piksela tijekom skeniranja. Početni relativni položaj izvora je s desne strane slike. Dvostruki su rubovi vidljivi jer uslijed horizontalnog pomaka nije došlo do idealnog preklapanja skenova zabilježenih u položaju 0° , odnosno 180° . Slika 2-16(b) pokazuje slučaj nastajanja dvostrukih rubova kao posljedice vertikalnog pomicanja istog uzorka.



Slika 2-16 Primjeri artefakata pomaka: (a) artefakt horizontalnog pomaka, (b) dupli rubovi i zamućenje nastali kao posljedica vertikalnog pomaka [55]

2.5.4. Artefakti raspršivanja

Artefakti raspršivanja (eng. *Scattering Artifacts*) posljedica su djelovanja raspršenog zračenja koje nastaje prilikom interakcije rendgenskog snopa s ispitivanim objektom. Kao što je prethodno objašnjeno, kada rendgenski snop prolazi kroz objekt, dio zračenja se apsorbira, dio prolazi kroz objekt, dok se drugi dio raspršuje u različitim smjerovima (slika 2-17). Pritom dio raspršenih fotona može doseći detektor i na taj način unijeti dodatni signal koji nije u korelaciji s atenuacijom primarnog zračenja. Na ovaj se način uvodi nelinearnost u proces skeniranja, a kao rezultat pojavljuju se artefakti raspršivanja. Iako im je fizikalno porijeklo drugačije, ovi artefakti pokazuju sličnost s prethodno opisanim artefaktima izdublivanja i artefaktima pruga nastalih uslijed procesa otvrdnjivanja zračenja [72].



Slika 2-17 Princip nastajanja artefakta raspršivanja [73]

2.6. Utjecaj šuma na kvalitetu skeniranja

Pojava šuma na registriranim volumetrijskim slikama obično je uzrokovana ograničenim brojem fotona unutar snopa rendgenskog zračenja. Uglavnom se jednostavno prepoznaje te su njihovi učinci na analizu slike prilično očiti. Kvalitativno, pojava šuma otežava prepoznavanje sitnih detalja, uvodeći grublje teksture na površini. Kada je omjer signala i šuma (eng. *Signal to Noise Ratio - SNR*) nizak, kao rezultat se mogu pojaviti strukture slične grudicama i rupicama na zabilježenim slikama. Vrijednost omjera signala i šuma također utječe na sposobnost prepoznavanja značajki, što može narušiti točnost analiza struktura materijala koje zahtijevaju precizno prepoznavanje. Stoga se, gdje je to primjereno, linearni koeficijent prigušenja može preciznije odrediti uzimajući u obzir srednju vrijednost većeg broja vokselâ. Na taj način dolazi do standardne pogreške koja, kako se broj vokselâ povećava, brzo postaje zanemariva u usporedbi sa sistematskim pogreškama kao što su pojava otvrdnjivanja ili raspršivanja zračenja. Kada je riječ o pojavi šuma u laboratorijskoj tomografiji, vrijedi primijetiti nekoliko faktora. Prvo, za određenu veličinu uzorka, šum ovisi o rezoluciji. Drugo, šum nije konstantan kroz cijelu sliku, već je općenito veći u središtu pošto veći broj rendgenskih zraka prolazi kroz središte objekta. Treće, važno je napomenuti da je šum na zabilježenim slikama anizotropnog karaktera. Ovo je posebno uočljivo kod uzoraka ili značajki unutar uzorka s velikim omjerom dimenzija. Rendgenske zrake koje prolaze uzduž duljih dimenzija bit će znatno više prigušene, pretpostavljajući veći linearni koeficijent prigušenja, što rezultira pojavom nasumičnih pruga u tom smjeru. Iz istog će razloga slika predmeta s kružnim poprečnim presjekom pokazivati šum koji "zrači" iz svojeg središta. Anizotropni uzorci šuma uobičajeni su i ne trebaju se miješati s

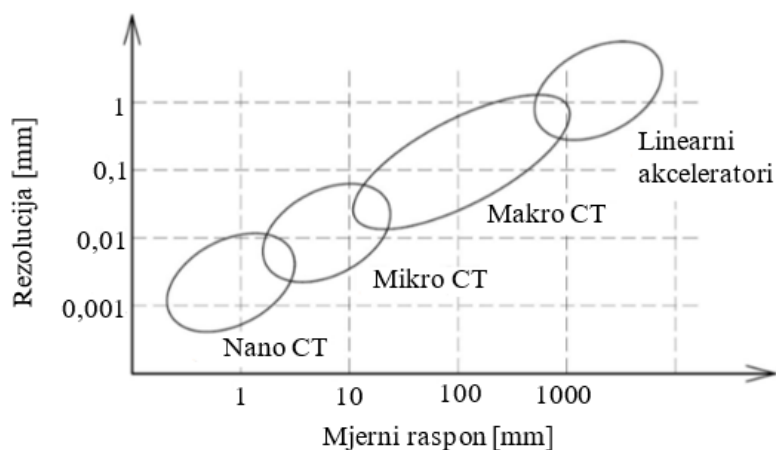
pravom strukturom u uzorku ili s prethodno opisanim artefaktima pruga. Posljednje, najbolji omjer signala i šuma koji se može postići u određenom vremenu skeniranja ovisit će o vrsti promatranog objekta. Snimljene slike potpuno ispunjenog promatranog objekta imat će niži omjer signala i šuma, nego one poroznog ispitnog uzorka istog materijala [55].

2.7. Klasifikacija CT uređaja

Klasificirajući CT uređaje prema postignutoj rezoluciji, odnosno ostvarenom mjernom području, prema [74], mogu se definirati sljedeće kategorije:

- linearni akceleratori
- makro CT uređaji
- mikro CT uređaji
- nano CT uređaji.

Makro CT uređaji koriste se za skeniranje objekata okvirnih dimenzija od 10 do 1000 mm. U tom području postižu se rezolucije između 0,01 i 1 mm. S druge strane, mikro i nano CT uređaji koriste se za mjerenje manjih objekata okvirnih dimenzija manjih od 1 mm do 10 mm. U tom se području postižu rezolucije u rasponu od 0,001 mm do 0,01 mm. Mikro CT uređaji često koriste izvore rendgenskog zračenja s malom veličinom fokusne točke (1 μm - 50 μm), što omogućava pozicioniranje ispitnih objekata u blizini fokusa i postizanje većeg geometrijskog uvećanja. Slično tome, izvori zračenja s nano-fokusom (fokusne točke manje od 1 μm) najprikladniji su za ispitivanje vrlo malih objekata [57]. Prethodno opisane okvirne vrijednosti odnosa rezolucije i raspona mjerenja kod CT uređaja prikazane su na slici 2-18.



Slika 2-18 Ovisnost rezolucije o mjernom području za određene vrste industrijskih uređaja [74]

U području eksperimentalne mehanike bitno je omogućiti promatranje ispitivanih objekata na mikro razini. Iz tog su razloga u laboratorijskim i inženjerskim primjenama najzastupljeniji mikro CT uređaji, pri čemu se postupak skeniranja ovom vrstom uređaja često naziva mikro-

CT (tj. μ CT).

Rezolucije koje pripadaju nano području donedavno su se mogle postizati samo u području sinkrotronske tomografije. Razvojem tehnologije visokorazlučivih nano-fokusnih rendgenskih cijevi danas je moguće ostvariti fokalne točke promjera manjeg od jednog mikrometra [57]. Zahvaljujući tome, rezolucije koje pripadaju nano području danas se također mogu postizati i primjenom laboratorijske tomografije [75, 76].

U daljnjem će tekstu biti objašnjeno na koji način veličina vokseli i s time povezano geometrijsko pojačanje skeniranja utječe na mjernu rezoluciju CT uređaja, dok se utjecaj ostalih faktora (npr. izvor rendgenskog zračenja, izvedba detektora, način rekonstrukcije slike, vrsta materijala objekta, itd.) može pronaći u relevantnoj literaturi. Primjerice u [62], gdje je utjecaj ovih faktora analiziran u kontekstu primjene CT tehnike kod dimenzionalnog mjeriteljstva.

2.7.1. Utjecaj fizikalne veličine vokseli na rezoluciju CT skeniranja

Veličina vokseli ima značajan utjecaj na rezoluciju laboratorijskih CT uređaja. Manja fizikalna veličina vokseli omogućuje veću rezoluciju i detaljniji prikaz finih struktura i manjih dijelova objekta, dok veća fizikalna veličina vokseli rezultira nižom rezolucijom i manje detaljnom slikom. U praksi se koriste različite veličine vokseli ovisno o specifičnim potrebama primjene. Radi se, naime, o tome da veličina vokseli utječe i na brzinu obrade podataka. U tom je smislu, ovisno o konkretnim zahtjevima primjene, važno postići kompromis između željene prostorne rezolucije i brzine obrade slike.

Na veličinu vokseli može se utjecati približavanjem, odnosno udaljavanjem, ispitnog objekta od izvora zračenja (slika 2-19). Kada se objekt približi izvoru rendgenskog zračenja, projekcija objekta na detektoru postaje veća, što rezultira manjim fizikalnim dimenzijama vokseli na slici i boljom rezolucijom. S druge pak strane, kada se objekt udalji od izvora, projekcija objekta na detektoru postaje manja, što rezultira većim fizikalnim dimenzijama vokseli na slici i nižom rezolucijom.

Na ovaj se način ostvaruje tzv. pojačanje CT skeniranja, koje se odnosi na omjer veličine ispitnog objekta i njegove projekcije na detektoru, a izražava se kao:

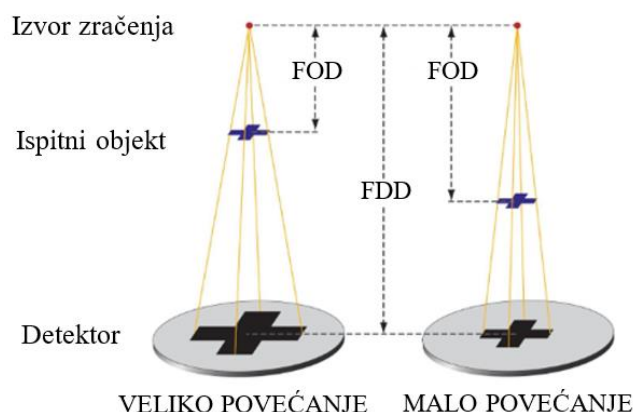
$$M_p = \frac{FDD}{FOD} \quad (2-2)$$

pri čemu je:

M_p geometrijsko pojačanje CT skeniranja

FDD udaljenost između fokusa i detektora (eng. *Focus-detector Distance*)

FOD udaljenost između fokusa i objekta (eng. *Focus-object Distance*).



Slika 2-19 Utjecaj položaja ispitivanog objekta na veličinu objekta na detektoru [77]

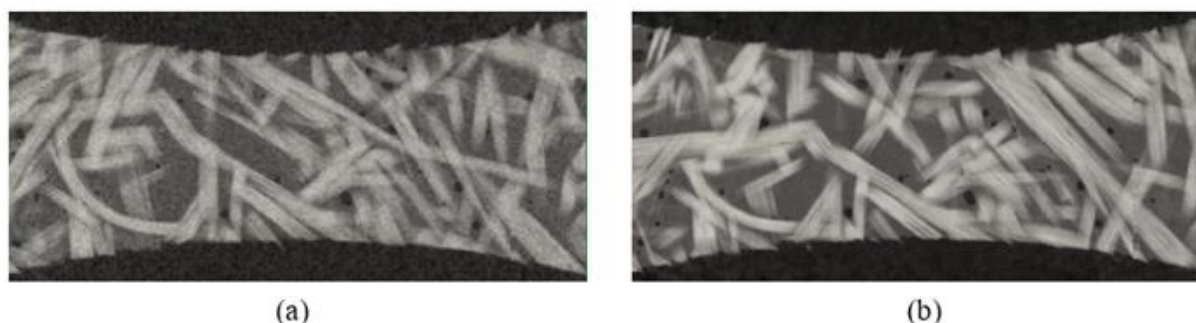
Iz navedenog se izraza zaključuje kako je geometrijsko povećanje moguće postići povećavanjem FDD-a ili smanjenjem FOD-a. Kod laboratorijskih CT uređaja koji imaju nepomičan izvor i detektor, uvećanje je moguće ostvariti jedino približavanjem objekta izvoru, odnosno smanjivanjem FOD udaljenosti. Slika 2-19 ilustrira na koji način promjena FDD ili FOD utječe na veličine projekcija na detektoru.

2.7.2. Primjena računalne tomografije X-zrakama kod vlaknima ojačanih polimera

Računalna tomografija sve je značajnija u istraživanju i razvoju vlaknima ojačanih polimera jer omogućuje detaljno trodimenzionalno snimanje, pružajući pritom ključne informacije za razumijevanje strukture ove vrste materijala kao i njihovih svojstava. Skenirajući komponente izrađene od vlaknima ojačanih polimera, moguće je provesti visoko precizne trodimenzionalne inspekcije arhitekture vlakana te pratiti nastanak i propagaciju oštećenja tijekom životnog vijeka komponente. Osim toga, primjenom računalne tomografije omogućena je identifikacija i detaljna analiza proizvodnih defekata kod vlaknima ojačanih polimera, što je često ključno za unaprjeđenje procesa proizvodnje i osiguravanje visoke kvalitete komponente. S obzirom na činjenicu kako se ključni fenomeni koji utječu na ponašanje vlaknima ojačanih polimera u uvjetima opterećenja odvijaju unutar samog materijala, računalna tomografija izuzetno je koristan alat pošto omogućava detaljno snimanje unutarnje strukture, bez potrebe za klasičnim, razornim metodama ispitivanja.

Primjena računalne tomografije kod vlaknima ojačanih kompozita suočava se ipak s nekoliko ključnih izazova. Primarno, heterogenost i kompleksna arhitektura ove vrste materijala zahtijevaju visoku rezoluciju skeniranja, kako bi se detaljno identificirali svi slojevi i strukturne komponente. Zbog različitih gustoća i rasporeda sastavnica unutar kompozita, ovo je često

izrazito izazovno za postići. Nadalje, postizanje optimalnog kontrasta između različitih konstituenata kompozita (tj. matrice i vlakna) posebno je izazovno kod materijala s niskim atomskim brojevima, što otežava njihovo razlikovanje na rekonstruiranim volumenima. U svrhu ilustriranja utjecaja rezolucije skeniranja na kvalitetu rekonstruirane slike i posljedično na mogućnost identifikacije strukturnih komponenti materijala, isti je ispitni uzorak izrađen od FRP materijala skeniran koristeći različite parametre skeniranja. Usporedbom dviju tako dobivenih slika, evidentno je kako je kod rekonstruirane slike niske rezolucije (slika 2-20 a)) otežana identifikacija strukturnih komponenti, dok je kod rekonstruirane slike visoke rezolucije (slika 2-20(b)) postignut znatno bolji kontrast, čime je pružena mogućnost preciznije analize i interpretacije mikrostrukture ispitivanog materijala.



Slika 2-20 Rekonstruirana slika ispitnog uzorka izrađenog od polimera ojačanog staklenim vlaknima MAT arhitekture vlakana. Rekonstruirana slika niske rezolucije (a) postignuta je zabilježavanjem jedne slike po projekciji uz ukupno trajanje skeniranja od 15 min. Rekonstruirana slika visoke rezolucije (b) postignuta je zabilježavanjem 20 slika po projekciji uz ukupno trajanje skeniranja od 110 min.

Upravo zbog činjenice kako se kod vlaknima ojačanih polimera inicijalna oštećenja najčešće javljaju na mikrorazini unutar samog materijala, nakon čega se postupno šire prema površini, upotreba računalne tomografije pri ispitivanju ove vrste materijala izrazito je korisna, pošto pruža mogućnost dobivanja detaljne trodimenzionalne slike njegove unutrašnjosti. U ovom kontekstu treba, međutim, spomenuti drugo svojstvo vlaknima ojačanih polimera koje implicira nužnost pažljivijeg provođenja skeniranja i interpretacije dobivenih rezultata. Radi se o pojavi zatvaranja inicijalnih pukotina nakon prestanka djelovanja opterećenja na ispitni uzorak. Ovako zatvorene pukotine neće biti prikazane na rekonstruiranim volumenima te će se time otežati precizna analiza i interpretacija rezultata. Izvedbom specijalnih ispitnih uređaja integriranih s CT uređajima problemi povezani s zatvaranjem inicijalnih pukotina mogu biti prevladani, što će biti opisano kasnije u tekstu.

2.8. Mehanička ispitivanja primjenom računalne tomografije X-zrakama

Računalna tomografija X-zrakama primijenjena pri mehaničkom ispitivanju omogućava detaljnu analizu materijala, olakšavajući identifikaciju nedostataka, deformacija i drugih

karakteristika koje su bitne za procjenu čvrstoće i ponašanja materijala pod opterećenjem. Osim navedenog, primjena računalne tomografije u kombinaciji s mehaničkim ispitivanjem materijala pruža i dodatne mogućnosti, od kojih su neke:

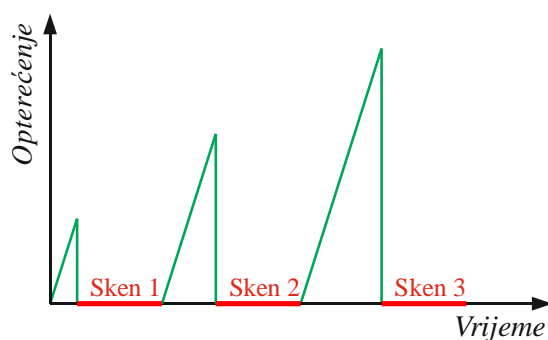
- **Vizualizacija unutarnje strukture** ispitivanog materijala, čime se omogućava istraživačima pregledavanje značajki poput pora, uključina, pukotina i drugih defekata
- **Analiza poroznosti i gustoće**, što omogućava kvantificiranje poroznosti i definiranje gustoće unutar uzorka. Analizom rekonstruiranih slika moguće je mjeriti veličinu pora, oblik, frakciju volumena i prostornu distribuciju, što je ključno za razumijevanje materijalnih svojstava poput čvrstoće, krutosti, propusnosti i toplinske provodljivosti.
- **Otkrivanje i karakterizacija defekata** poput šupljina, pukotina, delaminacija i uključina, pružajući informacije o njihovoj veličini, obliku, orijentaciji i položaju. Ovo pomaže u procjeni kvalitete materijala, integriteta i potencijalnih mehanizama oštećenja.
- **Dimenzijsko mjerenje**, čime je često eliminirana potreba za fizičkim presijecanjem ispitivanog uzorka, odnosno razornim ispitivanjem. Primjenom računalne tomografije moguće je mjeriti unutarnje, drugim mjernim metodama nedostupne, geometrije ispitivanog objekta.
- **Analiza oštećenja** koristeći detaljne trodimenzionalne slike oštećenih materijala i komponenti. Proučavanjem unutarnjih značajki u blizini lokacije oštećenja, moguće je utvrditi korijenski uzrok otkazivanja komponente, bilo da je riječ o proizvodnim greškama, degradaciji materijala ili uvjetima mehaničkog opterećenja.
- **Kontrola kvalitete aditivne proizvodnje** čime se omogućava otkrivanje nedostataka poput poroznosti, pukotina i deformacija.

Dva su osnovna pristupa korištenja računalne tomografije u kombinaciji s mehaničkim ispitivanjem: *ex-situ* pristup i *in-situ* pristup. Kod *ex-situ* pristupa mehaničko opterećivanje uzorka odvija se izvan radnog područja CT uređaja, nakon čega se ispitivani uzorak pozicionira na zakretni stol CT uređaja te se vrši skeniranje uzorka koji je u neopterećenom stanju. Kod *in-situ* pristupa, skeniranje ispitivanog uzorka vrši se u opterećenom stanju pa je u tu svrhu nužno korištenje specijalnih uređaja za opterećivanje (tj. kidalica) koje se na radni stol CT uređaja instaliraju zajedno s ispitivanim uzorkom. Oba pristupa pružaju vrijedne informacije za razumijevanje ponašanja materijala pod različitim uvjetima opterećenja te kao takvi nalaze široku primjenu, počevši od analize oštećenja sve do karakterizacije materijala i verifikacije računalnih modela. Kako bi se dobio kompletniji uvid u mogućnosti primjene, kao i u prednosti

ex-situ i *in-situ* pristupa, u nastavku slijedi njihov detaljniji opis.

2.8.1. *Ex-situ* mehaničko ispitivanje uz primjenu računalne tomografije

Ex-situ pristup predstavlja jednostavniju primjenu računalne tomografije u provedbi mehaničkih ispitivanja, a podrazumijeva korištenje klasičnih makroskopskih ispitnih uređaja (u daljnjem će se tekstu ovi uređaji nazivati *kidalice*) koji se nalaze izvan CT skenera. Proces započinje pažljivom pripremom ispitnog uzorka ili uzoraka koja uključuje tretiranje uzorka u svrhu osiguravanja uniformnosti i dosljednosti u njegovom sastavu i geometriji. Dodatno, defekti ili značajke od interesa mogu biti uneseni u uzorke kako bi se simulirali stvarni uvjeti ili istražili specifični fenomeni. Nakon pripreme uzorka, pristupa se mehaničkom opterećivanju pri čemu se najčešće koristi klasična ispitna oprema, kao što je univerzalni ispitni stroj (eng. *Universal Testing Machine* – UTM) ili uređaj za savijanje. Željeni uvjeti opterećenja (primjerice vlačno, tlačno, torzijsko, savojno) primjenjuju se kontroliranim brzinama ili pomacima kako bi se izazvala deformacija ili oštećenje u uzorku. U svrhu praćenja reakcije materijala na primijenjene sile, bilježe se tijekom ispitivanja mehanički parametri poput sile, pomaka, deformacije i vremena. Kada se želi izvršiti CT snimanje ispitnog uzorka, na kraju testiranja ili više puta unutar ciklusa testiranja, ispitni se uzorak izvadi iz *kidalice* te se postavlja na rotacijski stol CT uređaja nakon čega slijedi skeniranje ispitnog uzorka. Pošto se ispitni uzorak više ne nalazi unutar *kidalice*, njegovo skeniranje vršit će se u neopterećenom stanju, kao što se može uočiti na grafičkom prikazu *ex-situ* postupka ispitivanja danog na slici 2-21.



Slika 2-21 Shematski prikaz izvedbe *ex-situ* mehaničkog ispitivanja primjenom računalne tomografije

Prilikom premještanja ispitnog uzorka s ispitnog uređaja na CT uređaj, posebnu pažnju treba posvetiti preciznom pozicioniranju ispitnog uzorka. To se obično postiže korištenjem specijalnih elemenata za fiksiranje koji sprječavaju pomake uzorka prilikom skeniranja. Skeniranje je popraćeno rotacijom uzorka na zakretnom stolu CT uređaja, čime je omogućeno zabilježavanje većeg broja projekcija pod različitim kutovima oko uzorka. Korištenjem rekonstrukcijskih algoritama zabilježene se projekcije potom obrađuju kako bi se generirale

volumetrijske slike ispitnog uzorka. Odabirom parametara rekonstrukcije utječe se na kvalitetu dobivenih slika, rezoluciju i kontrast, osiguravajući na taj način jasnu vizualizaciju unutarnjih značajki ispitivanog uzorka poput pora, pukotina, uključina i zona deformacije. Naknadno se, korištenjem odgovarajućih tehnika obrade slika ili algoritama segmentacije, rekonstruirane slike analiziraju kako bi se izvukle kvantitativne i kvalitativne informacije o unutarnjoj strukturi materijala i mehaničkom odzivu. Relevantni parametri poput poroznosti, distribucije pora, duljine pukotina i profila deformacije kvantificiraju se kako bi se procijenila mehanička svojstva i ponašanje materijala. Finalno se rezultati *ex-situ* mehaničkog ispitivanja interpretiraju povezujući rezultate proizašle iz mehaničkih testova s rezultatima obrade rekonstruiranih slika, kako bi se razjasnila veza mehaničkog ponašanja uzorka i njegove unutarnje strukture.

Osim što omogućuje provođenje testova korištenjem klasičnih, univerzalnih, ispitnih uređaja, koji svojim dimenzijama nisu pogodne za jednostavnu manipulaciju i instalaciju unutar CT uređaja, *ex-situ* pristup primjene računalne tomografije kod mehaničkih ispitivanja pruža dodatne mogućnosti, od kojih su neke:

- **Analiza prije i poslije deformacije**, čime je omogućena vizualizacija i kvantifikacija unutarnjih promjena u mikrostrukturi materijala, poput deformacije, inicijacije oštećenja i propagacije pukotina, prije i nakon djelovanja mehaničkog opterećenja. Time se omogućava detaljna analiza reakcije materijala na vanjske sile.
- **Analiza oštećenja** provedena povezivanjem rekonstruiranih volumena ispitivanih (oštećenih) komponenti s rezultatima mehaničkih testiranja.
- **Karakterizacija materijalnih svojstava** poput poroznosti, gustoće i mikrostrukturnih značajki, koja proizlaze iz mehaničke deformacije. Ove informacije pomažu u razumijevanju odnosa između mehaničkog ponašanja materijala i njegove unutarnje strukture.
- **Validacija računalnih modela** i simulacija ponašanja materijala pod različitim uvjetima opterećenja. Usporedbom rezultata simulacije s eksperimentalnim podacima dobivenih CT skeniranjem, moguće je poboljšati prediktivne modele ponašanja materijala.

Međutim, glavni nedostaci *ex-situ* pristupa vezani su upravo uz činjenicu kako je ispitni uzorak potrebno izvaditi iz kidalice te ga potom neopterećenog instalirati na zakretni stol CT uređaja kako bi se izvršilo skeniranje. Kod nekih izvedbi kidalica postupak instalacije ispitnog uzorka i njegove deinstalacije nije uvijek jednostavan te zahtijeva određeno vrijeme. Ako je potrebno pritom napraviti više skenova, utrošak vremena pritom može biti nezanemariv. Osobito je bitno

u kontekstu ovog doktorskog rada naglasiti problem rasterećenja uzorka prije CT skeniranja. Kao što je prethodno navedeno, karakteristika je vlaknima ojačanih polimera da se inicijalna oštećenja, nastala kao posljedica mehaničkog djelovanja, pojavljuju u unutrašnjosti materijala te postupno propagiraju prema vani. Ukoliko se mehaničko testiranje zaustavi neposredno nakon nastanka početnih pukotina te se takav uzorak rastereti kako bi se pristupilo skeniranju, može doći do zatvaranja inicijalnih pukotina koje u tom slučaju neće biti detektirane na skenovima što će u konačnici kompromitirati rezultate ispitivanja. Nadalje, uzastopna montaža i demontaža ispitnog uzorka na zakretni stol CT skenera uzrokuje značajne pomake krutog tijela (eng. *Rigid Body Motion* - RBM) koji mogu utjecati na standardnu mjernu rezoluciju metode korelacije digitalnih volumena, metode često korištene u kombinaciji s računalnom tomografijom s ciljem određivanja polja pomaka i deformacija nastalih uslijed narinutog mehaničkog opterećenja. Nedostaci *ex-situ* pristupa koji se odnose na potencijalno zatvaranje inicijalnih pukotina, kao i na eventualne greške povezane s uzastopnom montažom i demontažom ispitnog uzorka, mogu biti uvelike prevladani primjenom *in-situ* pristupa kod kojeg se skeniranje odvija dok je ispitni uzorak u opterećenom stanju, a koji je opisan u nastavku.

2.8.2. *In-situ* mehaničko ispitivanje uz primjenu računalne tomografije

In-situ pristup provedbe mehaničkih ispitivanja putem računalne tomografije pruža jedinstvenu priliku za proučavanje mehaničkog ponašanja materijala uz istovremenu vizualizaciju njegove unutarnje strukture u realnom vremenu. Proces započinje pažljivom pripremom ispitnog uzorka s ciljem osiguravanja kompatibilnosti s ispitnim *in-situ* postavom. Ispitni uzorak treba biti izrađen ili modificiran tako da sigurno stane unutar CT skenera te da izdrži mehaničko opterećenje koje se primjenjuje tijekom ispitivanja. Za uspješnu provedbu ispitivanja pritom je od izrazite važnosti uzimanje u obzir svojstava materijala ispitnog uzorka kao i njegove geometrije i dimenzija. Prethodno navedeni faktori ključni su za odabir odgovarajućih naprava koje, osim što služe za precizno pozicioniranje i poravnavanje uzorka u odnosu na izvor i detektor rendgenskih zraka, također trebaju osigurati neometano opterećivanje i deformiranje uzorka tijekom ispitivanja. Pošto, osim za pozicioniranje ispitnog uzorka, također služe i za primjenu mehaničkog opterećenja na isti, spomenute naprave kod *in-situ* pristupa zapravo predstavljaju mehaničke ispitne uređaje. Njihova je kompatibilnost s korištenim CT uređajem ključna što uvjetuje pažljiv odabir prilikom planiranja ispitivanja. Nakon što je ispitni postav pripremljen, pristupa se konfiguriranju CT sustava, pri čemu je potrebno optimirati parametre poput energije izvora rendgenskih zraka, vremena izloženosti i rezolucije detektora, sve u svrhu

postizanja ostvarivanja visokokvalitetnog snimanja unutarnje strukture uzorka. Zabilježavanje projekcija ostvaruje se u redovitim intervalima ili kontinuirano tijekom postupka mehaničkog ispitivanja, čime je omogućeno praćenje unutarnjih promjena u stvarnom vremenu. Nakon skeniranja, pristupa se obradi projekcija zabilježenih tijekom skeniranja, što se vrši preko algoritama rekonstrukcije, a u svrhu generiranja volumetrijskih slika ispitnog uzorka. Slike je potom potrebno analizirati kako bi se izdvojile kvantitativne i kvalitativne informacije o unutarnjoj strukturi materijala, deformaciji i mehaničkom odzivu. Promjene u karakteristikama poput morfologije pora, širenja pukotina i pomaka materijala prate se kako bi se razumjelo mehaničko ponašanje uzorka pod opterećenjem. Interpretacija rezultata *in-situ* mehaničkog testiranja korištenjem računalne tomografije uključuje povezivanje podataka proizašlih iz mehaničkih testova s rezultatima obrade rekonstruiranih volumetrijskih slika. Završno se izrađuju odgovarajući izvještaji koji sažimaju ključne nalaze i zaključke, raspravljajući o implikacijama koje se odnose na karakterizaciju materijala, analizu strukture i evaluaciju performansi na temelju spoznaja dobivenih kombiniranom metodom mehaničkog testiranja i CT skeniranja.

Činjenica kako se kod *in-situ* pristupa provodi CT skeniranje dok je ispitivani uzorak u opterećenom stanju otvara različite mogućnosti primjene, od kojih su neke:

- **Promatranje mikrostrukture materijala u realnom vremenu**, čime je moguće dovesti u vezu unutarnju mikrostrukturu ispitivanog uzorka s mehanizmima deformacija nastalih kao posljedica istovremenog opterećivanja. Time se omogućava detekcija oštećenja unutar materijala, kao i praćenje njegova daljnjeg širenja.
- **Mapiranje mehaničkih svojstava** korištenjem većeg broja projekcija zabilježenih dok je ispitivani uzorak u opterećenom stanju. Mapiranje distribucije pomaka i naprezanja unutar materijala pomaže u razumijevanju pojave lokaliziranih deformacija kao i mehanizama oštećenja.
- **Izrada studija dinamičkog opterećenja**, gdje dolazi do brzih promjena prilikom deformiranja materijala. Ovo se odnosi, primjerice, na slučajeve povezane s udarnim opterećenjem, zamornim djelovanjem ili puzanjem materijala. Zabilježavanjem projekcija s visokom vremenskom rezolucijom moguće je istraživati prolazne pojave i detektirati ključne događaje tijekom mehaničkog ispitivanja.
- **Višemodalno snimanje**, koje podrazumijeva kombiniranje računalne tomografije s drugim modaliteta snimanja, poput korelacije digitalne slike ili praćenja akustične emisije, a sve u svrhu dobivanja komplementarnih informacija o mehaničkom

ponašanju materijala. Višemodalni pristup poboljšava razumijevanje odziva materijala na mehaničko opterećenje.

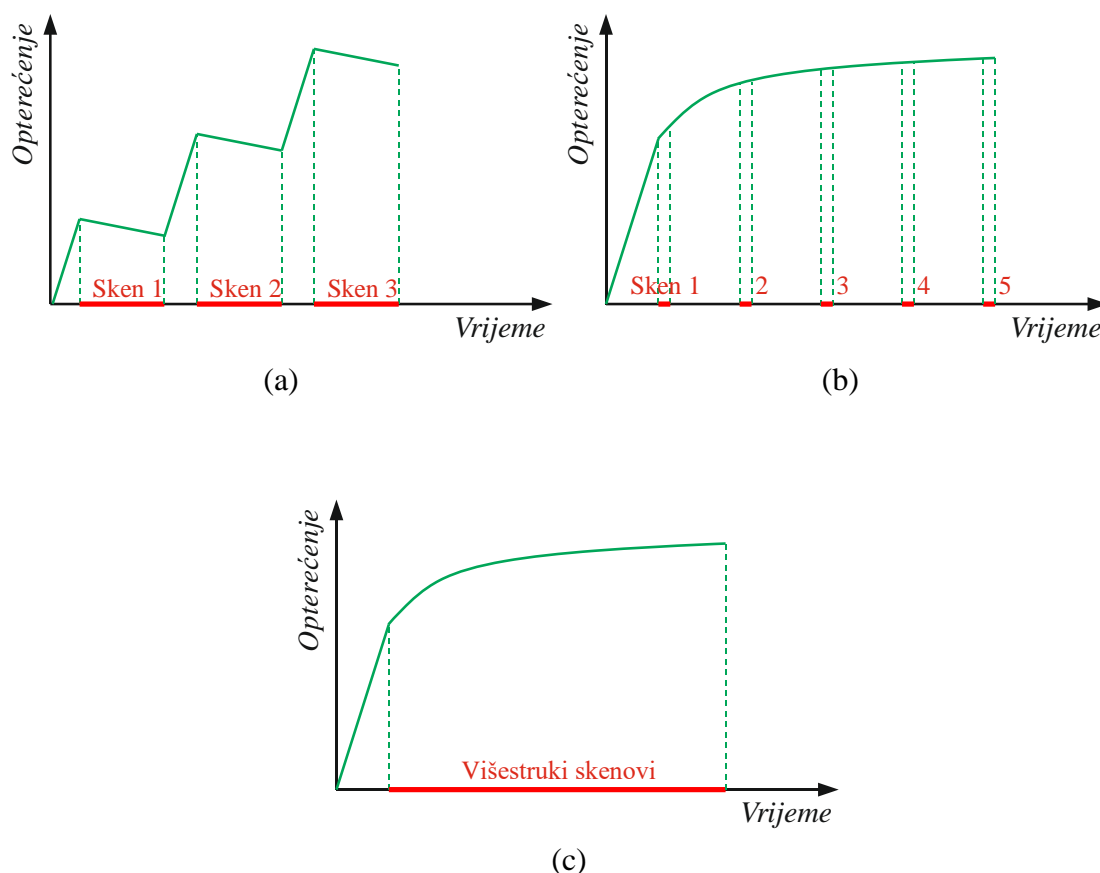
Postoje tri osnovne verzije izvedbe *in-situ* mehaničkih testiranja primjenom računalne tomografije X-zrakama.

Isprekidani *in-situ* test, shematski prikazan na slici 2-22(a), podrazumijeva zaustavljanje opterećivanja na točno definiranim razinama naprezanja kako bi se pristupilo zabilježavanju CT skena. Ovaj je pristup često korišten kod laboratorijskih CT skenera, a glavna mu je prednost što preciznom kontrolom opterećivanja uzorka olakšava snimanje CT skenova u točno određenim trenucima trajanja testa. Ukoliko ispitivani uzorci imaju viskoelastična svojstva (što je slučaj primjerice s vlaknima ojačanim polimerima) doći će prilikom provođenja isprekidanog testa do pojave relaksacije materijala, koja se očituje kroz smanjenje naprezanja unutar materijala, iako se opterećenje cijelo vrijeme drži konstantnim. Kako je fenomen relaksacije materijala vremenski ovisan, potrebno je pričekati određeno vrijeme dok ne dođe do stabilizacije naprezanja u materijalu. Iz tog razloga kod isprekidanog *in-situ* testa akvizicija skenova ne započinje odmah nakon zaustavljanja opterećivanja, već se primjenjuje odgoda čiji iznos varira ovisno o vrsti ispitivanog materijala. Ovo vodi produženju ukupnog trajanja testa, ali i postizanju veće kvalitete rekonstruiranih volumetrijskih slika i smanjenju vjerojatnosti pogrešnih interpretacija dobivenih rezultata.

Neprekinuti *in-situ* test, shematski prikazan na slici 2-22(b), karakterizira kontinuirano opterećivanje uzorka, popraćeno snimanjem diskretnog broja skenova, simultano s rotacijom ispitivanog uzorka unutar CT uređaja. U usporedbi s isprekidanim testom, kod neprekinutog *in-situ* testa, vrijeme ispitivanja može biti značajno skraćeno. Kako bi se izbjeglo kompromitiranje rezultata uslijed prethodno navedenog relaksacijskog karaktera pojedinih materijala, primjena ovog testa uvjetuje korištenje modernijih CT uređaja koji imaju mogućnost postizanja znatno većih brzina akvizicije. Time se omogućuje u realnom vremenu praćenje deformacija, oštećenja i drugih promjena povezanih s apliciranjem mehaničkog opterećenja na ispitni uzorak.

Kontinuirano *in-situ* ispitivanje, shematski prikazano na slici 2-22(c), koristi se slučajevima u kada se želi provesti ispitivanje materijala uz neprekinuto mehaničko opterećivanje uzorka, a karakterizira ga kontinuirano CT skeniranje pri kojem svaki pojedini tomografski niz akvizicije direktno prelazi u sljedeći. Na ovaj se način mogu ispitivati materijali kod kojih dolazi do brzih strukturalnih promjena koje nije moguće u potpunosti zabilježiti primjenom isprekidanog testa ili snimanjem diskretnog broja projekcija. Dobar je primjer snimanje sekvenci lomova vlakana neposredno prije konačnog loma kompozita [14], pri čemu je bitno osigurati cjelovitu

kontinuiranu sliku događaja kako bi se stekao potpuniji uvid u početak pojave oštećenja i njegovo daljnje širenje kroz materijal. Kod *in-situ* računalne tomografije općenito je izazovno uskladiti trajanja akvizicije s vremenskom skalom oštećenja koja se događaju tokom ispitivanja, a posebice kada je evolucija oštećenja unutar materijala brza. Promjene u strukturi, koje se događaju tijekom zabilježavanja projekcija, mogu dovesti do zamućenja određenih značajki na slikama uzrokujući artefakte [55, 78], smanjujući na taj način kvalitetu rekonstruiranih volumetrijskih slika. Kako bi ovi problemi bili nadvladani, primjenjuje se kontinuirani *in-situ* ostvaren s izrazito velikim brzinama akvizicije. Pritom se velike akvizicijske brzine najčešće postižu primjenom sinkrotronske tomografije kod koje je za snimanje jednog skena potrebno između 0,05 sekundi i jedne minute [13, 15] ili u novije vrijeme primjenom laboratorijske tomografije s izvorom zračenja visoke gustoće toka [79] (eng. *High-flux Source*), odnosno s više izvora zračenja [80].



Slika 2-22 Shematski prikaz (a) isprekidane, (b) neprekinute i (c) kontinuirane izvedbe *in-situ* mehaničkog ispitivanja primjenom računalne tomografije

Neovisno o tome koji se od tri prethodno navedena postupka skeniranja provodi, *in-situ* računalna tomografija podrazumijeva korištenje specijalnih kidalica koje su svojom izvedbom prilagođene instalaciji unutar CT sustava. Kidalice za *in-situ* mehanička ispitivanja trebaju

pritom biti kompaktne izvedbe kako bi se: *ad a)* mogle instalirati unutar relativno malenog radnog područja laboratorijskih tomografa, *ad b)* mogla postići zadovoljavajuća rezolucija zabilježenih snimaka. Kao što je prethodno objašnjeno, prostorna rezolucija zabilježenih snimaka kod laboratorijskih CT uređaja konusnog izvora zračenja ovisi, među ostalim, o udaljenosti ispitivanog objekta od izvora zračenja (slika 2-1). U tom smislu konstrukcijska izvedba *in-situ* kidalica mora omogućiti pozicioniranje ispitnog uzorka što je moguće bliže izvoru zračenja kako bi se mogla postići veća prostorna rezolucija. Zbog njihove ključne uloge u provedbi *in-situ* ispitivanja te značajnog utjecaja na kvalitetu rekonstruiranih volumetrijskih slika i posljedično na rezultate ispitivanja, uređaji za *in-situ* mehanička ispitivanja (tj. kidalice) bit će detaljno objašnjeni u nastavku.

2.9. Kidalice za in-situ mehanička ispitivanja primjenom računalne tomografije

Za postizanje visoke prostorne rezolucije kao i zbog potrebe za kompaktnošću, kidalice za *in-situ* mehanička ispitivanja moraju biti izuzetno kompaktne kako bi se instalirale u relativno ograničen radni prostor laboratorijskog CT uređaja. One ne smiju biti prepreka prolazu X-zraka kroz ispitivani objekt. Kako bi se omogućio nesmetan prolaz rendgenskog zračenja kroz ispitni objekt prilikom rotacije za puni krug, *in-situ* kidalice razvijaju se u dvije osnovne izvedbe. Prva izvedba uključuje korištenje cjevaste potpore koja povezuje pomični i nepomični dio kidalice, prenoseći opterećenje na ispitni uzorak. Druga izvedba koristi traverze za prenošenje opterećenja na uzorak, pri čemu je ključno da ispitni uređaj omogućuje vlastitu rotaciju ispitnog uzorka, pošto nije moguće koristiti rotacijski stol CT skenera.

2.9.1. In-situ kidalice s cjevastom potporom

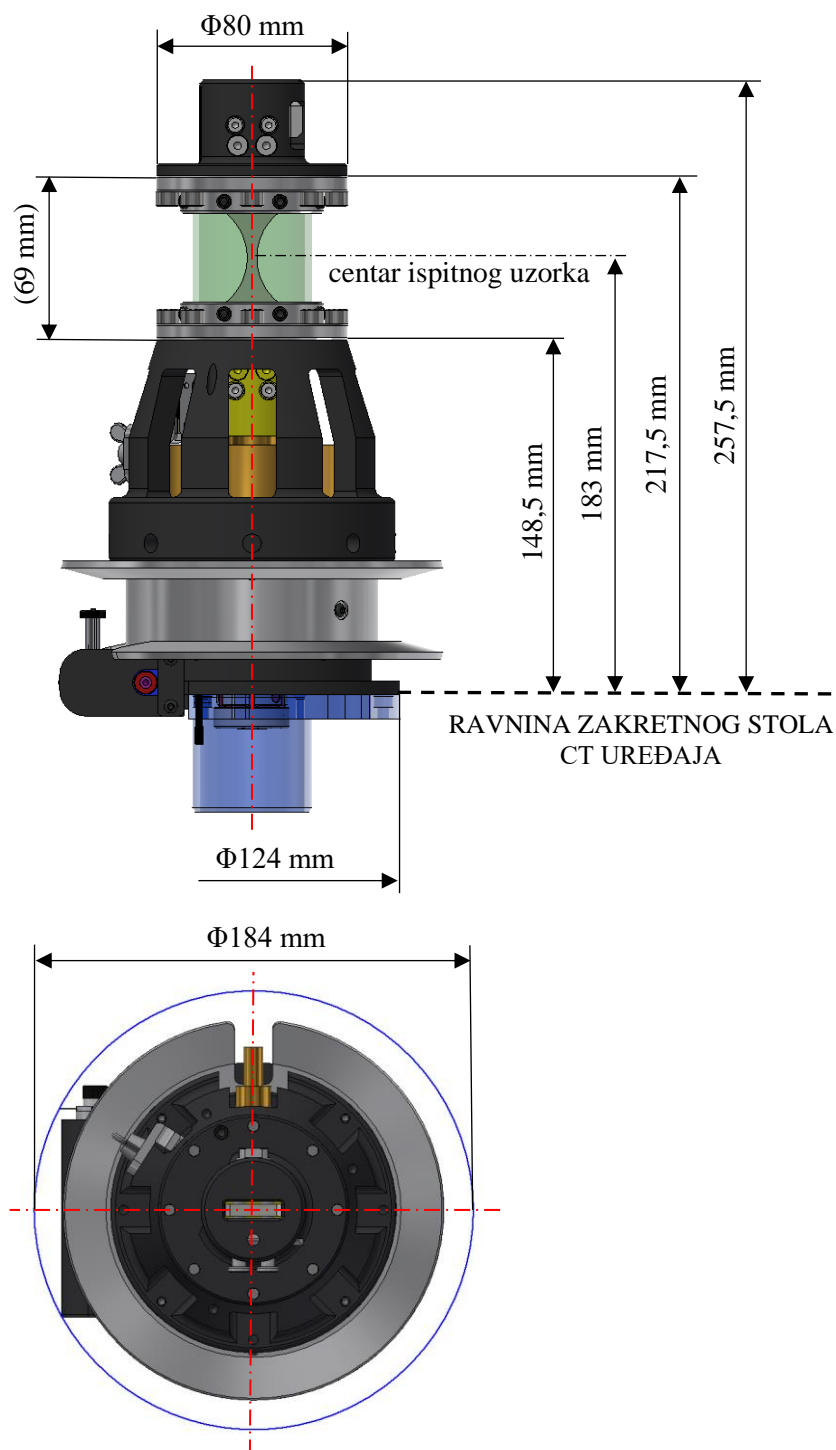
Cjevasta potpora, osim što preuzima reakcijske sile kako bi omogućila opterećivanje ispitnog uzorka, također ga potpuno okružuje, što znači da rendgensko zračenje mora dva puta proći kroz njezinu stjenku prije nego što stigne do detektora. Pregledom komercijalno dostupnih kidalica, kojih je relativno malen broj, kao i kidalica specifično razvijenih za određena istraživanja, uočeno je kako se najčešće za izradu cjevastih potpora koriste polimetilmetakrilat (PMMA), aluminij i polimeri ojačani ugljičnim vlaknima.

Osnovni dijelovi *in-situ* kidalice ove izvedbe, kao i princip njenog rada, pokazat će se na primjeru kidalice za statičko vlačno ispitivanje razvijene na Katedri za eksperimentalnu mehaniku, Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Ova je kidalica razvijena u sklopu HRZZ istraživačkog projekta *Fullinspect* (UIP-2019-04-5460) te predstavlja samo jednu od mogućih izvedbi *in-situ* kidalica za provedbu kvazi-statičkih jednoosnih ispitivanja. Ono što joj daje prednost u odnosu na trenutno komercijalno dostupne kidalice ili uređaje

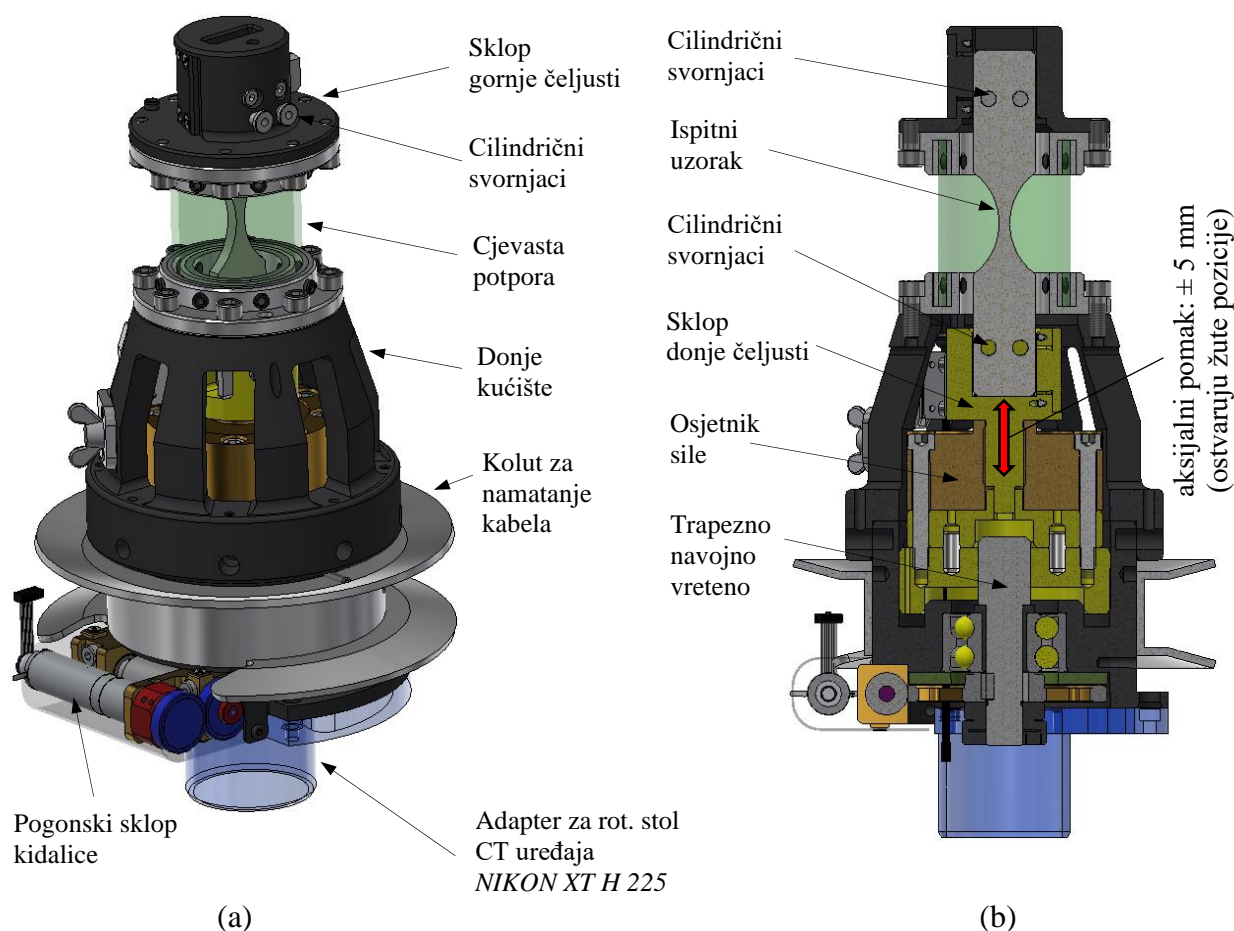
razvijene u okviru različitih znanstvenih istraživanja jest njezina modularnost i mogućnost instalacije u različite CT uređaje. Naime, predloženi ispitni uređaj razvijen je s ciljem istraživanja utjecaja materijala cjevaste potpore na mjernu nesigurnost DVC metode, kao i utjecaja relaksacije cjevaste potpore na rezultate mjerenja. Iz tog razloga, proizvedene su cjevaste potpore od četiri različita materijala te je omogućena njihova jednostavna zamjena. Detaljan opis razvoja ovog uređaja nalazi se u [81], dok se ovdje navode samo glavne dimenzije i osnovne karakteristike.

Glavne dimenzije *in-situ* statičke kidalice razvijene na Fakultetu strojarstva i brodogradnje dane su na slici 2-23, dok su njeni osnovni konstrukcijski dijelovi prikazani na slici 2-24(a), gdje je prikazan izometrijski pogled, odnosno na slici 2-24(b), gdje je dan presjek kroz centralnu ravninu.

Pogon ove kidalice izveden je preko istosmjernog motora s integriranim reduktorom koji preko zupčanog prijenosa pogoni pužni vijak, koji je dio pužnog prijenosa. Preko pužnog prijenosa pogoni se potom sklop trapeznog navojnog vretena i matice čime je ostvareno translacijsko gibanje pomičnog dijela kidalice. Pomični dio kidalice ima vertikalni hod od ± 5 mm u odnosu na centralni položaj (kota 183 mm na slici 2-23), dok maksimalna postiziva aksijalna sila iznosi 5 kN. Na pomičnom dijelu kidalice smješten je osjetnik sile i donja čeljust. Gornja je čeljust preko izmjenjive cjevaste potpore povezana s kućištem kidalice. Izvedba čeljusti kidalice omogućava postavljanje ispitnih uzoraka širine 24 mm i debljine između 1 mm i 5 mm i približne duljine 130 mm preko narovašenih, kaljenih steznih pločica. Nadalje, dodatno se koristi par kaljenih, cilindričnih svornjaka promjera 6 mm, koji su opterećeni na smik. Osim trenjem preko narovašenih pločica, cilindrični svornjaci svojim oblikom također prenose opterećenje na ispitni uzorak.

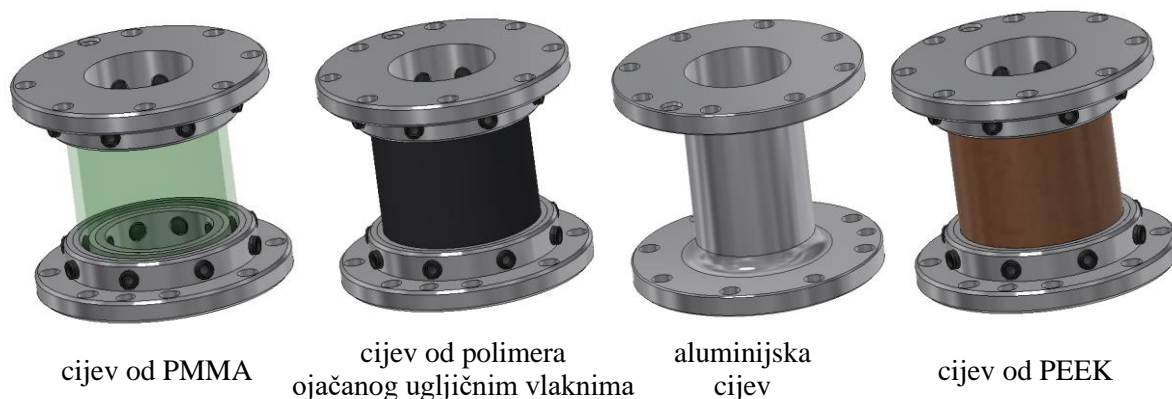


Slika 2-23 Glavne dimenzije *in-situ* kidalice s cjevastom potporom razvijene u sklopu HRZZ projekta Fullinspect (UIP-2019-04-5460)



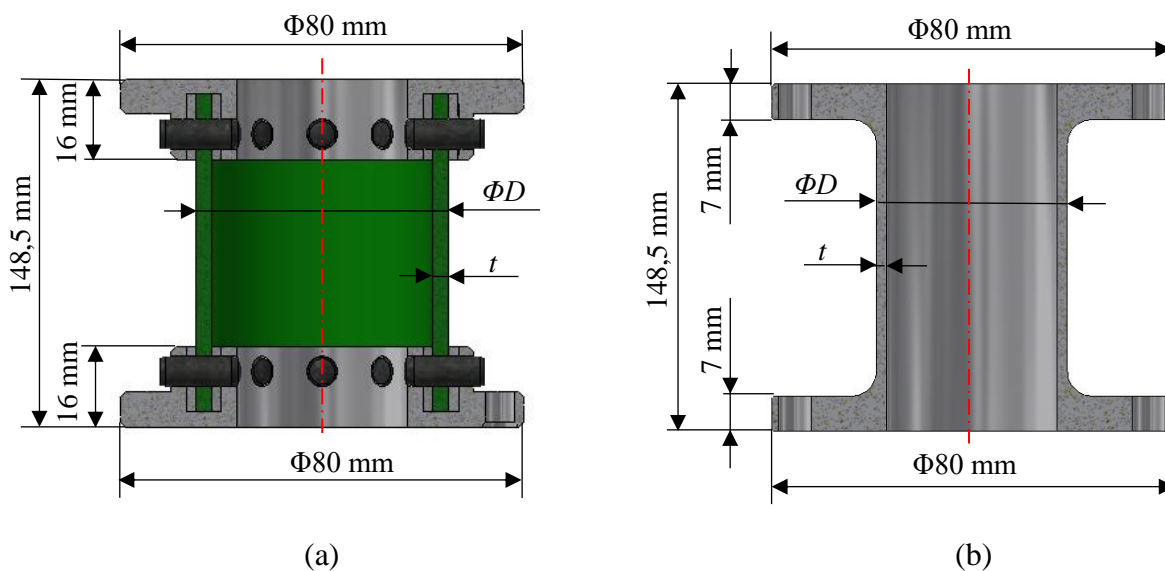
Slika 2-24 Osnovni dijelovi *in-situ* kidalice s cjevastom potporom razvijene u sklopu HRZZ projekta *Fullinspect* (UIP-2019-04-5460); (a) pogled u izometriji i (b) presjek kroz centralnu ravninu

Za ispitivanje propusnosti X-zračenja i utjecaja materijala koji okružuje promatrani ispitni uzorak na mjernu nesigurnost metode korelacije digitalnih volumena, predložena su četiri različita materijala za izradu cjevastih potpora (slika 2-25). Proizvedene su cjevaste potpore koje koriste cijev od polimetilmetakrilata (PMMA), polimernu cijev ojačanu ugljičnim vlaknima, aluminijsku cijev te cijev od poli(eter-eter-eton)-a (PEEK). S obzirom na intenciju da se izvoru zračenja što više približi ispitni uzorak, glavni je cilj bio odabrati najmanji mogući promjer cijevi. Pri tome su ograničavajući faktori bili širina ispitnog uzorka i steznih čeljusti.



Slika 2-25 Različite vrste cjevastih potpora kidalice razvijene u sklopu HRZZ projekta *Fullinspect* (UIP-2019-04-5460)

Debljine stjenki cilindričnih cijevi izrađenih iz različitih materijala određene su provedbom numeričkih simulacija izvijanja. Rezultat numeričke analize je kritična sila kod koje dolazi do izvijanja. Kod provedenih numeričkih proračuna definiran je kriterij (tj. faktor sigurnosti), prema kojem izračunata sila kod koje dolazi do izvijanja mora biti minimalno deset puta veća od maksimalne sile opterećenja koju ispitni uređaj može ostvariti (tj. 5 kN). Dimenzije i skice sklopa cjevastih potpora definirane su u tablici 2-1 i na slici 2-26(a) za cijev od PMMA, cijev od polimera ojačanog ugljičnim vlaknima te za cijev od PEEK, odnosno na slici 2-26(b) za aluminijsku cijev.

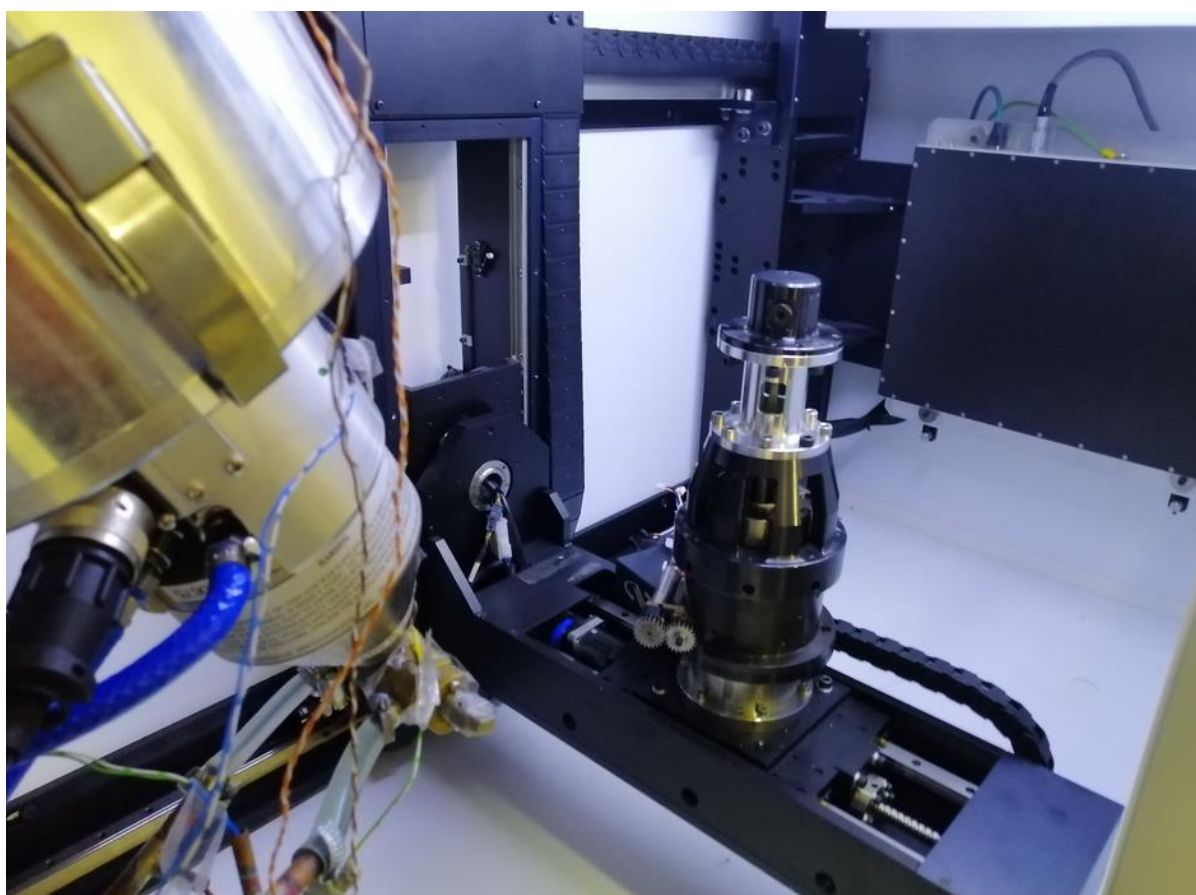


Slika 2-26 Dimenzije korištenih cjevastih potpora izrađenih od (a) PMMA, polimera ojačanog ugljičnim vlaknima i od PEEK te od (b) aluminijska

Tablica 2-1 Dimenzije korištenih cjevastih potpora

Materijal cjevaste potpore	Vanjski promjer cijevi ΦD	Debljina stijenke t
Polimetilmetakrilat – PMMA	50 mm	3 mm
Polimer ojačan ugljičnim vlaknima	48,8 mm	1,4 mm
Poli(eter-eter-eton)	50 mm	2 mm
aluminij	38 mm	2 mm

In-situ ispitni postav koji uključuje kidalicu razvijenu na Katedri za eksperimentalnu mehaniku instaliranu unutar laboratorijskog CT-uređaja *NIKON XT H 225*, koji se nalazi u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje, prikazan je na slici 2-27.



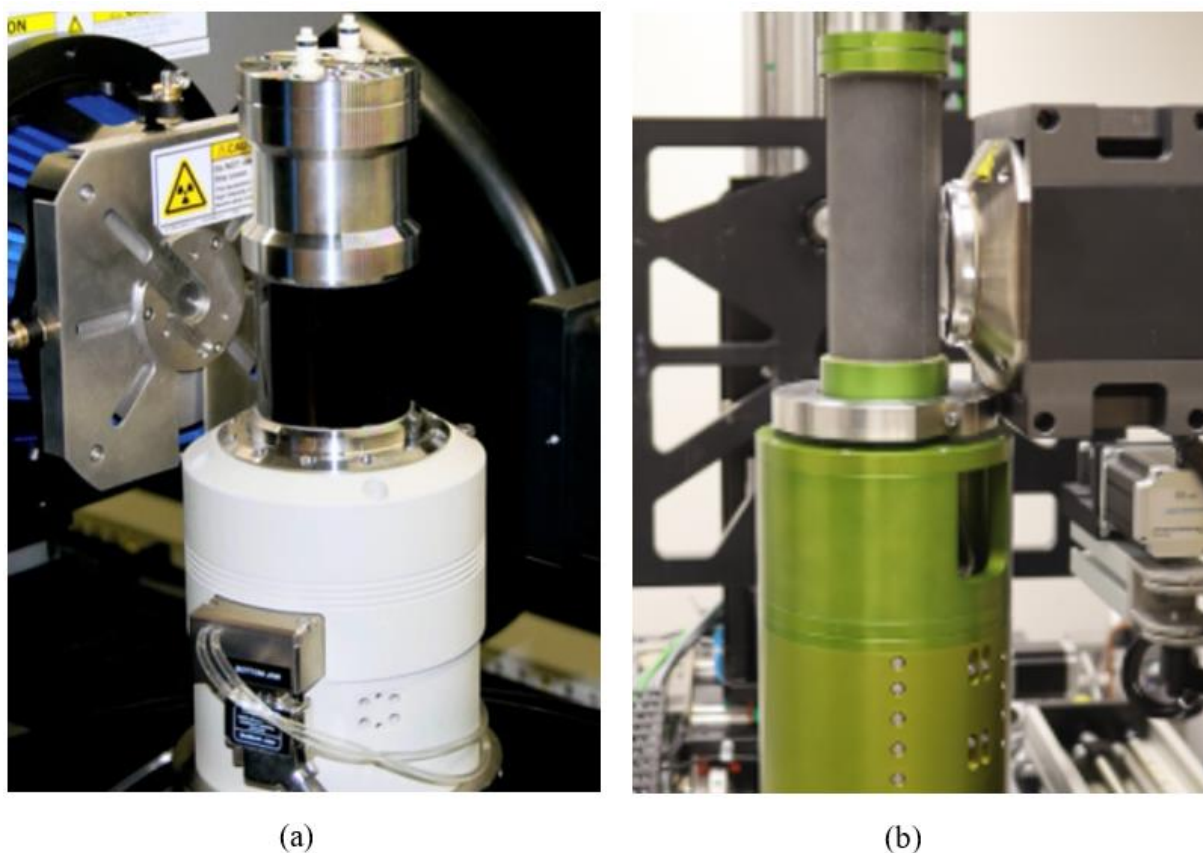
Slika 2-27 *In-situ* kidalica razvijena u sklopu *HRZZ* projekta *Fullinspect* (UIP-2019-04-5460) instalirana na laboratorijski CT uređaj *NIKON XT H 225*

Usporedivši kidalicu razvijenu na Katedri za eksperimentalnu mehaniku sa sličnom, komercijalnom dostupnom kadalicom *CT5000* proizvođača *Deben UK Ltd.*, prikazanoj na slici 2-28(a), uočit će se neke od temeljnih prednosti koje kidalica razvijena u sklopu *HRZZ* projekta *Fullinspect* posjeduje. Iako je kidalica proizvođača *Deben UK Ltd* kompaktne izvedbe kao i kidalica razvijena na Katedri za eksperimentalnu mehaniku te iako posjeduju jednaku

maksimalnu postizivu vlačnu / tlačnu silu (tj. 5kN), kod kidalice razvijene na Fakultetu strojarstva i brodogradnje znatno je jednostavniji postupak instalacije na zakretni stol laboratorijskih CT uređaja. Naime, konstrukcijskim rješenjem donjeg dijela ove kidalice realizirano je sučelje koje odgovara trima različitim komercijalno dostupnim CT uređajima. Radi se o CT uređaju *NIKON XTH 225*, kakav je instaliran u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje, zatim o CT uređaju *Werth TomoScope S*, kakav je instaliran u firmi *Yazaki Europe Limited* te o CT uređaju *X50+ North Star Imaging*, kakav je instaliran na *Laboratoire de Mécanique Paris- Saclay* u Francuskoj. Dodatno je, izvedbom donjeg dijela kidalice, olakšana njena eventualna buduća prilagodba nekom drugom laboratorijskom CT uređaju, što bi se realiziralo primjenom jednostavnih, lako izmjenjivih adapterskih pozicija. Pregledom komercijalno dostupnih kidalica za *in-situ* tlačno-vlačna ispitivanja, ustanovljeno je kako je od svih kidalica kod kojih je pogon smješten u donjem dijelu, upravo kidalica *CT5000* proizvođača *Deben UK Ltd.* najkompaktnije izvedbe. Iz tog je razloga zanimljivo promotriti dimenzije korištene cjevaste potpore čiji je utjecaj na udaljenost izvora zračenja od detektora te posljedično na rezoluciju rekonstruiranih volumetrijskih slika prethodno objašnjen. Kod kidalice *CT5000* koristi se cjevasta potpora vanjskog promjera 60 mm i debljine stijenke 3 mm, što se može vidjeti na mrežnim stranicama proizvođača [82]. Kidalica razvijena na Katedri za eksperimentalnu mehaniku i po ovom pitanju ostvaruje značajnu prednost pošto svaka od četiri različite izvedbe cjevastih potpora ima manji vanjski promjer cijevi (tablica 2-1), čime je kod korištenja ove kidalice omogućeno znatnije približavanje ispitivanog objekta izvoru zračenja.

Osim usporedbe s nekom od komercijalno dostupnih kidalica, interesantno je kidalicu razvijenu na Katedri za eksperimentalnu mehaniku usporediti s nekom od sličnih kidalica razvijenih također u sklopu i za potrebe specifičnih istraživačkih projekata. Jedna od takvih kidalica razvijena je na Institutu za teorijsku i primjenjenu mehaniku Sveučilišta u Pragu (slika 2-28(b)), a karakterizira je korištenje cjevaste potpore od polimera ojačanog ugljičnim vlaknima. Iako se u dostupnoj literaturi eksplicitno ne navodi promjer korištene cjevaste potpore, iz podatka o minimalnoj postizivoj udaljenosti između izvora zračenja i ispitivanog objekta (tj. 33 mm, navedeno u radu [83]), moguće je zaključiti kako promjer korištene cjevaste potpore kod ove kidalice nije značajno manji od dvostruke vrijednosti navedene udaljenosti, odnosno nije značajno manji od 66 mm. Usporedivši navedeni promjer s promjerima različitih cjevastih potpora korištenih na kidalici razvijenoj na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (tablica 2-1), zaključuje se kako je upotrebom potpore kidalice u odnosu na kidalicu razvijenu u Pragu

također moguće postići veće geometrijsko povećanje CT skeniranja, pošto je zbog manjih promjera cjevastih potpora moguće više približiti izvor zračenja ispitivanom objektu. Sljedeća zanimljiva usporedba ovih dviju kidalica odnosi se na njihove glavne dimenzije i s tim u vezi na mogućnosti njihove instalacije unutar različitih CT uređaja. Uvidom u glavne dimenzije i karakteristike kidalice razvijene u Pragu [84] može se ustanoviti kako je ova kidalica svojim vanjskim promjerom od 130 mm slična kidalici razvijenoj na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (slika 2-23). Ipak, kidalica razvijena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje znatno je kompaktnije izvedbe. Ovo se može ilustrirati usporedbom ukupne ugradbene visine koja za kidalicu razvijenu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje iznosi svega 257,5 mm, dok kod kidalice razvijene u Pragu ukupna visina iznosi 465 mm.



Slika 2-28 Različite izvedbe *in-situ* ispitnih uređaja s cjevastom potporom: (a) komercijalno dostupna *in-situ* kidalica CT5000 proizvođača *Deben UK Ltd.* [82]; (b) kidalica razvijena na Institutu za teorijsku i primjenjenu mehaniku u Pragu [83]

Masom od otprilike 5,5 kg, kidalica razvijena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje [81] znatno je lakša od kidalice razvijene u Pragu, čija približna masa iznosi 8 kg. Podatak koji je svakako bitno naglasiti kada se vrši usporedba dviju sličnih kidalice odnosi se na njihov kapacitet, odnosno na maksimalnu postizivu vlačnu ili tlačnu silu. Po ovom pitanju kidalica razvijena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje također ostvaruje značajnu prednost pošto

može ostvariti aksijalnu silu od 5 kN, za razliku od kidalice razvijene u Pragu čiji je limit 3 kN.

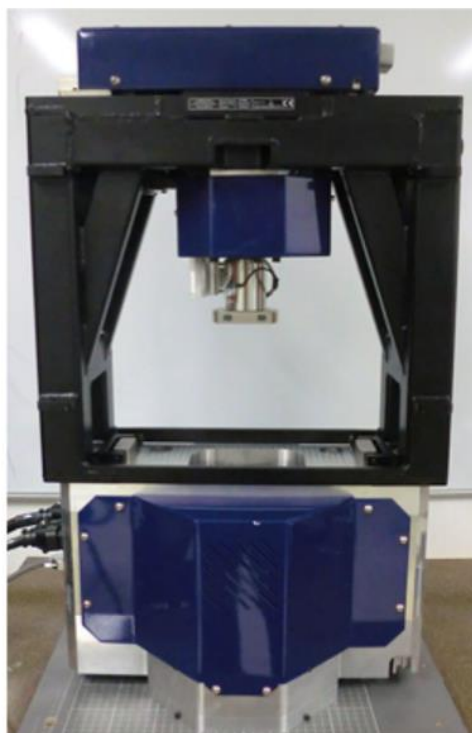
2.9.2. *In-situ kidalice s traverzama*

Konstruktivske izvedbe *in-situ* ispitnih uređaja s traverzama konstruirane su po uzoru na klasične (tj. makro) univerzalne kidalice. Kod ovog tipa kidalica, povezivanje pomičnog i nepomičnog dijela uređaja, odnosno prenošenje opterećenja na ispitni uzorak, ostvareno je preko dvaju trapeznih vretena (tj. traverzi) pri čemu je osiguran precizan i stabilan pomak pokretnih dijelova kidalice duž njihove duljine. Na ovaj je način osigurano ravnomjerno raspoređivanje opterećenja na ispitnom uzorku tijekom mehaničkih ispitivanja. Postavljanjem ovog tipa ispitnog uređaja na rotirajući stol CT skenera, traverze bi u određenim položajima mogle blokirati prolaz X-zrakama do detektora. Stoga, ova izvedba kidalica mora uključivati vlastitu rotaciju ispitnog uzorka kako bi se omogućio neometan prolaz rendgenskih zraka tijekom zabilježavanja 2D projekcija. Time se osigurava precizno i pouzdano skeniranje uz očuvanje visoke kvalitete prikupljenih podataka.

Kidalica *CT 20K* proizvođača *Deben UK Ltd.*, prikazana na slici 2-29, primjer je komercijalno dostupne kidalice s traverzama. Osim što se može koristiti za vlačni i tlačni test, konstruktivska izvedba pogonskog dijela ove kidalice, koja uključuje dva zasebna pogonska motora, također omogućuje provedbu torzijskog testa.

Prema tehničkim specifikacijama [85], masa ove kidalice iznosi približno 120 kg, dok je njen kapacitet 20 kN za vlačni i tlačni test te 100 Nm za torzijski test. Nadalje, kidalica ima mogućnost ostvarivanja aksijalnog pomaka u duljini od 50 mm, a u pogledu torzijskog testa ograničena je na maksimalnih 1000 okretaja po testu.

Usporede li se prethodno navedene tehničke karakteristike ove kidalice s karakteristikama triju kidalica opisanih u prethodnom poglavlju, uočiti će se kako je kidalica *Deben CT 20K* znatno veća, masivnija i kako je znatno većeg kapaciteta. Veća postiziva aksijalna sila, kao i mogućnost opterećivanja uzorka u torzijskom smjeru, predstavlja značajnu prednost koju ostvaruje ne samo konkretno navedena *Deben CT 20K* kidalica u odnosu na tri prethodno opisane, već se to općenito odnosi na kidalice s traverzama kada se usporede s kidalicama koje za prijenos opterećenja s donjeg na gornji dio koriste cjevastu potporu.



Slika 2-29 Komercijalno dostupna kidalica CT 20K proizvođača Deben UK Ltd. [85]

Ipak, uslijed svojih dosta većih dimenzija, kidalice s traverzama znatno su rjeđe korištene u uvjetima laboratorijske tomografije pošto je radni prostor laboratorijskih CT uređaja prilično ograničen, i kao takav, obično nije dostatan za instalaciju ovog tipa kidalice. Dodatan je problem vezan i uz ograničenja u pogledu nosivosti radnog stola laboratorijskih CT skenera. Naime, iako je kod kidalica s traverzama rotacija ispitnog uzorka ostvarena unutar same kidalice, izvedba laboratorijskih CT skenera najčešće uvjetuje instalaciju *in-situ* ispitnih uređaja isključivo na zakretni stol čija ograničenja u pogledu nosivosti onda direktno utječu na primjenjivost ispitnog uređaja za *in-situ* mehaničko testiranje. Ovaj bi se problem mogao riješiti deinstalacijom zakretnog stola s CT uređaja i instalacijom kidalice direktno na metalno postolje CT uređaja, ukoliko je nosivost takvog postolja dostatna za prihvata korištene kidalice. Drugi bi pristup uključivao intervenciju na donjem dijelu kidalice, koja bi opet omogućila prijenos opterećenja uzrokovanog težinom same kidalice na postolje CT uređaja, izbjegavajući opterećivanje zakretnog stola. Ovo bi se moglo izvesti upotrebom specijalnih nosača (tj. okvira) koji bi s gornje strane imali sučelje za prihvat kidalice, s donje strane sučelje za prihvat na postolje CT uređaja, dok bi sredina, unutar koje bi bio zakretni stol, ostala slobodna.

Oba predložena pristupa integracije ovakvih masivnih kidalica s laboratorijskim CT uređajima zahtijevaju ozbiljnu tehničku intervenciju, pri čemu je prvi pristup demontaže zakretnog stola posebno delikatan. Osim što iziskuje potrebne tehničke vještine, demontaža zakretnog stola

također povlači i pitanje gubitka garancije komercijalnog laboratorijskog CT uređaja. Navedena je argumentacija razlog bitno rjeđe primjene ove grupe kidalice kod provođenja *in-situ* mehaničkih ispitivanja laboratorijskom tomografijom. Znatno veći potencijal kidalice s traverzama pokazuju u uvjetima sinkrotronske tomografije kod koje problem limitiranosti radnog prostora nije izražen u onoj mjeri u kojoj postoji kod laboratorijske tomografije. Kako je fokus ovog doktorskog rada upravo na laboratorijskoj tomografiji, kod koje za *in-situ* mehanička ispitivanja dominiraju kidalice s cjevastom potporom, tako se neće ulaziti u detaljniji opis i analizu grupe kidalica s traverzama.

3. KORELACIJA DIGITALNIH VOLUMENA

3.1. Uvod

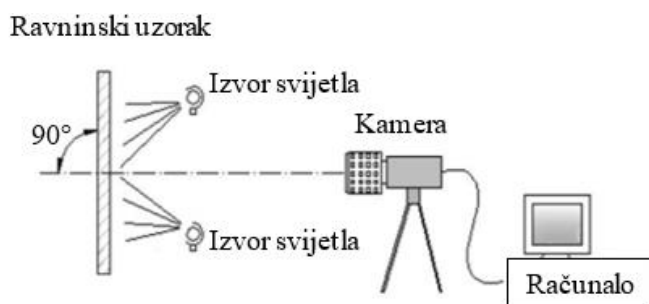
Određivanje ponašanja materijala uslijed narinutog mehaničkog opterećenja, kao i utvrđivanje ponašanja inženjerskih komponenti u eksploatacijskim uvjetima, jedni su od osnovnih ciljeva eksperimentalne mehanike. U mehaničkim ispitivanjima koja se u tu svrhu provode najčešće se mjere ostvarene sile i pomaci te se iz njih izračunavaju pripadajuće deformacije i naprezanja. Konvencionalnim metodama mjerenja pomaka i/ili deformacija (npr. ekstenzometri, tenzometri, LVDT senzori) moguće je odrediti globalno ponašanje materijala u samo jednoj ili nekoliko diskretnih točaka promatranog prostora interesa. Iz tog razloga primjenom konvencionalnih metoda nije moguće pratiti fenomene kao što su lokalizacija deformacija te inicijacija i propagacija mikropukotina. Navedeni su fenomeni prisutni i kod vlaknima ojačanih polimera, koji su materijal koji se analizira u eksperimentalnom dijelu ovog doktorskog istraživanja. Primjenom računalne tomografije i metode korelacije digitalnih volumena omogućena je trodimenzionalna kvantifikacija cijelog polja pomaka i/ili deformacija ispitnog uzorka. Rezultati predložene metodologije dugo su bili cilj istraživača u području mehanike čvrstih tijela. Osim što omogućuje detaljno praćenje ponašanja materijala pod opterećenjem, ova napredna metoda otvara vrata razumijevanju mikrostrukturnih promjena unutar materijala tijekom mehaničkih ispitivanja. Nadalje, kombinacija ovih tehnika omogućuje precizno mapiranje promjena u strukturi materijala s visokom razlučivošću i omogućuje dublju analizu mehaničkih svojstava materijala pod stvarnim uvjetima opterećenja. Kvantificiranjem cijelih polja pomaka i izračunom pripadajućih polja deformacija moguće je točnije odrediti globalni odziv materijala uslijed narinutog mehaničkog opterećenja te na taj način eksperimentalno verificirati teorijske pretpostavke ponašanja čvrstih tijela kod različitih režima opterećenja. Iako su rane metode mjerenja cijelog polja pomaka: Moir'e interferometrija [86], speckle interferometrija [87], grid metode [88], fotoelasticimetrija [89] dale određene doprinose, njihovo je korištenje bilo ograničeno zbog izraženih poteškoća i nepraktičnosti u analizi podataka [90]. Značajniji napredak u području mjerenja cijelog polja pomaka/deformacija dogodio se s razvojem tehnologije obrade digitalne slike i sve većom upotrebom računala. Ovaj se napredak dogodio početkom osamdesetih godina dvadesetog stoljeća, kada je počela primjena metoda korelacije digitalne slike za mjerenje polja pomaka [91, 92].

3.2. Korelacija digitalne slike

Korelacija digitalne slike (eng. *Digital Image Correlation* – DIC) beskontaktna je optička metoda koja se temelji na praćenju promjena položaja točaka na površini ispitnog uzorka. Ova

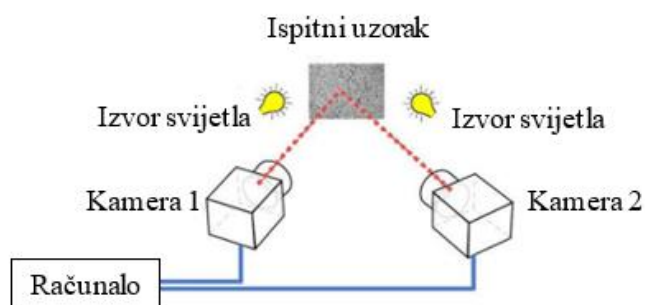
tehnika uspoređuje položaj mjernih točaka u deformiranom stanju s njihovim položajem u nedeformiranom, odnosno referentnom stanju [93]. Na taj način omogućeno je kvantitativno mjerenje pomaka i deformacija na površini materijala ili inženjerske komponente s visokom preciznošću te bez potrebe za direktnim kontaktom s uzorkom. Za primjenu metode korelacije digitalne slike potrebna je jedna digitalna kamera (ili više njih), izvor svjetla i odgovarajući algoritam koji će omogućiti praćenja promjena na zabilježenim digitalnim slikama.

Svoju primjenu ova metoda nalazi kod ravninskih (2D) mjerenja i kod stereo (3D) mjerenja na površini. U oba se slučaja najčešće koriste kamere s CCD (eng. *Charge-coupled Device*) ili CMOS (eng. *Complementary Metal-oxide-semiconductor*) sensorima. Iz shematskih prikaza 2D i 3D ispitnih postava može se uočiti njihova temeljna razlika. Tako se kod ravninskog DIC mjerenja (slika 3-1) upotrebljava jedna kamera, pri čemu ravnina uzorka i os kamere moraju biti okomite. Relativni položaj kamere u odnosu na ispitni uzorak ne smije se mijenjati pošto promjenom položaja kamere ili uzorka dolazi do pogreške koju u 2D tehnici nije moguće otkloniti [94].



Slika 3-1 Shematski prikaz 2D DIC optičkog sustava [94]

Kod stereo (tj. 3D površinskog) mjerenja upotrebljavaju se minimalno dvije kamere te je, za razliku od 2D površinskog DIC-a, nakon inicijalne kalibracije sustav moguće premješati na bilo koju lokaciju na kojoj se želi provesti mjerenje (vidi sliku 3-2). Pri tom je potrebno paziti da se ne promjeni međusobni položaj postavljenih kamera [94].

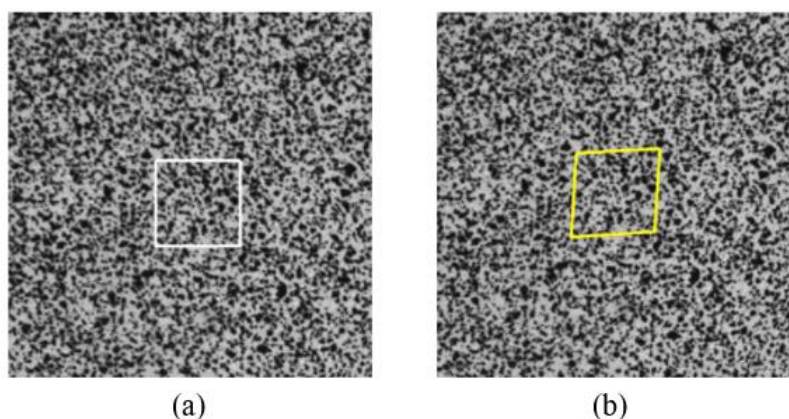


Slika 3-2 Shematski prikaz 3D DIC optičkog postava [95]

Najčešće korištene CCD ili CMOS kamere daju točnost rezultata mjerenja na makro i mezo razini, dok se za dobivanje pouzdanih rezultata na manjim razinama upotrebljavaju različite vrste mikroskopa, kao što su npr. optički mikroskopi [96], skenirajući elektronski mikroskopi [97], prijenosni elektronski mikroskopi [98] i atomski mikroskopi [99]. Pritom optički mikroskopi omogućavaju vizualizaciju i analizu uzoraka na mikro razini, dok skenirajući elektronski mikroskopi i prijenosni elektronski mikroskopi omogućavaju dobivanje slika visokih rezolucija koje se mogu koristiti za detaljnu analizu strukture materijala na nano razini. Atomski mikroskopi, koristeći osjetljivu sondu za mapiranje površine uzorka s izuzetno visokom preciznošću, omogućavaju analizu na atomskom nivou.

Osobita pažnja prilikom provedbe mjerenja DIC metodom treba biti usmjerena na teksturu ispitivanog materijala pošto ona u velikoj mjeri utječe na mjerne rezultate. Idealna bi tekstura trebala biti visoko kontrastna, stohastička i izotropna [100]. Za razliku od materijala čija je prirodna tekstura pogodna za provođenje metode korelacije digitalne slike (npr. nodularni i sivi lijev), za većinu je materijala potrebna dodatna priprema promatrane površine kako bi se dobio uzorak s prethodno navedenim karakteristikama. Postoji čitav spektar različitih tipova umjetne teksture kao i tehnika njihove aplikacije na ispitivani objekt. Neke su od njih metoda sprejanja, *airbrush* metoda, lasersko printanje i mikrolitografija. Odabir odgovarajućeg tipa umjetne teksture ovisi o vrsti ispitivanog materijala, površini ispitnog uzorka i željenoj razini prostorne rezolucije mjerenja. Glavni je cilj dobiti mjernu površinu s raznolikom teksturom kako bi se na svakoj slici identificirale karakteristične točke. Praćenjem tih točaka mogu se precizno odrediti pomaci koji su uzrokovani narinutim opterećenjem. Svaka tehnika ima svoje prednosti i ograničenja, pa se odabir metode prilagođava specifičnim potrebama istraživanja.

Postupak mjerenja primjenom DIC metode sastoji se od analize niza digitalnih slika zabilježenih tijekom mehaničkog ispitivanja. Referentna digitalna slika diskretizira se manjim poljima piksela koji se nazivaju podskupovi (eng. *Subsets*) ili fasete (engl. *Facets*). Fasete su obično pravokutnog ili kvadratnog oblika, a zahvaljujući stohastičkom karakteru teksture promatrane površine svaka je faseta jedinstvena u pogledu raspodjele intenziteta sive boje što je čini pogodnom za kros-korelaciju. Primjer diskretizacije referentne slike na podskupove dan je na slici 3-3(a), dok je primjer diskretizacije deformirane slike dan na slici 3-3(b).



Slika 3-3 Diskretizacija digitalne slike primjenom lokalnog DIC pristupa u (a) referentnoj i (b) deformiranoj konfiguraciji [101]

Slika referentne konfiguracije najčešće se uzima u nedeformiranom, odnosno neopterećenom stanju, pri čemu se matrica intenziteta sive boje označava kao $f(\mathbf{x})$, dok se slike deformiranih konfiguracija uzimaju u opterećenom stanju te se matrice intenziteta sive boje označavaju kao $g(\mathbf{x})$. Drugim riječima, $f(\mathbf{x})$ i $g(\mathbf{x})$ predstavljaju vrijednosti intenziteta sive boje na slikama referentnog odnosno deformiranog stanja pri čemu \mathbf{x} označava položaj piksela.

Poštujući pravilo optičkog toka, koje pretpostavlja očuvanje razine sive boje između slika referentnog i deformiranog stanja, vrijedi izraz:

$$f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})), \quad (3-1)$$

gdje je \mathbf{u} nepoznato polje pomaka koje je potrebno izmjeriti za svaki piksel.

Kriterij podudaranja slika referentnog i deformiranog stanja može se pritom odrediti minimiziranjem SSD korelacijskog koeficijenta, čiji naziv proizlazi iz akronima engleskog termina za sumu kvadrata razlika (eng. *Sum of the Square Difference* – SSD) iznad cijelog područja interesa (eng. *Zone of Interest* – ZOI) prema izrazu:

$$\min_u \|f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u})\| = \int_{ZOI} [f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u})]^2 dx \quad (3-2)$$

ili traženjem maksimuma kros-korelacijskog koeficijenta (eng. *Cross-correlation Coefficient* - CCC) prema izrazu:

$$(f * g) = \int_{ZOI} f(\mathbf{x})g(\mathbf{x} + \mathbf{u}) dx \quad (3-3)$$

Metoda korelacije digitalne slike izuzetno je koristan alat ukoliko se polja pomaka i deformacija žele odrediti na površini ispitnog uzorka. Razvojem računalne tomografije opisane u prethodnom poglavlju, dobivena je mogućnost uvida u unutrašnjost ispitivanog materijala. Iz dobivenih 2D projekcija rekonstruiraju se volumetrijske slike ispitnog uzorka. Zabilježeni CT skenovi mogu se zatim diskretizirati na manje trodimenzionalne podskupove, koji se mogu

analizirati putem korelacijskih postupaka koji su slični onima kod korelacije digitalnih slika. Ovaj pristup omogućuje detaljnu analizu pomaka i deformacija unutar ispitivanog uzorka u trodimenzionalnom prostoru. U tom se slučaju radi o metodi korelacije digitalnih volumena koja predstavlja trodimenzionalnu ekstenziju DIC metode.

3.3. Korelacija digitalnih volumena

Korelacija digitalnih volumena (eng. *Digital Volume Correlation* – DVC) beskontaktna je optička metoda koja se zasniva na praćenju promjena položaja točaka na površini i u unutrašnjosti ispitnog uzorka [5]. Metoda koristi volumetrijske digitalne slike koje se diskretiziraju na podvolumene te se na sličan način kao i kod metode korelacije digitalne slike mjere polja pomaka i deformacija. U odnosu na DIC metodu koja je ograničena na mjerenje ravninskih pomaka, prednost DVC metode je u tome što ona pruža mogućnost mjerenja cijelog polja pomaka u 3D prostoru.

Kao i u slučaju prethodno opisane DIC metode, tekstura ispitivanog materijala igra značajnu ulogu u smislu primjene i iskoristivosti metode korelacije digitalnih volumena. Pošto je DVC metoda usmjerena na promatranje unutrašnjosti ispitivanog materijala, u slučaju njene primjene nisu izvedive intervencije kojima bi se tekstura ispitivanog uzorka učinila povoljnijom za provođenje mjerenja. Drugim riječima, princip nanošenja umjetne teksture na ispitivani materijal, učestalo korišten kod DIC metode, nije primjenjiv kod metode korelacije digitalnih volumena. Postoji, ipak, slučaj u kojem se pri razvoju novog FRP materijala uzela u obzir buduća potreba za ispitivanjem komponenti primjenom računalne tomografije i DVC metode [36]. U tom se smislu, kroz aplikaciju submikronskih čestica u kompozitnu matricu, stvorila kontrolirana mikrostruktura koja je omogućila provedbu DVC analize. Ovaj pristup, međutim, nije primjenjiv kod već postojećih materijala te se pri njihovom ispitivanju DVC metodom potrebno osloniti na prirodnu teksturu (tj. mikrostrukturu) materijala. S obzirom na različitu mikrostrukturu/teksturu materijala, prilagođavanje DVC algoritma specifičnoj teksturi ispitivanog materijala ključno je za pouzdana mjerenja. Ovaj proces uključuje optimizaciju parametara algoritma, poput podskupa/fasete/elementa za korelaciju, razlučivosti uzorka te primjene odgovarajućih tehnika interpolacije ili filtriranja. Cilj je osigurati precizno i pouzdano mjerenje polja pomaka i deformacija unutar materijala, prilagođeno svakom pojedinačnom slučaju. Predloženo prilagođavanje dovodi do optimalne učinkovitosti i preciznosti DVC mjerenja za svaki materijal ili uzorak. Stoga je razvoj DVC metode više usmjeren na razvoj niza procedura koje se prilagođavaju i primjenjuju na pojedinačne slučajeve, uzimajući u obzir raznolikost mikrostrukture i teksture materijala [27].

Razvoj metode korelacije digitalnih volumena ne bi bio moguć bez napretka tehnika snimanja unutrašnjosti materijala, a ključni pokretač ovog napretka bilo je područje medicine. Naime, računalna tomografija X-zrakama, snimanje magnetskom rezonancom, optička koherentna tomografija, konfokalna mikroskopija, ultrazvučno snimanje tehnike su koje se uvelike koriste u medicinsko-dijagnostičke svrhe. U tom kontekstu, nije iznenađujuće što se prva primjena metode korelacije digitalnih volumena odnosi na mjerenje polja pomaka tlačno opterećenih trabekularnih kosti, koje su prethodno *in-situ* skenirane na laboratorijskom CT skeneru [5]. Zbog svoje heterogene strukture, koja se sastoji od 70 % anorganske tvari (najvećim dijelom kalcija i fosfora), 22 % organske (kolagena) i 8 % vode [95], kosti se mogu smatrati kompozitima izrazito pogodnima za provođenje DVC mjerenja. Iako je rana primjena bila vezana uz biomehaničke aplikacije [102, 103], danas DVC metoda nalazi široku primjenu u mehanici čvrstih tijela. Tako se DVC metoda koristi pri ispitivanju aluminijskih legura [26, 104], različitih vrsta pjena [105, 106], vlaknima ojačanih kompozita [107, 108], kamena [109] i drugih materijala.

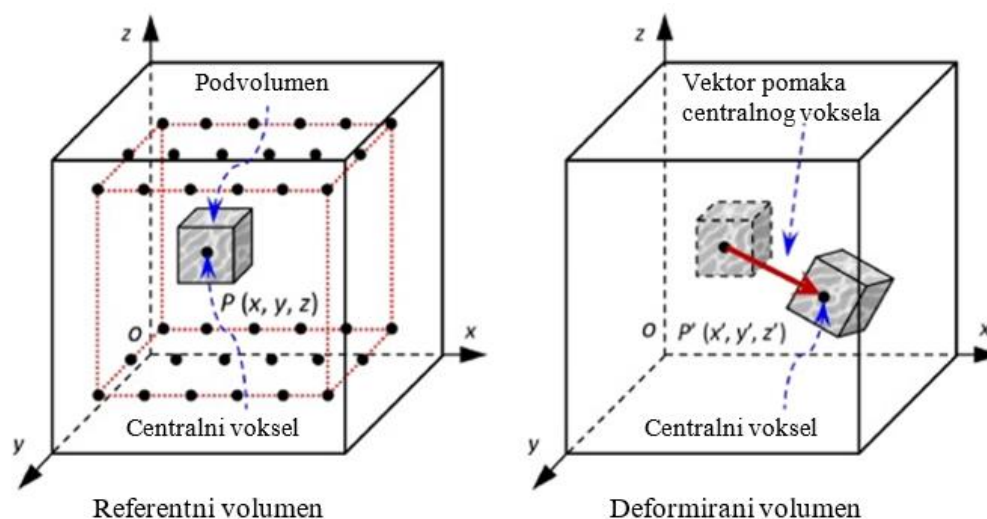
Svoju primjenu DVC metoda najčešće nalazi u kombinaciji s računalnom tomografijom X-zrakama. Ispitni se uzorak istovremeno rotira i skenira te se iz tako dobivenih 2D projekcija rekonstruiraju digitalni volumeni. Prvo se uzorak skenira u neopterećenom stanju kako bi se dobile projekcije za rekonstrukciju tzv. *referentnog volumena*. Nakon toga, uzorak se skenira pod različitim razinama opterećenja kako bi se dobio tzv. *deformirani volumen*. Referentni i deformirani volumeni zatim se diskretiziraju na manja polja vokseli (trodimenzionalni ekvivalenti pikseli), koji se nazivaju podvolumenima. Nad ovim podvolumenima provodi se metoda korelacije digitalnih volumena.

Matematički se referentni i deformirani volumeni mogu, kao i kod DIC metode, prikazati koristeći vrijednosti $f(\mathbf{x})$ i $g(\mathbf{x})$ koje predstavljaju trodimenzionalne matrice vrijednosti sive skale tonova referentnog i deformiranog volumena. Pritom \mathbf{x} označava lokaciju pojedinog vokseli. Očuvanje intenziteta sive skale boja na referentnom i deformiranom volumenu, prema zakonu očuvanja optičkog toka, temeljni je princip metode korelacije digitalnih volumena. U tom se smislu veza između referentnog i deformiranog volumena, jednako kao i kod DIC metode, može opisati izrazom (3-1).

Ovisno o tome mjere li se pomaci podvolumena neovisno (tj. lokalno) ili se pretpostavlja kontinuitet polja pomaka DVC metode razlikuju se dva pristupa, lokalni i globalni, koji će biti opisani u nastavku.

3.3.1. Lokalni DVC pristup

Kod primjene lokalnog pristupa, referentni se volumen diskretizira na skupove voksela (podvolumena) koji su međusobno neovisni, što znači da nije zadovoljen kontinuitet pomaka. Na slici 3-4 prikazan je princip rada lokalnog DVC pristupa. Naime, za niz podvolumena, definiran na referentnoj slici primjenom kros-korelacijske funkcije, traži se najbolje poklapanje u deformiranoj konfiguraciji. Kada se pronade najbolje poklapanje referentnog podvolumena na deformiranoj konfiguraciji, određen je pomak centra fasete na razini voksel.



Slika 3-4 Osnovni princip lokalnog DVC-a: podudaranje referentnog i deformiranog podvolumena [110]

Lokalni DVC pristup temelji se na primjeni kros-korelacijske (eng. *Cross-correlation*) funkcije, koja se u obradi signala definira kao mjera sličnosti dvije serije signala, s obzirom na pomak jedne u odnosu na drugu. U kontekstu analize slika ili signala, kros-korelacijska funkcija pruža informacije o međusobnoj povezanosti između dva skupa podataka, pri čemu se jedan skup pomiče u odnosu na drugi. Navedenu operaciju moguće je opisati kao klizni *skalarni* produkt. Naime, jedna funkcija (tj. signal) klizi preko druge, a za svaki pomak računa se skalarni produkt između njihovih vrijednosti. Ovaj se proces ponavlja za svaki mogući pomak, što rezultira kros-korelacijskom funkcijom koja prikazuje kako se sličnost između funkcija mijenja s pomakom. Maksimalni iznos kros-korelacijske funkcije označava najbolje poklapanje između dva različita signala. Vrlo je važno napomenuti da se kros-korelacija i konvolucija računaju na sličan način. U oba slučaja, jedna funkcija (tj. kernel) klizi preko druge, a za se svaki pomak računa odgovarajuća mjera. Glavna je razlika u interpretaciji rezultata: dok kros-korelacija pruža informacije o sličnosti između dvije funkcije, konvolucija se često koristi za filtriranje i izdvajanje karakteristika iz signala.

U kontekstu korelacije digitalnih slika/volumena, kros-korelacijska funkcija koristi se za

usporedbu intenziteta piksela ili vrijednosti vokselna između referentne i deformirane slike na svim mogućim pozicijama pomaka. Referentni kubični podvolumen pritom sadrži $n = (2M + 1) \times (2M + 1) \times (2M + 1)$ vokselna, pri čemu M predstavlja veličinu slike. Cjelobrojni pomaci referentnog podvolumena u vokselima, tj. u_0, v_0, w_0 , mogu se lako pronaći jednostavnim klizanjem njegove pozicije u deformiranim volumenskim slikama i pronalaženjem lokacije koja daje globalni maksimum koeficijenta normalizirane korelacije s nultom sredinom (eng. *Zero Mean Normalized Cross-Correlation - ZNCC*) definirane kao:

$$C_{ZNCC}(u_0, v_0, w_0) = \frac{\sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i, z_i) - f_m][g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0) - g_m]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i, z_i) - f_m]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n [g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0) - g_m]^2}}, \quad (3-4)$$

gdje su $f(x_i, y_i, z_i)$ i $g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0)$ vrijednosti sive skale tonova i -tog vokselna u referentnom i deformiranom podvolumenu. Izraz $f_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i, z_i)]$ predstavlja srednju vrijednosti intenziteta referentnih podvolumena, dok $g_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0)]$ predstavlja srednju vrijednosti intenziteta deformiranih podvolumena. Kriterij ZNCC definiran u jednadžbi (3-4) nudi dvije prednosti. Prva prednost ZNCC koeficijenta, koji se kreće u rasponu od $[-1, 1]$, jest mogućnost da intuitivno prikazuje kvalitetu podudaranja, gdje 1 označava savršeno podudaranje, 0 predstavlja da nema sličnosti, a -1 označava suprotno podudaranje. Druga je prednost ZNCC funkcije njezina robusnost, koja se manifestira u otpornosti na promjene osvjetljenja, kontrasta i druge varijacije u slikama. Normalizacija uklanja utjecaj razlika u osvjetljenju između slika, čineći ZNCC otpornim na globalne varijacije u intenzitetu.

Uzimajući u obzir diskretnu prirodu digitalnih volumenskih slika, pomaci procijenjeni iz jednadžbe (3-4) imaju rezoluciju pomaka na razini vokselna. Da bi se izmjerili pomaci faseta ispod razine vokselna, potrebno je provesti interpolaciju. Pošto se izvodi neovisno o analiziranim volumenima, operacija subvokselne interpolacije ne smatra se dijelom DVC analize [4].

Subvokselna interpolacija tehnika je koja se koristi u postupku korelacije digitalnih slika kako bi se preciznije odredili pomaci između referentne i deformirane slike, na razini ispod granulacije vokselna. Ova tehnika omogućuje fino podešavanje pomaka između susjednih vokselna unutar podvolumena koji su već određeni kros-korelacijom. Jedan od čestih načina provođenja subvokselne interpolacije jest korištenje matematičkih modela, kao što su B-spline ili polinomijalni modeli, kako bi se procijenili pomaci između diskretnih točaka vokselna. Ovi modeli omogućavaju glatko i neprekidno prilagođavanje pomaka unutar podvolumena, uzimajući u obzir vrijednosti kros-korelacijske funkcije između susjednih vokselna. Drugi

pristup subvokselnoj interpolaciji uključuje primjenu algoritama pretrage po uzorku, kao što su iterativni algoritmi poput Gauss-Newton ili Levenberg-Marquardt algoritma. Ovi algoritmi iterativno optimiraju parametre interpolacijskog modela kako bi se minimizirala greška između referentne i deformirane slike na subvokselnoj razini. Kombinacija ovih metoda omogućuje visoku preciznost u određivanju pomaka unutar ispitivanog materijala ili strukture materijala, čime se postiže veća točnost u analizi pomaka i deformacija. Subvokselna interpolacija igra ključnu ulogu u poboljšanju rezultata korelacije digitalnih slika, posebno u područjima gdje su potrebna visoka razlučivost i preciznost u mjerenjima.

Polje pomaka na svakom vokselu slike formira se korištenjem rezultata korelacije digitalnih slika i subvokselne interpolacije. Nakon što se odrede pomaci u centrima podvolumena na razini ispod piksela, ti se pomaci interpoliraju kako bi se dobilo polje pomaka koje pokriva cijelu sliku. Interpolacija se provodi primjenom odgovarajućih matematičkih modela ili algoritama, kako bi se procijenili pomaci na svakoj lokaciji između centara podvolumena. Na taj se način dobiva raspored pomaka za svaki voksel slike, što omogućuje detaljnu analizu deformacija i pomaka unutar ispitnog uzorka.

3.3.2. Globalni DVC pristup

Za razliku od lokalnog pristupa, globalni DVC pristup uvodi pretpostavku kontinuiteta polja pomaka, čime se razmatra cijelo (tj. globalno) polje pomaka primjenom principa definiranih kod metode konačnih elemenata. Globalni pristup korelacije digitalnih volumena prvi je put primijenjen za mjerenje polja pomaka kod tlačno opterećenih uzoraka izvedenih od polipropilenske pjene [16]. Nadalje, definiran je protokol *a priori* analize standardne mjerne nesigurnosti predložene metode.

Kako je opisano u [101], kod globalnog pristupa cilj je minimizirati sumu razlike kvadrata korelacijskih reziduala nad cijelim područjem interesa (eng. *Regions of Interest* - ROI):

$$\Phi_c^2 = \int_{ROI} \varphi_c^2 dx \quad (3-5)$$

gdje je φ_c polje korelacijskih reziduala:

$$\varphi_c = f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})). \quad (3-6)$$

Minimizacija Φ_c predstavlja loše postavljen problem. Stoga je odabrana slaba formulacija za dekompoziciju traženog polja pomaka $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ u skup unaprijed odabranih kinematičkih polja (tj. funkcija oblika) $\boldsymbol{\psi}_n$, poput onih korištenih u okviru metode konačnih elemenata:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_n u_n \cdot \Psi_n(\mathbf{x}). \quad (3-7)$$

Kada se koriste konačni elementi s prostornim funkcijama oblika, interpolacijom polja pomaka, problem minimiziranja reziduala svest će se na minimiziranje u odnosu na čvorne pomake mreže konačnih elemenata u_n . U usporedbi s lokalnim pristupom DVC metode, gdje se pomaci mjere u središtu podvolumena, kod FE-DVC algoritma čvorovi mreže konačnih elemenata su točke mjerenja pomaka (tj. stupnjevi slobode gibanja nalaze se na vrhovima elemenata).

Uz pretpostavku malih promjena pomaka i specifičnih korekcija, Gauss-Newtonovim iterativnim postupkom rješava se nelinearni aspekt problema minimiziranja sume razlike kvadrata φ_c^2 , što rezultira dobivanjem traženog polja pomaka preko:

$$\frac{\partial \varphi_c^2}{\partial \mathbf{u}} = [\mathbf{M}]\{\mathbf{du}\} - \{\mathbf{b}\} = 0, \quad (3-8)$$

gdje se iterativno rješava linearni sustav:

$$[\mathbf{M}]\{\mathbf{du}\} - \{\mathbf{b}^i\} = 0, \quad (3-9)$$

kod kojeg je cilj odrediti čvorne korekcije pomaka $\{\mathbf{du}\}$. DVC matrica (tj. matrica Hessian) $[\mathbf{M}]$ sadrži funkcije oblika Ψ_n i gradijente referentne slike $\nabla f(\mathbf{x})$, pa se zbog toga računa samo jednom prema:

$$M_{mn} = \sum_{\text{ROI}} (\nabla f(\mathbf{x}) \cdot \Psi_m(\mathbf{x})) (\nabla f(\mathbf{x}) \cdot \Psi_n(\mathbf{x})) \quad (3-10)$$

dok je $\{\mathbf{b}^i\}$ rezidualni vektor kod iteracije i . Rezidualni vektor definiran je kao razlika vrijednosti sive nijanse tonova referentnog f i korigiranog deformiranog volumena \tilde{g} prema:

$$b_m^i = \sum_{\text{ROI}} (f(\mathbf{x}) - \tilde{g}^i(\mathbf{x})) (\nabla f(\mathbf{x}) \cdot \Psi_m(\mathbf{x})). \quad (3-11)$$

Korigirani deformirani volumen (tj. slika) \tilde{g} računa se kod svake iteracije i , a mijenja se u ovisnosti o trenutno izračunatom polju pomaka \mathbf{u}^i :

$$\tilde{g} = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}^i(\mathbf{x})) \quad (3-12)$$

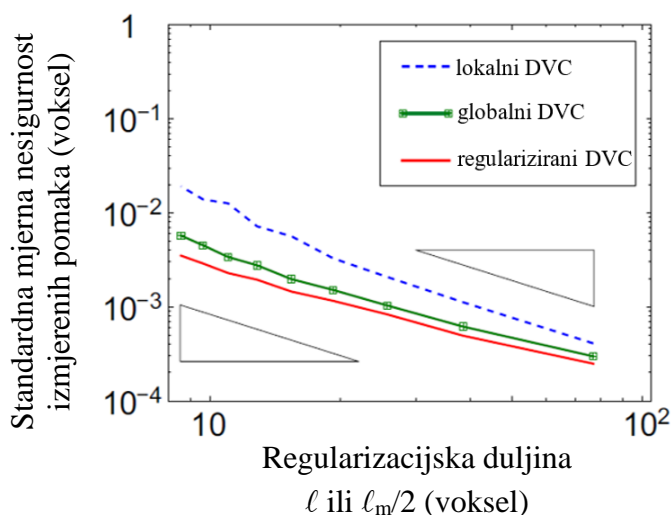
Matrica $[\mathbf{M}]$ tijekom svih iteracija ostaje konstantna, a u svakoj se iteraciji mijenja samo vektor $\{\mathbf{b}\}$. Iterativni se postupak provodi dok nije postignuta konvergencija, tj. dok korekcija polja pomaka $\{\mathbf{du}\}$ ne dostigne dovoljno malu vrijednost. Kod provedbe DVC analize kriterij inkrementalne promjene definira korisnik. Kriterij konvergencije za svaki korak korelacije definiran je prema L2 normi Gauss-Newtonove korekcije, obično postavljajući da je srednje kvadratno odstupanje (eng. *Root Mean Square*) korekcije polja pomaka između dvije iteracije manje od 10^{-4} voksela.

Linearni sustav DVC algoritma, definiran jednađbom (3-9) i dobiven minimizacijom korelacijskih reziduala, analogan je jednađbi konačnog elementa:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{b} \quad (3-13)$$

pri čemu se jedino razlikuje sadržaj matrice krutosti \mathbf{K} i vektora sile \mathbf{b} . U tom kontekstu, matrica krutosti konačnog elementa ekvivalentna je matrici koja sadrži gradijente sive skale i funkcije oblika koje definiraju polje pomaka. Nadalje, vektor sila, definiran u metodi konačnih elemenata, odgovara rezidualnom vektoru koji definira razliku između vrijednosti sive nijanse tonova referentnog volumena i korigiranog deformiranog volumena u slučaju DVC mjerenja polja pomaka globalnim pristupom. Matrica \mathbf{M} je simetrična, pojasna i pozitivno definitna matrica kao i matrica krutosti osnovnog pravokutnog konačnog elementa. Vektor \mathbf{d}_u sadrži pripadajuće inkrementalne stupnjeve slobode gibanja polja pomaka [19].

Uspoređujući globalni i lokalni DVC pristup, primjećuje se da FE-DVC algoritam, zahvaljujući pretpostavci o kontinuiranosti polja pomaka, nadmašuje lokalni pristup u smislu standardne rezolucije pomaka i odgovarajuće mjere nesigurnosti [106]. Na slici 3-5 prikazana je usporedba standardne mjere nesigurnosti izmjerenih pomaka primjenom lokalnog i globalnog pristupa s istom formulacijom mreže konačnih elemenata te neovisnih podvolumena. Može se primijetiti da globalni pristup bilježi niže vrijednosti standardne mjerne nesigurnosti za različite veličine podvolumena, tj. elemenata, te da se smanjenjem elemenata ta razlika povećava. S druge strane, algoritmi korišteni u globalnom pristupu su složeniji za implementaciju i zahtijevaju dulje vrijeme za izračun polja pomaka, jer se određivanje pomaka lokalnim pristupom može paralelizirati zbog neovisne analize pomaka svakog podvolumena [104]. Nadalje, korištenjem regularizirane DVC metode, koja koristi mehaničku regularizaciju, moguće je postići još nižu mjernu nesigurnosti DVC metode. U slijedećem će poglavlju, stoga, biti detaljno objašnjen regularizirani pristup globalnog DVC algoritma.

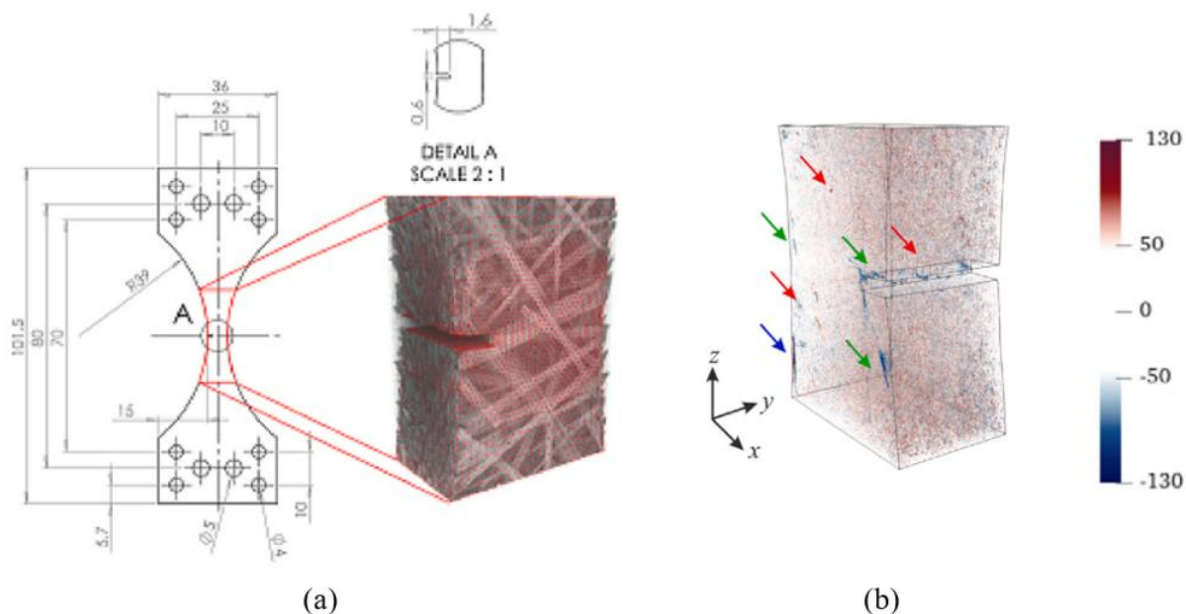


Slika 3-5 Standardna mjerna nesigurnost izmjerenih pomaka u ovisnosti o veličini elemenata ℓ ili regularizacijskoj duljini $\ell_m/2$ za Gaussov bijeli šum. Ovisnost prema zakonu potencije $-3/2$ prikazan je crnim trokutom [111]

Jedna od glavnih prednosti globalnog pristupa DVC metode jest dostupnost mapa korelacijskih reziduala za svaki analizirani volumen. Korelacijski reziduali analiziraju se za sve voksele koji pripadaju promatranom području interesa te, među ostalim, služe kao alat za provjeru kvalitete korelacije (tj. provjeru konvergencije DVC analize).

Osim toga, budući da se DVC metoda temelji na zakonu očuvanja optičkog toka, svako značajno odstupanje od očuvanja razine sive nijanse boje između dvije slike može biti povezano s promjenama u mikrostrukтури promatranog volumena (npr. nukleacijom i rastom oštećenja [107]). Drugim riječima, lokacije povišenih vrijednosti korelacijskih reziduala upućuju na mjesta nastanka mehaničkog oštećenja unutar ispitivanog materijala [108]. Na ovaj je način uspješno praćen nastanak i rast oštećenja unutar FRP materijala [35, 2].

Primjer upotrebe mape korelacijskih reziduala u svrhu detekcije oštećenja dan je na primjeru vlačnog testa [112] provedenog nad ispitnim uzorkom izrađenim od staklenim vlaknima ojačanog polimera *MAT* arhitekture vlakana kod kojeg je prisutan zarez na mjestu najmanjeg presjeka (slika 3-6(a)). Mjesta povišenih vrijednosti korelacijskih reziduala, prikazana plavim, crvenim i zelenim strelicama na slici 3-6(b) ukazuju pritom na mjesta nastanka oštećenja kao posljedice narinutog mehaničkog opterećenja.



Slika 3-6 Primjer rezultata vlačnog testa gdje je a) ispitni uzorak od FRP materijala za zarezom na mjestu najmanjeg presjeka te b) mape korelacijskih reziduala čije su povišene vrijednosti prikazane strelicama [112]

3.3.3. Regularizirani DVC

Ograničenja globalnog pristupa DVC metode u kontekstu prostorne rezolucije i kvalitete promatrane mikrostrukture, moguće je djelomično prevladati upotrebom mehaničke regularizacije. Ova metoda pretpostavlja elastično rješenje traženog polja pomaka i djeluje kao filter koji propušta samo mehanički signal zabilježen na slikama, filtrirajući pritom sve nemehaničke pojave poput šuma nastalog tijekom akvizicije slika [111].

Dodavanjem mehaničkih zahtjeva kroz implementaciju tzv. metode minimiziranja ravnotežne razlike (eng. *Equilibrium Gap Method* - EGM) ograničava se polje pomaka na rješenje problema elastičnosti s poznatim silama:

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{f}\}, \quad (3-14)$$

pri čemu $[\mathbf{K}]$ predstavlja matricu krutosti, dok vektor $\{\mathbf{f}\}$ obuhvaća sve čvorne sile mreže konačnih elemenata korištene za mjerenje pomaka [113].

U slučaju da vektor pomaka $\{\mathbf{u}\}$ ne zadovoljava uvjet ravnoteže, pojavit će se rezidualne sile na unutarnjim čvorovima:

$$\{\mathbf{f}_r\} = [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} - \{\mathbf{f}\}. \quad (3-15)$$

Kako unutarnjim čvorovima nisu pridružena nikakva vanjska opterećenja, potrebno je napraviti minimizaciju funkcije cilja. Predloženi pristup sastoji se od minimiziranja $L2$ norme neuravnoteženih čvornih sila za unutarnje stupnjeve slobode te neopterećene površine (tj. Neumann-ove stupnjeve slobode) mreže konačnih elemenata prema

$$\Phi_m = \{\mathbf{u}\}^T [\mathbf{K}_m]^T [\mathbf{K}_m] \{\mathbf{u}\}, \quad (3-16)$$

gdje je Φ_m funkcija cilja ravnotežne razlike, $[\mathbf{K}_m]$ parcijalna matrica navedenih stupnjeva slobode, a \top operator transponiranja.

Vanjske sile također nisu poznate. Međutim, za njih se ne može primijeniti izraz (3-16) jer on vrijedi samo za unutarnje i slobodne stupnjeve slobode. Stoga se uvodi dodatna penalizacija za preostale (tj. opterećene) čvorove

$$\Phi_S = \{\mathbf{u}\}^T [\mathbf{K}_S]^T [\mathbf{L}] [\mathbf{K}_S] \{\mathbf{u}\}, \quad (3-17)$$

gdje je $[\mathbf{K}_S]$ matrica krutosti za Dirichlet-ove čvorove, $[\mathbf{L}]$ Laplace-Beltrami operator [30], i $\{\mathbf{u}\}$ stupac vektor koji sakuplja čvorne pomake povezane s diskretiziranim poljem pomaka \mathbf{u} .

Regularizirani DVC podrazumijeva minimizaciju triju funkcija cilja koje su definirane preko izraza (3-14), (3-16) i (3-17). Naime, ukupna funkcija cilja Φ_t sastoji se od linearne kombinacije DIC/DVC funkcije cilja Φ_c , funkcije cilja ravnotežne razlike neopterećenih Φ_m i opterećenih stupnjeva slobode Φ_S

$$\Phi_t(\{\mathbf{u}\}) = \frac{\omega_c}{\omega_t} \hat{\Phi}_c(\{\mathbf{u}\}) + \frac{\omega_m}{\omega_t} \hat{\Phi}_m(\{\mathbf{u}\}) + \frac{\omega_S}{\omega_t} \hat{\Phi}_S(\{\mathbf{u}\}), \quad (3-18)$$

gdje su:

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_c(\{\mathbf{u}\}) &= \frac{\Phi_c(\{\mathbf{u}\})}{\Phi_c(\{\mathbf{v}\})} = \frac{\Phi_c(\{\mathbf{u}\})}{(\{\mathbf{v}\}^T [\mathbf{M}] \{\mathbf{v}\})}, \\ \hat{\Phi}_m(\{\mathbf{u}\}) &= \frac{\Phi_m(\{\mathbf{u}\})}{\Phi_m(\{\mathbf{v}\})}, \\ \hat{\Phi}_S(\{\mathbf{u}\}) &= \frac{\Phi_S(\{\mathbf{u}\})}{\Phi_S(\{\mathbf{v}\})}. \end{aligned} \quad (3-19)$$

U jednadžbi (3-19), $\{\mathbf{v}\}$ su čvorni pomaci vezani uz probno polje pomaka koje odgovara smičnom valu s pomacima ortogonalnim valnom vektoru \mathbf{k} . Probno polje pomaka \mathbf{v} definirano je izrazom:

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \sin(2\pi \mathbf{k} \cdot \mathbf{x}), \quad (3-21)$$

a uvodi se zbog normalizacije funkcija ciljeva, budući da imaju različite mjerne jedinice.

Valja napomenuti da, dok je $\Phi_c(\{\mathbf{v}\})$ neovisan o valnoj duljini, ovisnost o valnoj duljini za $\Phi_m(\{\mathbf{v}\})$ i Φ_S je četvrtog reda. Nadalje, članovi $\Phi_m(\{\mathbf{v}\})$ i Φ_S djeluju kao nisko-prolazni filteri koji lokalno umanjuju iznenadne gradijente pomaka, a podešavaju se pomoću karakterističnih duljina ξ . Osim toga, budući da normalizacija dolazi iz globalne energije, a ne iz maksimalne gustoće, valni vektor ne igra nikakvu ulogu kada je tekstura slike dobro uzorkovana.

Karakteristične duljine ξ uvode se kao različiti parametri za svaki od regularizacijskih izraza, kako bi se osigurali odgovarajući težinski faktori predloženi u jednadžbi (3-19). Težinski faktori

za svaku od funkcija cilja definirani su izrazima:

$$\begin{aligned}\omega_c &= 1, \\ \omega_m &= (\xi_m |\mathbf{k}|)^4, \\ \omega_s &= (\xi_s |\mathbf{k}|)^4,\end{aligned}\tag{3-22}$$

dok pritom vrijedi:

$$\omega_t = \omega_c + \omega_m + \omega_s.\tag{3-23}$$

Pritom ω_c predstavlja težinski faktor korelacijskog funkcionala, ω_m težinski faktor za unutarnje stupnjeve slobode, ω_s težinski faktor opterećene površine (tj. opterećene stupnjeve slobode), dok ω_t predstavlja ukupni težinski faktor. Što je veća duljina regularizacije ξ , stavlja se veća težina na odgovarajuću funkciju. Ove se težine mogu intuitivno prilagoditi zahvaljujući postupku normalizacije. Duljine regularizacije ξ imaju istu mjernu jedinicu kao i karakteristična duljina povećanja probnog polja pomaka $\mathbf{v}(\mathbf{x})$, koja se obično izražava u pikselima ili vokselima. Kada se mreža konačnih elemenata definira u istim jedinicama (tj. vokselima), za svaku regularizacijskoj duljinu ξ manju od karakteristične duljine elementa, pripadajuća funkcija cilja je prirodno *deaktivirana* [2]. Obrnuto, regularizacija će se odvijati za svaki ξ veći od karakteristične duljine elementa ℓ . Ovaj se učinak može promatrati kao filter veličine ℓ koji lokalno smanjuje visoke prostorne frekvencije.

Primjenom regulariziranog DVC pristupa mogu se odrediti pouzdaniji rezultati prilikom ispitivanja materijala s niskim kontrastom između konstituenata budući da se mjerenja mogu provesti sa zadovoljavajućom standardnom mjernom nesigurnosti pomaka i deformacija. Nadalje, primjenom mehaničke regularizacije moguće je koristiti finiju diskretizaciju mreže konačnih elemenata, što rezultira boljim opisivanjem lokalizacije deformacija i geometrije ispitnog uzorka. Potenciranjem polja pomaka da zadovolji uvjet linearne elastičnosti, tj. korištenjem velikih regularizacijskih duljina, naglašava se fenomene mehaničkog oštećenja, što je osobito interesantno kod ispitivanja vlaknima ojačanih polimera.

3.4. Mjerna nesigurnost DVC metode

Kao i kod provođenja bilo koje druge mjerne metode, kod primjene metode korelacije digitalnih volumena izuzetno je bitan korak utvrđivanje standardne mjerne nesigurnosti. Prema [22], mjerna se nesigurnost definira kao parametar pridružen rezultatu mjerenja kojim se opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini. Osim kvantificiranja mjerne nesigurnosti, za optimalnu iskoristivost DVC metode potrebno je i razumijevanje faktora koji utječu na njen iznos, a time i na pouzdanost izmjerenih podataka. Postoji više pristupa utvrđivanja mjerne nesigurnosti kod metoda mjerenja cijelog polja pomaka, a među

njima i DVC metode.

Prvi pristup najčešće koristi sken neopterećenog stanja na koji se dodaju umjetni pomaci kako bi se generirao deformirani volumen. Na referentni volumen najčešće se dodaje jednoliki pomak od 0,5 vokselu u svakom smjeru, čime se kreira kritična situacija u kojoj je potrebno provesti interpolaciju kako bi se odredila vrijednost skale sive boje na necijelobrojnim pozicijama [16, 114]. Referentni volumen i umjetnim pomacima kreirani deformirani volumen potom su podvrgnuti postupku korelacije. Izmjereni pomaci zatim se oduzimaju od umjetno propisane translacije pomaka (poznate vrijednosti). Prosječna pogreška odgovara prosjeku razlike između izmjerenih i propisanih pomaka, dok standardna nesigurnost odgovara standardnoj devijaciji razlike između izmjerenih i propisanih pomaka. Osim toga, za dodatno utvrđivanje mjerne nesigurnosti povezane s interpolacijom skale sive boje može se pristupiti umjetnim propisivanjem polja pomaka koji će oponašati određeni lokalizacijski fenomen [115]. Drugi pristup određivanju mjerne nesigurnosti također se temelji na korištenju jednog registriranog 3D skena. Ovaj protokol uključuje dodavanje slučajnog šuma na referentni volumen, čime je definiran novi (tj. deformirani) volumen [116]. Korelacijski postupak potom se provodi između referentnog i deformiranog (tj. šumom obogaćenog) volumena s ciljem utvrđivanja osjetljivosti DVC algoritma na šum. Ovaj pristup analize mjerne nesigurnosti favoriziran je u usporedbi sa standardnom umjetnom translacijom krutog tijela jer uobičajeno podcjenjuje standardnu rezoluciju pomaka povezanu s rekonstruiranim volumenom budući da ne uzima u obzir šum [111, 117].

Treći pristup određivanju mjerne nesigurnosti DVC metode podrazumijeva provedbu DVC analize na dva uzastopno zabilježena skena, ne mijenjajući pritom uvjete opterećenja. Najčešće se skeniranje provodi u neopterećenom stanju. Kao posljedica nesavršenosti prilikom procesa skeniranja, pojavljuju se pritom šumovi, artefakti i druge slučajne greške, imajući za posljedicu da rekonstruirani volumeni, unatoč nepromijenjenim uvjetima opterećenja, budu različiti za svako novo skeniranje. Ovo su razlozi zbog kojih DVC algoritmi registriraju lažne pomake koji nisu posljedica narinutog opterećenja i koji zapravo generiraju mjernu nesigurnost izmjerenih polja pomaka te posljedično izračunatih polja deformacija. Dodatno se između dva skena namjerno mogu dodati pomaci krutog tijela. Ovaj se pristup smatra kompleksnijim, pošto rekonstrukcijski artefakti (npr. prstenovi) koji se mogu pojaviti prilikom skeniranja ne prate pomake i mogu ozbiljno utjecati na izmjerene podatke [118]. Glavna prednost pristupa koji uključuje DVC analizu između dva uzastopno registrirana skena, neovisno o tome je li primijenjen pomak krutog tijela ili ne, jest u činjenici da se oba izvora greške (akvizicijski šum

i interpolacijski problem korelacijskog algoritma kad su primijenjeni mali pomaci) mogu ispitati istovremeno. U drugom i trećem pristupu, bez namjerno propisanog pomaka, iznos standardne mjerne nesigurnosti pomaka odgovara standardnoj devijaciji izmjerenih pomaka.

Osim korištenja dvaju uzastopnih skenova, određivanju mjerne nesigurnosti DVC metode moguće je pristupiti i analizirajući veći broj skenova, kao što je to slučaj kod DIC metode [119, 120]. U istraživanju opisanom u radu [121], ispitane su različite strategije korištenja većeg broja uzastopno zabilježenih skenova za određivanje mjerne nesigurnosti. Pokazano je kako srednje vrijednosti ovako dobivenih mjernih nesigurnosti ne odstupaju značajno od slučaja kada se koriste samo dva uzastopna skena, ali se postiže značajna vremenska ušteda korištenjem samo dva skena, budući da vrijeme akvizicije visokokvalitetne volumetrijske slike može trajati od 20 minuta do nekoliko sati.

3.4.1. Utjecaj prostorne rezolucije DVC metode na mjernu nesigurnost

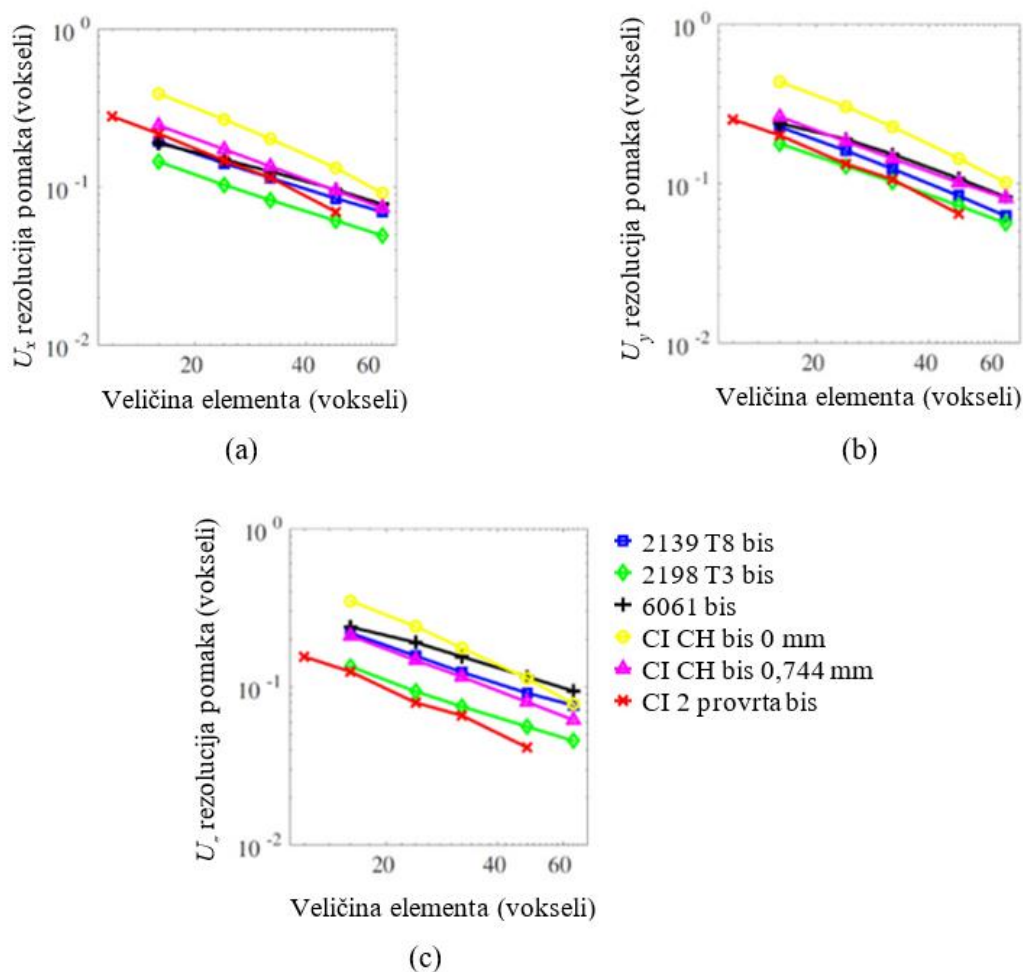
U kontekstu mjerne nesigurnosti DVC metode, bitno je također promotriti na koji način veličina diskretizacije slike (tj. prostorna rezolucija DVC metode) utječe na izmjerena polja pomaka i izračunata polja deformacija. Finijom diskretizacijom, odnosno korištenjem manjih elemenata, postići će se veća prostorna rezolucija korištenog DVC algoritma, ali će se istovremeno povećati standardna mjerna nesigurnost. Suprotno tome, diskretizacijom promatranog volumena interesa na veće elemente, korišteni DVC algoritam imat će manju prostornu rezoluciju, ali će mjerna nesigurnost biti niža (vidi sliku 3-5). Veći elementi/podvolumeni omogućuju točnije mjerenje pomaka pošto je veći broj voksela uključen u svaki element (tj. manji je utjecaj akvizicijskog šuma). Međutim, takvi elementi nisu u stanju registrirati sva složena (tj. nehomogena) polja pomaka, što ih čini slabije primjenjivima kod opisivanja diskontinuiteta i lokalizacijskih fenomena (npr. mikropukotina u unutrašnjosti vlaknima ojačanih kompozita). S druge strane, manji elementi pružaju veću fleksibilnost u praćenju velikih gradijenata pomaka, ali će njihovom primjenom doći do povećanja mjerne nesigurnosti [16]. Stoga je potrebno pronaći kompromis između veličine diskretizacije (tj. prostorne rezolucije) i pripadajuće mjerne nesigurnosti [26]. Kod provedbe mjerenja cijelog polja pomaka cilj je koristiti što finiju mrežu konačnih elemenata (tj. male veličine podvolumena) kako bi se mogli opisati lokalizacijski fenomeni, ali je istovremeno važno zadržati mjeru nesigurnosti unutar prihvatljivih granica. Premalim bi se elementima mjerna nesigurnost pomaka povećala do razine pri kojoj bi svako mjerenje postalo beskorisno, budući da DVC matrica [**M**] iz izraza (3-9) više ne bi bila invertibilna [116]. Prihvatljiva vrijednost mjerne nesigurnosti DVC metode, kada se ista koristi u mehanici čvrstih tijela, za izmjerena polja pomaka iznosi 10^{-1} voksela ili

niže [4]. Pri ovim vrijednostima mjerne nesigurnosti izmjerenih polja pomaka moguće je pouzdano izračunati polja deformacija na površini i unutar opterećenog uzorka.

Temeljita analiza utjecaja veličine diskretizacije na iznos mjerne nesigurnosti DVC metode provedena je u istraživanju [26], gdje su promatrani skenirani laminografski uzorci izrađeni od različitih tipova aluminijskih legura i čeličnog lijeva. Mjerna je nesigurnost pritom određivana računanjem standardne devijacije čvornih pomaka nad volumenima dobivenim iz dvaju uzastopno registriranih skenova, bez pomaka krutog tijela. Na temelju provedenog istraživanja, ustanovljen je u svim slučajevima rastući trend iznosa mjerne nesigurnosti kada se koristi finija diskretizacija (manji elementi/podvolumeni).

Izmjerene standardne rezolucije pomaka različitih materijala određene su za tri osi (tj. x , y i z) promatrane zone interesa i prikazane su na slici 3-7, pri čemu je potvrđen utjecaj mikrostrukture ispitivanog materijala na iznos mjerne nesigurnosti. Usporedivši rezultate koji se odnose na ispitivane aluminijske legure, uočava se kako legura *2198 T3* ima najpovoljniju mikrostrukturu za provođenje DVC metode, pošto u sve tri osi bilježi manju rezoluciju pomaka, nego što je to slučaj kod dvije preostale ispitivane aluminijske legure (tj. *2139 T8* i *6061*). Nadalje, sve tri ispitivane aluminijske legure bilježe manju rezoluciju pomaka, odnosno niže vrijednosti standardnih mjernih nesigurnosti pomaka, u odnosu na uzorke izrađene od čeličnog lijeva (slučajevi *CI CH* i *CI 2 provrta* na slici 3-8). Navedeni rezultati posebno su interesantni u kontekstu ovog doktorskog rada, pošto ukazuju na važnost utvrđivanja utjecaja mikrostrukture ispitivanog materijala na iznos mjerne nesigurnosti DVC metode. Kod ispitivanja vlaknima ojačanih polimera, koji su predmet ovog doktorskog rada, može se očekivati još izazovnija situacija, pošto se radi o izrazito heterogenom materijalu kod kojeg je rasporedom slaganja vlakana unutar matrice, kao i odabirom volumnih udjela konstituenata, moguće ostvariti širok spektar mehaničkih svojstava, što rezultira izuzetnom raznolikošću mikrostrukture FRP materijala.

Varijacije u mjernim nesigurnostima povezane s mikrostrukturom materijala, potvrđene kod aluminijskih uzorka i uzoraka od čeličnog lijeva [26], ukazuju stoga, na nužnost provedbe sličnih ispitivanja kod vlaknima ojačanih polimera.

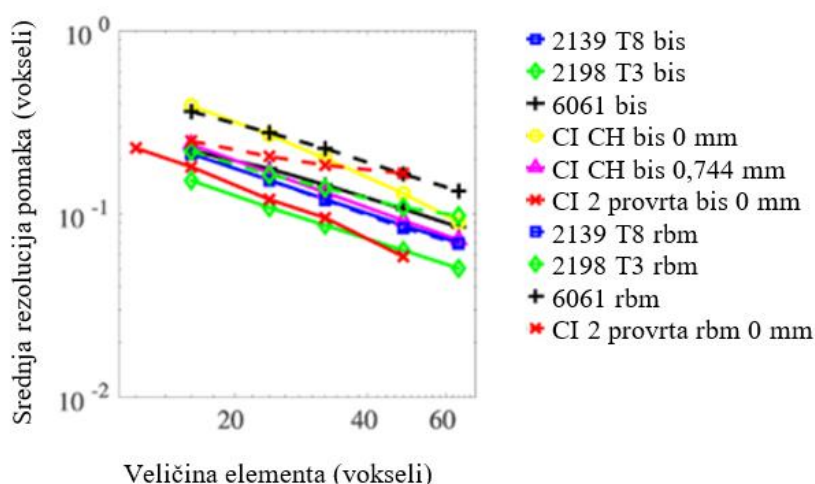


Slika 3-7 Standardna rezolucija izmjerenih pomaka u (a) x -smjeru, (b) y - smjeru i (c) z -smjeru kao funkcija veličine elemenata/podvolumena za ispitne uzorke izrađene od različitih vrsta aluminijskih legura i čeličnog lijeva [26]

Grafovi prikazani na slici 3-7 također ukazuju na gotovo identične rezultate izmjerenih rezolucija pomaka u x , y i z -smjeru za pojedine uzorke. Takvi rezultati ne iznenađuju, pošto se ovdje radilo o homogenim metalnim uzorcima koji su karakterizirani jednolikom strukturom i sastavom unutar cijelog volumena. Zbog njihove izrazite heterogenosti u pogledu postignute mikrostrukture, kod ispitivanja vlaknima ojačanih polimera, po ovom se pitanju također očekuje znatno izazovnija situacija, odnosno očekuju se značajne razlike u mjernim nesigurnostima izmjerenih pomaka u različitim smjerovima.

U provedenom istraživanju [26] dodatno je pokazano kako se propisivanjem pomaka krutog tijela između dva uzastopno zabilježena skena zadržava trend porasta mjerne nesigurnosti pri korištenju finije diskretizacije, ali se istovremeno povećava sami iznos mjerne nesigurnosti. Povišeni iznos mjerne nesigurnosti povezan je u tom slučaju s rekonstrukcijskim artefaktima čija pozicija nije pratila aplicirani pomak između dva skena. Na slici 3-8 povišene vrijednosti srednje standardne rezolucije pomaka i deformacija za slučaj pomaka krutog tijela (*rbm* slučaj),

u odnosu na slučaj bez pomaka krutog tijela (*bis* slučaj), prikazane su isprekidanim linijama.



Slika 3-8 Usporedba srednjih standardnih rezolucija pomaka za ispitne uzorke od aluminijskih legura i čeličnog lijeva. Rezultati proizašli iz testiranja bez pomaka krutog tijela (*bis* slučajevi) prikazani su punim linijama, a rezultati dobiveni propisivanjem pomaka krutog tijela (*rbm* slučajevi) prikazani su isprekidanim linijama [26]

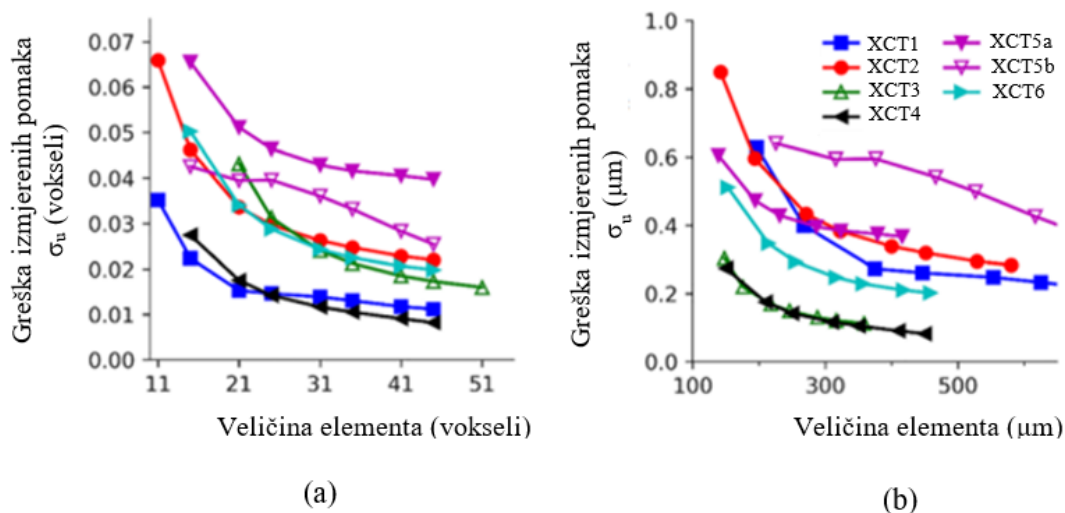
Efekt porasta mjerne nesigurnosti DVC metode pri korištenju finije diskretizacije također je utvrđen u slučaju analiziranja uzoraka izrađenih od nodularnog lijeva [111] i feritnog lijeva [116] snimanih primjenom sinkrotronske tomografije, kao i u slučaju ispitivanja laboratorijskom tomografijom snimanih pjenastih uzoraka [122] ili kostiju [123, 124].

Uzevši u obzir prihvatljivu vrijednost mjerne nesigurnosti DVC metode korištene u mehanici čvrstih tijela, koja za izmjerena polja pomaka iznosi minimalno 10^{-1} vokseli [4], vrijedi još jednom promotriti rezultate prikazane na slici 3-7 i slici 3-8. Može se uočiti kako se pojedine krivulje u cijelosti nalaze iznad definirane granice od 10^{-1} vokseli, iz čega se zaključuje kako ovakva diskretizacija neće u njihovom slučaju rezultirati prihvatljivim rezultatima, pošto je mjerna nesigurnost provedene metode iznad dopuštene vrijednosti. Ovo je primjerice slučaj s aluminijskom legurom *6061* kada se aplicira pomak krutog tijela (crna isprekidana krivulja na slici 3-8) ili s čeličnim lijevom u *x* i *y*-smjeru (žute krivulje na slici 3-7(a) i slici 3-7(b)). Kao što je prethodno navedeno, mjerna nesigurnost DVC metode mogla bi se u ovom slučaju dodatno sniziti, odnosno dovesti do prihvatljivih vrijednosti, primjenom mehaničke regularizacije, koja pod pretpostavkom lokalne elastičnosti uzima u obzir polja pomaka uzrokovana mehaničkim signalom. Kako bi se smanjila mjerna nesigurnost kod ispitivanja vlaknima ojačanih polimera, unutar ovog doktorskog rada također će biti primijenjena mehanička regularizacija.

3.4.2. Utjecaj ostalih faktora na mjernu nesigurnost DVC metode

U prethodnom poglavlju opisan je utjecaj diskretizacije promatranog volumena na iznos mjerne nesigurnosti DVC metode u kombinaciji s laboratorijskom tomografijom. Osim direktnog utjecaja same metode mjerenja i interpolacije pomaka, na standardnu mjernu nesigurnost utječe čitav niz dodatnih faktora. Ovo se prvenstveno odnosi na problematiku skeniranja ispitnog objekta u svrhu dobivanja volumetrijskih slika dovoljno kvalitetnih za daljnji proces korelacije. Tako će, na primjer, na iznos mjerne nesigurnosti utjecati akvizicijski parametri poput broja snimljenih projekcija tijekom skeniranja promatranog objekta, prosječni broj projekcija zabilježenih za definiranje jednog 2D radiografa, vrijeme izloženosti zračenju, smanjenje prostorne rezolucije projekcija (eng. *Binning*) i rekonstrukcijski algoritam. Pregledom dostupne znanstvene i stručne literature, zaključeno je kako nisu provedene detaljne studije koje bi temeljito evaluirale utjecaj svih relevantnih faktora na vrijednosti standardne rezolucije pomaka DVC metode. Kao rezultat toga, nije identificiran, niti postoji jedinstveni set smjernica koji bi omogućio odabir optimalne opreme ili parametara skeniranja u svrhu postizanja minimalnih mjernih nesigurnosti. Stoga, istraživački timovi često biraju parametre isključivo na temelju prethodnog iskustva ili intuicije.

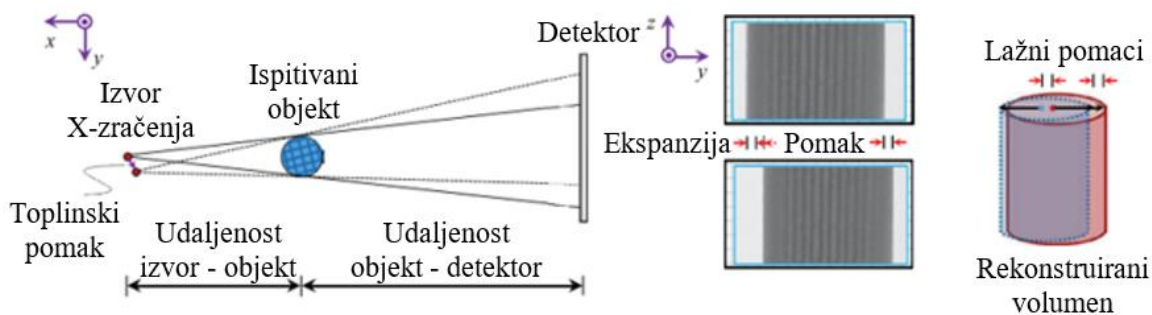
Kako bi se utvrdilo kolike se razlike u točnosti DVC metode mogu očekivati uslijed različito odabranih parametara skeniranja, provedeno je istraživanje koje je uključivalo skeniranje identičnih ispitnih uzoraka sintetičke pjene od strane šest međusobno neovisnih istraživačkih laboratorija [122]. Pritom je svakom laboratoriju dozvoljena sloboda odabira parametara skeniranja, budući da su korišteni različiti laboratorijski CT skeneri. Analizirajući mjernu nesigurnost DVC metode na dva uzastopno registrirana CT skena, bez uvođenja pomaka krutog tijela, otkrivena je značajna fluktuacija u razinama mjerne nesigurnosti, ovisno o istraživačkom timu. Rezultati navedenog istraživanja prikazani su na slici 3-9, gdje oznake *XCT1* – *XCT6* predstavljaju različite istraživačke laboratorije/timove. Iako se primjećuje trend porasta mjerne nesigurnosti s finijom diskretizacijom, pri čemu nijedna od izmjerenih vrijednosti nije premašila zabilježeni limit od 10^{-1} voksel, ostvarene razlike upućuju na potrebu provedbe daljnjih istraživanja. Cilj takvog istraživanja bio bi utvrđivanje utjecaja svakog pojedinog elementa procesa skeniranja na mjerenu nesigurnost. Nakon detaljnije analize dobivenih rezultata, zaključeno je kako su faktori poput broja projekcija, vremena zračenja i snage izvora imali manji utjecaj na mjernu nesigurnost, dok je veće odstupanje primijećeno zbog specifičnih karakteristika pojedinih CT sustava.



Slika 3-9 Usporedba mjerne nesigurnosti DVC metode kod različitih istraživačkih timova izražena u (a) vokselima i (b) mikrometrima [122]

Pri ispitivanju materijala metodom korelacije digitalnih volumena, važno je razmotriti kako degradacija mikrostrukture uzorka kod velikih deformacija utječe na dobivene rezultate. Uslijed narinutog opterećenja može doći do postupne degradacije prirodne teksture u unutrašnjosti ispitivanog objekta. Degradacija mehaničkih svojstava uzrokovana oštećenjem mikrostrukture materijala dovodi do narušavanja principa očuvanja intenziteta sive nijanse boje, što posljedično smanjuje kvalitetu DVC mjerenja. Provedbom *in-situ* tlačnih mehaničkih ispitivanja na sintetičkim pjenama [28], utvrđena je kritična granica od 30% uništenih praznih staklenih mikrosfera unutar ispitivanog materijala. Ako se ta granica premaši, doći će do izraženog porasta mjerne nesigurnosti pomaka, što će značajno narušiti pouzdanost daljnjih mjerenja primjenom DVC metode.

Toplina generirana unutar rendgenske cijevi, uslijed generiranja X-zračenja, može rezultirati blagim pomicanjem žarišne točke. Ovo pomicanje može uzrokovati registraciju lažnih pomaka i neželjenih povećanja u projekcijskim slikama. Shematski prikaz ovog fenomena prikazan je na slici 3-10. DVC analizom volumetrijskih slika, rekonstruiranih iz ovako kontaminiranih 2D projekcija, doći će do povišenih vrijednosti standardne mjerne nesigurnosti pomaka.



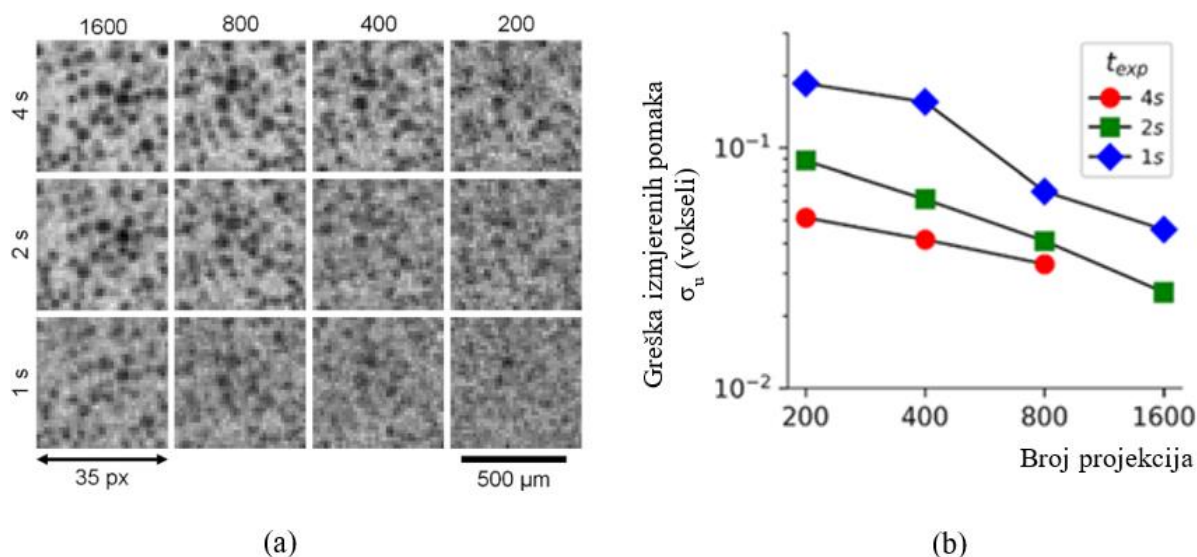
Slika 3-10 Utjecaj topline generirane unutar rendgenske cijevi na pojavu lažnih pomaka u rekonstruiranim volumenima [125]

Iz provedenih istraživanja [25, 125], kvantificiran je utjecaj topline koja se generira unutar rendgenske cijevi na standardnu mjeru nesigurnost DVC metode, na način da su zabilježena dva uzastopna skena. U početnoj fazi nakon uključivanja CT uređaja [125], mogu se pojaviti pogreške u izračunatim poljima deformacija, koje dosežu do 400 mikrodeformacija ($\mu\epsilon$) ili čak 0,5% deformacija [25], što je direktna posljedica toplinskih pomaka izvora rendgenskog zračenja. Na temelju provedenih analiza, predložena su tri pristupa za kompenzaciju topline generiranih deformacija. Prvi pristup uključuje potpuno zagrijavanje rendgenskog skenera prije prikupljanja 2D slika. Ova tehnika zahtijeva identifikaciju vremena rada rendgenske cijevi potrebnog za postizanje toplinske ravnoteže. Nadalje, za ispravak pogreške u izmjerenim deformacijama, može se koristiti prethodno definirana krivulja umjetne deformacije prema vremenu potrebnom da se izvor zagrije na konstantnu temperaturu. Primjenom ovog pristupa, pogreške u izmjerenim deformacijama uzrokovane samozagrijavanjem rendgenske cijevi moraju se unaprijed eksperimentalno odrediti kao funkcije vremena rada, korištenjem ponovljenih skenova s istim parametrima skeniranja. Posljednji pristup temelji se na korištenju nepomičnog referentnog objekta koji se postavlja blizu ispitnog uzorka ili se pričvršćuje na njega, ali na način koji osigurava da referentni objekt nije pod utjecajem mehaničkih i toplinskih deformacija [126]. Na temelju mjerenja, cilj je detektirati umjetna polja pomaka nastala kao posljedica samozagrijavanja rendgenske cijevi i zatim koristiti linearnu aproksimaciju kako bi se dobile matematičke funkcije kojima će se provesti korekcija.

Kvaliteta zabilježenih skenova također ima utjecaj na iznos mjerne nesigurnosti DVC metode. Iako kvaliteta zabilježenih projekcija ovisi o različitim parametrima skeniranja (tj. snaga izvora rendgenskog zračenja, udaljenost ispitnog objekta od izvora i detektora, mikrostruktura ispitivanog materijala itd.), u kontekstu primjene laboratorijske tomografije i DVC metode u svrhu mjerenja u području eksperimentalne mehanike, posebno je važan utjecaj broja projekcija i vremena izlaganja zračenju. Za vjernu rekonstrukciju promatranog volumena preporučuje se

da broj projekcija bude veći ili jednak umnošku broja $\pi/2$ i najveće dimenzije uzorka promatranog volumena interesa, izražene u vokselima [55]. Veći broj zabilježenih projekcija i dulje vrijeme izlaganja zračenju vodit će, naime, većoj kvaliteti rekonstruiranih volumena i posljedično nižim vrijednostima standardne rezolucije pomaka DVC metode. Povećanje broja projekcija za rekonstrukciju rezultira duljim procesom prikupljanja i obrade podataka, što može potencijalno uzrokovati toplinske dilatacije, kao što je već spomenuto. Zbog toga je važno razumjeti utjecaj broja projekcija i vremena izloženosti zračenju kako bi se postigao kompromis između kvalitete skenova i standardne mjerne nesigurnosti DVC metode. Eksperimentalnim je istraživanjima pokazano kako je odabir odgovarajućeg broja projekcija ključan za postizanje željene preciznosti i vremenske razlučivosti u mjerenjima DVC metodom. Konkretno, u istraživanju [32] se na primjeru DVC mjerenja ispitnog uzorka izrađenog od bakrene pjene određivao optimalan broj projekcija s obzirom na željenu točnost izmjerenih pomaka, odnosno s obzirom na ciljanu mjernu nesigurnost. Rezultati istraživanja pritom sugeriraju kako je za analizirani CT uređaj optimalno koristiti raspon od 36 do 60 projekcija za rekonstrukciju promatranog volumena, kako bi se ostvario kompromis između preciznosti mjerenja i vremenske razlučivosti. Nadalje, za postizanje veće točnosti potrebno je rekonstruirati volumen s više od 720 projekcija.

U radu [122] analiziran je utjecaj broja projekcija i vremena izloženosti zračenju na iznos mjerne nesigurnosti DVC metode. Skenovi korišteni u istraživanju registrirani su uzastopnim skeniranjem ispitnog uzorka u neopterećenom stanju. Za analizu parametara skeniranja korištena su četiri različita seta projekcija za rekonstrukciju volumena; odnosno $N_{proj.} = 1600, 800, 400$ i 200 projekcija. Osim toga, ispitana je mjerna nesigurnost kada su za predloženi broj projekcija korištena tri različita vremena ekspozicije, odnosno $t_{exp.} = 4, 2$ i 1 s. Na slici 3-11(a) prikazan je isti presjek skenova zabilježenih s predloženim parametrima. Može se zaključiti da smanjenjem broja projekcija i vremena ekspozicije (tj. smanjenjem vremena izloženosti zračenju) opada kvaliteta rekonstruiranih skenova. Standardna mjerna greška DVC metode evaluirana je između referentnog skena visoke kvalitete ($N_{proj.}=1600$ i $t_{exp.} = 4$) i skenova slabije kvalitete kod kojih je korišten manji broj projekcija i kraće ekspozicijsko vrijeme. Pregledom trendova standardne mjerne greške DVC metode utvrđeno je kako mjerna nesigurnost opada kako se povećava broj projekcija $N_{proj.}$ i vrijeme ekspozicije $t_{exp.}$ (vidi sliku 3-11(b)). Iz provedene analize osjetljivosti potvrđeno je kako su oba parametra ključna za proizvodnju visokokvalitetnih radiografa za DVC mjerenja.



Slika 3-11 Prikaz (a) utjecaja broja zabilježenih projekcija i vremena izloženosti zračenju na kvalitetu rekonstruiranih volumena i (b) kvantificirane greške izmjerenih pomaka u ovisnosti o broju projekcija i vremenu izloženosti zračenju [122]

Dosadašnja istraživanja o procjeni mjerne nesigurnosti DVC metode, posebno u vezi s brojem radiografa korištenih tijekom rekonstrukcije, ograničena su na analize osjetljivosti provedene isključivo na pjenastim materijalima, kako je dokumentirano u radovima [122, 32].

Dodatan faktor koji bi trebao imati utjecaj na iznos mjerne nesigurnosti DVC metode vezan je uz izvedbu uređaja za provedbu mehaničkih *in-situ* ispitivanja, čiji je opis dan u poglavlju 2.9.1. Cjevasta potpora u ispitnim *in-situ* uređajima, obično konstruirana za povezivanje gornje i donje čeljusti, predstavlja prepreku pri skeniranju. Ova prepreka može utjecati na apsorpciju X-zraka oko ispitnog objekta. Stoga će se u sklopu ovog doktorskog istraživanja analizirati utjecaj materijala cjevaste potpore na mjerenu nesigurnost, budući da je pregledom postojeće literature utvrđeno kako ovaj aspekt još nije istražen.

3.4.3. Mjerna nesigurnost DVC metode pri *in-situ* XCT ispitivanju FRP materijala

Određivanje mjerne nesigurnosti DVC metode korištene pri karakterizaciji vlaknima ojačanih polimera posebno je interesantno s aspekta unutarnje strukture ove klase materijala. Pošto se kod vlaknima ojačanih polimera ciljana svojstva postižu kombiniranjem udjela gradivnih konstituenata i/ili odabirom željene distribucije vlakana unutar polimerne matrice, zaključuje se kako postoji prilično širok raspon mogućnosti izvedbe vlaknima ojačanih polimera pri čemu će svaka izvedba imati jedinstvena mehanička svojstva. Štoviše, ovisno o predloženoj distribuciji vlakana unutar matrice (tj. arhitekturi vlakana), FRP materijal će pokazivati različita mehanička svojstva u različitim smjerovima. Budući da se DVC metoda oslanja na prirodnu mikrostrukturu ispitivanog materijala, posebno na njezinu heterogenost koja omogućava

konvergenciju procesa korelacije, može se pretpostaviti kako će vrsta korištenog FRP materijala utjecati na mjerenu nesigurnost DVC metode. Nadalje, mjerna nesigurnost razlikovat će se s obzirom na ortogonalne osi promatranog ispitnog uzorka. Tijekom određivanja mjerne nesigurnosti DVC metode kod analize ugljičnim vlaknima ojačanih polimera, pokazano je kako dolazi do veće mjerne nesigurnosti u zoni uzdužne distribucije vlakana. Do ovog fenomena dolazi kad se među promatranim skenovima uvede pomak krutog tijela u smjeru distribucije vlakana [127, 33].

Budući da određene arhitekture vlakana mogu rezultirati siromašnom mikrostrukturom FRP materijala za provedbu DVC mjerenja, u kompozitnu matricu namjenski se dodaju male količine submikronskih čestica. Ovaj pristup ima za cilj poboljšati prikladnost teksture materijala za provođenje DVC analize povećanjem kontrasta između susjednih vokseli [36], [44]. Povećavanjem heterogenosti materijala, submikronske čestice djeluju kao referentni markeri u rekonstruiranim volumenima. To omogućuje preciznije mjerenje primjenom DVC metode, što je princip sličan onome u DIC metodi, gdje se koristi umjetna tekstura na površini. Ako je distribucija submikronskih čestica izraženija u jednom smjeru, tada će mjerna nesigurnost biti manja u tom smjeru [128]. Ovaj pristup teži poboljšanju kvalitete DVC analize, što doprinosi većoj prostornoj rezoluciji mjerenja.

4. VLAKNIMA OJAČANI POLIMERI

4.1. Uvod

Vlaknima ojačani polimeri visokotehnološki su kompozitni materijali koji se sastoje od polimerne matrice ojačane vlaknima. Ovi su materijali dizajnirani s ciljem postizanja izuzetne čvrstoće i izdržljivosti. Vlakna igraju ključnu ulogu kao ojačavajući elementi, pružajući visoku čvrstoću i otpornost na opterećenja, često nadmašujući druge materijale u odnosu na svoju težinu. Polimerna matrica djeluje kao vezivno sredstvo koje okružuje i podupire vlakna. Nadalje, matrica pomaže u prenošenju opterećenja na vlakna i ravnomjernoj raspodjeli naprezanja po cijelom materijalu. Materijali matrice obično su žilavi i duktilni kako bi efikasno prenosili opterećenje na vlakna i sprječavali širenje pukotina kroz kompozit. Kombinacija vlakana i polimerne matrice rezultira materijalom koji posjeduje superiorna svojstva u odnosu na pojedinačne komponente. Prilagodбом udjela konstituenata, odabirom vlakana i načinom njihove distribucije te slaganjem slojeva unutar višeslojne konstrukcije, moguće je definirati materijal koji zadovoljava specifične zahtjeve različitih primjena. Vlaknima ojačani polimeri ističu se po visokoj čvrstoći, krutosti, kao i otpornosti na koroziju i umor. Zbog svojih izvanrednih karakteristika, nalaze široku primjenu u različitim industrijskim sektorima poput zrakoplovstva, brodogradnje, automobilske industrije, građevinarstva, elektrotehnike, vojne industrije i svemirske tehnologije.

4.2. Osnovne kategorije i karakteristike vlaknima ojačanih polimera

Matrice igraju ključnu ulogu u vlaknima ojačanim polimernim materijalima, pružajući konstrukcijsku potporu na način da omogućuju homogenu distribuciju opterećenja unutar kompozita. Njihova uloga je višestruka: osim što povezuju vlakna i pružaju podršku, matrice doprinose i apsorpciji energije pri udarcima te štite vlakna od vanjskih utjecaja poput vlage, kemikalija ili UV zračenja. Stoga je ključno razumjeti karakteristike i svojstva različitih vrsta polimernih matrica kako bi se postigla najbolja mehanička svojstva za određenu namjenu kompozitnog materijala.

Kada se analiziraju polimerne matrice kod vlaknima ojačanih polimernih kompozita, važno je razumjeti njihove specifične karakteristike i primjene. Jedan od ključnih kriterija za klasifikaciju polimernih matrica njihovo je ponašanje pri povišenim temperaturama. Ovaj faktor direktno utječe na primjenu i svojstva u različitim uvjetima, što ga čini bitnim prilikom odabira prikladne matrice za određenu namjenu.

U tom se kontekstu, polimerne matrice dijele na plastomerne, koje pod utjecajem topline pokazuju promjene u strukturi i svojstvima, te duromerne, kod kojih se značajne promjene u

svojstvima događaju tek približavanjem temperaturi staklišta. Duromerne se matrice, stoga, često odabiru za zahtjevnije primjene. Među najčešće korištenim duromernim matricama u vlaknima ojačanim polimerima su epoksidne smole, koje su posebno otporne na vlagu, a istovremeno pružaju izuzetna mehanička svojstva. Osim epoksidnih smola, druge vrste duromernih matrica jesu poliesterske smole, koje su ekonomičnija opcija s dobrim mehaničkim svojstvima i otpornošću na koroziju, te vinilesterske smole, koje se ističu izvrsnom kemijskom otpornošću te visokom čvrstoćom i krutošću. Fenolne smole također se često koriste kao matrica u vlaknima ojačanim kompozitima, osobito u primjenama gdje su ključni zahtjevi visoka otpornost na visoke temperature i vatru [129].

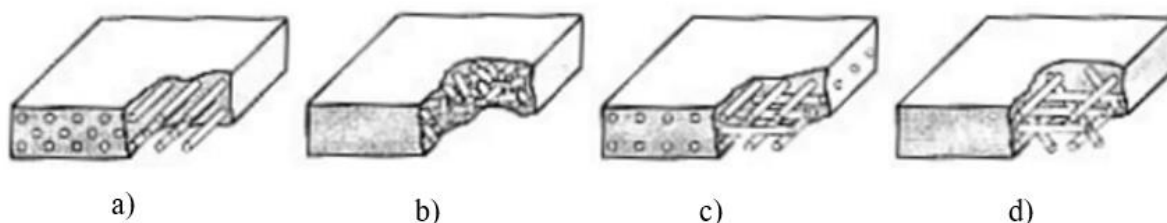
Raspored, tj. arhitektura, vlakana, ključni je element u izvedbi materijala koji sadrže vlakna, poput polimera ojačanih vlaknima. Usmjerenost vlakana igra ključnu ulogu u definiranju mehaničkih svojstava kompozitnih materijala, kao i u učinkovitosti i ponašanju u različitim uvjetima opterećenja. Pravilna usmjerenost vlakana ključna je za postizanje optimalnih svojstava vlaknima ojačanih polimernih materijala iz nekoliko razloga. Prvo, omogućuje postizanje veće čvrstoće i krutosti materijala u smjeru vlakana, što je važno za povećanje otpornosti na opterećenja u tom smjeru. Nadalje, pravilno usmjerenim vlaknima omogućuje se ravnomjerna raspodjela opterećenja unutar materijala, čime se sprječava koncentracija naprezanja na određenim točkama i smanjuje rizik od loma ili lokalizacije deformacija. Konačno, precizno usmjerenje vlakana omogućuje inženjerima prilagodbu materijala specifičnim zahtjevima primjene, kao što je postavljanje vlakana prema očekivanim opterećenjima kod konstrukcijskih komponenti u svrhu osiguranja optimalne čvrstoće i krutosti. Ovi čimbenici zajedno doprinose stvaranju materijala koji zadovoljava visoke standarde čvrstoće, dinamičke izdržljivosti i sigurnosti u različitim industrijskim primjenama.

Prema [129], četiri su različite vrste izvedbe vlaknima ojačanih polimera ovisno o rasporedu slaganja vlakana unutar matrice (vidi sliku 4-1):

- vlaknima ojačani polimeri s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima
- vlaknima ojačani polimeri sa slučajno usmjerenim diskontinuiranim vlaknima
- vlaknima ojačani polimeri s ortogonalno raspoređenim vlaknima
- vlaknima ojačani polimeri s višesmjerno usmjerenim vlaknima.

Ovisno o rasporedu vlakana, variraju svojstva ove grupe materijala. U slučaju kontinuiranih usmjerenih vlakana, svojstva kompozita mogu biti vrlo anizotropna, što znači da je čvrstoća visoka u smjeru vlakana, dok je okomito na njih značajno niža. S druge strane, kompoziti ojačani slučajno usmjerenim kratkim vlaknima imaju svojstva sličnija izotropnim materijalima

[129]. Ova svojstva uvjetuju razliku u primjeni, pa se materijali s anizotropnim svojstvima često koriste za izradu dijelova kod kojih je važna specifična usmjerenost čvrstoće, dok se izotropni materijali koriste kod onih dijelova kod kojih je potrebna ravnomjerna čvrstoća u svim smjerovima.



Slika 4-1 Različite izvedbe vlanknima ojačanih polimera prema rasporedu vlakana: (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, (b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, (c) ortogonalno raspoređena vlakna i (d) višesmjerno usmjerena vlakna [129]

Kao ojačalo kod vlanknima ojačanih polimera, najčešće se koriste staklena, ugljična i aramidna vlakna, a u primjeni se može naći i čitav niz sintetičkih (polietilenska vlakna, poliamidna vlakna, polipropilenska vlakna) ili prirodnih vlakana (npr. sisalna vlakna, kokosova vlakna, jutina vlakna, bambusova vlakna, vlakna iz biljke lana). Unutar ovog dijela rada ukratko će biti opisane samo tri najčešće korištene vrste vlakana.

Od svih vrsta vlanknastih ojačala korištenih kod polimernih kompozita ugljična vlakna posjeduju najveću krutost. Dodatno, ugljična vlakna imaju sposobnost zadržavanja svoje vlačne čvrstoće čak i pri visokim temperaturama. U odnosu na staklena i druga sintetička vlakana, ugljična vlakna pružaju dobru otpornost na lom [130]. Ugljična vlakna također pružaju visoku električnu i toplinsku provodljivost s relativno niskim koeficijentom toplinskog širenja [131]. Ova svojstva čine ugljična vlakna idealnima za primjene u zrakoplovnoj, elektroničkoj i automobilskoj industriji. Kao ojačalo u polimernim se matricama koriste ugljična vlakna promjera od 4 do 10 μm . Njihova izvedba može biti kontinuirana ili sjeckana, a uobičajeno se prevlače zaštitnim epoksidnim slojem koji poboljšava adheziju s polimernom matricom [129]. Aramidna vlakna pripadaju grupi aromatskih poliamida koji najčešću primjenu u kontekstu polimernih kompozita nalaze u slučajevima kada se zahtijeva mala masa, velika čvrstoća te otpornost na zamor i oštećenje. Neka od područja u kojima svoju primjenu nalaze kompoziti ojačani aramidnim vlanknima jesu vojna industrija (pancirke i zaštitna odijela) zrakoplovna industrija (aerodinamičke obloge s donje strane trupa zrakoplova), automobilska industrija (dijelovi karoserije i unutrašnjosti), građevinarstvo (ojačanja građevinskih konstrukcija), elektronika (izolacijske komponente), sport (štitnici, kacige i druga zaštitna oprema) itd.

Dvije su osnovne grupe armadinih vlakana korištenih kao ojačala u kompozitima: meta-aramidi

i para-aramidi [1]. Meta-aramidi vrlo su otporni na visoke temperature, kemijsku degradaciju i trošenje, te se obično proizvode pređenjem u kemijskoj otopini (eng. *Wet Spinning*), rezultirajući polukristalnim vlaknom s djelomično orijentiranim molekularnim lancem duž osi vlakna. Ova vlakna imaju čvrstoću usporedivu s najlonskim i poliesterskim vlaknima srednje čvrstoće, a jedinstvena su po svojoj sposobnosti da izdrže vlačna naprezanja pri izlaganju plamenu i temperaturama do 400 °C [132]. Najčešće korišteni meta-aramid je *Nomex*. S druge strane, vlakna izrađena od poliamida u skupini para-aramida imaju veću čvrstoću. Kemijska struktura para aramidnih vlakana sastoji se od potpuno proširenih lanaca tekućih kristala formiranih duž osi vlakna s visokim stupnjem kristalnosti, što povećava njihovu čvrstoću. Para-aramidna vlakna se najčešće koriste u polimernim kompozitima gdje je potrebna visoka vlačna čvrstoća [132], a najpoznatiji para aramid je *Kevlar*.

Gotovo 90 % vlakana koja se koriste kao ojačala u polimernim kompozitima otpada na staklena vlakna [133]. Zbog relativno niske cijene, staklena su vlakna daleko zastupljenija u inženjerskim primjenama, nego primjerice ugljična vlakna, koja su veće čvrstoće. Kombinirajući vrste i udjele konstituenata mogu, se kod staklenih vlakana postići različite konfiguracije, pri čemu će svaki tip vlakana imati jedinstvena svojstva i kao takav će odgovarati specifičnoj primjeni. Osnovna fizikalna i mehanička svojstva različitih tipova staklenih vlakana dana su u tablici 4-1.

Tablica 4-1 Fizikalna i mehanička svojstva različitih tipova staklenih vlakana [133]

Tip vlakna	Gustoća (g/cm ³)	Vlačna čvrstoća (GPa)	Youngov modul (GPa)	Prekidno produljenje (%)	Koeficijent toplinskog širenja (10 ⁻⁷ /°C)	Poissonov koeficijent	Indeks loma
A tip	2,44	3,310	68,9	4,8	73	-	1,538
C tip	2,52	3,310	68,9	4,8	63	-	1,533
D tip	2,11–2,14	2,415	51,7	4,6	25	-	4,465
E tip	2,58	3,445	72,3	4,8	54	0,2	1,558
R tip	2,54	4,135	85,5	4,8	33	-	1,546
S Tip	2,46	4,890	86,9	5,7	16	0,22	1,521

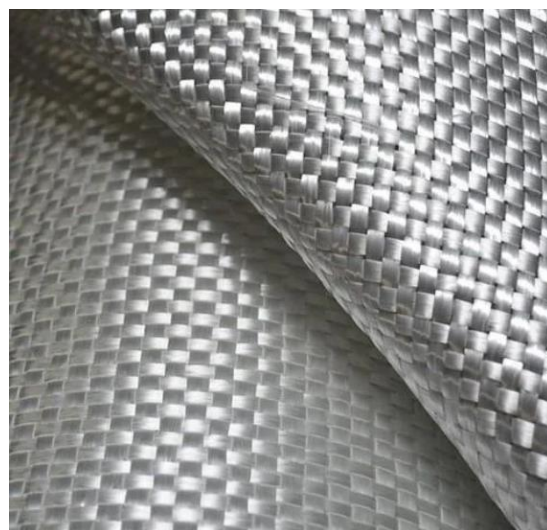
Sve vrste staklenih vlakana, nakon što prođu proces proizvodnje, pripremaju se u obliku poluproizvoda, pri čemu se individualna vlakna grupiraju u snopove vlakana. Poluproizvodi od staklenih vlakana pružaju pritom različite nivoe svojstava i funkcionalnosti, što je i razlog njihove široke primjene u različitim industrijama i aplikacijama.

U smislu arhitekture vlakana najčešće izvedbe poluproizvoda od staklenih vlakana jesu:

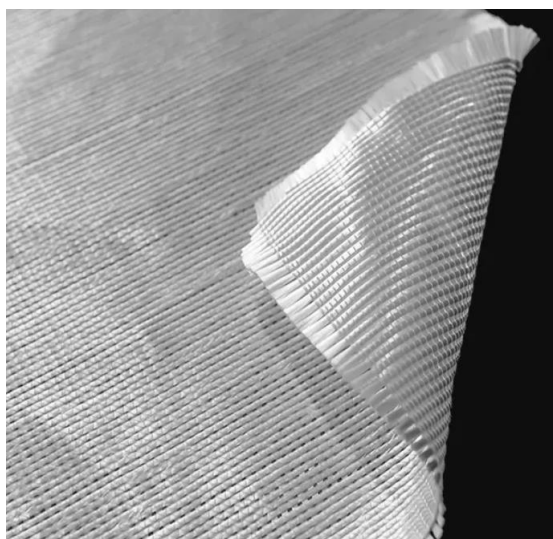
- **Matovi** (eng. *Chopped Strand Mats – CSM*) koji se sastoje od nasumično raspoređenih kratkih vlakana spojenih pomoću vezivnog sredstva. Najčešće se koriste u procesu ručnog laminiranja i u proizvodnji kompozita kod kojih se žele postići dobra izotropna svojstva. Primjer ovog tipa poluproizvoda dan je na slici 4-2(a).
- **Tkanine** (eng. *Woven Fabrics*) koje se prave tkanjem staklenih vlakana u različite obrasce kao što su keper, atlas ili platno. Ove tkanine pružaju visoku čvrstoću i krutost u pravcu vlakana i koriste se u aplikacijama kod kojih su potrebne visoke mehaničke performanse, poput konstrukcijskih komponenti u brodogradnji, aeronautici i sportskim rekvizitima. Primjer ovog tipa poluproizvoda dan je na slici 4-2(b).
- **Preprezi** (eng. *Pre-impregnated Fibers*) koji su unaprijed impregnirani smolom i ojačalom. Koriste se u visoko specijaliziranim aplikacijama kod kojih su potrebne precizne mehaničke karakteristike i visok nivo kontrole nad procesom proizvodnje. Primjer ovog tipa poluproizvoda dan je na slici 4-2(d).
- **Roving** (eng. *Continuous Roving*) koji podrazumijeva paralelno poredana duga vlakana kakva se koriste za pravljenje tkanina, prediva ili direktno u procesima kao što su pultruzija i filamentno namotavanje. Roving je ključan za proizvodnju jakih i lakih kompozitnih materijala. Primjer ovog tipa poluproizvoda dan je na slici 4-2(e).
- **Višesmjernе tkanine** (eng. *Multiaxial Fabrics*) koje se proizvode tako što se slojevi vlakana polažu u više pravaca (obično 0° , 90° , $+45^\circ$, -45°). Ova vrsta tkanine omogućava kontroliranje karakteristika čvrstoće i krutosti u više pravaca, što je korisno kod materijala koji moraju podnositi složena opterećenja. Primjer ovog tipa poluproizvoda dan je na slici 4-2(c).
- **Pređe i niti** (eng. *Yarns and Threads*) koji su osnovni elementi za proizvodnju tkanina i drugih tekstilnih proizvoda te kao takvi mogu biti korišteni i za direktnu proizvodnju određenih kompozitnih struktura. Primjer ovog tipa poluproizvoda dan je na slici 4-2(f).



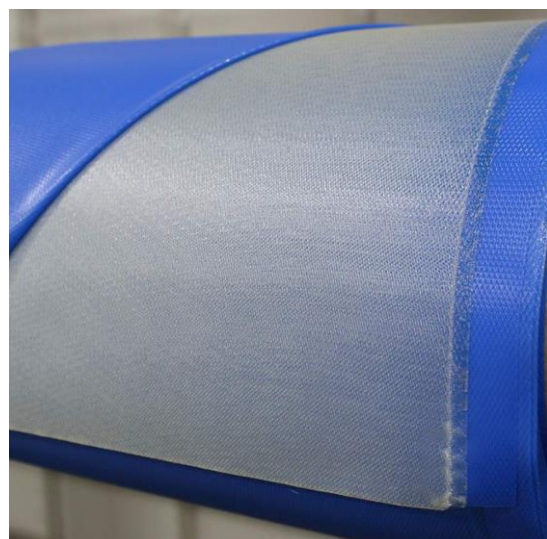
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Slika 4-2 Najčešće izvedbe poluproizvoda od staklenih vlakana (a) matovi, (b) tkanine, (c) višesmjerne tkanine (d) preprezi, (e) roving, i (f) prede i niti

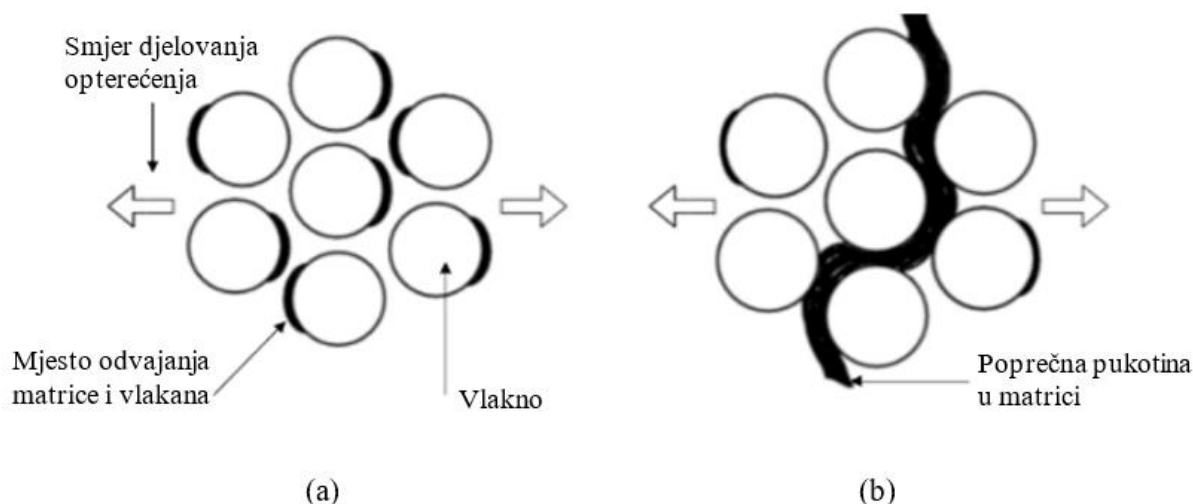
4.3. Mehanizmi oštećenja u vlaknima ojačanim polimerima

Zbog svojih povoljnih mehaničkih svojstava, komponente izrađene od vlaknima ojačanih polimera nalaze široku primjenu u raznim područjima. Tijekom životnog vijeka, ove komponente izložene su raznim vrstama opterećenja, uključujući mehanička opterećenja, zamorna djelovanja, te izloženost vlazi i kemikalijama. Dugotrajna izloženost nekom od navedenih djelovanja ili njihovoj kombinaciji može dovesti do različitih vrsta oštećenja unutar inženjerskih konstrukcija i komponenti. Kod vlaknima ojačanih polimera oštećenja su posebno zanimljiva jer se obično iniciraju unutar komponente, čineći ih nevidljivima na površini. Daljnjom izloženošću opterećenju, oštećenje će se širiti kroz materijal, a kada postane vidljivo na površini, strukturni integritet komponente već će biti ozbiljno narušen. Razumijevanje mikrostrukture i mehanizama nastanka oštećenja od velike je važnosti jer omogućava inženjerima i znanstvenicima bolje predviđanje ili čak sprječavanje njihovog nastanka. Rana identifikacija oštećenja omogućuje poduzimanje odgovarajućih mjera kako bi se spriječila daljnja degradacija te smanjili potencijalni rizici.

Najčešći mehanizmi oštećenja koji se javljaju kod vlaknima ojačanih polimera i općenito kod vlaknima ojačanih kompozita su pucanje matrice, odvajanje matrice i vlakna, delaminacija i lom vlakna [3].

4.3.1. Pucanje matrice i odvajanje matrice i vlakna

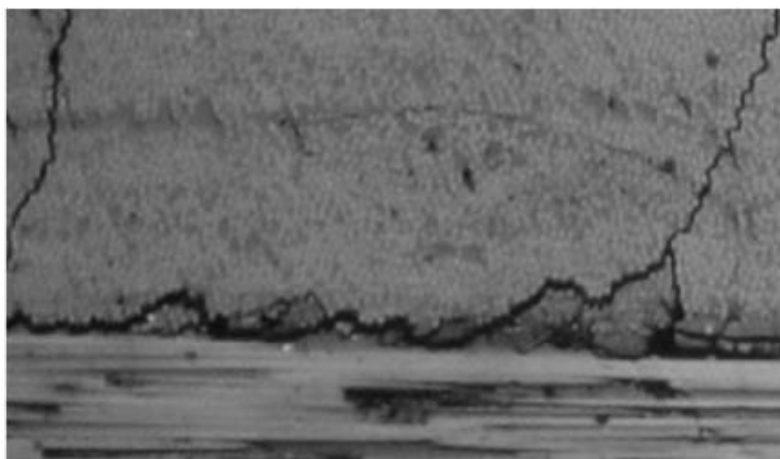
Matrične pukotine najčešće prethode pojavi odvajanja matrice i vlakana, a do ovakvog tipa oštećenja uglavnom dolazi kada je narinuto vanjsko opterećenje okomito na orijentaciju vlakana [134]. Početak nastanka pukotine prikazan je na slici 4-3(a). Pošto su svojstva kompozita slabija u smjeru okomitom na orijentaciju vlakana, doći će do odvajanja matrice i vlakana koje će se širiti uzduž vlakna. U slučaju odvajanja vlakana i matrice na više mjesta može doći do spajanja mikropukotina i nastanka veće poprečne pukotine, kao što je prikazano na slici 4-3(b).



Slika 4-3 (a) Odvajanje vlakna od matrice i (b) nastanak poprečne pukotine [134]

4.3.2. Delaminacija

Delaminacija ili odvajanje slojeva nastaje kao posljedica slabe adhezije između slojeva kompozita, često uzrokovane kontaminacijom tijekom proizvodnje ili lokalnim nakupljanjem praznina, a može se može dodatno razvijati pod utjecajem mehaničkih i toplinskih opterećenja koja dovode do pojave pukotina između slojeva [134]. Kako je ranije navedeno, pucanje matrice u većini slučajeva prethodi delaminaciji. Slika 4-4 prikazuje delaminacijsko oštećenje koje je rezultat spajanja dviju poprečnih pukotina unutar kompozitne matrice. Širenjem delaminacije može doći do kolapsa konstrukcije, preuranjenog izvijanja laminata, upijanja vlage u kompozit te smanjenja krutosti.

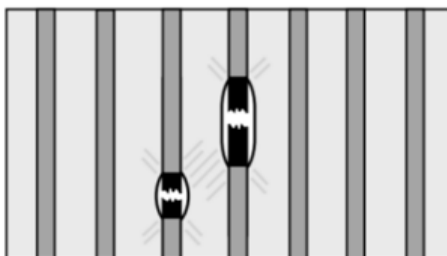


Slika 4-4 Delaminacijsko oštećenje nastalo uslijed spajanja dviju susjednih poprečnih pukotina u matrici [135]

4.3.3. Lom vlakna

Ojačala u kompozitnim materijalima izrađena su od snopova vlakana. Vlakna mogu sadržavati nesavršenosti koje nastaju tijekom proizvodnog procesa, što vodi do razlike u iznosu vlačne

čvrstoće vlakna. Uslijed te razlike, pri različitim razinama opterećenja može doći do izoliranih pucanja vlakana. Pucanjem pojedinog vlakna, naprezanje se prenosi na susjedno vlakno koje uslijed povećanja naprezanja dolazi u opasnost od pucanja, što je prikazano na slici 4-5. Pucanjem matrice smanjuje se prijenos naprezanja između vlakana, što posljedično također može uzrokovati lom vlakna.



Slika 4-5 Lom vlakana [134]

Kao što je prethodno naglašeno, navedeni mehanizmi oštećenja javljaju se kod vlaknima ojačanih polimera najčešće u unutrašnjosti materijala te postupno rastu i šire se prema površini. U trenutku kada su oštećenja vidljiva na površini, materijal je već značajno oslabio, a njegova mehanička svojstva bitno su kompromitirana. Ovo može dovesti do smanjenja integriteta i nosivosti inženjerske komponente, čime se povećava rizik od totalnog kolapsa konstrukcije. Kako bi se bolje razumjelo ponašanje materijala pod opterećenjem i pravovremeno detektirale unutarnje pukotine i oštećenja, izuzetno je važno koristiti računalnu tomografiju pošto je njenom primjenom omogućen detaljan uvid u unutrašnjost materijala. Ukoliko se računalna tomografija koristi u kombinaciji s metodom korelacije digitalnih volumena, otvara se mogućnost sveobuhvatne karakterizacije vlaknima ojačanih polimera pošto je predloženim pristupom omogućeno kvantificiranje polja pomaka unutar materijala, a time i dovođenje u vezu mikrostrukture FRP materijala s apliciranim opterećenjem. Ovo je ključno za pouzdanu analizu i procjenu stanja inženjerskih komponenti izrađenih od vlaknima ojačanih polimera.

4.4. Vinilesterska smola ojačana staklenim vlaknima različite arhitekture

U kontekstu *in-situ* mehaničkih ispitivanja vlaknima ojačanih polimera korištenjem računalne tomografije u kombinaciji s metodom korelacije digitalnih volumena, osobito je interesantan FRP materijal čija je matrica izrađena od vinilesterske smole, dok su kao ojačalo korištena staklena vlakna. Navedeni konstituenti pružaju povoljan kontrast u pogledu nijansi sive boje, što je od izuzetne važnosti za DVC metodu, budući da povećanje kontrasta između susjednih voksela olakšava korelaciju, povećavajući na taj način kvalitetu DVC analize. Iz tog su razloga u sklopu eksperimentalne kampanje provedene unutar ovog doktorskog rada korišteni ispitni uzorci izrađeni upravo od polimera od vinilesterske smole ojačanog staklenim vlaknima. Kako

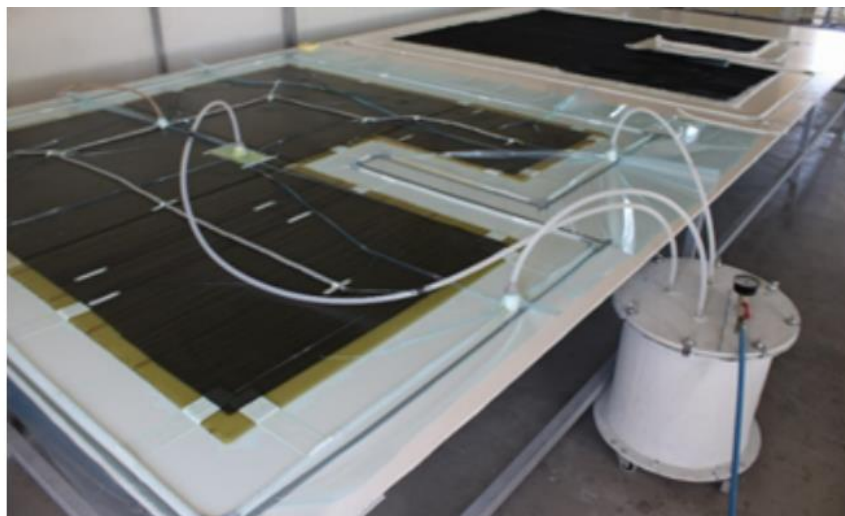
bi se evaluirao njihov utjecaj na mjernu nesigurnost DVC metode, korištene su različite arhitekture vlakana, što je vodilo ka različitim volumnim i masenim udjelima smole i staklenih vlakana.

Postupkom vakuumske infuzije proizvedene su četiri kompozitne ploče debljine 5 mm, pri čemu su različitim rasporedom slaganja staklenih vlakana unutar matrice od vinilesterske smole postignute arhitekture vlakana koje će se u daljnjem tekstu označavati kao *MAT*, *UD*, *WF* i *AP*, a koje podrazumijevaju arhitekture vlakana definirane u tablici 4-2.

Tablica 4-2 Arhitekture vlakana ispitnih uzoraka

Oznaka arhitekture vlakana	Raspored slaganja vlakana
<i>MAT</i>	Stohastički raspoređena kontinuirana vlakna
<i>UD</i> (eng. <i>Unidirectional</i>)	Kontinuirana vlakna paralelna s uzdužnim smjerom ploče
<i>WF</i> (eng. <i>Woven Fabric</i>)	Uzdužno i poprečno pletena vlakna
<i>AP</i> (eng. <i>Angle-ply</i>)	Kontinuirana jednosmjerna vlakna naizmjenice okretana $+45^{\circ}/-45^{\circ}$

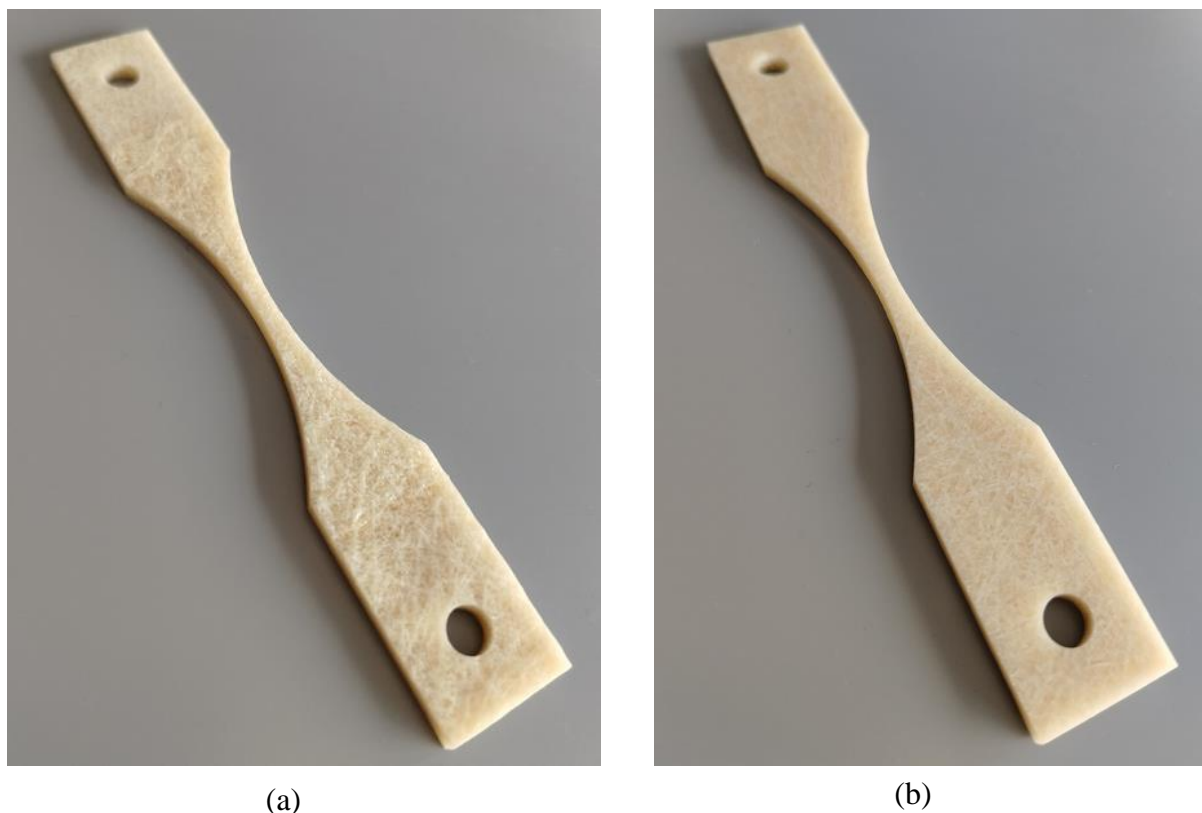
Početni korak u proizvodnji kompozitnih ploča uključivao je polaganje vlakana (koja su u obliku tkanja) u kalup, nakon čega su na njih stavljeni površinski pokrov i vakuumska vreća. Pomoću vakuumske pumpe uklonjen je potom zrak, nakon čega je ubrizgana smola. Uloga površinskog pokrova jest poboljšavanje protoka smole i impregnacije ojačala. Postupak proizvodnje kompozitnih ploča ispitivanih unutar ovog rada prikazan je na slici 4-6.



Slika 4-6 Izrada kompozitnih ploča primjenom vakuumske infuzije

Glavne prednosti korištenog postupka vakuumske infuzije jesu relativno jeftina izrada alata, mogućnost izrade dijelova velikih dimenzija, bolja kvaliteta površine i veći udio vlakana nego što je to slučaj kod ručnog polaganja. Glavni je nedostatak relativno složeno izvođenje procesa, pojava lokaliteta u kojima nije impregnirana smola te nužnost korištenja smola niske viskoznosti [136].

Završni korak u pripremi ispitnih uzoraka bilo je njihovo izrezivanje iz kompozitnih ploča u formu koja odgovara geometriji jednoosnih ispitnih uzorka, pri čemu je posebna pažnja posvećena osiguravanju željene orijentacije uzorka (tj. njegove uzdužne osi) u odnosu na orijentaciju vlakana unutar kompozitne ploče. Sam postupak rezanja ispitnih uzoraka izveden je tehnologijom vodenog mlaza, a primjer ovako dobivenog ispitnog uzorka dan je na slici 4-7. Pritom valja naglasiti kako je uslijed specifičnosti samog procesa vakuumske infuzije kod sve četiri vrste kompozitnih ploča došlo do nakupljanja smole na gornjoj strani ploče, zbog čega je ova strana izrazito hrapava (slika 4-7(a)), dok je donja strana (tj. strana koja je prilikom izvođenja postupka vakuumske infuzije bila položena na stol) ostala glatka (slika 4-7(b)).



Slika 4-7 Primjer jednoosnog ispitnog uzorka korištenog u istraživanju; (a) gornja, hrapava strana i (b) donja, glatka strana

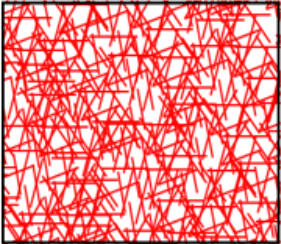
Detaljnije informacije o svakom pojedinom ispitnom uzorku analiziranom unutar ovog doktorskog rada, kao i o njegovoj mikrostrukturi, volumnom i masenom udjelu između

konstituenata te načinu slaganja i debljini slojeva dan je u nastavku.

4.4.1. Vinilesterska smola ojačana staklenim vlaknima MAT arhitekture

Kao što se može vidjeti u tablici 4-3, postupkom vakuumske infuzije proizvedena je kompozitna ploča pravokutnog oblika dimenzija 1000 mm × 1250 mm, a debljina ploče iznosila je 5 mm. Kao ojačalo su korišteni slojevi vlakana debljine 0,44 mm čija je površinska masa iznosila 600 g/m². Korišteno je ukupno 12 slojeva, a svi su slojevi postavljeni u istom smjeru. Iz ploče su naknadno rezani ispitni uzorci u formi prikazanoj na slici 4-7. Definiranje orijentacije ispitnog uzorka u odnosu na orijentaciju slojeva staklenih vlakana u ovom je slučaju neizvedivo pošto su kao ojačalo ovdje korištena staklena vlakna čija je orijentacija unutar kompozitne ploče stohastičkog karaktera.

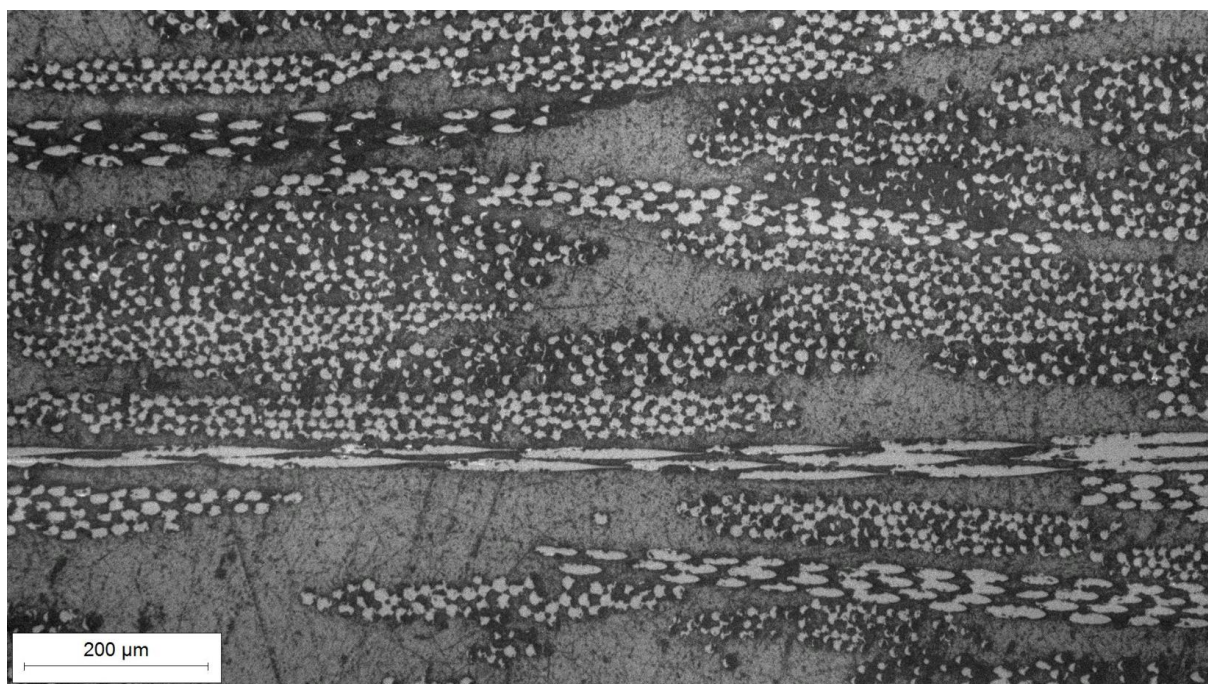
Tablica 4-3 Dimenzije kompozitne ploče s MAT arhitekturom vlakana i osnovne informacije o korištenim slojevima

 <p>1250 mm</p> <p>1000 mm</p>	<p>TIP POLUPROIZVODA: slučajno usmjerena mat vlakna</p> <p>POVRŠINSKA MASA: 600 g/m²</p> <p>DEBLJINA SLOJA: 0,44 mm</p> <p>BROJ SLOJEVA: 12</p> <p>NAČIN SLAGANJA: slojevi postavljeni u istom smjeru</p>
--	---

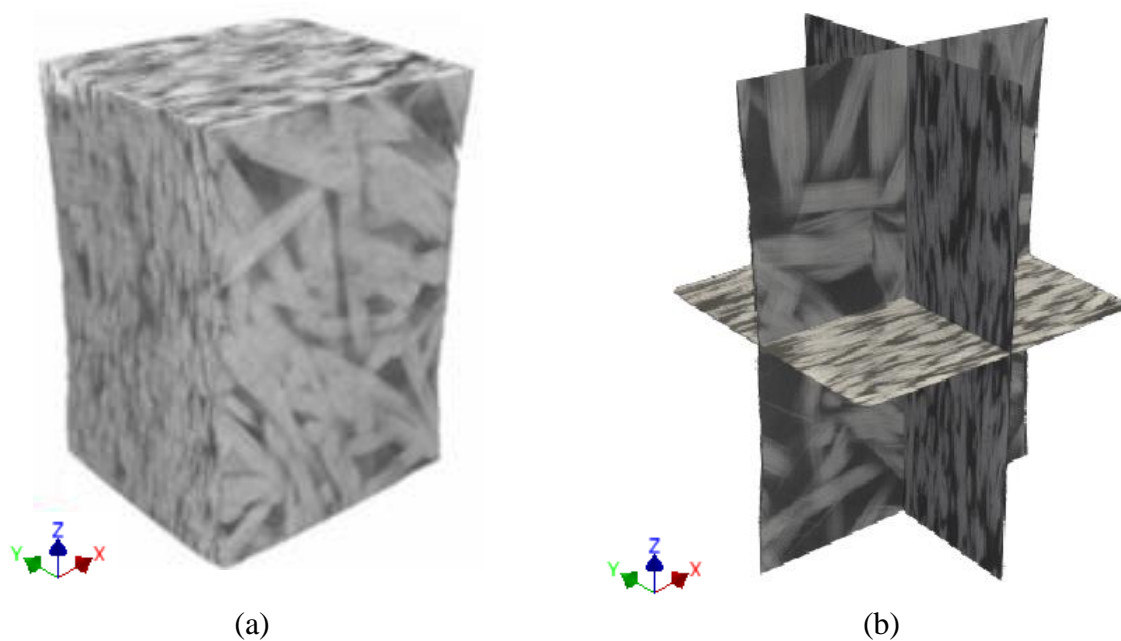
Analiza mikrostrukture poprečnih presjeka sve četiri vrste ispitnih uzoraka (*MAT*, *UD*, *WF* i *AP* arhitekture) provedena je upotrebom optičkog mikroskopa, pri čemu je korištenjem snimke polirane površine i *ImageJ* softvera kreirana 8-bitna slika koja prikazuje različite konstituente ispitivanog materijala, tj. staklena vlakna i matricu.

Na temelju segmentacije slike poprečnog presjeka *MAT* ispitnog uzorka, utvrđeni su volumni udjeli konstituenata u iznosu od 68% za staklena vlakna i 32% za matricu. Prikaz mikrostrukture poprečnog presjeka ovog ispitnog uzorka snimljen optičkim mikroskopom pri povećanju 100× dan je na slici 4-8.

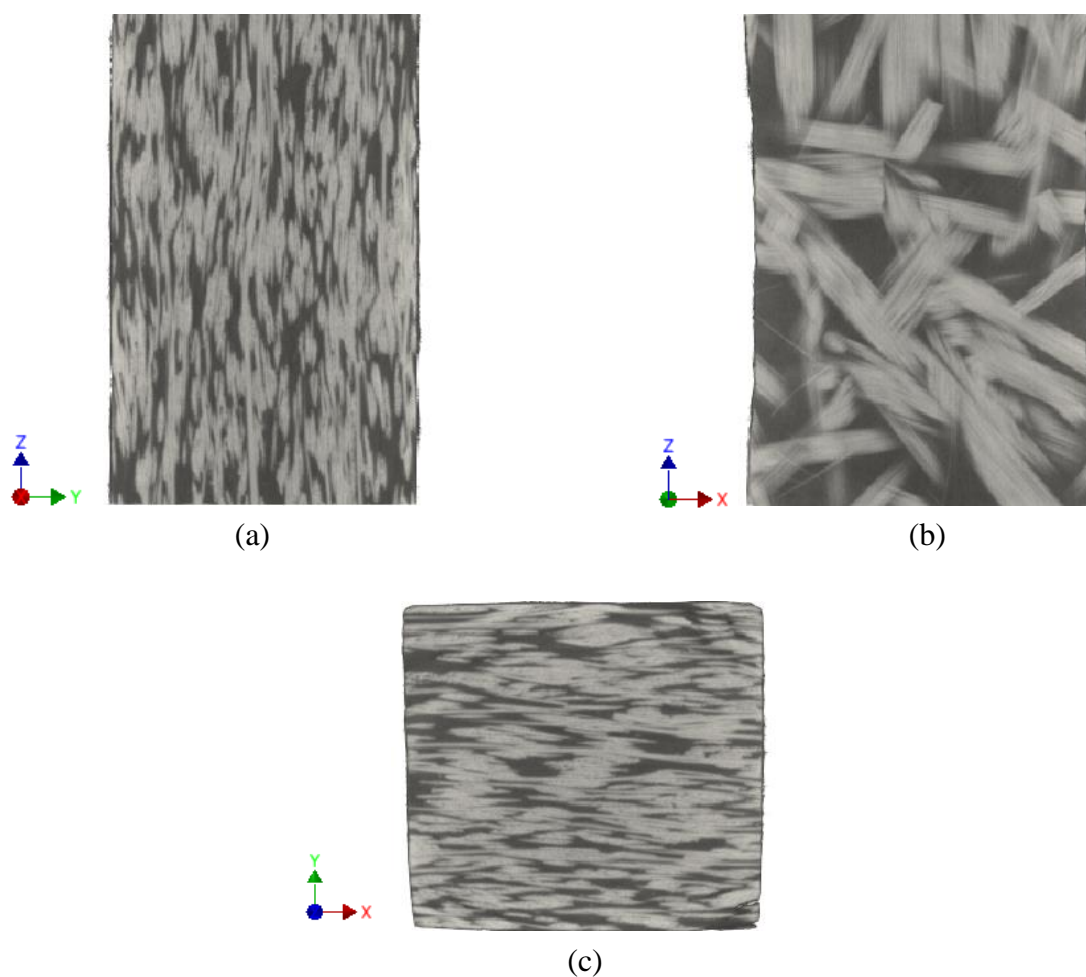
Trodimenzionalna analiza mikrostrukture za sve četiri vrste ispitnih uzoraka provedena je nad rekonstruiranim volumenima dobivenima nakon CT skeniranja, koje je izvršeno korištenjem laboratorijskog tomografa *Werth Tomoscope S* ustupljenog od strane tvrtke *Yazaki Europe Limited*. Detaljan opis postupka XCT skeniranja, kao i točni parametri skeniranja navedeni su u poglavlju 5.2.



Slika 4-8 Poprečni presjek ispitnog uzorka *MAT* arhitekture vlakana, debljine 5 mm, pri povećanju $100\times$. Na slici 4-9(a) prikazan je rekonstruirani volumen *MAT* ispitnog uzorka, dok slika 4-9(b) prikazuje presjeka u njegovom težištu. Dodatno je na slici 4-10 prikazana mikrostruktura u ravninama x - y , x - z i y - z . Na navedenim je slikama vidljivo kako se mikrostruktura promatranog volumena sastoji od stohastički raspoređenih *MAT* staklenih vlakana, koja se nalaze u vinilesterskoj smoli. Budući da su sve četiri kompozitne ploče proizvedene postupkom vakuumske infuzije, nije unutar rekonstruiranih volumena primijećena poroznost.

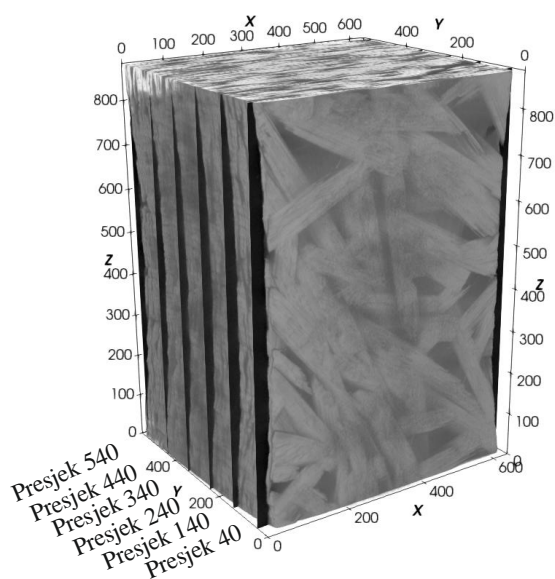


Slika 4-9 (a) Rekonstruirani volumen *MAT* ispitnog uzorka i (b) prikaz presjeka u težištu *MAT* ispitnog uzorka

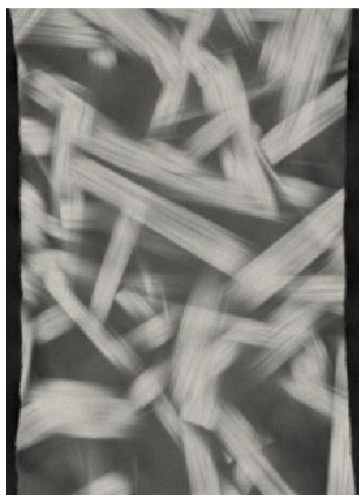


Slika 4-10 Presjeci u težištu *MAT* ispitnog uzorka u (a) *y-z*, (b) *x-z* i (c) *x-y* ravnini

Na slici 4-12 prikazan je rekonstruirani volumen *MAT* ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih slojeva (definiranih preko slike 4-11), pri čemu je normala označenih presjeka paralelna s osi *y*. Bitno je naglasiti kako nije jednostavno odrediti kojem sloju pripadaju vidljiva vlakna, zbog isprepletenosti vlakana te vakuumske proizvodnje. Nadalje, na prikazanim je presjecima (slika 4-12) vidljiva stohastička raspodjela staklenih vlakana, dok mjehurići zraka nisu uočeni. Također, vidljivo je kako prikazani presjeci imaju različitu mikrostrukturu, odnosno različitu arhitekturu vlakana te različite volumne udjele konstituenata. Preliminarno se zaključuje kako je prikazana mikrostruktura prikladna za mjerenja cijelog polja pomaka primjenom DVC metode, zbog stohastičke raspodjele vlakana i jasne granice između konstituenata.



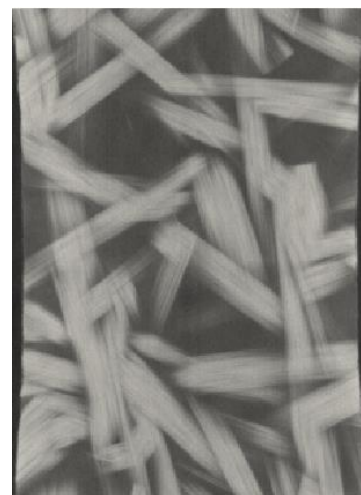
Slika 4-11 Rekonstruirani volumen MAT ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih slojeva s normalom koja odgovara osi y



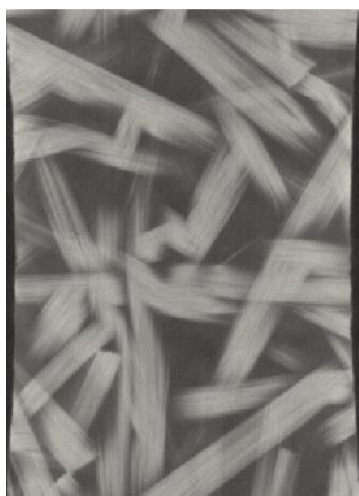
Presjek 40



Presjek 140



Presjek 240



Presjek 340



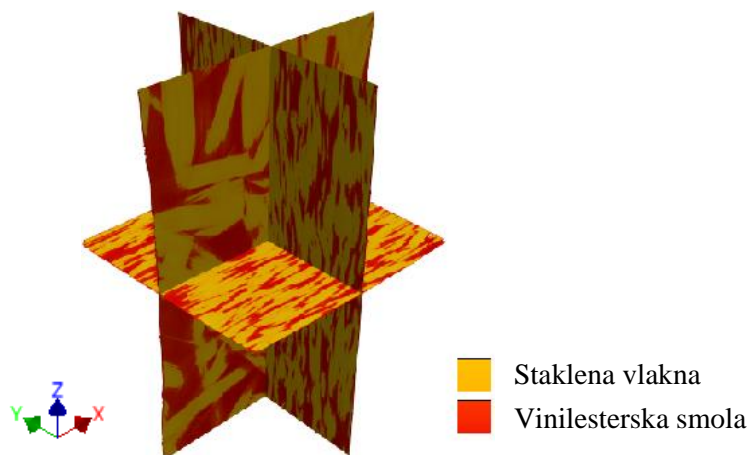
Presjek 440



Presjek 540

Slika 4-12 Različiti presjeci MAT ispitnog uzorka koji su paralelni s polaganjem slojeva

Rekonstrukcijom promatranog volumena, osim raspodjele pojedinih konstituenata i prikaza mikrostrukture, primjenom *ImageJ* programskog paketa za analizu slika dobiveni su i volumni udjeli pojedinih konstituenata u promatranom volumenu. Na slici 4-13 vidljiv je segmentirani 3D prikaz presjeka *MAT* ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima.

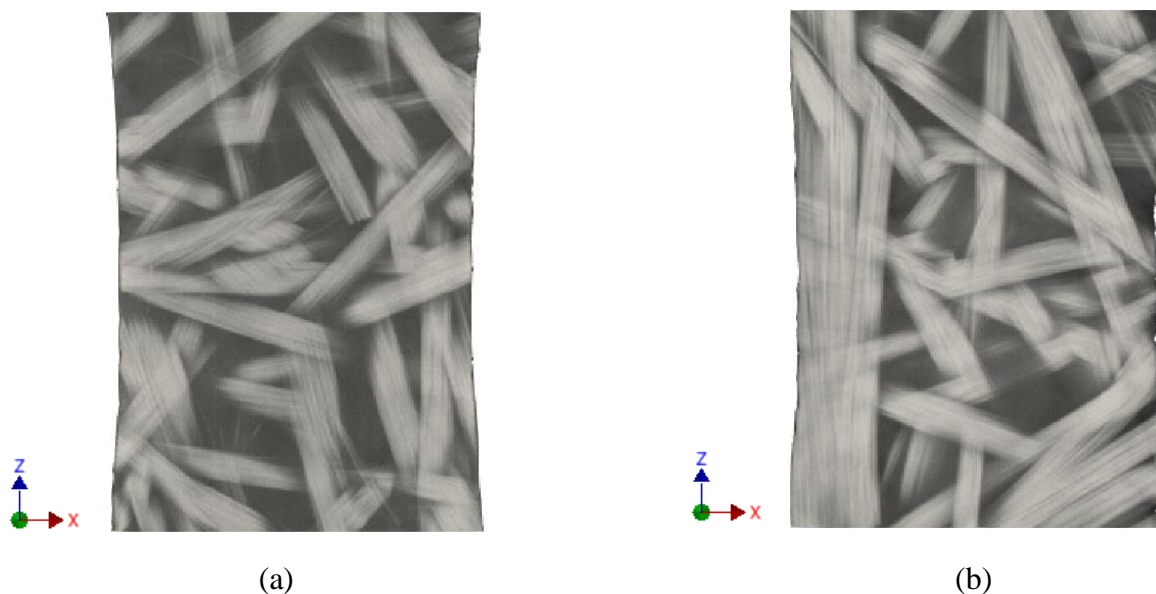


Slika 4-13 Segmentirani volumetrijski prikaz *MAT* ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima

Uvidom u rezultate prikazane u tablici 4-4, uočava se kako najveću srednju vrijednost volumnog udjela imaju staklena vlakna (71,205%), koja su osnovni nosivi element uzorka te uzorku daju čvrstoću. Maksimalni volumni udio vlakana iznosi 77,673%, a ovaj je udio postignut u *presjeku 548* s normalom u smjeru osi *y* (slika 4-14(b)). Minimalni volumni udio staklenih vlakana iznosi 64,542%, a ovaj volumni udio vlakna zauzimaju u *presjeku 141* s normalom u smjeru osi *y* (slika 4-14(a)).

Tablica 4-4 Volumni udio staklenih vlakana i vinilesterske smole kod *MAT* ispitnog uzorka, utvrđen segmentacijom slike dobivene CT skeniranjem ispitnog uzorka

	Staklena vlakna	Vinilesterska smola
Srednja vrijednost volumnog udjela	71,205%	28,795%
Minimalni volumni udio	65,542% (<i>presjek 141</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)	22,327% (<i>presjek 548</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)
Maksimalni volumni udio	77,673% (<i>presjek 548</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)	35,458% (<i>presjek 141</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)



Slika 4-14 (a) Presjek 141 s minimalnim udjelom vlakana i (b) presjek 548 s maksimalnim udjelom vlakana

Vrijedi primijetiti određene razlike u procjeni volumnih udjela konstituenata kada se isti određuju analizom slika dobivenih primjenom optičkog mikroskopa, odnosno skeniranjem laboratorijskim tomografom. Niža rezolucija slika dobivenih CT skeniranjem u odnosu na rezoluciju slika dobivenih primjenom optičkog mikroskopa, povećava potencijalnu grešku u procjeni volumnih udjela kada se koristi laboratorijska tomografija. S druge strane, primjena optičkog mikroskopa također nije idealno rješenje pošto je za procjenu volumnog udjela konstituenata potrebno fizički izrezati ispitni uzorak kako bi se dobila slika njegovog presjeka. Rezultati volumnih udjela konstituenata proizašli iz segmentacije slike, dobivene primjenom optičkog mikroskopa, proizlaze iz analize samo jednog presjeka ispitnog uzorka. Oslanjajući se na samo jedan (u ovom slučaju poprečni) presjek ispitnog uzorka, zanemaruju se potencijalne razlike u distribuciji vlakana unutar promatranog volumena, čime se dovodi u pitanje točnost ovako utvrđenih volumnih udjela između konstituenata.

Kako bi se dobila potpunija informacija o udjelima konstituenata unutar ispitnog uzorka, provedeno je dodatno testiranje koje je bilo usmjereno na određivanje masenog udjela staklenih vlakana unutar vinilesterske matrice za svaku promatranu arhitekturu. Navedeni je postupak podrazumijevao spaljivanje četiriju ispitnih uzoraka na 600°C s vremenom trajanja od četiri sata. Poznavajući masu lončića u koji su odloženi ispitni uzorci kao i masu samih ispitnih uzoraka te znajući da će uslijed procesa spaljivanja sva vinilesterska smola sagorjeti, određena je masa ostatka materijala u lončiću, što je podatak koji predstavlja masu staklenih vlakana u ispitivanom uzorku. Podijelivši iznos ovako dobivene mase staklenih vlakana s ukupnom masom uzorka prije spaljivanja ustanovljen je maseni udio staklenih vlakana u pojedinom

uzorku. Uprosječivanjem rezultata ispitivanja četiriju uzoraka određena je srednja vrijednost masenih udjela staklenih vlakana koja za ispitni uzorak s *MAT* arhitekturom vlakana iznosi 60,27%. Kompletni rezultati ovog testa navedeni su u tablici 4-5.

Tablica 4-5 Rezultati utvrđivanja masenog udjela staklenih vlakana kod *MAT* ispitnih uzoraka

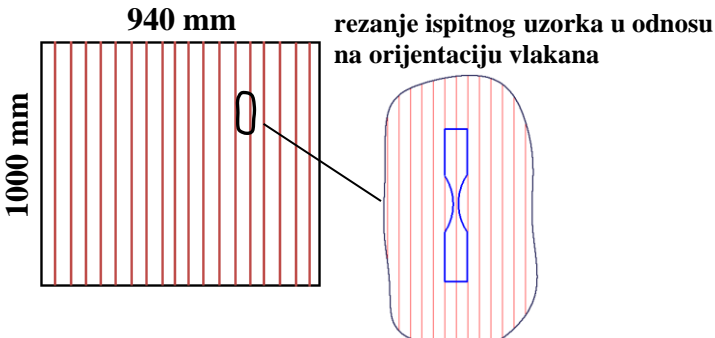
Uzorak	Masa lončića (g)	Masa lončića + masa uzorka (g)	Masa uzorka (g)	Masa lončića + Masa ostatka (g)	Masa ostatka (g)	Maseni udio ostatka (%)
1	28,3083	33,1361	4,8278	31,1802	2,8719	59,49
2	26,6714	31,1285	4,4571	29,3322	2,6608	59,70
3	22,1246	26,5265	4,4019	24,8196	2,6950	61,22
4	21,8200	26,2347	4,4147	24,4992	2,6792	60,69

Srednja vrijednost masenog udjela ostatka: 60,27 %

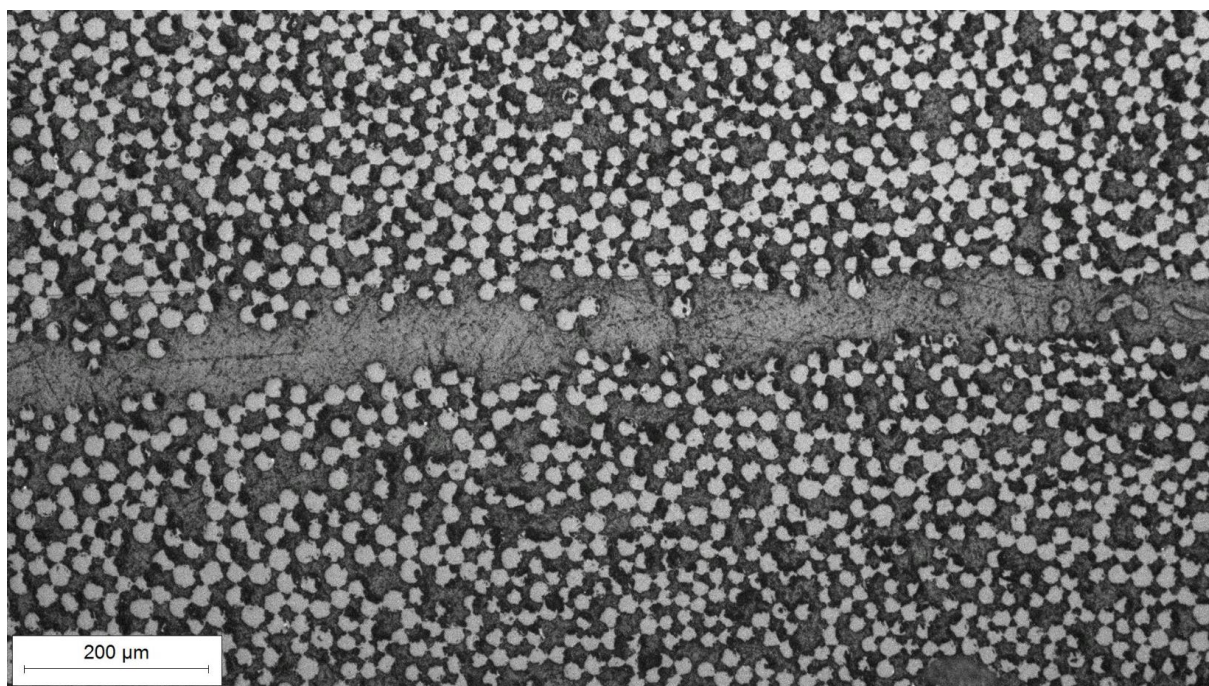
4.4.2. Vinilesterska smola ojačana staklenim vlaknima *UD* arhitekture

Kao što se može vidjeti u tablici 4-6, postupkom vakuumske infuzije proizvedena je kompozitna ploča pravokutnog oblika dimenzija 1000 mm × 940 mm, a debljina ploče iznosila je 5 mm. Kao ojačalo su korišteni slojevi vlakana debljine 1,69 mm čija je površinska masa iznosila 2316 g/m². Korištena su ukupno 3 sloja, a svi su slojevi postavljeni u istom smjeru. Iz kompozitne su ploče naknadno rezani ispitni uzorci, pri čemu je orijentacija uzdužne osi jednoosnog ispitnog uzorka paralelna s orijentacijom vlakana unutar kompozitne ploče.

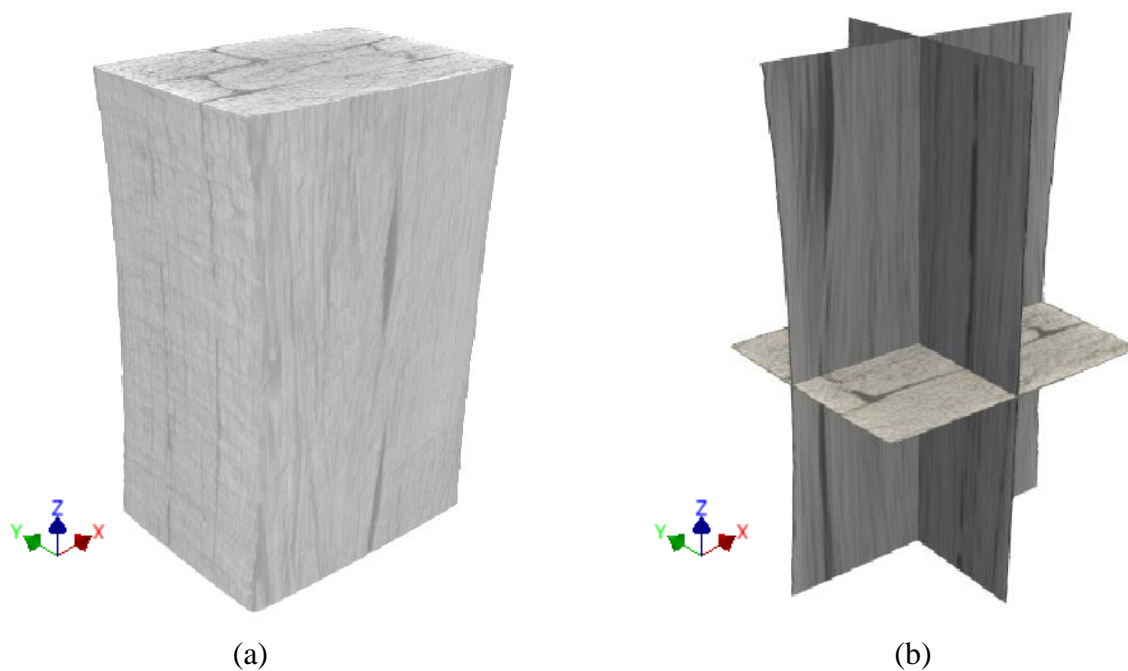
Tablica 4-6 Dimenzije kompozitne ploče s *UD* arhitekturom vlakana, orijentacija rezanja ispitnog uzorka u odnosu na orijentaciju vlakana te osnovne informacije o korištenim slojevima

 <p>940 mm</p> <p>1000 mm</p> <p>rezanje ispitnog uzorka u odnosu na orijentaciju vlakana</p>	<p>TIP POLUPROIZVODA: kontinuirana jednosmjerna vlakna</p> <p>POVRŠINSKA MASA: 2316 g/m²</p> <p>DEBLJINA SLOJA: 1,69 mm</p> <p>BROJ SLOJEVA: 3</p> <p>NAČIN SLAGANJA: slojevi postavljeni u istom smjeru</p>
--	--

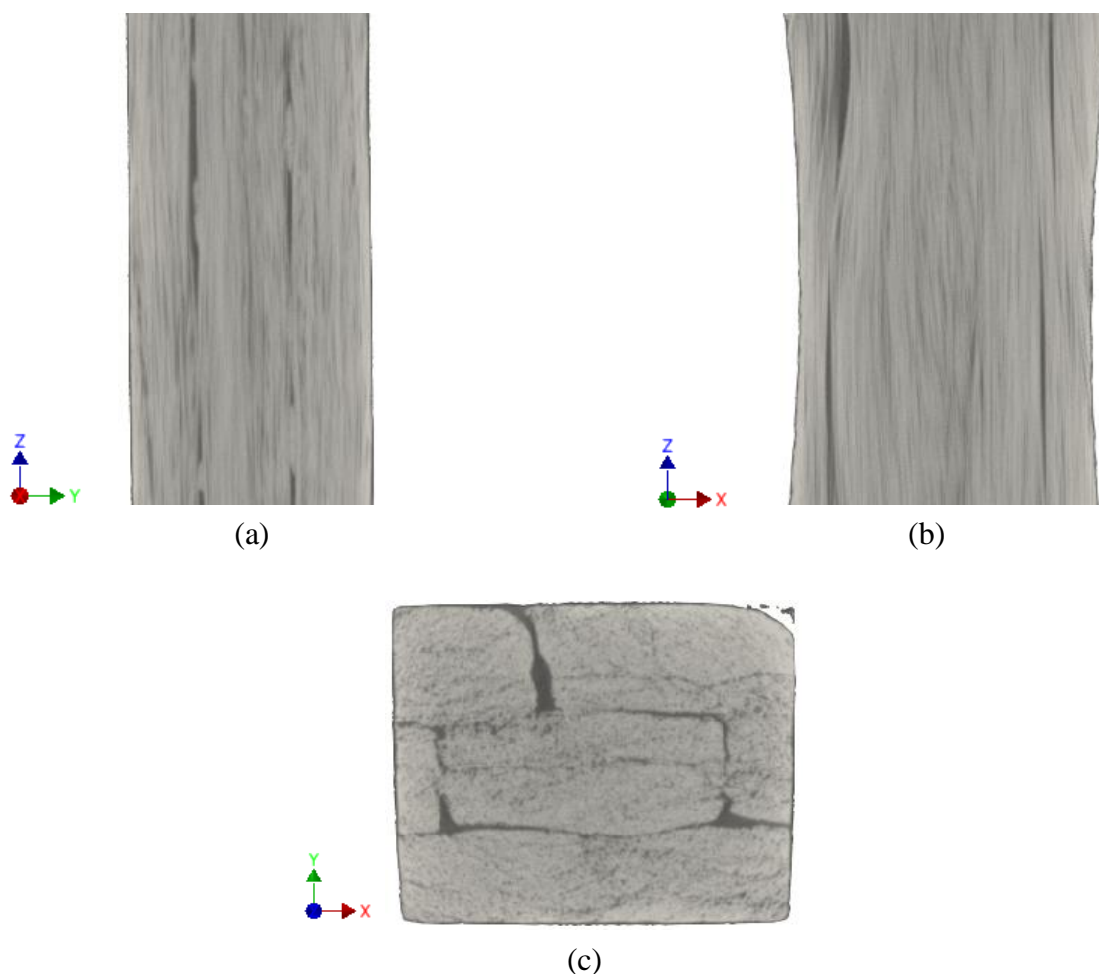
Segmentacijom slike poprečnog presjeka ispitnog uzorka dobivene primjenom optičkog mikroskopa određeni su volumni udjeli konstituenata *UD* ispitnog uzorka u iznosu od 91,8% za staklena vlakna i 8,2% za matricu. Prikaz mikrostrukture poprečnog presjeka ovog ispitnog uzorka snimljen optičkim mikroskopom pri povećanju 100× dan je na slici 4-15.



Slika 4-15 Poprečni presjek ispitnog uzorka *UD* arhitekture vlakana, debljine 5 mm, pri povećanju 100×
 Na slici 4-16(a) prikazan je rekonstruirani volumen *UD* ispitnog uzorka, dok slika 4-16(b) prikazuje presjeke u njegovom težištu. Dodatno je na slici 4-17 prikazana mikrostruktura u ravninama *x-y*, *x-z* i *y-z*. Na navedenim je slikama vidljivo kako se mikrostruktura promatranog volumena sastoji od kontinuiranih staklenih vlakana paralelnih s uzdužnom osi uzorka koje zajedno drži vinilesterska smola.

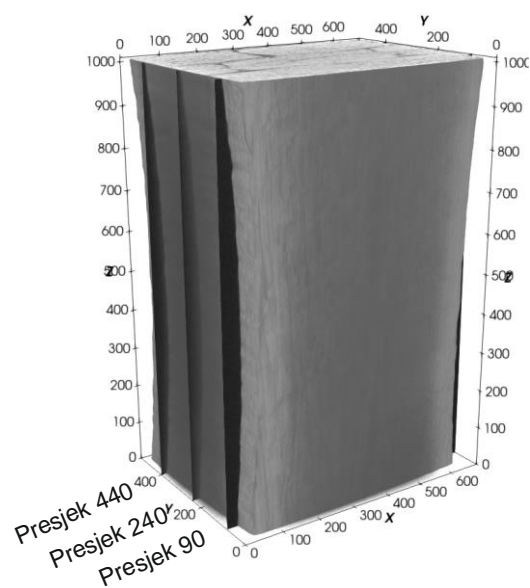


Slika 4-16 (a) Rekonstruirani volumen *UD* ispitnog uzorka i (b) prikaz presjeka u težištu *UD* ispitnog uzorka

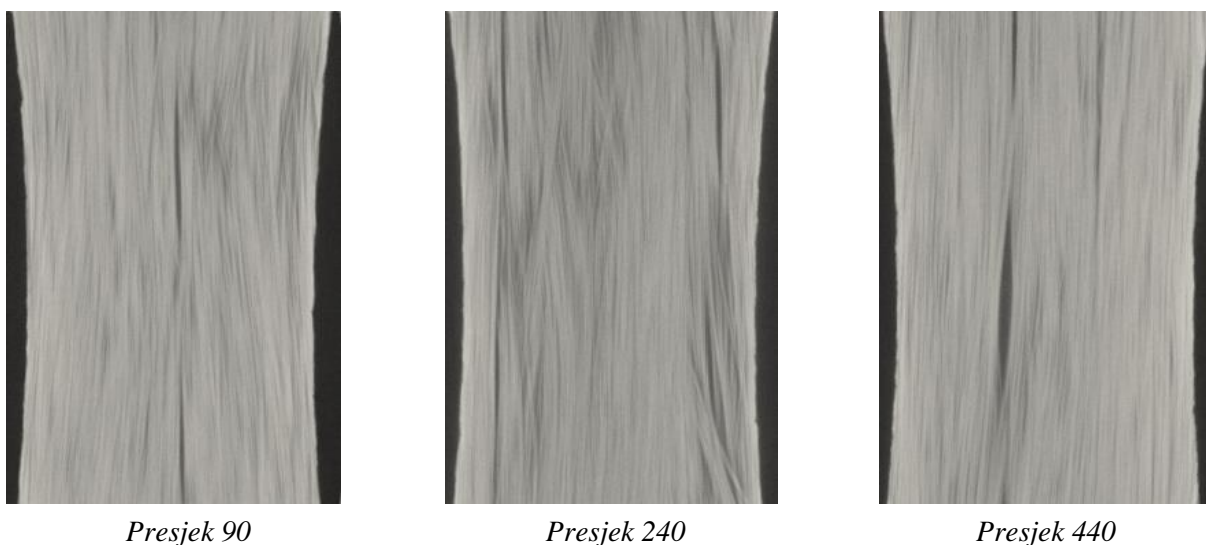


Slika 4-17 Presjeci u težištu *UD* ispitnog uzorka u (a) *y-z*, (b) *x-z* i (c) *x-y* ravnini

Na slici 4-19 prikazan je rekonstruirani volumen *UD* ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih slojeva (definiranih preko slike 4-18) pri čemu je normala označenih presjeka paralelna s osi *y*. Nadalje, na prikazanim je presjecima (slika 4-19) vidljiva arhitektura staklenih vlakana u slojevima, dok mjehurići zraka nisu uočeni. Na prikazanim se presjecima može još jasnije uočiti paralelnost kontinuiranih staklenih vlakana s uzdužnom osi uzorka. Preliminarno se zaključuje kako prikazana mikrostruktura nije prikladna za mjerenja cijelog polja pomaka primjenom DVC metode, s obzirom na visok volumni udio vlakana i nejasnu granicu između konstituenata.

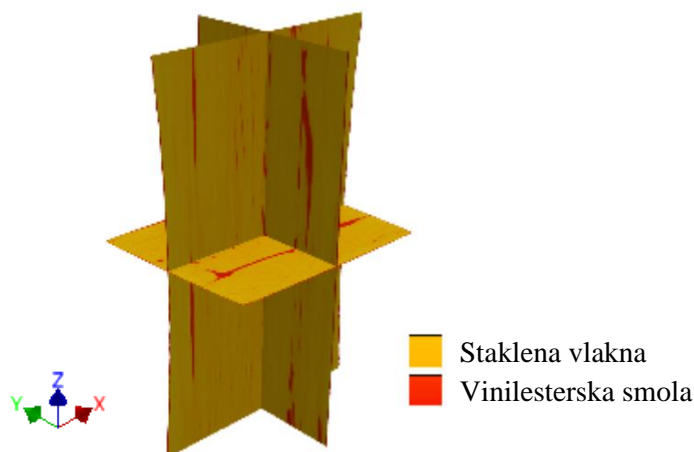


Slika 4-18 Rekonstruirani volumen *UD* ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih slojeva s normalom koja odgovara osi *y*



Slika 4-19 Različiti presjeci *UD* ispitnog uzorka koji su paralelni s polaganjem slojeva

Rekonstrukcijom promatranog volumena, osim raspodjele pojedinih konstituenata i prikaza mikrostrukture, primjenom *ImageJ* programskog paketa za analizu slika dobiveni su i volumni udjeli pojedinih konstituenata u promatranom volumenu. Na slici 4-20 vidljiv je segmentirani 3D prikaz presjeka *UD* ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima.

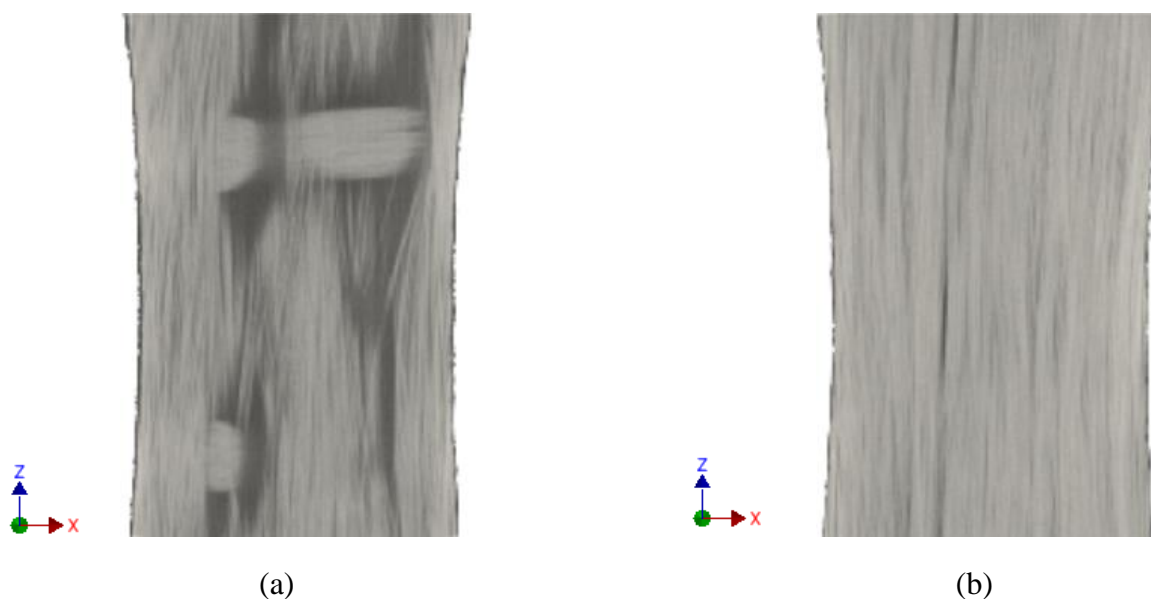


Slika 4-20 Segmentirani volumetrijski prikaz UD ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima

Uvidom u rezultate prikazane u tablici 4-7, uočava se kako najveću srednju vrijednost volumnog udjela imaju staklena vlakna (92,037%), koja su osnovni nosivi element uzorka te uzorku daju čvrstoću. Maksimalni volumni udio vlakana iznosi 98,586%, a ovaj je udio postignut u *presjeku 435* s normalom u smjeru osi *y* (slika 4-21(b)). Minimalni volumni udio staklenih vlakana iznosi 66,074%, a ovaj volumni udio vlakna zauzimaju u *presjeku 326* s normalom u smjeru osi *y* (slika 4-21(a)).

Tablica 4-7 Volumni udio staklenih vlakana i vinilesterske smole kod UD ispitnog uzorka, utvrđen segmentacijom slike dobivene CT skeniranjem ispitnog uzorka

	Staklena vlakna	Vinilesterska smola
Srednja vrijednost volumnog udjela	92,037%	7,963%
Minimalni volumni udio	66,074% (<i>presjek 326</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)	1,414% (<i>presjek 435</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)
Maksimalni volumni udio	98,586% (<i>presjek 435</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)	33,926% (<i>presjek 326</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)



Slika 4-21 (a) Presjek 326 s minimalnim udjelom vlakana i (b) presjek 435 s maksimalnim udjelom vlakana
 Argumentacija vezana uz točnost određivanja volumetrijskih udjela konstituenata analizom slika presjeka ispitnih uzoraka dobivenih primjenom laboratorijske tomografije, odnosno primjenom optičkog mikroskopa, problematizirana u poglavlju 4.4.1, razlog je provođenja identičnog postupka utvrđivanja masenog udjela konstituenata kod *UD* ispitnog uzorka, kao što je to izvedeno i za *MAT* ispitni uzorak.

Spaljivanjem četiriju ispitnih uzoraka na 600°C s vremenom trajanja od četiri sata, mjerenjem mase ostatka neisparenog materijala te usporedbom s početnom masom uzoraka, odnosno slijeđenjem procedure također opisane u poglavlju 4.4.1, utvrđena je kod ispitnih uzoraka *UD* arhitekture vlakana srednja vrijednost masenih udjela staklenih vlakana u iznosu od 75,51% (tablica 4-8).

Tablica 4-8 Rezultati utvrđivanja masenog udjela staklenih vlakana kod *UD* ispitnih uzoraka

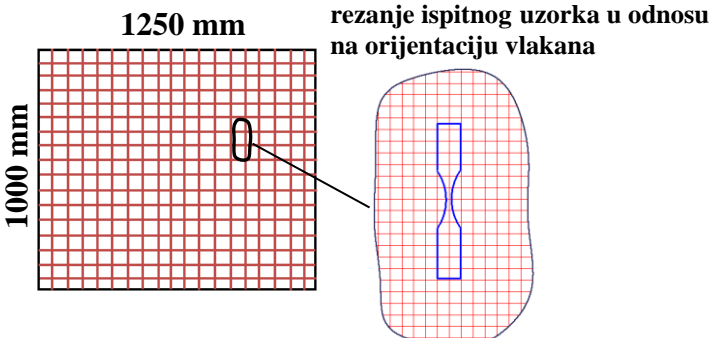
Uzorak	Masa lončića (g)	Masa lončića + masa uzorka (g)	Masa uzorka (g)	Masa lončića + Masa ostatka (g)	Masa ostatka (g)	Maseni udio ostatka (%)
1	22,6062	27,3006	4,6944	26,1925	3,5863	76,40
2	21,3610	26,0555	4,6945	24,9196	3,5586	75,80
3	28,0391	32,2537	4,2146	31,1867	3,1476	74,68
4	21,5501	25,9654	4,4153	24,8680	3,3179	75,15

Srednja vrijednost masenog udjela ostatka: 75,51 %

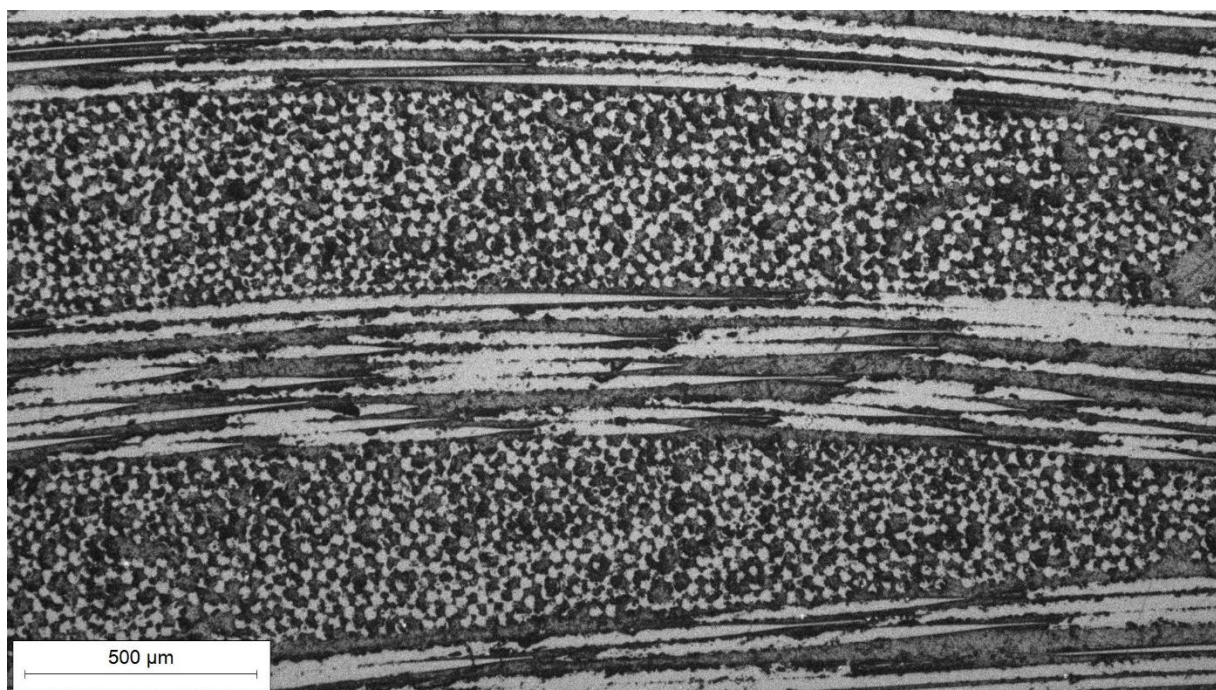
4.4.3. Vinilesterska smola ojačana staklenim vlaknima WF arhitekture

Kao što se može vidjeti u tablici 4-9, postupkom vakuumske infuzije proizvedena je kompozitna ploča pravokutnog oblika dimenzija 1000 mm × 1250 mm, a debljina ploče iznosila je 5 mm. Kao ojačalo su korišteni slojevi pletenih staklenih vlakana debljine 0,44 mm, pri čemu je površinska masa iznosila 600 g/m². Korišteno je ukupno 12 slojeva, a svi su slojevi postavljeni u istom smjeru. Rezanjem ispitnog uzorka ostvarena je orijentacija poprečnih i uzdužnih staklenih vlakana od 0° i 90° u odnosu na njegovu uzdužnu os.

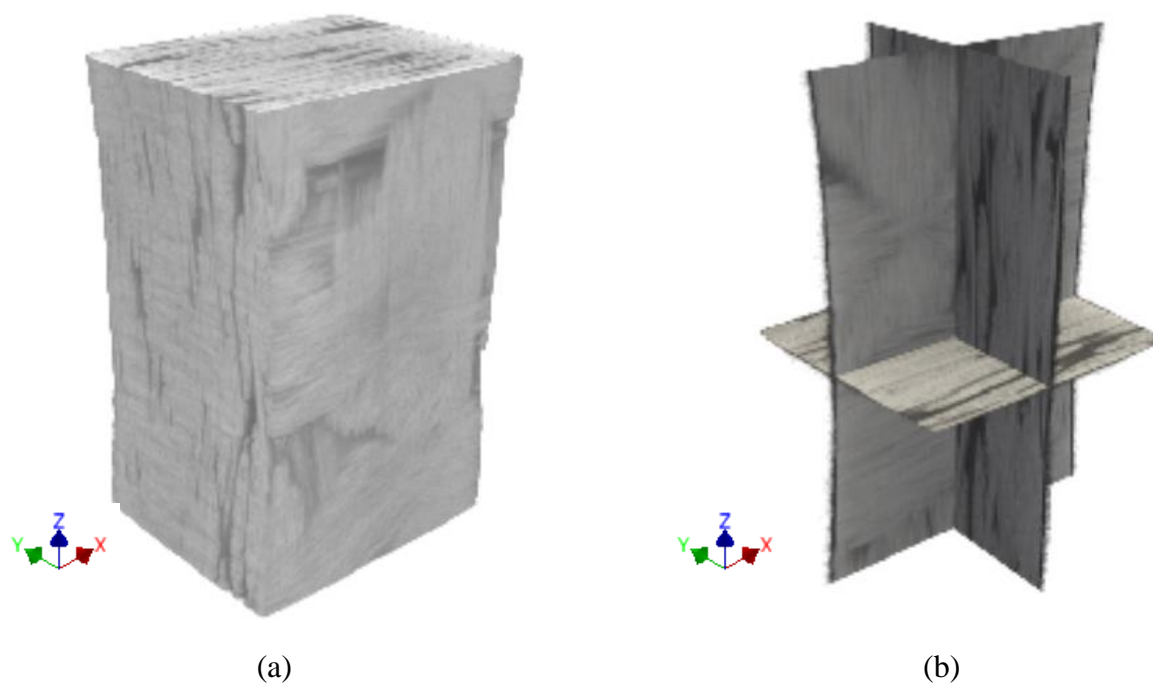
Tablica 4-9 Dimenzije kompozitne ploče s WF arhitekturom vlakana, orijentacija rezanja ispitnog uzorka u odnosu na orijentaciju vlakana te osnovne informacije o korištenim slojevima

 <p>1250 mm</p> <p>1000 mm</p> <p>rezanje ispitnog uzorka u odnosu na orijentaciju vlakana</p>	<p>TIP POLUPROIZVODA: pletena vlakna 0° - 90°</p> <p>POVRŠINSKA MASA: 600 g/m²</p> <p>DEBLJINA SLOJA: 0,44 mm</p> <p>BROJ SLOJEVA: 12</p> <p>NAČIN SLAGANJA: slojevi postavljeni u istom smjeru</p>
--	---

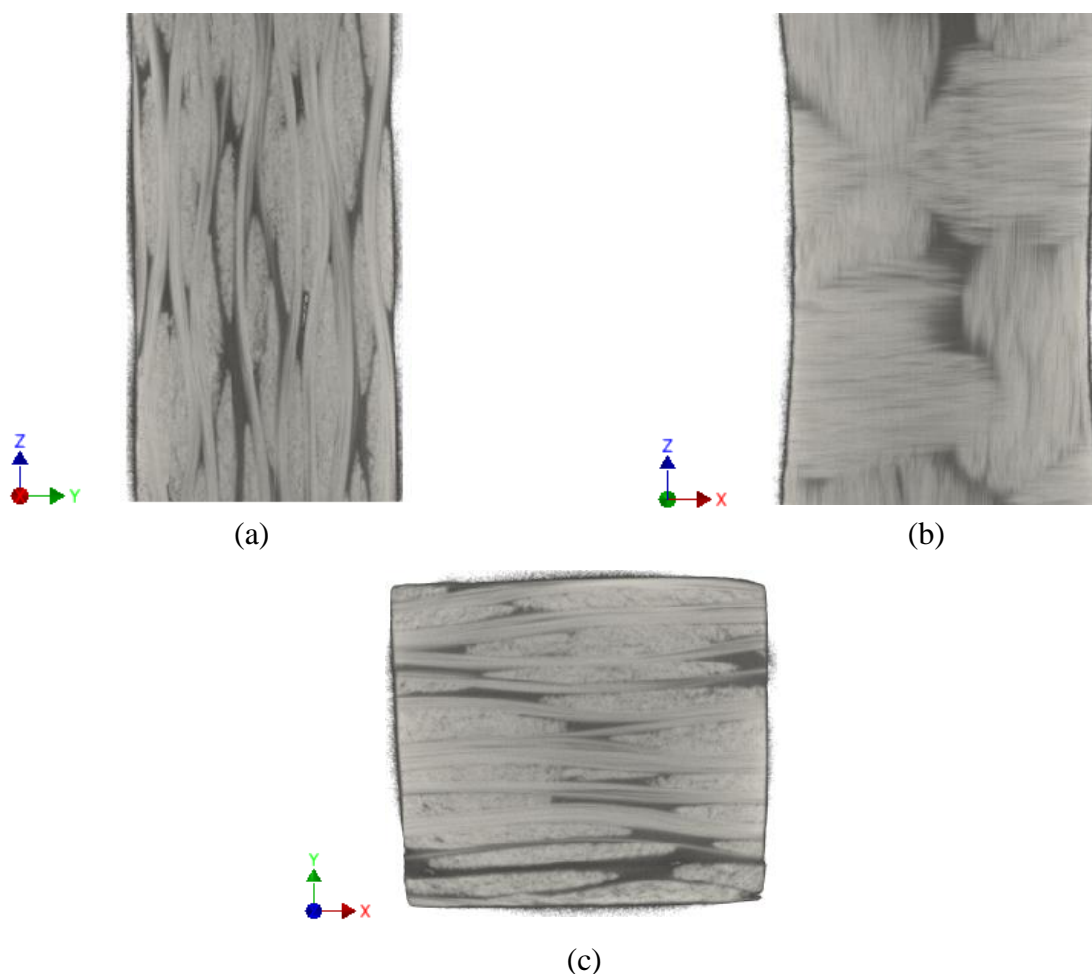
Segmentacijom slike poprečnog presjeka ispitnog uzorka dobivene primjenom optičkog mikroskopa određeni su volumni udjeli konstituenata WF ispitnog uzorka u iznosu od 90% za staklena vlakna i 10% za matricu. Prikaz mikrostrukture poprečnog presjeka ovog ispitnog uzorka snimljen optičkim mikroskopom pri povećanju 100× dan je na slici 4-22.



Slika 4-22 Poprečni presjek ispitnog uzorka *WF* arhitekture vlakana, debljine 5 mm, pri povećanju $100\times$. Na slici 4-23(a) prikazan je rekonstruirani volumen *WF* ispitnog uzorka, dok slika 4-23(b) prikazuje presjeke u njegovom težištu. Dodatno je na slici 4-24 prikazana mikrostruktura u ravninama x - y , x - z i y - z . Na navedenim je slikama vidljivo kako se mikrostruktura promatranog volumena sastoji od poprečnih i uzdužnih staklenih vlakana orijentiranih pod 0° i 90° u odnosu na uzdužnu os uzorka, a vlakna zajedno drži vinilesterska smola.

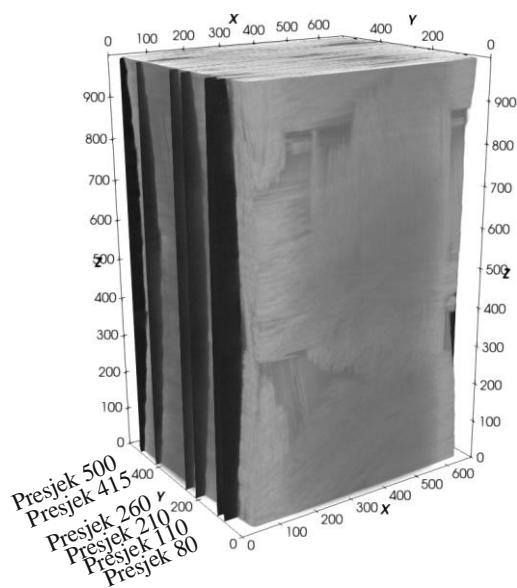


Slika 4-23 (a) Rekonstruirani volumen *WF* ispitnog uzorka i (b) prikaz presjeka u težištu *WF* ispitnog uzorka

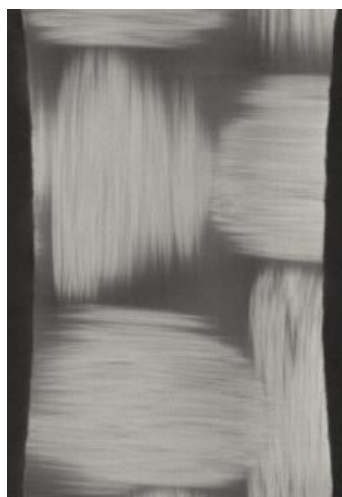


Slika 4-24 Presjeci u težištu *WF* ispitnog uzorka u (a) *y-z*, (b) *x-z* i (c) *x-y* ravnini

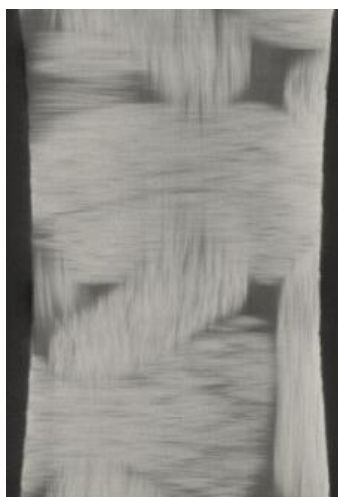
Na slici 4-26 prikazan je rekonstruirani volumen *WF* ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih slojeva (definiranih preko slike 4-25), pri čemu je normala označenih presjeka paralelna s osi *y*. Nadalje, na prikazanim je presjecima (slika 4-26) vidljiva arhitektura staklenih vlakana u slojevima, dok mjehurići zraka nisu uočeni. Na prikazanim se presjecima može još jasnije uočiti kako su kod ovog ispitnog uzorka vlakna pletena. Preliminarno se zaključuje kako je prikazana mikrostruktura prikladna za mjerenja cijelog polja pomaka primjenom DVC metode, pošto je moguće uočiti granicu između konstituenata.



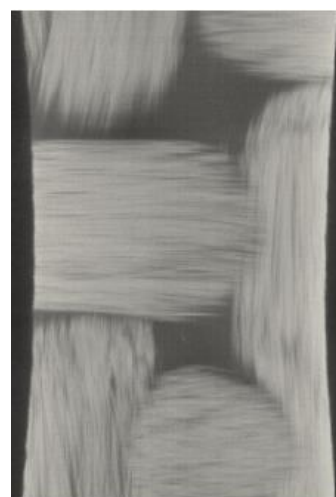
Slika 4-25 Rekonstruirani volumen WF ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih slojeva s normalom koja odgovara osi y



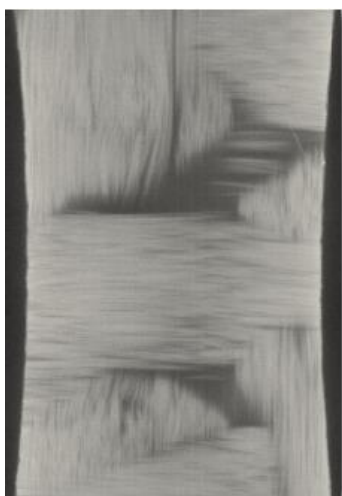
Presjek 80



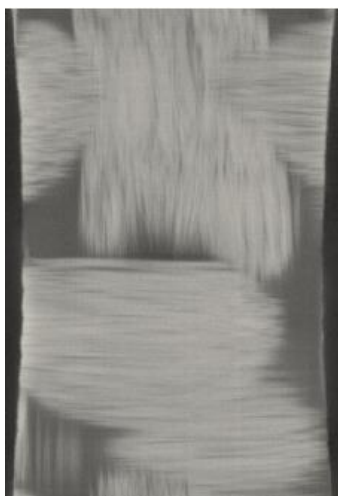
Presjek 110



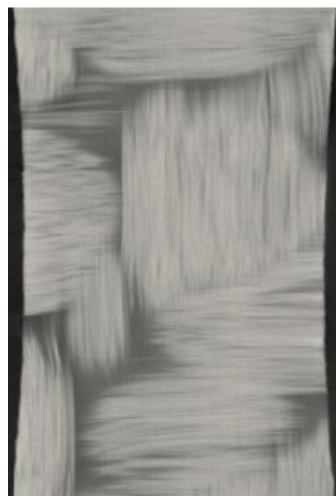
Presjek 210



Presjek 260



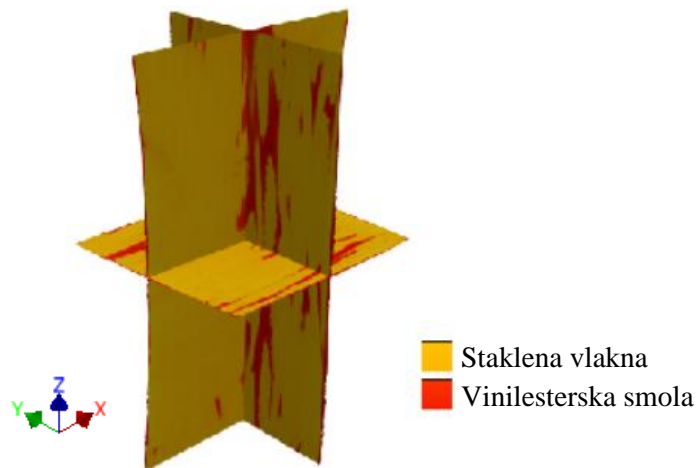
Presjek 415



Presjek 500

Slika 4-26 Različiti presjeci WF ispitnog uzorka koji su paralelni s polaganjem slojeva

Rekonstrukcijom promatranog volumena, osim raspodjele pojedinih konstituenata i prikaza mikrostrukture, primjenom *ImageJ* programskog paketa za analizu slika dobiveni su i volumni udjeli pojedinih konstituenata u promatranom volumenu. Na slici 4-27 vidljiv je segmentirani 3D prikaz presjeka *WF* ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima.

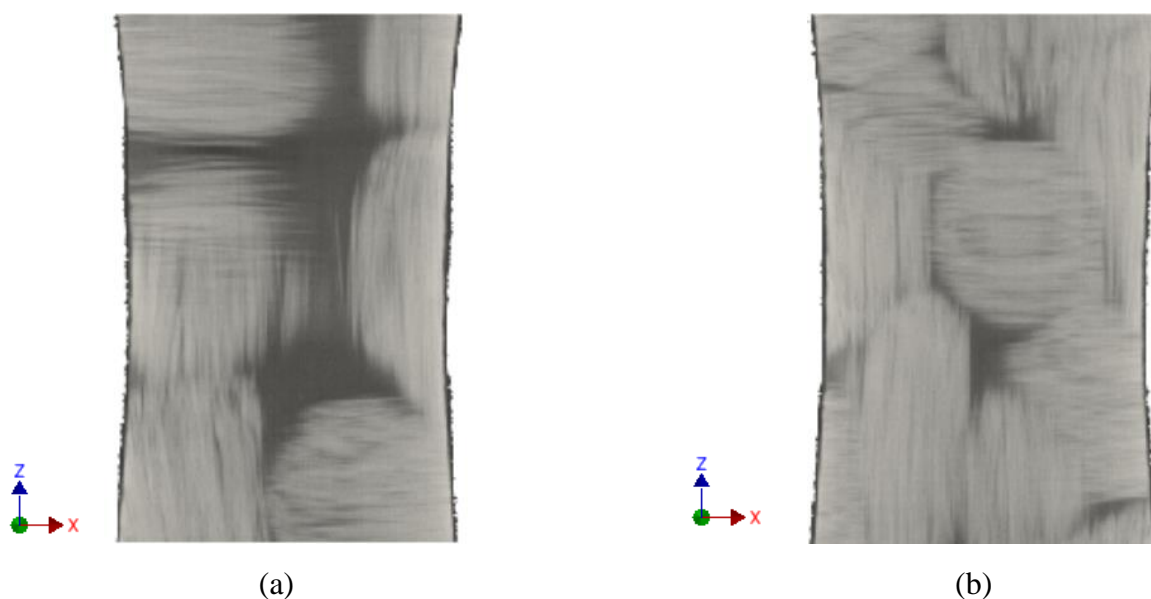


Slika 4-27 Segmentirani volumetrijski prikaz *WF* ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima

Uvidom u rezultate prikazane u tablici 4-10, uočava se kako najveću srednju vrijednost volumnog udjela imaju staklena vlakna (88,102%). Maksimalni volumni udio vlakana iznosi 95,931%, a ovaj je udio postignut u *presjeku 317* s normalom u smjeru osi *y* (slika 4-28(b)). Minimalni volumni udio staklenih vlakana iznosi 71,777%, a ovaj volumni udio vlakna zauzimaju u *presjeku 221* s normalom u smjeru osi *y* (slika 4-28(a)).

Tablica 4-10 Volumni udio staklenih vlakana i vinilesterske smole kod *WF* ispitnog uzorka, utvrđen segmentacijom slike dobivene CT skeniranjem ispitnog uzorka

	Staklena vlakna	Vinilesterska smola
Srednja vrijednost volumnog udjela	88,102%	11,898%
Minimalni volumni udio	71,777% (<i>presjek 221</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)	4,069% (<i>presjek 317</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)
Maksimalni volumni udio	95,931% (<i>presjek 317</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)	28,223% (<i>presjek 221</i> s normalom paralelnom s <i>y</i> osi)



Slika 4-28 (a) *Presjek 317 s minimalnim udjelom vlakana* i (b) *presjek 221 s maksimalnim udjelom vlakana*. Spaljivanjem četiriju ispitnih uzoraka na 600°C s vremenom trajanja od četiri sata, mjerenjem mase ostatka neisparenog materijala te usporedbom s početnom masom uzorka, odnosno slijeđenjem procedure opisane u poglavlju 4.4.1, utvrđena je kod ispitnih uzoraka *WF* arhitekture vlakana srednja vrijednost masenih udjela staklenih vlakana u iznosu od 72,08% (tablica 4-11).

Tablica 4-11 Rezultati utvrđivanja masenog udjela staklenih vlakana kod *WF* ispitnih uzoraka

Uzorak	Masa lončića (g)	Masa lončića + masa uzorka (g)	Masa uzorka (g)	Masa lončića + Masa ostatka (g)	Masa ostatka (g)	Maseni udio ostatka (%)
1	26,6710	31,5016	4,8306	30,1587	3,4877	72,20
2	28,3091	33,1533	4,8422	31,8337	3,5246	72,76
3	22,1235	27,3010	5,1775	25,8065	3,8630	71,13
4	21,8196	26,8778	5,0582	25,4739	3,6543	72,25

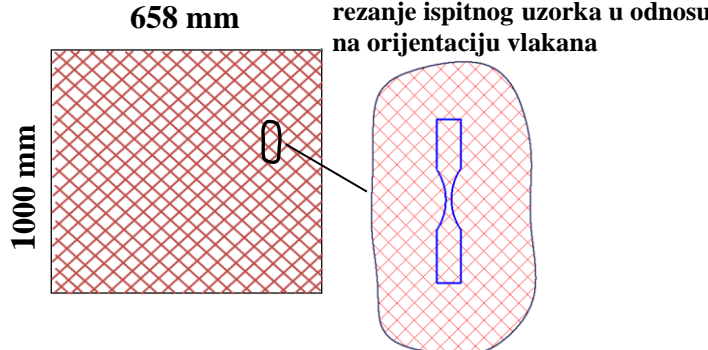
Srednja vrijednost masenog udjela ostatka: 72,08 %

4.4.4. Vinilesterska smola ojačana staklenim vlaknima *AP* arhitekture

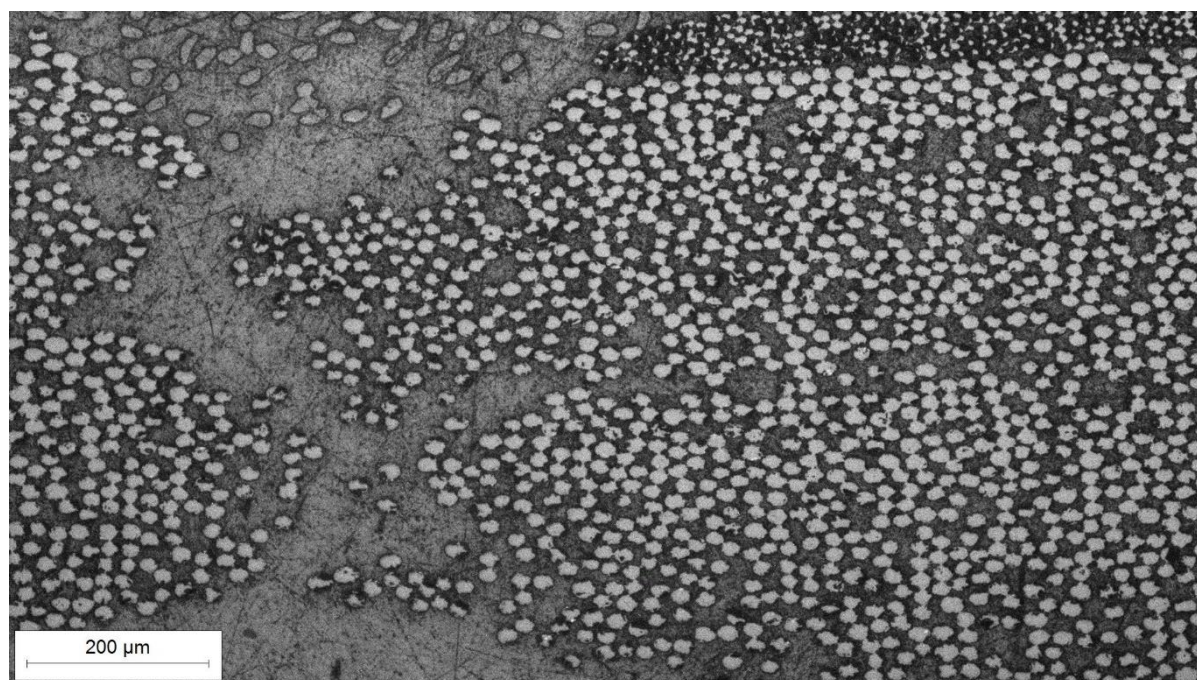
Kao što se može vidjeti u tablici 4-12, postupkom vakuumske infuzije proizvedena je kompozitna ploča pravokutnog oblika dimenzija 1000 mm × 658 mm, a debljina ploče iznosila je 5 mm. Kao ojačalo su korišteni slojevi pletenih staklenih vlakana debljine 0,86 mm, čija je površinska masa iznosila 1182 g/m². Korišteno je ukupno 6 slojeva, naizmjenice postavljenih pod kutovima +45°, odnosno -45°. Rezanjem ispitnog uzorka ostvarena je orijentacija

poprečnih i uzdužnih staklenih vlakana od $+45^\circ$ i -45° u odnosu na njegovu uzdužnu os.

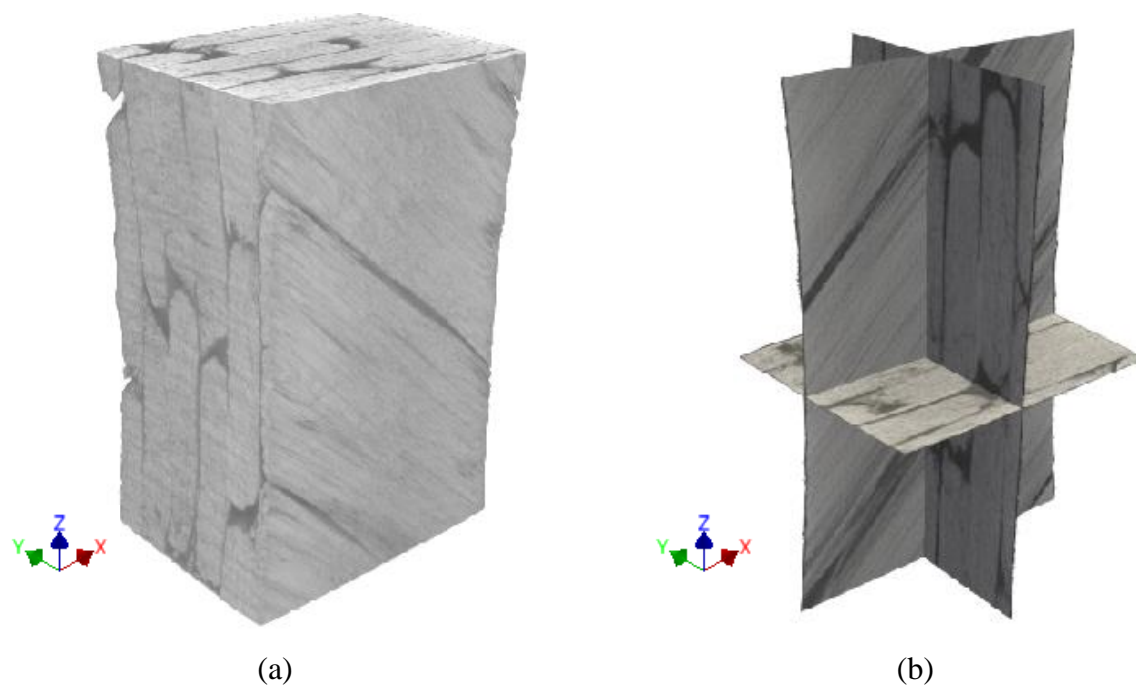
Tablica 4-12 Dimenzije kompozitne ploče s *AP* arhitekturom vlakana, orijentacija rezanja ispitnog uzorka u odnosu na orijentaciju vlakana te osnovne informacije o korištenim slojevima

	<p>TIP POLUPROIZVODA: kontinuirana jednosmjerna vlakna</p> <p>POVRŠINSKA MASA: 1182 g/m²</p> <p>DEBLJINA SLOJA: 0,86 mm</p> <p>BROJ SLOJEVA: 6</p> <p>NAČIN SLAGANJA: slojevi naizmjenice okretani $+45^\circ / -45^\circ$</p>
---	---

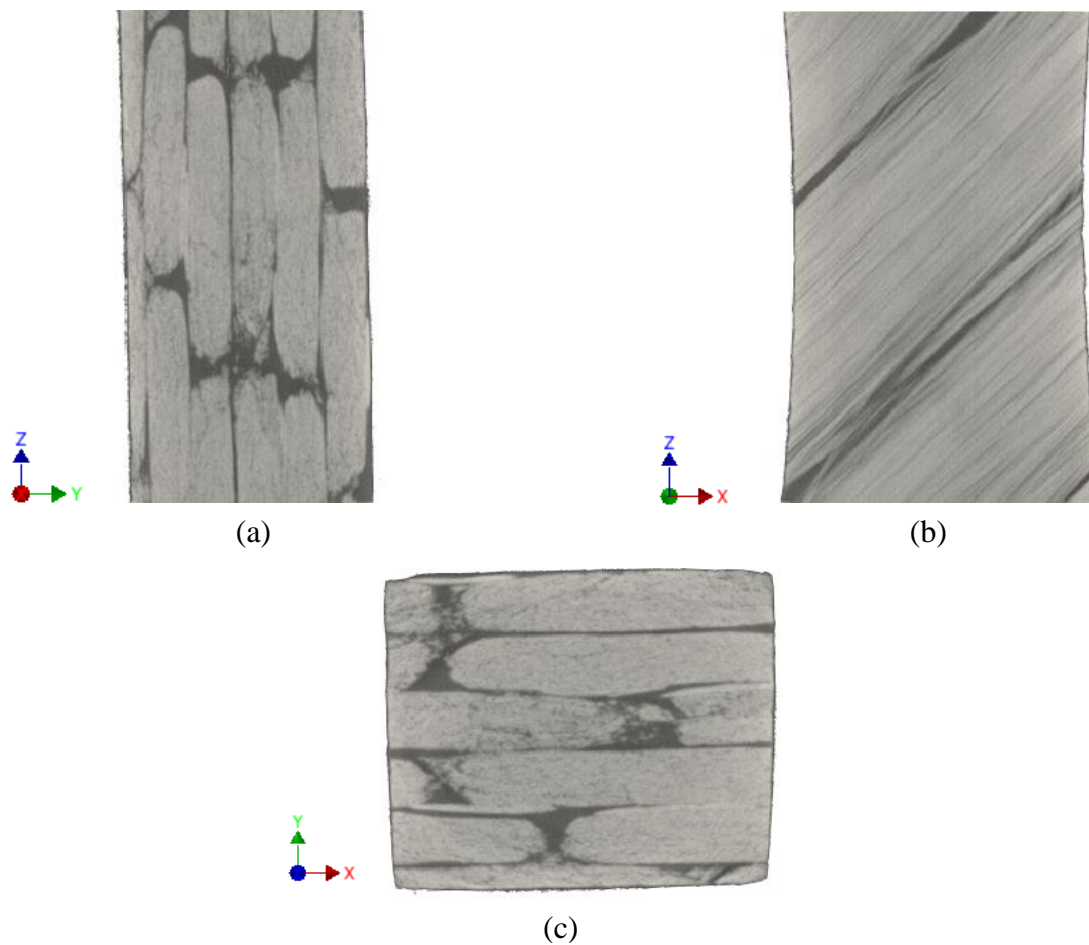
Segmentacijom slike poprečnog presjeka ispitnog uzorka dobivene primjenom optičkog mikroskopa određeni su volumni udjeli konstituenata *AP* ispitnog uzorka u iznosu od 89,5% za staklena vlakna i 10,5% za matricu. Prikaz mikrostrukture poprečnog presjeka ovog ispitnog uzorka snimljen optičkim mikroskopom pri povećanju $100\times$ dan je na slici 4-29.



Slika 4-29 Poprečni presjek ispitnog uzorka *AP* arhitekture vlakana, debljine 5 mm, pri povećanju $100\times$. Na slici 4-30(a) prikazan je rekonstruirani volumen navedenog uzorka, dok slika 4-30(b) prikazuje presjeke u težištu ispitnog uzorka. Dodatno je na slici 4-31 prikazana mikrostruktura u ravninama x - y , x - z i y - z . Na navedenim je slikama vidljivo kako se mikrostruktura promatranog volumena sastoji od kontinuiranih staklenih vlakana orijentiranih pod $+45^\circ$ i -45° u odnosu na uzdužnu os uzorka koje zajedno drži vinilesterska smola.

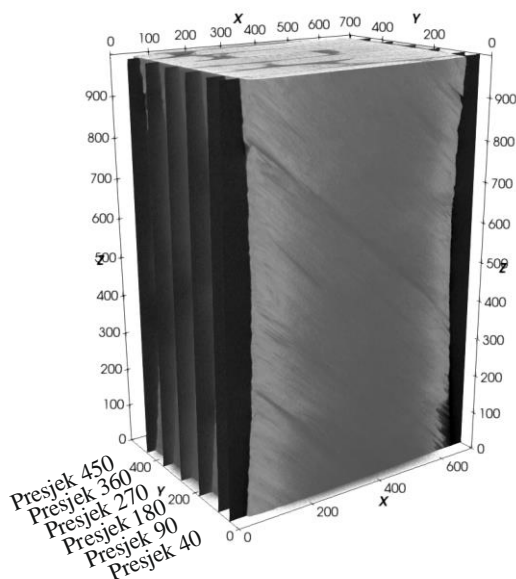


Slika 4-30 (a) Rekonstruirani volumen *AP* ispitnog uzorka i (b) prikaz presjeka u težištu *AP* ispitnog uzorka



Slika 4-31 Presjeci u težištu *AP* ispitnog uzorka u (a) *y-z*, (b) *x-z* i (c) *x-y* ravnini

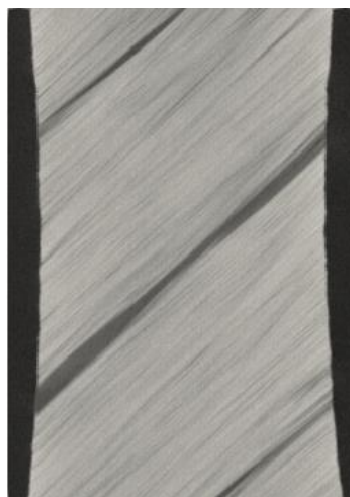
Na slici 4-33 prikazan je rekonstruirani volumen *AP* ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih slojeva (definiranih preko slike 4-32) pri čemu je normala označenih presjeka paralelna s osi *y*. Nadalje, na prikazanim je presjecima (slika 4-33) vidljiva arhitektura staklenih vlakana u slojevima, dok mjehurići zraka nisu uočeni. Na prikazanim se presjecima može još jasnije uočiti kako su slojevi staklenih vlakana naizmjenično orijentirani pod $+45^\circ$ i -45° . Preliminarno se zaključuje kako je prikazana mikrostruktura prikladna za mjerenja cijelog polja pomaka primjenom DVC metode, pošto je moguće uočiti granicu između konstituenata.



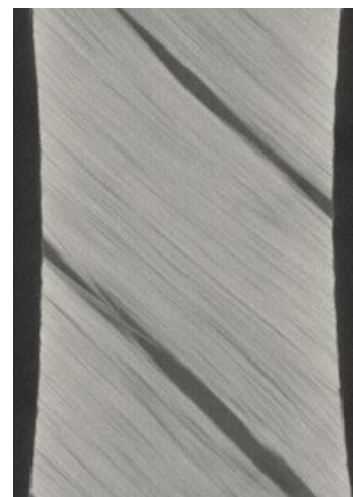
Slika 4-32 Rekonstruirani volumen *AP* ispitnog uzorka s označenim presjecima različitih slojeva s normalom koja odgovara osi *y*



Presjek 40



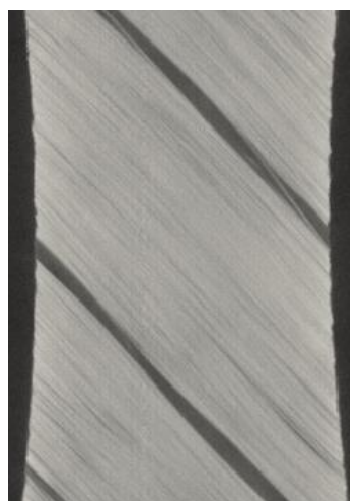
Presjek 90



Presjek 180



Presjek 270



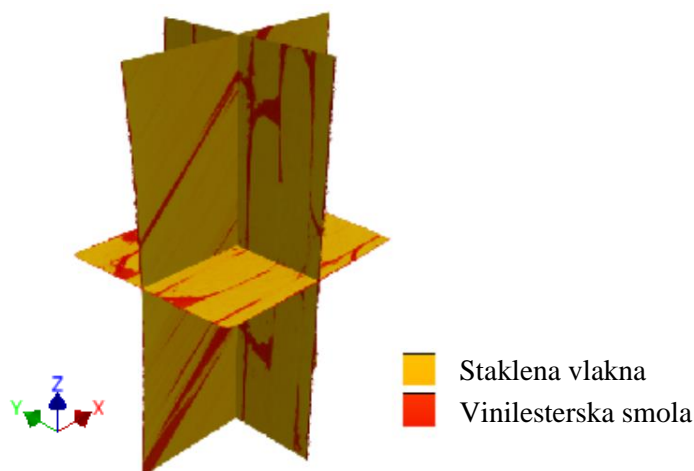
Presjek 360



Presjek 450

Slika 4-33 Različiti presjeci *AP* ispitnog uzorka koji su paralelni s polaganjem slojeva

Rekonstrukcijom promatranog volumena, osim raspodjele pojedinih konstituenata i prikaza mikrostrukture, primjenom *ImageJ* programskog paketa za analizu slika dobiveni su i volumni udjeli pojedinih konstituenata u promatranom volumenu. Na slici 4-34 vidljiv je segmentirani 3D prikaz presjeka *AP* ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima.

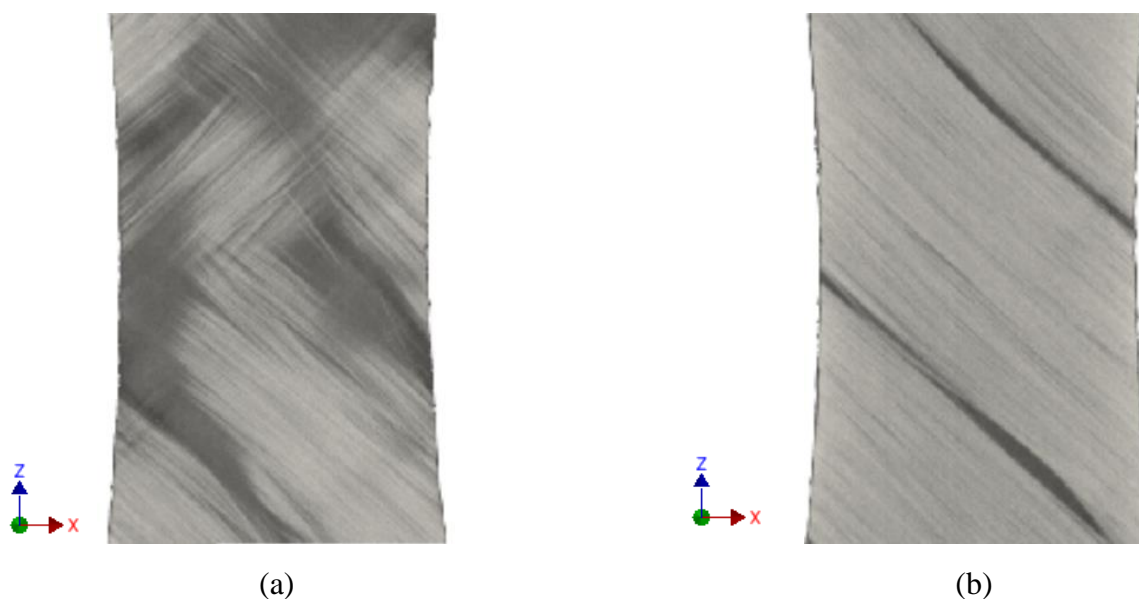


Slika 4-34 Segmentirani volumetrijski prikaz AP ispitnog uzorka s odgovarajućim konstituentima

Uvidom u rezultate prikazane u tablici 4-13, uočava se kako najveću srednju vrijednost volumnog udjela imaju staklena vlakna (84,744%). Maksimalni volumni udio vlakana iznosi 94,967%, a ovaj je udio postignut u *presjeku 198* s normalom u smjeru osi y (slika 4-35(b)). Minimalni volumni udio staklenih vlakana iznosi 56,031%, a ovaj volumni udio vlakna zauzimaju u *presjeku 58* s normalom u smjeru osi y (slika 4-35(a)).

Tablica 4-13 Volumni udio staklenih vlakana i vinilesterske smole kod AP ispitnog uzorka, utvrđen segmentacijom slike dobivene CT skeniranjem ispitnog uzorka

	Staklena vlakna	Vinilesterska smola
Srednja vrijednost volumnog udjela	84,744%	15,256%
Minimalni volumni udio	56,031% (<i>presjek 58</i> s normalom paralelnom s y osi)	5,033% (<i>presjek 198</i> s normalom paralelnom s y osi)
Maksimalni volumni udio	94,967% (<i>presjek 198</i> s normalom paralelnom s y osi)	43,969% (<i>presjek 58</i> s normalom paralelnom s y osi)



Slika 4-35 (a) *Presjek 58 s minimalnim udjelom vlakana* i (b) *presjek 198 s maksimalnim udjelom vlakana*
 Spaljivanjem četiriju ispitnih uzoraka na 600°C s vremenom trajanja od četiri sata, mjerenjem mase ostatka neisparenog materijala te usporedbom s početnom masom uzorka, odnosno slijeđenjem procedure također opisane u poglavlju 4.4.1, utvrđena je kod ispitnih uzoraka *AP* arhitekture vlakana srednja vrijednost masenih udjela staklenih vlakana u iznosu od 73,99% (tablica 4-14).

Tablica 4-14 Rezultati utvrđivanja masenog udjela staklenih vlakana kod *AP* ispitnih uzoraka

Uzorak	Masa lončića (g)	Masa lončića + masa uzorka (g)	Masa uzorka (g)	Masa lončića + Masa ostatka (g)	Masa ostatka (g)	Maseni udio ostatka (%)
1	44,7867	49,2973	4,5106	48,1337	3,3470	74,20
2	26,0783	31,2125	5,1342	29,8496	3,7713	73,45
3	25,5968	30,5119	4,9151	29,2498	3,6530	74,32
4	28,7073	33,5547	4,8474	32,2931	3,5858	73,97

Srednja vrijednost masenog udjela ostatka: 73,99 %

5. ODREĐIVANJE UTJECAJA ARHITEKTURE VLAKANA NA STANDARDNU MJERNU NESIGURNOST DVC METODE KOD ISPITIVANJA STAKLENIM VLAKNIMA OJAČANIH POLIMERA

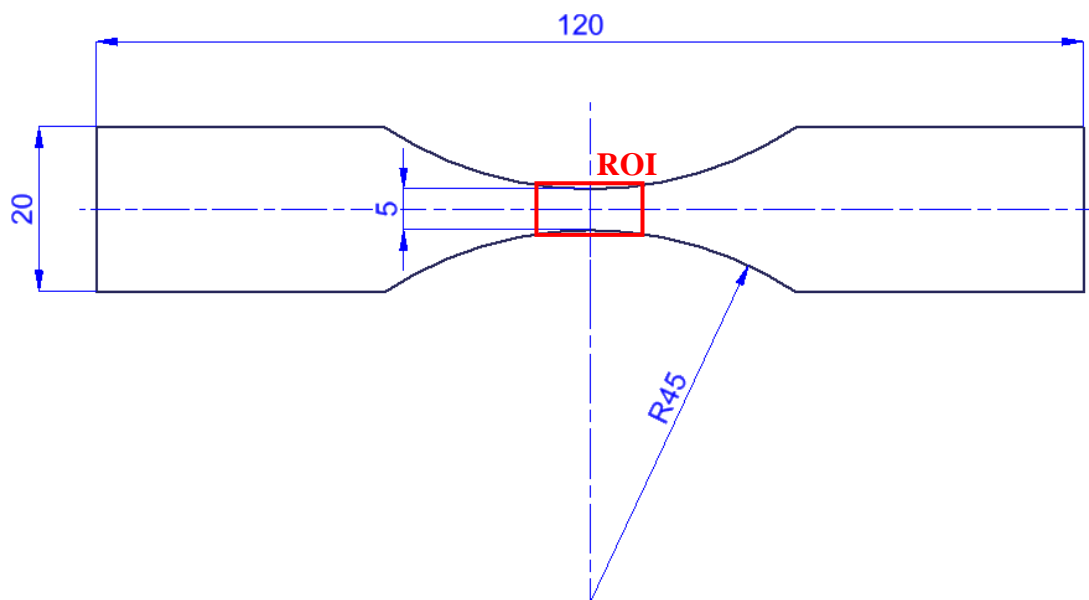
U ovom dijelu rada analizirana je standardna mjerna nesigurnost DVC metode primijenjene kod ispitivanja četiri različite izvedbe vlaknima ojačanih polimera. Polimerni kompoziti korišteni u svrhu ispitivanja ojačani su staklenim vlaknima, pri čemu su različite izvedbe materijala uzoraka ostvarene primjenom specifičnih arhitektura vlakana. Primjenom laboratorijske tomografije skenirani su ispitni uzorci te su, ovisno o izvedenoj arhitekturi vlakana, zabilježeni različiti kontrasti mikrostrukture na rekonstruiranim volumenima. Za svaku arhitekturu vlakana određena je standardna mjerna nesigurnost pomaka i deformacija globalne DVC metode, pri čemu se mjerenje pomaka (tj. korelacija) provodilo nad dva uzastopno registrirana CT skena u neopterećenom stanju, bez pomaka krutog tijela [137]. Koristeći globalni DVC algoritam, za svaku se izvedbu materijala ispitnog uzorka utvrđivala mjerna nesigurnost izmjerenih pomaka i izračunatih deformacija s obzirom na veličinu elemenata primijenjenih mreža konačnih elemenata. Usporedbom dobivenih rezultata određena je minimalna veličina diskretizacije promatranog volumena kod kojeg će promatrane arhitekture vlakana imati zadovoljavajuću točnost pomaka izmjerenih DVC metodom, čime se omogućava pouzdan izračun vrijednosti volumetrijskih deformacija. Kako bi se omogućilo korištenje finije diskretizacije promatranog volumena (tj. mreže konačnih elemenata s manjom duljinom elementa), korištena je globalna DVC metoda s implementiranom mehaničkom regularizacijom. Primjenom mehaničke regularizacije pretpostavlja se elastično rješenje traženog polja pomaka koje dozvoljava analizu siromašne mikrostrukture smanjujući značajno time utjecaj šuma uslijed zabilježavanja CT skenova.

5.1. Ispitni uzorci

Ispitni uzorci korišteni u ovom dijelu ispitivanja izrezani su iz četiriju kompozitnih ploča debljine 5 mm, proizvedenih postupkom vakuumske infuzije. Korištenjem različitih izvedbi slojeva staklenih vlakana te odabirom specifičnog načina slaganja slojeva staklenih vlakana unutar vinilesterske matrice kreirane su četiri različite vrste materijala, odnosno postignute su četiri različite arhitekture vlakana. Radi se o materijalima čija se arhitektura vlakana unutar ovog rada označava s *MAT*, *UD*, *WF* i *AP* te čiji su postupak proizvodnje kao i karakterizacija mikrostrukture detaljno objašnjeni u poglavlju 4.4.

Iz svake su od četiriju kompozitnih ploča tehnologijom rezanja vodenim mlazom izrezani

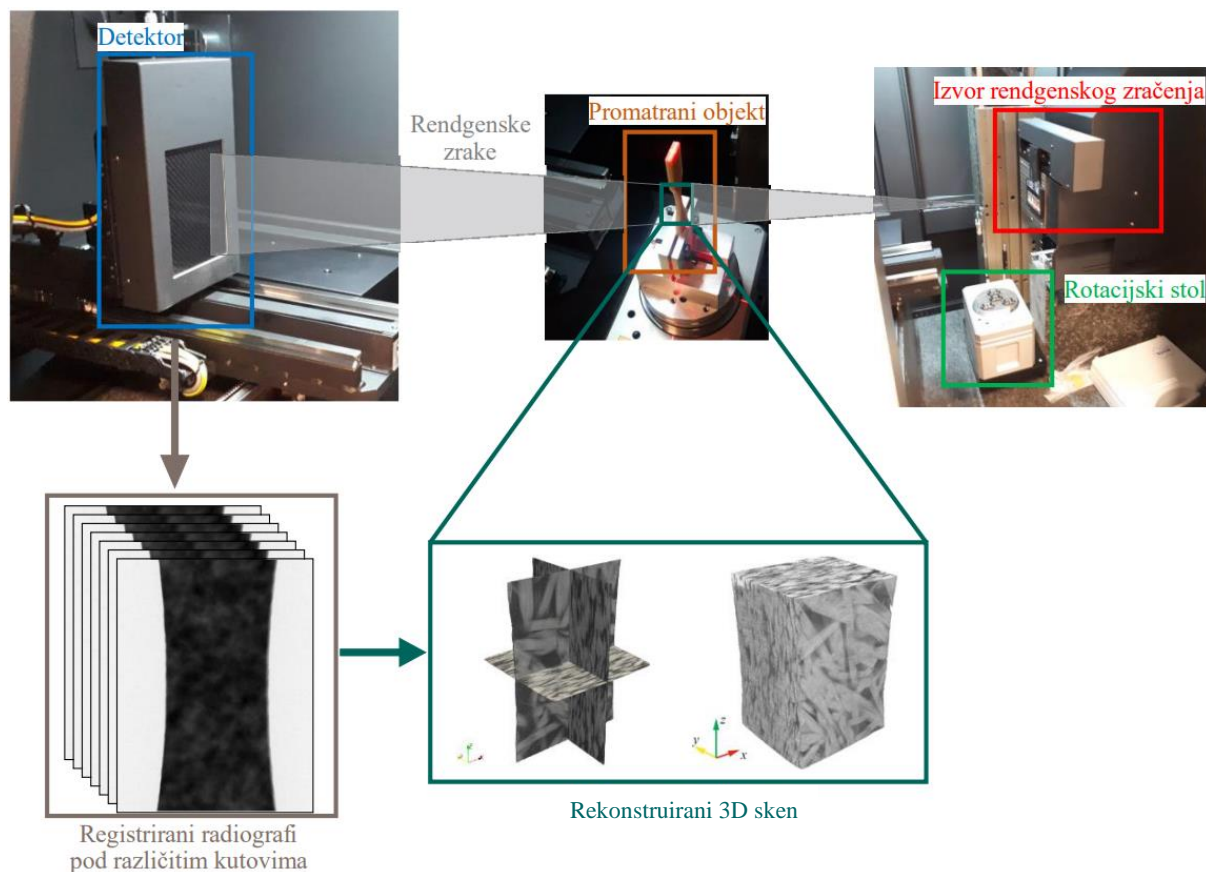
ispitni uzorci čija je geometrija prikazana na slici 5-1. Središnji dio ispitnih uzoraka simetrično je stanjen formirajući na taj način ligament širine 5 mm, što je jednako debljini ispitnih uzorka. Na taj se način postiglo da centralni (tj. minimalni) poprečni presjek uzorka ima kvadratni oblik (tj. 5×5 mm), pa će uslijed rotacije ispitnog uzorka pri skeniranju duljina prodiranja X-zračenja kroz materijal biti otprilike jednaka za svaku projekciju unutar područja interesa.



Slika 5-1 Geometrija i dimenzije (mm) ispitnih uzoraka korištenih za analizu utjecaja arhitekture vlakana na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode. Crvenim pravokutnikom prikazano je skenirano područje interesa (ROI)

5.2. Eksperimentalni protokol

Skeniranje ispitnih uzoraka provedeno je na laboratorijskom CT uređaju *Werth TomoScope S* u tvrtki *Yazaki Europe Limited*. Za svaki uzorak registrirana su dva uzastopna skena u neopterećenom stanju. Pošto su skenovi zabilježeni u neopterećenom stanju, nije bilo potrebno koristiti *in-situ* ispitni uređaj, već su ispitni uzorci pričvršćeni pomoću jednostavne naprave koja je osiguravala nepomičan vertikalni položaj uzorka u centru rotacijskog stola, kao što je prikazano na slici 5-2.



Slika 5-2 Eksperimentalni postav korišten za određivanje utjecaja arhitekture vlakana na standardnu mjernu nesigurnost pomaka DVC metode

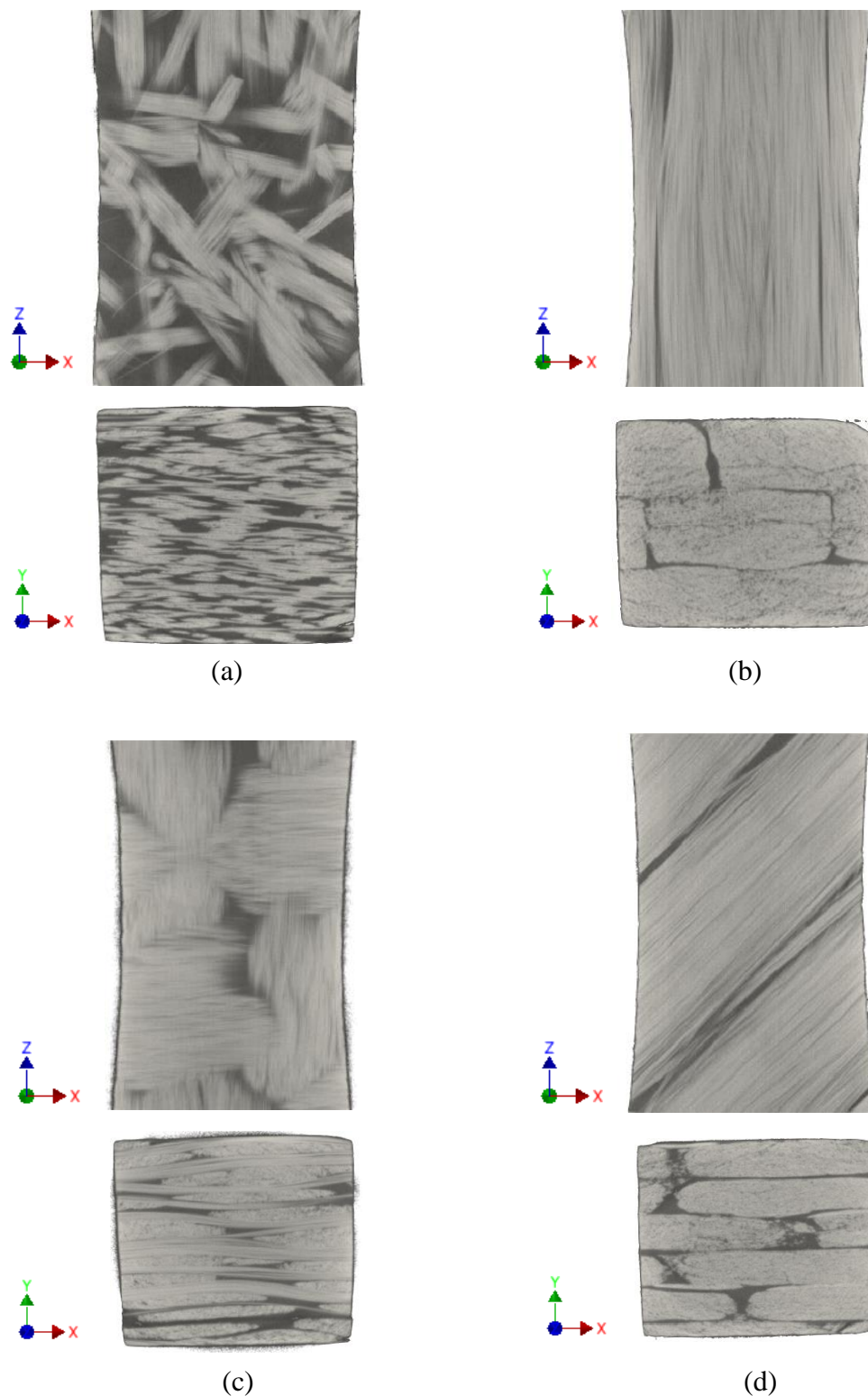
Snimanje dvodimenzionalnih projekcija ispitnog uzorka pod različitim kutovima provedeno je rotacijom zakretnog stola CT uređaja za diskretan broj kutnih pomaka. Snimanje projekcija provedeno je pritom u trenucima između pojedinih kutnih pomaka, kada rotacijski stol miruje, a trajalo je do onog trenutka dok nije ostvarena rotacija za puni krug. Na ovaj je način prikupljeno 800 dvodimenzionalnih projekcija po ispitnom uzorku, što je u kombinaciji s brojem zabilježenih slika po jednoj projekciji (eng. *Frame Average*) značilo da je za skeniranje jednog uzorka bilo potrebno otprilike dva i pol sata. Proces rekonstrukcije volumena iz zabilježenih dvodimenzionalnih projekcija temeljen je na filtriranoj inverznoj projekciji (eng. *Filtered Back Projection*) iz koje je dobiven 3D model vokselu s različitim vrijednostima skale sivih tonova, pri čemu fizikalna veličina vokselu iznosi 8,7 μm . Kako bi se minimizirao efekt zamućenja slike koji se javlja pri korištenju filtrirane inverzne projekcije, proveden je postupak filtriranja pri čemu je korišten aluminijski filter debljine 1 mm. Kao rezultat rekonstrukcije volumena iz zabilježenih dvodimenzionalnih projekcija, za svaki ispitni uzorak, dobiven inicijalni sken dimenzija $1133 \times 1133 \times 1461$ vokselu, koji je potom obrezan na veličinu $540 \times 702 \times 998$ vokselu. Time je, uzevši u obzir postignutu prostornu rezoluciju od 8,7 μm /vokselu,

definiran volumen promatranog područja interesa približnih dimenzija $4,7 \times 6,1 \times 8,7 \text{ mm}^3$. Detaljan opis parametara skeniranja dan je u tablici 5-1.

Tablica 5-1 Parametri CT skeniranja kod određivanja utjecaja arhitekture vlakana na standardnu mjernu nesigurnost pomaka DVC metode

CT uređaj	<i>Werth TomoScope S</i>
Izvor X zračenja	FOMM 230 01.WTT; od firme Werth
Cilj / Anoda	Transmisijski mod
Filter	Al (1 mm)
Napon zračenja	150 kV
Struja zračenja	160 μA
Promjer žarišne točke	5 μm
Udaljenost izvor zračenja - detektor	510 mm
Udaljenost izvor zračenja – ispitni objekt	185 mm
Detektor	TD300V
Definicija	1133 \times 1461 piksela (2 \times 2 biniranje)
Broj projekcija	800
Ukupan kutni pomak	360°
Broj zabilježenih slika	20 po jednoj projekciji
Brzina snimanja slika	333 fps
Trajanje skeniranja	2 h 35 min
Rekonstrukcijski algoritam	Filtrirana inverzna projekcija
Amplituda sive skale	8 bitova
Veličina obrezanog volumena	540 \times 702 \times 998 voksela (nakon obrezivanja)
Vidno polje	4,7 \times 6,1 \times 8,7 mm^3 (nakon obrezivanja)
Mjerilo slike	8,7 μm /voksel
Uzorak	Prikazan na slici 5-3

Kvalitativne informacije o arhitekturi vlakana četiriju izvedbi staklenim vlaknima ojačanih polimera dane su preko slika središnjih presjeka kroz x - z , odnosno x - y ravninu (slika 5-3).



Slika 5-3 Središnji presjeci u $z-x$ i $y-x$ ravninama kod ispitnog uzorka (a) *MAT*, (b) *UD*, (c) *WF* i (d) *AP* arhitekture vlakana

Vizualnim pregledom središnjih presjeka rekonstruiranih volumena četiriju ispitnih uzoraka može se preliminarno zaključiti kako uzorci s *MAT* arhitekturom vlakana (slika 5-3(a)), u odnosu na preostala tri ispitna uzorka, imaju mikrostrukturu koja je najpogodnija za mjerenje

polja pomaka DVC metodom. Na presjecima na slici 5-3 vidi se naime, kako u odnosu na druge ispitne uzorke, *MAT* arhitektura ima najmanji udio vlakana u matrici, što u kombinaciji sa stohastičkim rasporedom vlakana unutar matrice rezultira najkvalitetnijom teksturom za metodu korelacije digitalnih volumena. Kod ispitnih uzoraka *WF* (slika 5-3(c)) i *AP* (slika 5-3(d)) arhitekture vlakana mogu se očekivati pouzdani rezultati mjerenja DVC metodom pošto je na slikama uočljiva jasna granica između konstituenata. S druge strane, polimerni ispitni uzorci ojačani *UD* arhitekturom vlakana (slika 5-3(b)) bit će najizazovniji za korelaciju zbog visokog udjela vlakana u matrici te malog gradijenta sive skale tonova između susjednih voksela.

5.3. Mjerenje 3D polja pomaka

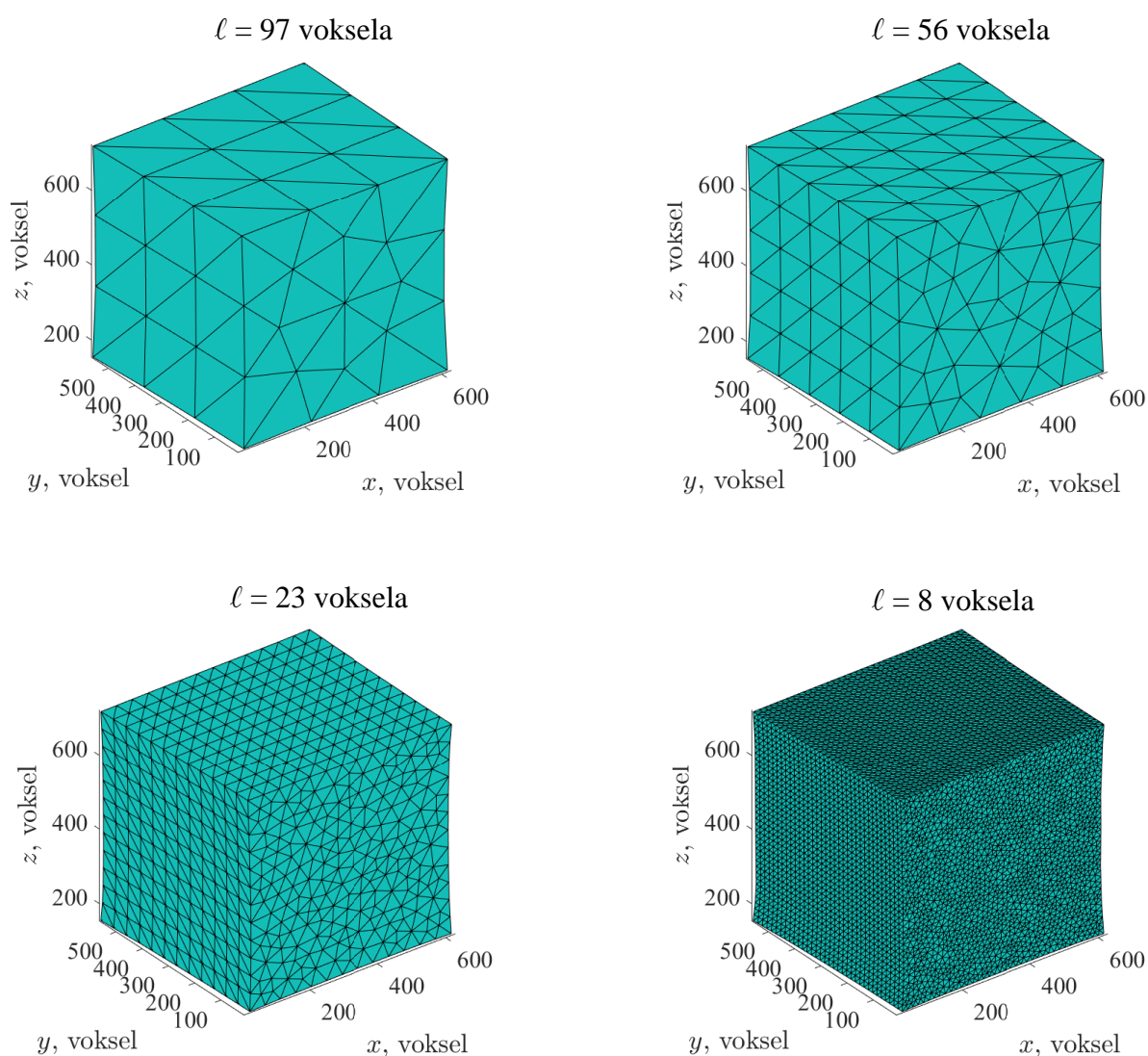
Kod određivanja utjecaja arhitekture vlakana na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode, provedeno je mjerenje polja pomaka na dva uzastopno zabilježena skena u neopterećenom stanju. Trodimenzionalna mjerenja polja pomaka provedena su na četiri različite arhitekture staklenim vlaknima ojačanog polimera primjenom standardnog globalnog DVC algoritma (tj. standardnog FE-DVC algoritma), opisanog u poglavlju 3.3.2. Nadalje, s ciljem smanjenja mjerne nesigurnosti kod fine diskretizacije promatranog volumena, korišten je regularizirani DVC protokol (vidi poglavlje 3.3.3). Oba korelacijska protokola implementirana su u *Correli 3.0* algoritmu [138] razvijenom u programskom paketu *MATLAB*. Prije provođenja DVC analize, kreirane su 3D mreže konačnih elemenata koje vjerodostojno opisuju geometriju ispitnog uzorka. Kako bi se odredile granice ispitnih uzoraka, volumetrijska je slika segmentirana uzimajući u obzir nijanse sive boje koje se odnose na okolni zrak. Potom je odabrano područje interesa (ROI) binarne slike diskretizirano mrežom konačnih elemenata koristeći *iso2mesh* algoritam [139], nakon čega je dobivena mreža izvezena kao STL datoteka. U završnoj fazi pripreme mreže za provedbu DVC analize izgladene su vanjske površine koristeći programski kôd *GMSH* [140].

Za utvrđivanje mjerne nesigurnosti DVC metode promatrano je područje interesa diskretizirano mrežom konačnih elemenata veličine 97, 76, 56, 42, 30, 23, 16, 12 i 8 voksela, pri čemu su korišteni tetraedarski konačni elementi prvog reda (T4) [141] opisani su linearnim funkcijama oblika. Pritom je kao kriterij podudaranja slika u referentnoj i deformiranoj konfiguraciji implementirana suma kvadrata razlika u DVC algoritam. Aproksimacija vrijednosti sive skale boje s čvornih pomaka mreže konačnih elemenata izvršena je kubičnom interpolacijom na razini voksela. Parametri DVC analize navedeni su u tablici 5-2, dok je na slici 5-4 dan primjer diskretizacije promatranog područja interesa *MAT* ispitnih uzoraka s konačnim

elementima duljine 97, 56, 23 i 8 voksel.

Tablica 5-2 Parametri standardnog DVC protokola kod određivanja utjecaja arhitekture vlakana na mjernu nesigurnost DVC metode

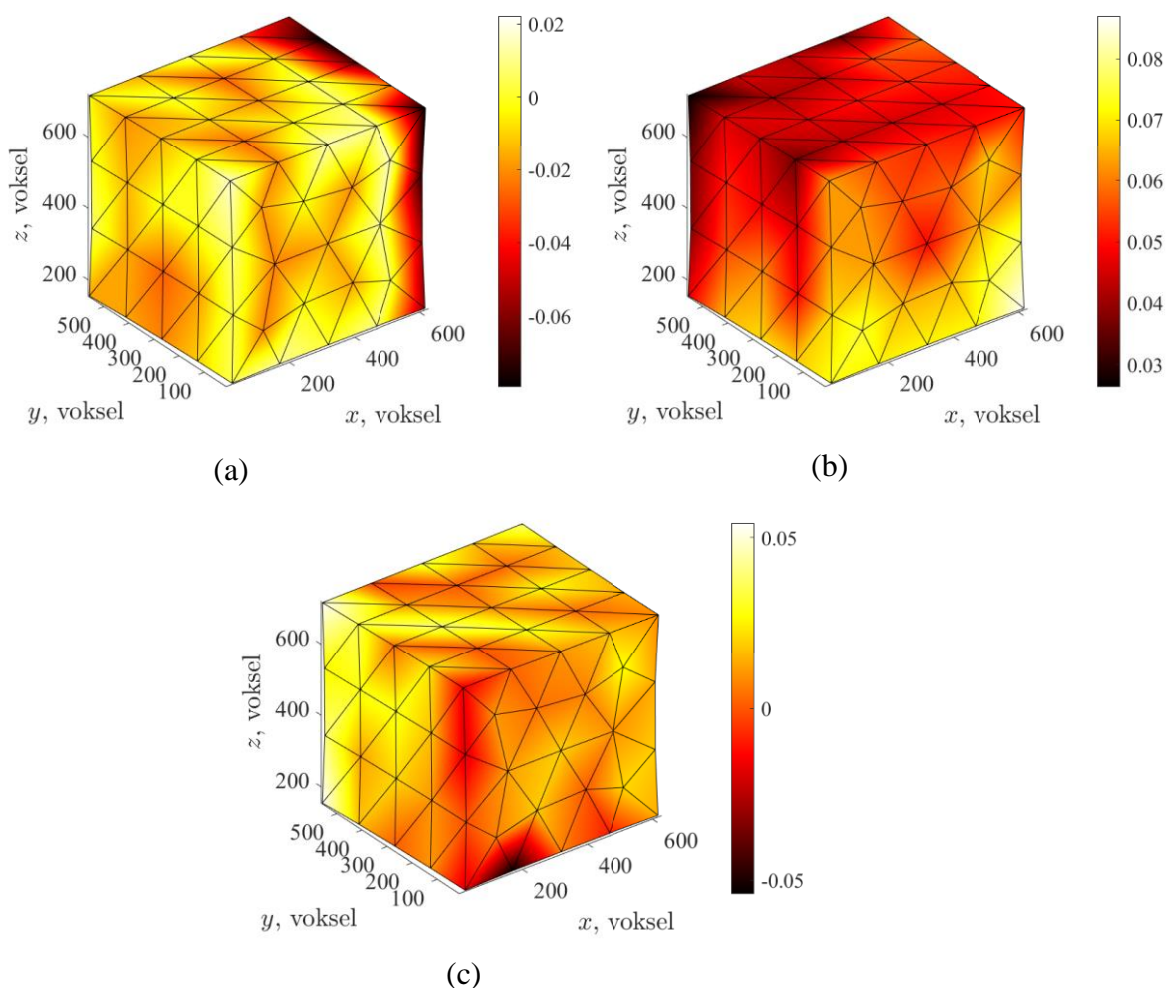
DVC algoritam	<i>Correli 3.0</i> [138]
Srednja veličina elementa (vokseli)	97, 76, 56, 42, 30, 23, 16, 12, 8
Funkcija oblika	Linearna funkcija (T4)
Kriterij podudaranja	Penalizirana suma kvadrata razlika (SSD)
Interpolacija	Kubična



Slika 5-4 Promatrano područje interesa ispitnog uzorka MAT arhitekture vlakana diskretizirano mrežom konačnih elemenata različite veličine

Primjer izmjerenih polja pomaka u x , y i z smjeru za slučaj MAT ispitnog uzorka, kada je korištena diskretizacija konačnim elementima veličine 76 voksel, dan je na slici 5-5, pri čemu

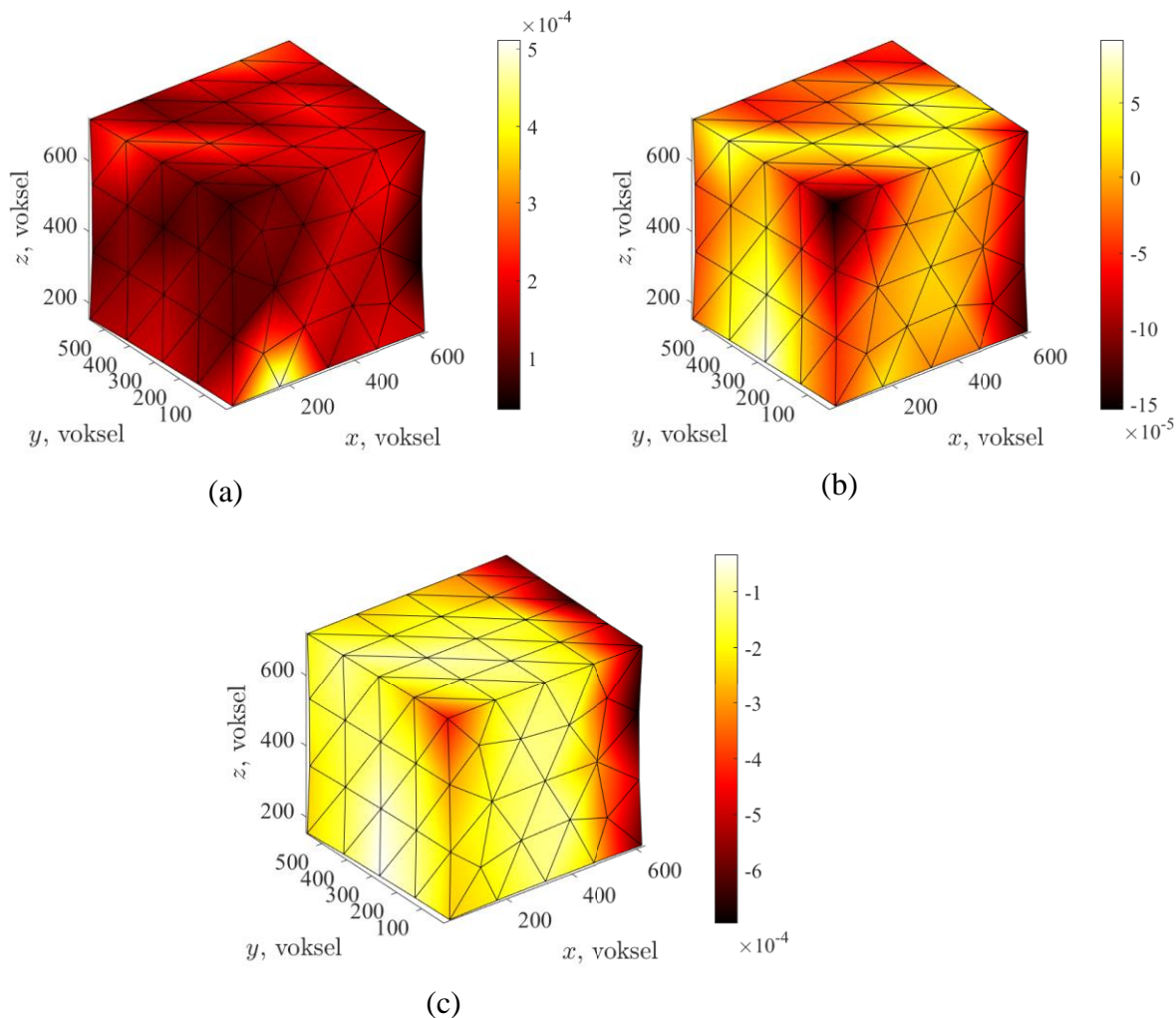
su povišene vrijednosti izmjerenih pomaka prikazane tamnijim nijansama boje. Kao što je prethodno navedeno, DVC metoda provedena je nad dva uzastopno registrirana CT skena u neopterećenom stanju. Usporedbom vrijednosti čvornih pomaka po pojedinim osima može se uočiti kako se za ovaj ispitni uzorak, pri odabranoj diskretizaciji, nešto izraženiji pomaci registrirani u z smjeru (slika 5-5(c)), dok su manje vrijednosti pomaka u registrirane u x smjeru (slika 5-5(a)), odnosno y smjeru (slika 5-5(b)). Na ovom se primjeru može također uočiti kako su vrijednosti izmjerenih pomaka po čvorovima stohastičkog karaktera, što vrijedi za svaku od triju promatranih osi. Osim kod *MAT* ispitnog uzorka, stohastički karakter izmjerenih čvornih pomaka, kao i nejednake vrijednosti čvornih pomaka po osima, primijećen je i kod preostalih triju ispitnih uzoraka, kada su korištene različite veličine diskretizacije.



Slika 5-5 Izmjerena polja pomaka (voksela) u (a) x smjeru, (b) y smjeru i (c) z smjeru za ispitni uzorak *MAT* arhitekture vlakana pri diskretizaciji konačnim elementima veličine 76 voksela

Iz izmjerenih polja pomaka izračunata su polja glavnih deformacija (slika 5-6). Polja deformacija također nemaju zabilježen mehanički signal, već čvorne lokalizacije glavnih

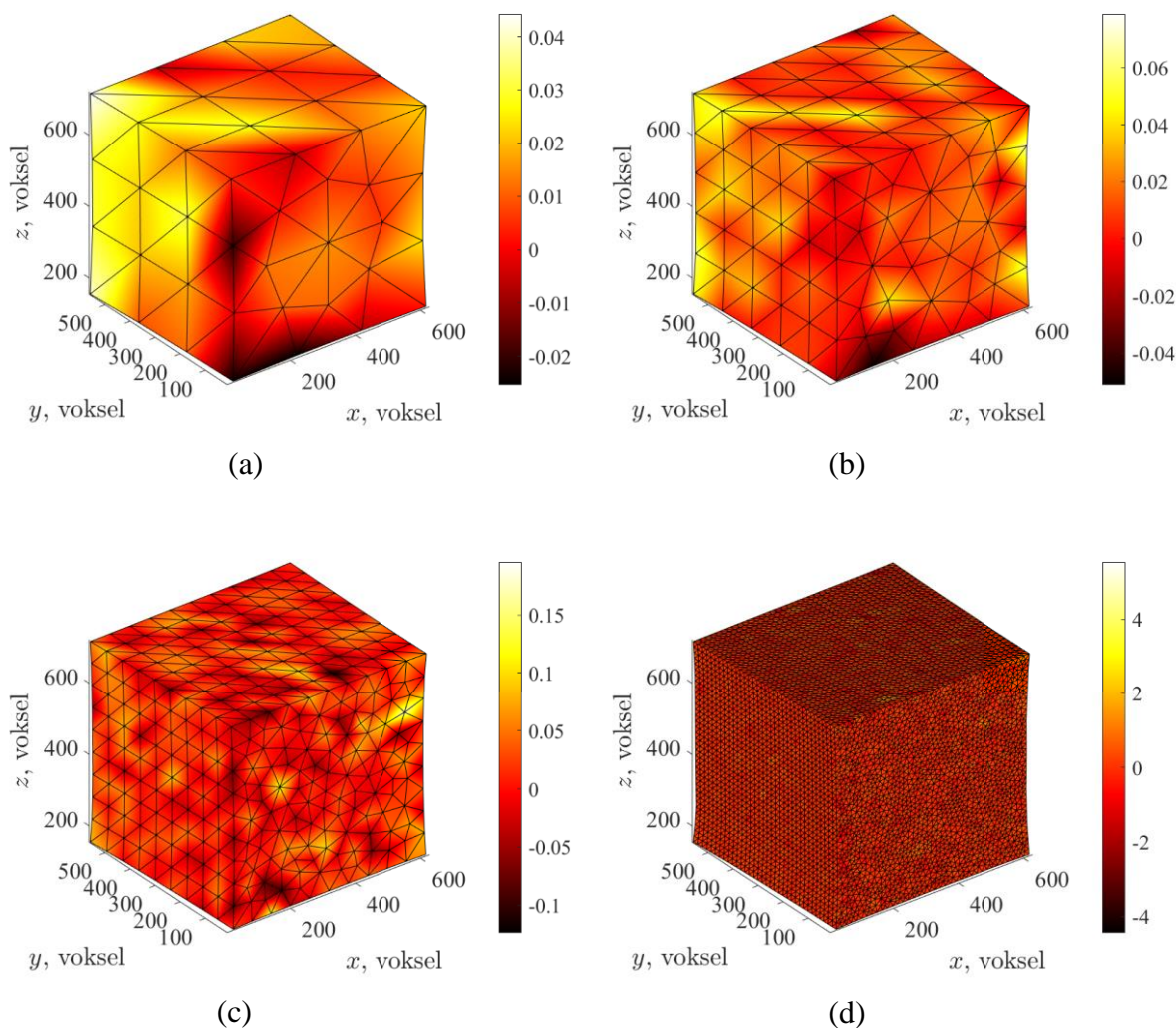
deformacija imaju stohastički karakter koji odgovara akvizicijskom šumu. Kvantitativno gledajući, polja glavnih deformacija dva su reda veličine manja od izmjerenih polja pomaka.



Slika 5-6 Izračunata polja glavnih deformacija (-) (a) ε_1 , (b) ε_2 i (c) ε_3 za MAT arhitekturu vlakana kod primjene mreže konačnih elemenata s prosječnom duljinom elementa $\ell = 76$ voksel

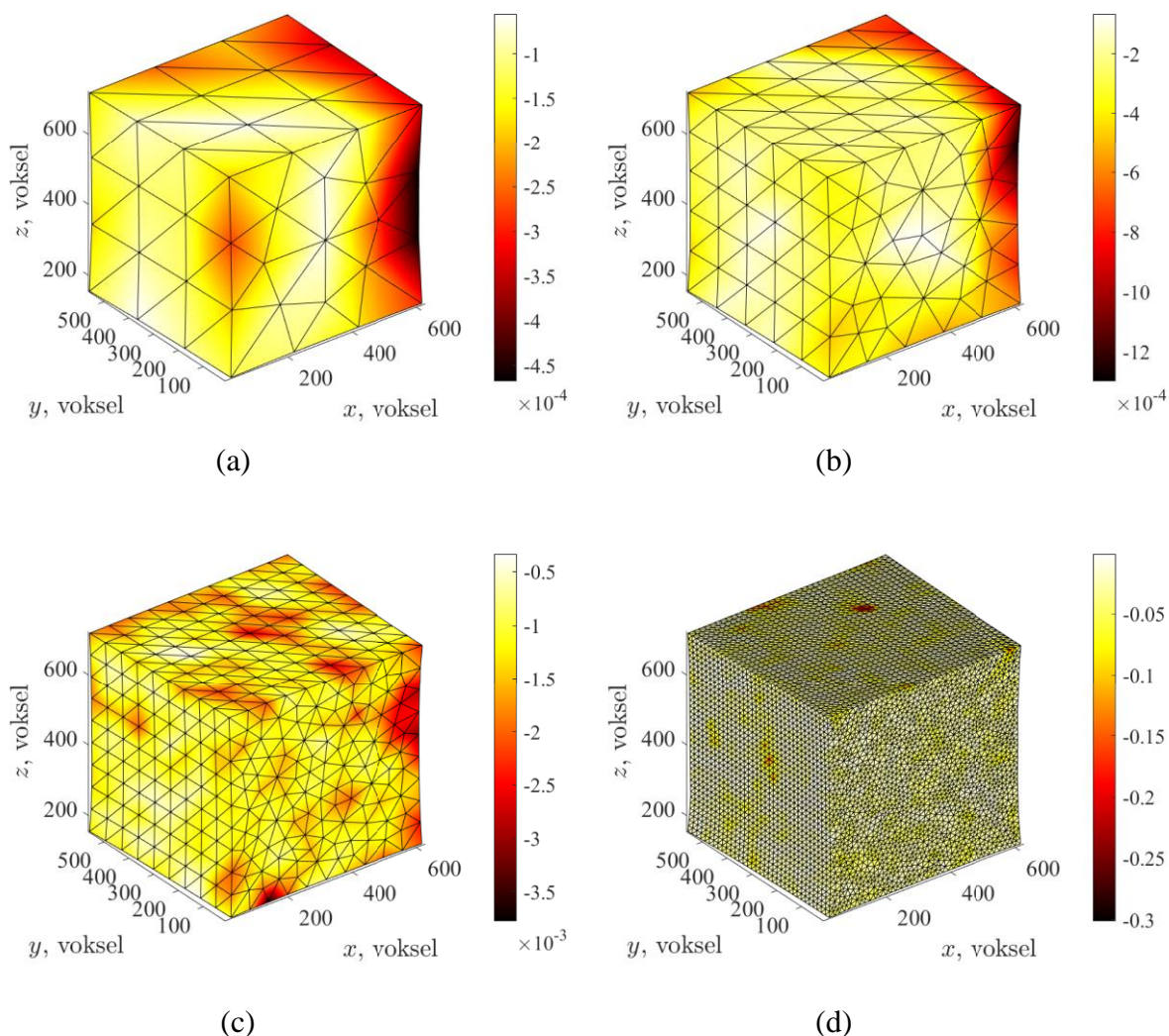
Osim usporedbe čvornih pomaka DVC metode izmjerenih u različitim smjerovima pri korištenju jedne diskretizacije mrežom konačnih elemenata, zanimljivo je također usporediti iznose izmjerenih čvornih pomaka kada se koriste diskretizacije mrežom konačnih elemenata različite veličine. U tom smislu vrijedi pogledati sliku 5-7, na kojoj su za ispitni uzorak MAT arhitekture vlakana prikazana izmjerena polja pomaka u z smjeru pri korištenju različitih diskretizacija. Primjećuje se kako korištenje većih elemenata rezultira manjim iznosima izmjerenih pomaka, dok s druge, finija diskretizacija, odnosno korištenje manjih konačnih elemenata, vodi ka većim izmjerenim pomacima DVC metode. Slika 5-7(a) tako predstavlja slučaj kada je korištena diskretizacija mrežom konačnih elemenata veličine 97 voksel, pri čemu su maksimalni izmjereni pomaci iznosili 0,04 voksel. Korištenje diskretizacije mrežom

konačnih elemenata veličine 8 voksel (Slika 5-7(d)), rezultiralo je izmjerenim maksimalnim pomacima od 4 voksel, dok su diskretizacije elementima veličine 56 (slika 5-7(b)), odnosno 30 voksel (slika 5-7(c)), rezultirale izmjerenim pomacima s vrijednostima između dviju krajnjih, prethodno navedenih vrijednosti. Valja također napomenuti kako je spomenuti efekt registriranja većih pomaka DVC metode pri korištenju finije diskretizacije primijećen za svaki od četiriju ispitivanih ispitnih uzoraka, i to u x , y i z smjeru. Ovo je u potpunosti u skladu s teorijskim objašnjenjem utjecaja prostorne rezolucija na mjernu nesigurnost DVC metode koja je detaljno razmatrana u poglavlju 3.4.1. Iz izmjerenih polja pomaka može se također uočiti kako su čvorni pomaci kod mreže konačnih elemenata s najmanjom prostornom rezolucijom ($\ell = 97$ voksel) dva reda veličina manji, nego kod primjene mreže s finom diskretizacijom od $\ell = 8$ voksel.



Slika 5-7 Izmjerena polja pomaka u z smjeru (vokseli) kod ispitnog uzorka MAT arhitekture vlakana pri diskretizaciji konačnim elementima veličine (a) 97, (b) 56, (c) 30 i (d) 8 voksel

Iz izmjerenih polja pomaka s različitim diskretizacijama (slika 5-7), izračunata su odgovarajuća polja glavnih deformacija (slika 5-8). Mehanički signal nije zabilježen na poljima najvećih glavnih deformacija. Povećanjem prostorne rezolucije mreže konačnih elemenata dolazi do lokalizacije glavnih deformacija u zonama koje su puno manje nego kod mreža grube diskretizacije.



Slika 5-8 Izračunata polja najvećih glavnih deformacija (-) za MAT arhitekturu vlakana kod primjene mreža konačnih elemenata s prosječnom duljinom elementa (a) $\ell = 97$ voksela, (b) $\ell = 56$ voksela, (c) $\ell = 30$ voksela i (d) $\ell = 8$ voksela

Uzevši u obzir činjenicu kako iznos pomaka dobivenih korelacijom dva uzastopno zabilježena skena neopterećenog stanja raste s primjenom manjih konačnih elemenata, odnosno kako se primjenom finije diskretizacije povećava mjerna nesigurnost DVC metode, a istovremeno znajući kako je primjenom finije diskretizacije omogućeno kvalitetnije promatranje i opisivanje diskontinuiteta i lokalizacijskih fenomena (npr. mikropukotina u unutrašnjosti vlaknima

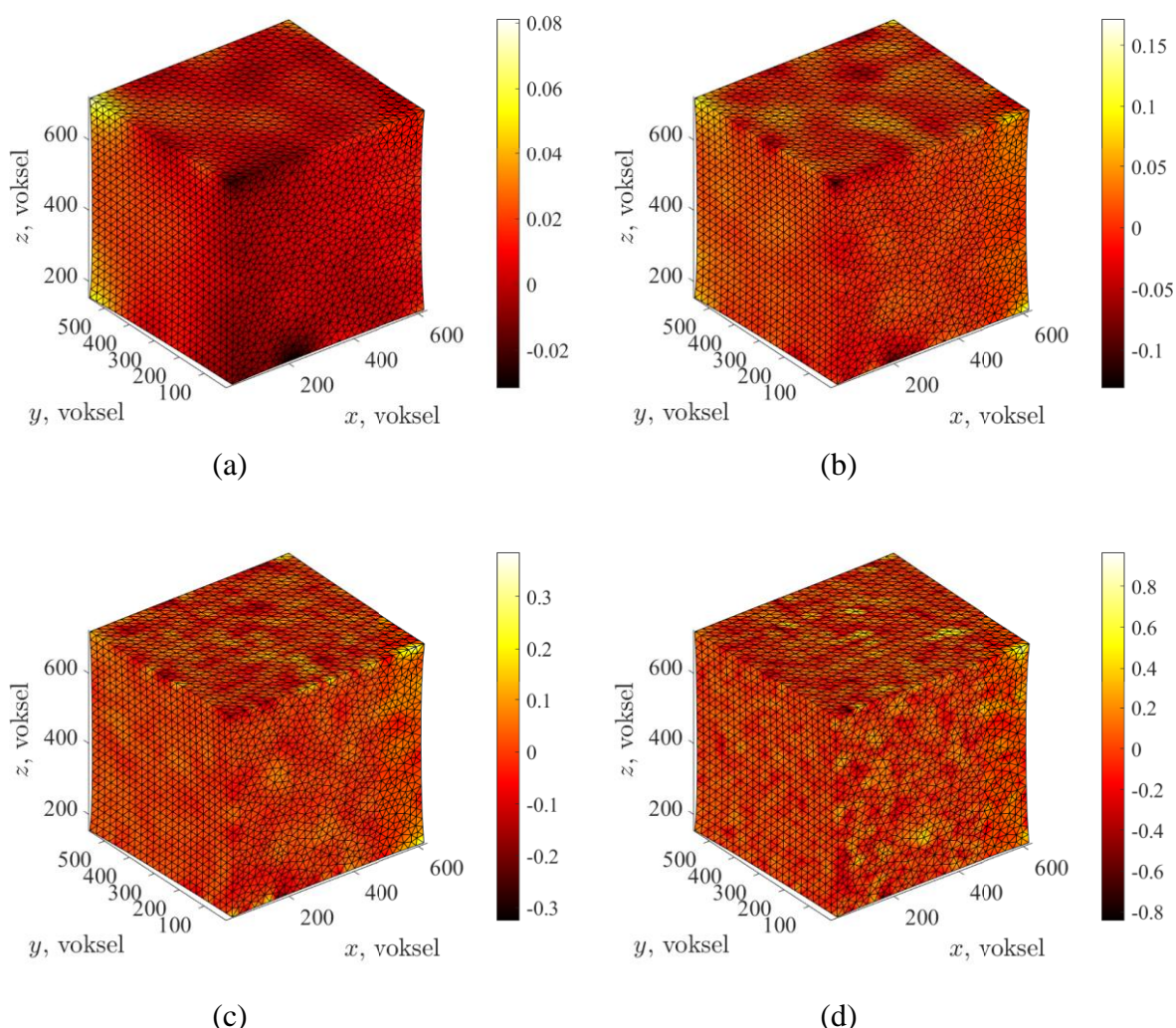
ojačanih kompozita), može se zaključiti kako je, u kontekstu korištenja DVC metode u području eksperimentalne mehanike, poželjno koristiti što je moguće finiju diskretizaciju, pri čemu iznos mjerne nesigurnosti pomaka ne smije premašiti 10^{-1} voksel, što je granična vrijednost definirana u [4], a odnosi se na ispitivanje čvrstih tijela. Kao što je objašnjeno u poglavlju 3.3.3, mjernu nesigurnost DVC metode moguće je dodatno sniziti primjenom mehaničke regularizacije, čime se postiže da DVC algoritmi pri korelaciji registriraju niže vrijednosti lažnih pomaka (koji su inače uobičajeno prisutni kao posljedica šumova, artefakata i sl.) nego što je to slučaj kod standardnog DVC algoritma. Stoga se primjenom mehaničke regularizacije omogućava analiza siromašnije mikrostrukture te se značajno smanjuje utjecaj šuma uslijed zabilježavanja CT skenova.

U ovom je poglavlju također analiziran utjecaj mehaničke regularizacije na iznos mjerne nesigurnosti DVC metode pri ispitivanju staklenim vlaknima ojačanih polimera. Zabilježena su po dva CT skena neopterećenog stanja za svaki od ispitnih uzoraka, a kao i u slučaju standardnog FE-DVC pristupa, i u ovom je slučaju korelacijski protokol implementiran korištenjem *Correli 3.0* algoritma [138] razvijenog u programskom paketu *MATLAB*. Promatran je utjecaj primjene regularizacijskih duljina od 256, 192, 128, 96, 64, 48, 32, 24 i 16 voksel na iznos mjerne nesigurnosti kada je promatrano područje interesa diskretizirano mrežom konačnih elemenata veličine 12 voksel. Korišteni su tetraedarski konačni elementi prvog reda (T4) opisani linearnim funkcijama oblika, a kao kriterij podudaranja DVC analize implementirana je penalizirana suma kvadrata razlika. Aproximacija vrijednosti sive skale boje s čvornih pomaka mreže konačnih elemenata izvršena je kubičnom interpolacijom na razini voksel. Kompletni parametri regularizirane DVC analize navedeni su tablici 5-3.

Tablica 5-3 Parametri regulariziranog DVC protokola kod određivanja utjecaja arhitekture vlakana na mjernu nesigurnost DVC metode

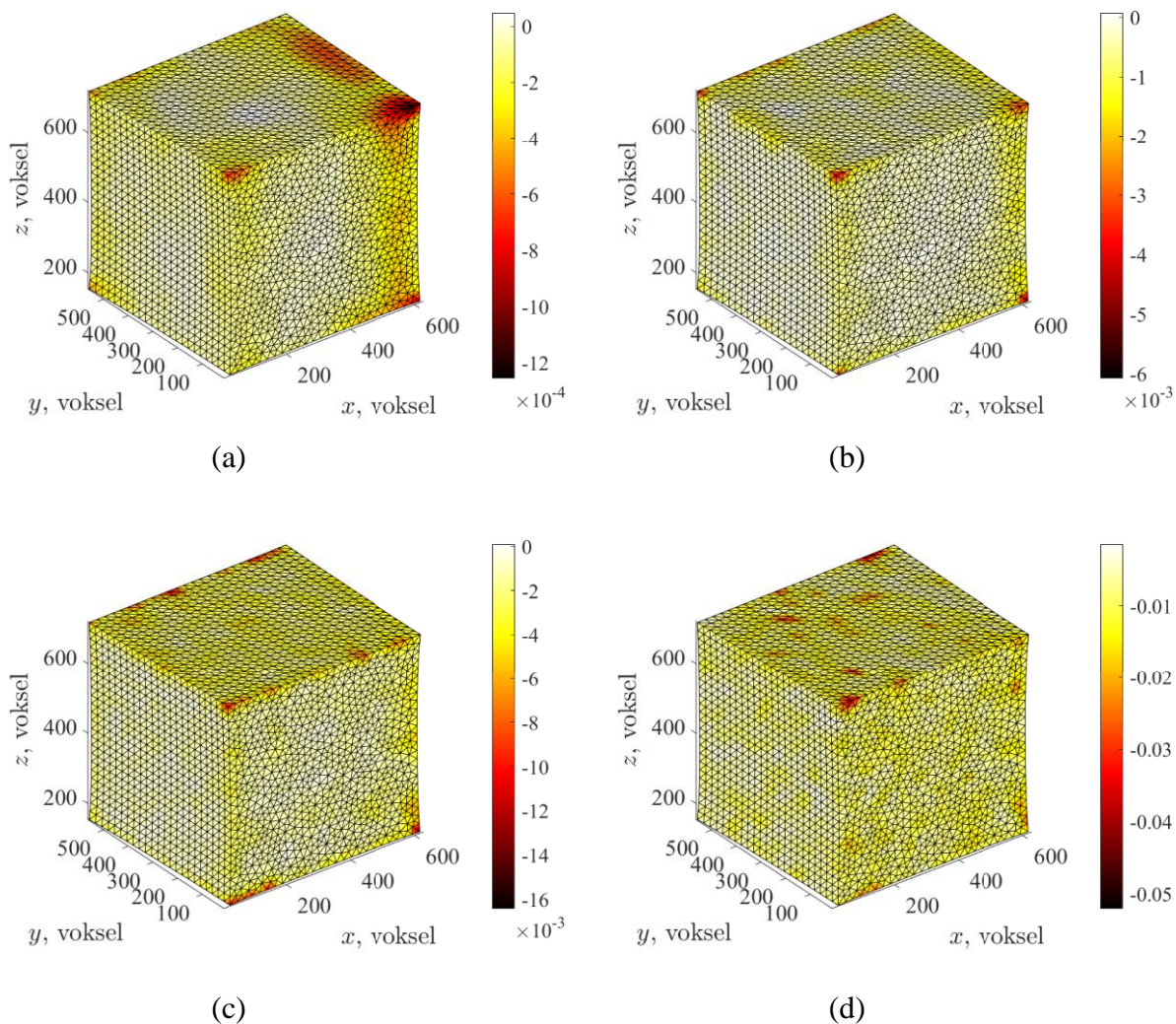
DVC algoritam	<i>Correli 3.0</i> [138]
Srednja veličina elementa (vokseli)	12
Funkcija oblika	Linearna funkcija (T4)
Kriterij podudaranja	Penalizirana suma kvadrata razlika
Regularizacijska duljina (vokseli)	256, 192, 128, 96, 64, 48, 32, 24, 16
Interpolacija	Kubična

Na slici 5-9 prikazana su polja pomaka u z smjeru kod primjene različitih regularizacijskih duljina. Kod primjene najveće regularizacijske duljine ($\xi = 256$ voksel) zabilježeni su najmanji čvorni pomaci. Smanjenjem regularizacijske duljine povećavaju se čvorni pomaci, tako da su vrijednosti polja pomaka kod regularizacije od 16 voksel red veličine veći nego kod primjene najveće regularizacijske duljine. Nadalje, smanjenjem regularizacije može se na poljima pomaka uočiti stohastički povećane vrijednosti čvornih pomaka. Kod regularizacije od 256 voksel navedena distribucija pomaka nije uočena, budući da je u potpunosti filtriran akvizicijski šum. Štoviše, korištenjem najveće regularizacije od 256 voksel (slika 5-9(a)) zabilježeni su manji čvorni pomaci nego kod primjene standardnog DVC algoritma s najgrubljom mrežom od $\ell = 97$ voksel (slika 5-7(a)).



Slika 5-9 Izmjerena polja pomaka u z smjeru (vokseli) kod ispitnog uzorka *MAT* arhitekture vlakana korištenjem regulariziranog DVC algoritma, pri čemu su regularizacijske duljine iznosile (a) 256, (b) 128, (c) 64 i (d) 16 voksel. Područje interesa diskretizirano je mrežom konačnih elemenata veličine 12 voksel

Iz izmjerenih polja pomaka s različitim regularizacijskim duljinama (slika 5-9) izračunata su odgovarajuća polja glavnih deformacija (slika 5-10). Ni u ovom slučaju nije zabilježen mehanički signal na poljima najvećih glavnih deformacija. Usporedbom prikazanih vrijednosti, može se uočiti kako su i u ovom slučaju izmjerene glavne deformacije najveće kada je korištena najmanja regularizacijske duljina (slika 5-10(d)).



Slika 5-10 Glavna deformacija (-) ϵ_3 za MAT ispitni uzorak izračunata korištenjem regulariziranog DVC algoritma, pri čemu su regularizacijske duljine iznosile (a) 256, (b) 128, (c) 64 i (d) 16 voksela. Područje interesa diskretizirano je mrežom konačnih elemenata veličine 12 voksela

5.4. Određivanje mjerne nesigurnosti DVC metode

Pristup određivanju mjerne nesigurnosti DVC metode u ovom radu uključuje usporedbu dvaju uzastopno zabilježenih skenova ispitnog uzorka u neopterećenom stanju. Prilikom snimanja uzastopnih skenova nije primijenjen pomak krutog tijela, pošto je cilj ovog istraživanja bio ispitati mjernu nesigurnost koja je isključivo povezana s različitom arhitekturom vlakana ispitivanih uzoraka, proizvedenih iz staklenim vlaknima ojačanih polimera. Budući da su za sva

četiri ispitna uzorka primijenjeni isti parametri CT skeniranja (vidi tablicu 5-1), pretpostavlja se kako je akvizicijski šum za sve slučajeve skeniranja približno jednak.

Uzastopno snimljeni skenovi neopterećenog stanja analizirani su primjenom globalnog *Correli 3.0* algoritma. Promatrano područje interesa (ROI) ispitnih uzoraka diskretizirano je mrežama konačnih elemenata, pri čemu su korišteni elementi različite duljine (tablica 5-2). Time je modelirano devet različitih mreža konačnih elemenata. Analizirajući uzastopne skenove, standardna mjerna nesigurnost izmjerenih pomaka i deformacija određena je kao standardna devijacija svih čvornih pomaka (tj. deformacija) prema:

$$\sigma_{U_i} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (u_{ij} - \bar{u}_i)^2}, \quad (5-1)$$

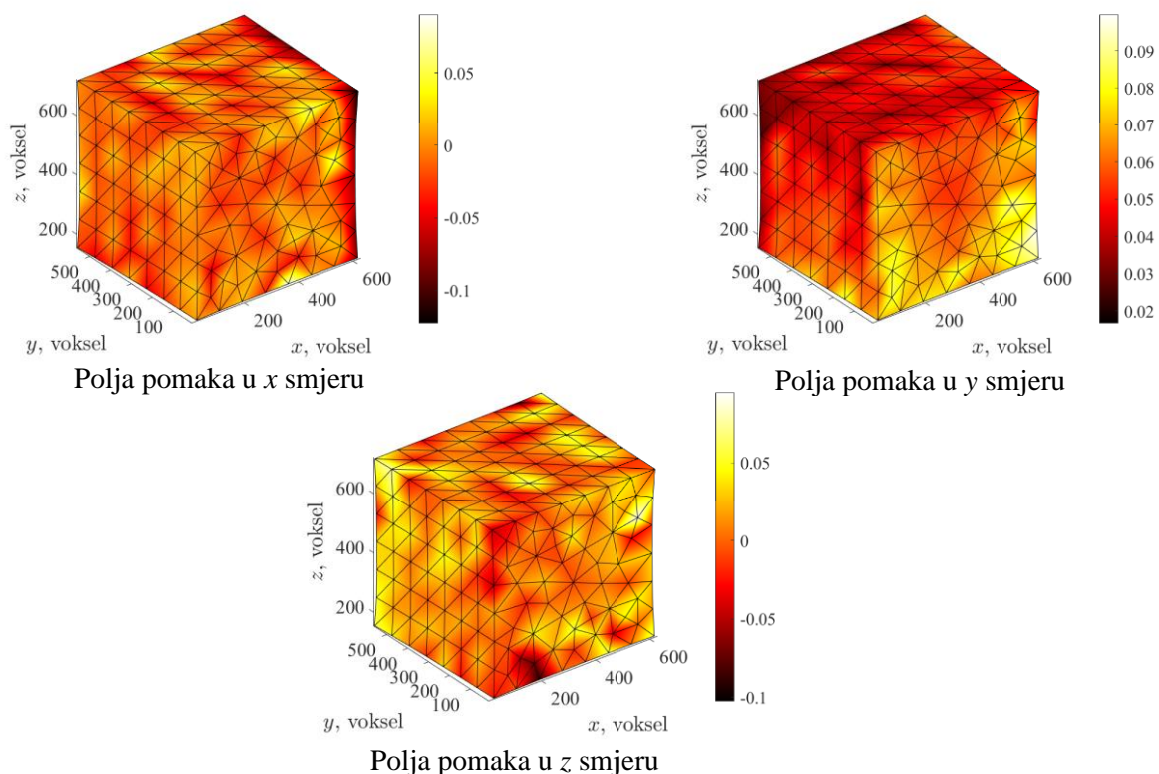
$$\sigma_{\varepsilon_i} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\varepsilon_{ij} - \bar{\varepsilon}_i)^2}, \quad (5-2)$$

gdje su σ_U i σ_ε standardna mjerna rezolucija pomaka i deformacija, \bar{u} i $\bar{\varepsilon}$ srednje vrijednosti čvornih pomaka i deformacija, n broj čvorova mreže konačnih elemenata, i smjerovi osi x , y i z kod mjerenja pomaka te glavne osi kod mjerenja deformacija. Za svaku je diskretizaciju mreže konačnih elemenata na ovaj način izračunata vrijednost mjerne nesigurnosti DVC metode u ovisnosti o veličini korištenog konačnog elementa. Opisani postupak određivanja mjernih nesigurnosti DVC metode dodatno je shematski opisan preko slike 5-11. Različite vrijednosti standardnih mjernih nesigurnosti po osima (prikazani na dijagramu na slici 5-11) rezultat su heterogene mikrostrukture promatranog ispitnog uzorka te različitog kontrasta koji se ostvaruje po pojedinim osima.

Za razliku od standardnog DVC pristupa, kod primjene regulariziranog DVC protokola korištena je jedna veličina mreže konačnih elemenata s finom diskretizacijom, pri čemu je prosječna duljina elementa iznosila $\ell = 12$ voksel.

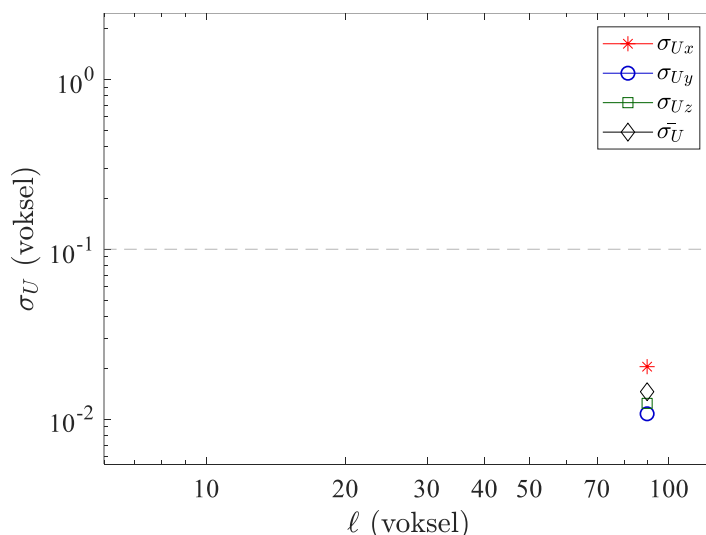
Za devet različitih regularizacijskih duljina ξ izračunate su standardne mjerne rezolucije pomaka i deformacija. Cilj ovog istraživanja bio je odrediti najmanju regularizacijsku duljinu kojom se još uvijek zadovoljava uvjet da standardna nesigurnost izmjerenih pomaka ne prelazi vrijednost od 10^{-1} voksel ($\bar{\sigma}_U \leq 10^{-1}$ voksel) [4], kako bi se s finom diskretizacijom moglo provesti pouzdano mjerenje deformacija.

Korak 1: za odabranu veličinu diskretizacije odrede se polja pomaka u x , y , i z smjeru



Korak 2: izračuna se standardna devijacija svih čvornih pomaka za pojedine osi, koristeći izraz (5-1)

Korak 3: izračunate vrijednosti standardnih devijacija čvornih pomaka za pojedine smjerove upisuju se u dijagram. Ove vrijednosti predstavljaju mjernu nesigurnost DVC metode za pojedini smjer pri odabranoj diskretizaciji



Slika 5-11 Shematski prikaz postupka određivanja mjerne nesigurnosti DVC metode te formiranja dijagrama koji prikazuju ovisnost mjerne nesigurnosti o veličini korištenih konačnih elemenata. Primjer se odnosi na određivanje mjerne nesigurnosti pomaka kod MAT ispitnog uzorka kada je korištena diskretizacija mrežom konačnih elemenata veličine 96 voksel. Za formiranje kompletnog dijagrama potrebno je ponoviti korake 1, 2 i 3 za svaku diskretizaciju

Kako bi se kvantitativno procijenila i usporedila mjerna nesigurnost DVC metode pri ispitivanju FRP materijala različite arhitekture vlakana pristupilo se utvrđivanju srednjih standardnih mjernih nesigurnosti pomaka ($\bar{\sigma}_U$) i glavnih deformacija ($\bar{\sigma}_\varepsilon$). Izračun srednjih standardnih mjernih nesigurnosti pomaka i deformacija izvršen je koristeći izraze:

$$\bar{\sigma}_U = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \sigma_{u_i} \right), \quad (5-3)$$

$$\bar{\sigma}_\varepsilon = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \sigma_{\varepsilon_i} \right), \quad (5-4)$$

pri čemu N predstavlja broj osi u kojima je određivana mjerna nesigurnost.

5.4.1. Procjena mjerne nesigurnosti standardnog DVC protokola

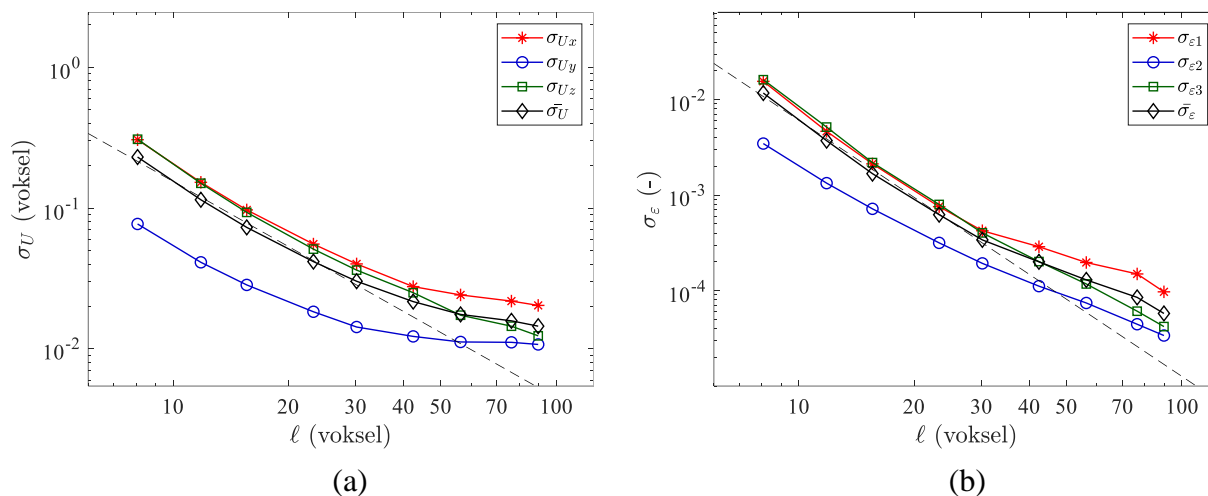
Unutar ovog dijela rada provedeno je devet neovisnih analiza koristeći diskretizacije s različitim veličinama konačnih elemenata, pri čemu su sve mreže diskretizirane nad istim područjem interesa. Procedura određivanja standardnih mjernih nesigurnosti izmjerenih polja pomaka detaljno je objašnjena u prethodnom poglavlju te shematski opisana na slici 5-11. Standardna mjerna nesigurnost pomaka i glavnih deformacija prikazana je u ovisnosti o veličini elementa odgovarajuće mreže konačnih elemenata izražene u vokselima. Osim toga, za svaki je ispitivani uzorak zabilježena i srednja standardna rezolucija pomaka $\bar{\sigma}_U$ i glavnih deformacija $\bar{\sigma}_\varepsilon$.

Rezultati standardnih mjernih nesigurnosti pomaka za ispitni uzorak *MAT* arhitekture vlakana (slika 5-12(a)) pokazuju kako je najniža vrijednost postignuta u y smjeru. Vrijednosti standardnih mjernih nesigurnosti pomaka u x i z smjeru približno su jednakog iznosa te su uvećane u odnosu na y smjer. Na slici 5-12(a) također se može uočiti kako do značajnijeg porast mjerne nesigurnosti pomaka dolazi kada se koriste konačni elementi manji od 30 voksel.

Usporedivši vrijednosti standardnih mjernih nesigurnosti pomaka (slika 5-12(a)) i deformacija (slika 5-12(b)) uočava se kako je mjerna nesigurnost glavnih deformacija kod *MAT* ispitnog uzorka red veličine manja nego što je to slučaj kod mjerne nesigurnosti pomaka.

Trend promjene srednjih standardnih mjernih nesigurnosti u odnosu na veličinu korištenih konačnih elemenata može se aproksimirati potencijalnim zakonom, pri čemu potencija iznosi $n = 1$. Pritom faktor nagiba za srednje standardne mjerne nesigurnosti deformacija iznosi -2,68 (slika 5-12(b)). S druge pak strane, trend promjene srednje standardne nesigurnosti pomaka prije zasićenja može se aproksimirati potencijalnim zakonom s faktorom nagiba -1,54 (slika 5-12(a)). Ovo ukazuje kako je Gaussianov akvizicijski šum glavni uzrok veće mjerne nesigurnosti kod korištenja manjih konačnih elemenata [4]. Pravci koji predstavljaju interpolaciju dobivenih

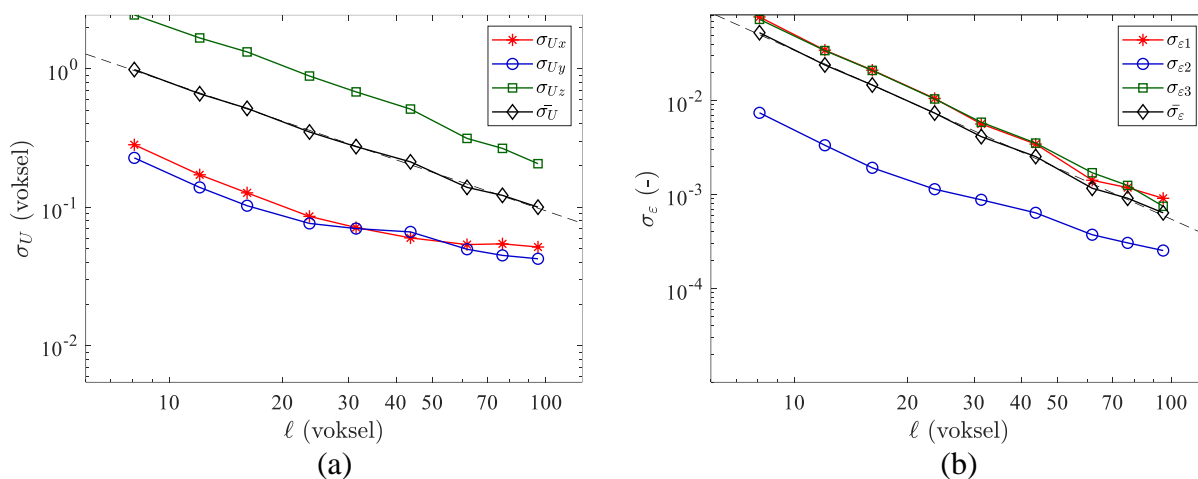
podataka preko potencijskog zakona prikazani su na slikama 5-12 do 5-15 kao crne isprekidane linije.



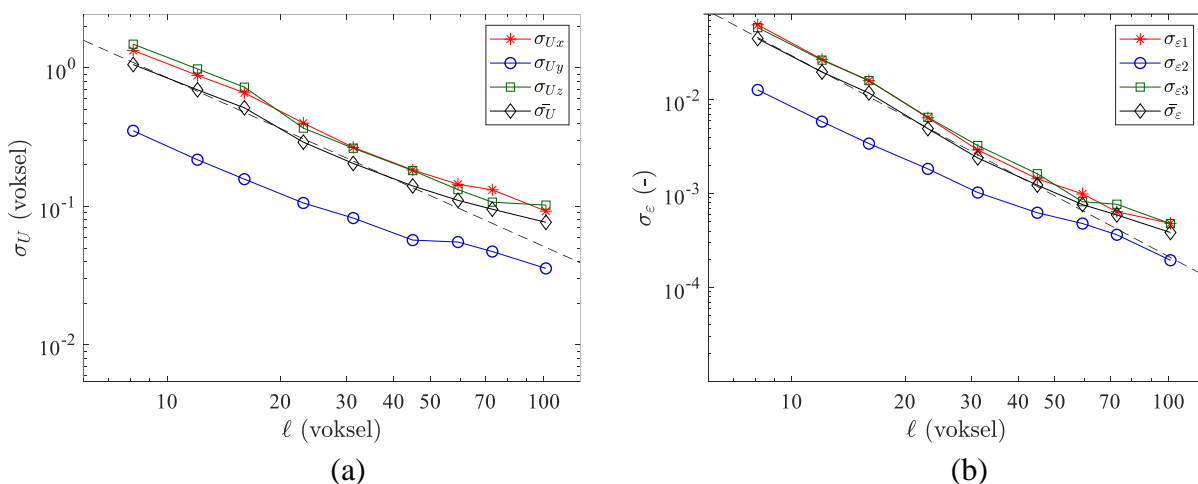
Slika 5-12 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitne uzorke MAT arhitekture vlakana. Crne isprekidane linije predstavljaju interpolaciju zakona potencije srednjih mjernih nesigurnosti

Osim u slučaju MAT arhitekture vlakana, najniži iznosi mjernih nesigurnosti pomaka i deformacija zabilježeni su u y smjeru i kod UD (slika 5-13), WF (slika 5-14) i AP (slika 5-15) arhitekture vlakana. Pri tome valja primijetiti kako je kod UD arhitekture vlakana mjerna nesigurnost pomaka u y smjeru podjednaka onom u x smjeru te kako je u odnosu na ove dvije, mjerna nesigurnost pomaka u z smjeru uvećana za otprilike jedan red veličine. Ovo pak nije slučaj s WF i AP arhitekturom vlakana, kod kojih mjerne nesigurnosti pomaka i deformacija imaju otprilike jednake vrijednosti x i z smjeru, ali uvećane u odnosu na y smjer.

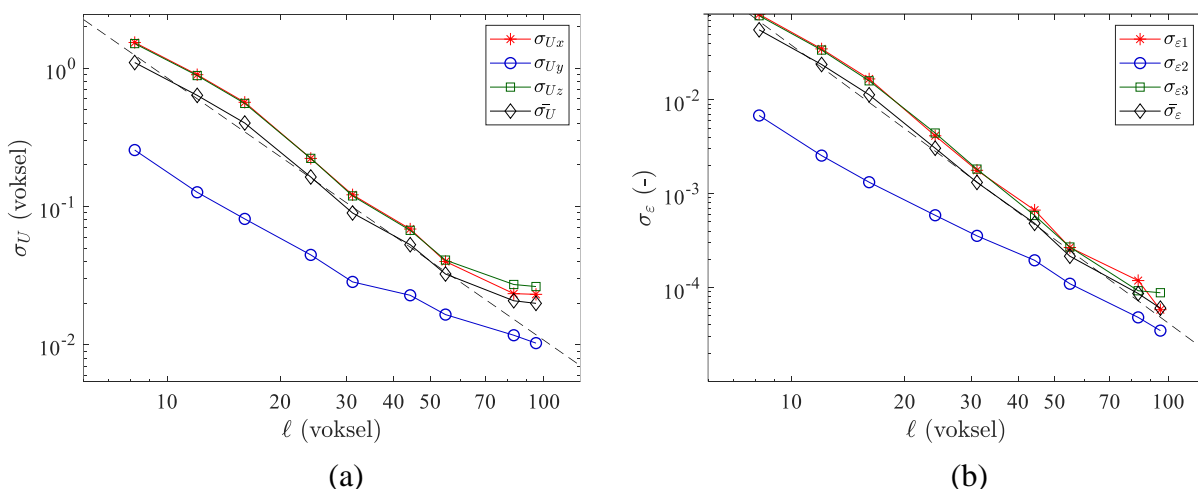
Posluživši se interpolacijom zakona potencije, trend promjene srednje standardne mjerne nesigurnosti pomaka kod UD arhitekture vlakana može se opisati pravcem s faktorom nagiba -0,93 (slika 5-13(a)), dok se trend promjene srednje standardne mjerne nesigurnosti deformacija može opisati pravcem s faktorom nagiba -1,80 (slika 5-13(b)). Za WF arhitekturu vlakana faktori nagiba pravaca pri interpolaciji zakona potencije srednje standardne mjerne nesigurnosti pomaka iznose -1,22 (slika 5-14(a)), odnosno -2,14 za srednju standardnu mjernu nesigurnost deformacija (slika 5-14(b)). Kod AP arhitekture vlakana, faktori za srednju standardnu mjernu nesigurnost pomaka iznose -1,89 (slika 5-15(a)), odnosno -2,96 za mjernu nesigurnost deformacija (slika 5-15(b)).



Slika 5-13 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitne uzorke UD arhitekture vlakana. Crne isprekidane linije predstavljaju interpolaciju zakona potencije srednjih mjernih nesigurnosti



Slika 5-14 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitne uzorke WF arhitekture vlakana. Crne isprekidane linije predstavljaju interpolaciju zakona potencije srednjih mjernih nesigurnosti



Slika 5-15 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitne uzorke AP arhitekture vlakana. Crne isprekidane linije predstavljaju interpolaciju zakona potencije srednjih mjernih nesigurnosti

Činjenica kako su najniže vrijednosti standardnih mjernih nesigurnosti za sva četiri arhitekture vlakana (slike 5-12 do 5-15) ostvarene u y smjeru, može se objasniti preko srednjeg kontrasta analiziranih slika. Odredivši korijen srednje vrijednosti gradijenta slike (eng. *Root Mean Squared Norm* – RMS) za svaki pojedini smjer, uočava se kako je kod sve četiri ispitivane arhitekture vlakana vrijednost RMS, izražena preko intenziteta sive boje (eng. *Gray Level* - GL) po vokselu, najveća upravo u y smjeru (vidi tablicu 5-4), odnosno kako je u ovom smjeru prisutan najpovoljniji kontrast za korelaciju. Veće vrijednosti gradijenta slike u y smjeru, stoga su razlog registriranja najmanjih mjernih nesigurnosti za y smjer. Vrijedi podsjetiti kako y smjer odgovara smjeru slaganja slojeva vlakana unutar kompozitnih ploča iz kojih su kasnije izrezani ispitni uzorci, što je objašnjeno u poglavlju 4.4.

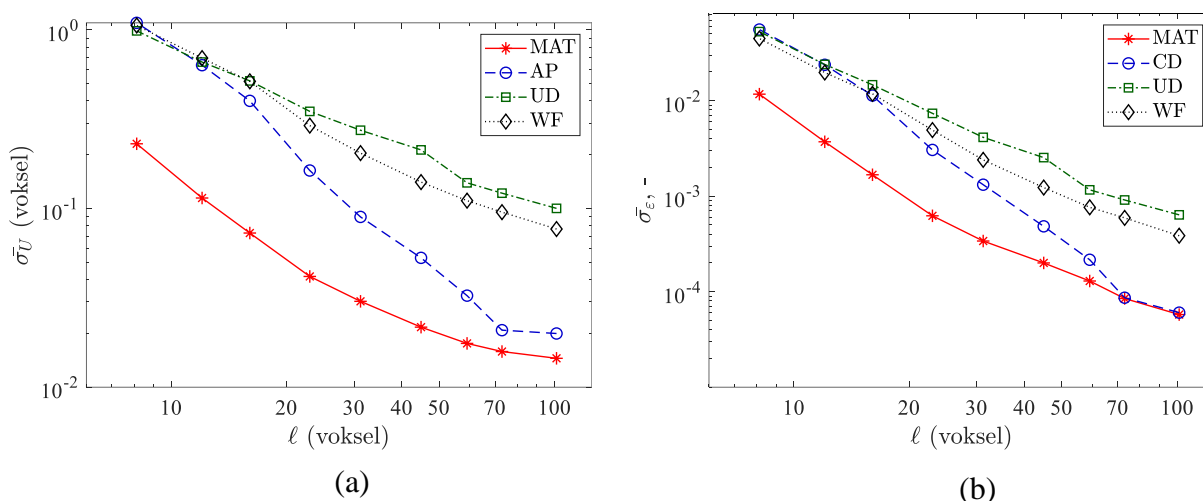
Tablica 5-4 Srednje vrijednosti gradijenta slika (RMS) za različite arhitekture vlakana

Arhitektura vlakana	RMS(∇f_x) (GL/voksel)	RMS(∇f_y) (GL/voksel)	RMS(∇f_z) (GL/voksel)
MAT	3,9	11,9	3,9
AP	3,9	6	3,7
WF	2,8	5,6	2,6
UD	4,5	5	1,6

Iako su uočene fluktuacije u iznosima mjernih nesigurnosti ovisno o arhitekturi vlakana polimernih kompozita, kod svih se slučajeva može primijetiti trend porasta iznosa standardnih mjernih nesigurnosti pri korištenju mreža s manjim konačnim elementima. Ovo je u skladu s teorijskim razmatranjima iznesenima u poglavlju 3.4.1, kao i u skladu s rezultatima sličnih istraživanja (primjerice [26, 111, 116, 122, 123, 124]), gdje su korištene drugačije klase materijala.

Kako bi se odredio utjecaj arhitekture vlakana polimernog kompozita na iznose mjernih nesigurnosti DVC metode, uspoređene su srednje mjerne nesigurnosti četiri tipa vlaknima ojačanih kompozita s obzirom na veličinu diskretizacije promatranog volumena (slika 5-16). Prema zabilježenim rezultatima, MAT arhitektura vlakana rezultira najnižim vrijednostima standardne nesigurnosti pomaka i deformacija za sve veličine elemenata. Ovo je u skladu s rezultatima kvalitativne analize mikrostrukture (poglavlje 4.4), kod koje je uočeno kako ova konfiguracija vlakana ima najpovoljniji omjer i raspored konstituenata za provedbu DVC analize. Na slici 5-16(a) također se može primijetiti kako za najveće elemente (97 i 76 voksel), kod AP arhitekture, standardne nesigurnosti poprimaju iznose koji su približno jednaki kao i

kod MAT arhitekture. Međutim, za finije diskretizacije mreže konačnih elemenata, izračunate vrijednosti mjerne nesigurnosti pomaka AP arhitekture vlakana značajno su više. Iz izračunatih iznosa standardnih nesigurnosti pomaka i deformacija može se konstatirati kako UD i WF arhitekture vlakana poprimaju najviše iznose mjernih nesigurnosti. Štoviše, zabilježene vrijednosti su za približno jedan red veličine više od iznosa standardnih mjernih nesigurnosti ispitnog uzorka MAT arhitekture vlakana. Vrijednosti mjerne nesigurnosti pomaka i deformacija za AP, UD i WF arhitekture vlakana za veličine elemenata $\ell = 16, 12$ i 8 vokselu rezultiraju približno istim vrijednostima. Uspoređujući razine mjerne nesigurnosti deformacija i pomaka, može se uočiti kako je standardna rezolucija pomaka za red veličine veća od standardne rezolucije deformacija.

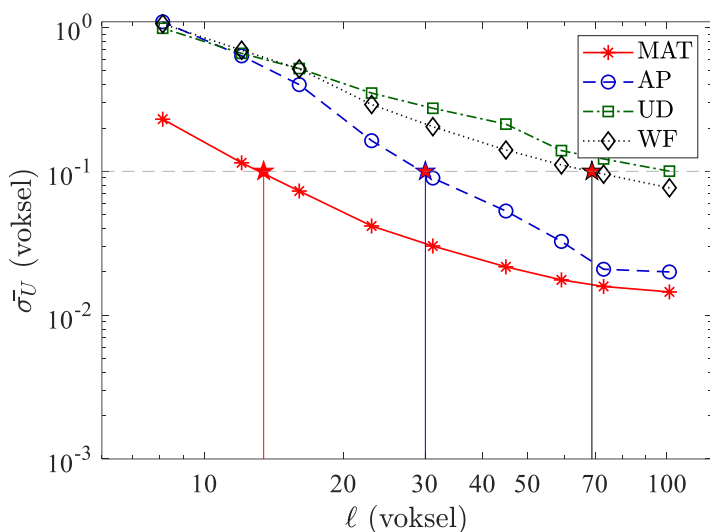


Slika 5-16 Srednja standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija u ovisnosti o veličini korištenih konačnih elemenata pri analizi ispitnih uzoraka različite arhitekture vlakana primjenom standardnog DVC protokola

Uzme li se u obzir ranije spomenuti kriterij za mjernu nesigurnost pomaka [4], koji definira da prihvatljiva vrijednost standardne nesigurnosti izmjerenih pomaka ne smije premašiti 10^{-1} vokselu ($\bar{\sigma}_U \leq 10^{-1}$ voksel), mogu se definirati prihvatljive veličine konačnih elemenata za ispitivanje uzoraka ispitanih u ovom radu. Primjenom ovog kriterija za odabir optimalne veličine elemenata za DVC analizu, osigurava se da standardna mjerna nesigurnost ostane unutar dopuštenih granica. Također, pridržavanje ovog standarda pomaže u osiguravanju pouzdanosti i točnosti izračunatih polja deformacija kod *ex-situ* ili *in-situ* mehaničkih ispitivanja, što je ključno za daljnju analizu i interpretaciju rezultata.

Na slici 5-17 prikazan je postupak odabira minimalne veličine elementa koja će zadovoljiti kriterij da je srednja mjerna nesigurnost manja od 10^{-1} vokselu. Važno je još jednom napomenuti kako se teži korištenju mreža konačnih elemenata s finijom diskretizacijom, budući

da one omogućavaju vjerodostojnije opisivanje lokalizacijskih fenomena i diskontinuiteta u poljima pomaka. Prema prezentiranim rezultatima na slici 5-17, definirane su optimalne veličine mreža za četiri arhitekture vlakana te su iste navedene u tablici 5-5. Za mjerenje polja pomaka i računanje polja deformacija, uočava se kako se kod polimera ojačanih *MAT* arhitekturom vlakana može koristiti najfinija diskretizacija, odnosno konačni elementi duljine 12 voksel. Nasuprot tome, *UD* i *WF* arhitektura vlakana zahtijevaju korištenje mreža s izrazito grubom mrežom konačnim elementima ($\ell = 95$ voksel za *UD* te $\ell = 68$ za *WF* arhitekturu vlakana) kada se koristi standardni DVC pristup. Nadalje, predloženom prostornom rezolucijom polja pomaka bilo bi veoma zahtjevno kod ovih dvaju tipova arhitekture vlakana mjeriti vrlo male kinematičke fluktuacije uslijed mehaničkog signala. Kod staklenim vlaknima ojačanih polimera s *AP* arhitekturom vlakana primjenom standardnog DVC pristupa omogućeno je pouzdano mjerenje pomaka korištenjem elementa većih od 30 voksel. Kod elemenata manjih od 15 voksel vrijednosti standardne nesigurnosti izmjerenih pomaka približno su iste kod *AP*, *WF* i *UD* arhitekture vlakana.

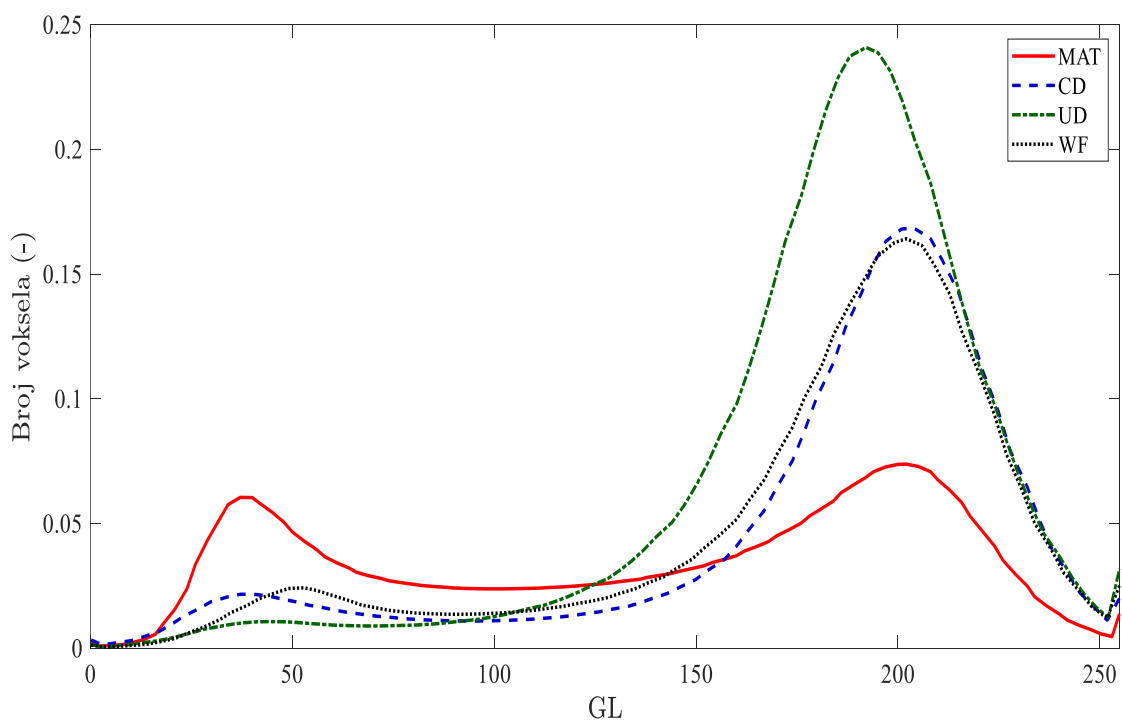


Slika 5-17 Određivanje optimalne veličine elemenata ℓ pri ispitivanju polimernih kompozita s različitim arhitekturom vlakana primjenom standardnog DVC algoritma

Tablica 5-5 Preporučene veličine konačnih elemenata pri ispitivanju polimernih kompozita s različitim arhitekturom vlakana primjenom standardnog DVC algoritma

Arhitektura vlakana	Duljina elementa, ℓ (vokseli)
<i>MAT</i>	12
<i>UD</i>	95
<i>WF</i>	68
<i>AP</i>	30

S ciljem određivanja uzroka različitih vrijednosti mjernih nesigurnosti te posljedično prostornih rezolucija pomaka za različite arhitekture vlakana, u nastavku su analizirani histogrami volumetrijskih slika te njihovi kontrasti. Na slici 5-18 prikazani su histogrami razina sive boje (eng. *Gray Levels* - GL) nad cijelim su područjem interesa (tj. volumena) za četiri predložene arhitekture vlakana. Iz zabilježenih se rezultata može uočiti kako kod *MAT* arhitekture vlakana prevladava bimodalni histogram, dok kod preostalih slučajeva (tj. *AP*, *UD* i *WF*) dominiraju lijevo zakrivljene distribucije histograma sive nijanse tonova. Najniža vrijednost mjerne nesigurnosti kod *MAT* arhitekture vlakana posljedica je najšire distribucije histograma. Nasuprot tome, kod *UD* uzorka djelomično je pokriven dinamički raspon, što rezultira najvišim razinama standardnih nesigurnosti. Slijedom navedenog, provedeno istraživanje potvrđuje nužnost kvantificiranja mjerne nesigurnosti prije analize mehanički deformiranih slika, budući da kontrast i kvaliteta akvizicije snažno utječu na pouzdanosti izmjerenih polja. Nadalje, iz histograma sive nijanse tonova nad područjem interesa, može se kvalitativno pretpostaviti potrebna veličina prostorne rezolucije za provedbu standardne DVC metode mjerenja trodimenzionalnih pomaka.



Slika 5-18 Histogrami sive boje analiziranih ispitnih uzoraka nad cijelim područjem interesa

Dodatna informacija, koja je jako korisna pri usporedbi različitih arhitektura vlakana, odnosi se na procjenu srednjeg kontrasta analiziranih slika [111, 117]. Preciznije, radi se o određivanju norme standardne srednje vrijednosti (eng. *Root Mean Squared (RMS) Norm*) gradijenta slike

nad promatranim područjima interesa. Tablica 5-6 ukazuje na postojanje značajnog kontrasta kod *MAT* arhitekture vlakana, dok je kod preostale tri arhitekture vlakana iznos gradijenta znatno niži.

Tablica 5-6 Srednji kontrast analiziranih arhitektura vlakana

Arhitektura vlakana	Srednji kontrast (razina sive boje/vokselu)
<i>MAT</i>	13,2
<i>UD</i>	6,9
<i>WF</i>	6,7
<i>AP</i>	8,1

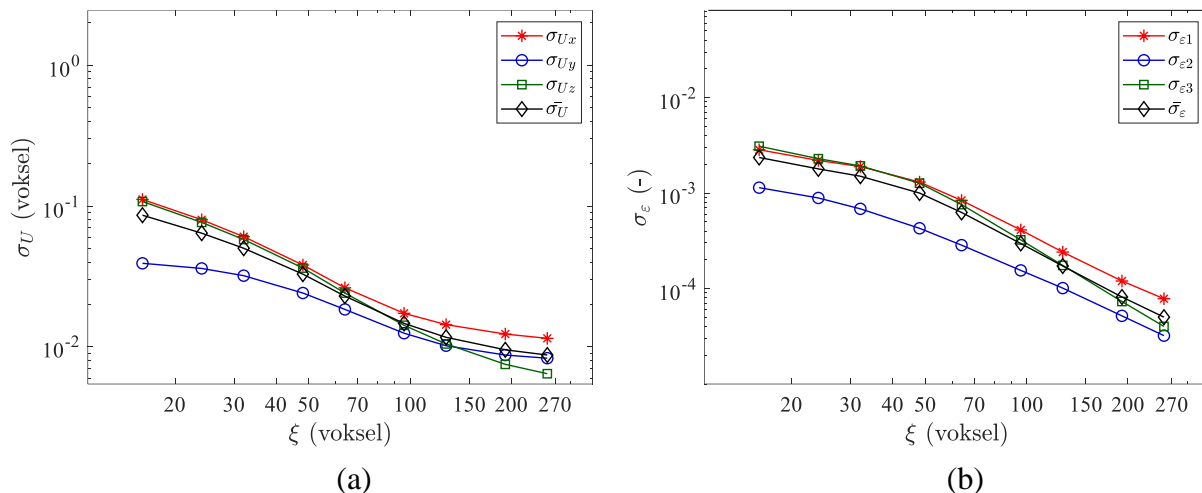
Analiza kontrasta promatranih arhitektura vlakana pokazala je povezanost sa standardnom mjernom nesigurnošću pomaka DVC metode. Mikrostrukture s najvišim kontrastom (*MAT* arhitektura vlakana) imale su najmanje mjerne nesigurnosti, dok su slike s najnižim kontrastom (*UD* i *WF* arhitektura vlakana) zabilježile najviše razine mjerne nesigurnosti.

5.4.2. Procjena mjerne nesigurnosti regulariziranog DVC protokola

U prethodnom poglavlju analizirana je standardna mjerna nesigurnost pomaka i deformacija standardne DVC metode. Pošto su kod određenih arhitektura vlakana (tj. *UD* i *WF* arhitektura) zabilježene visoke vrijednosti mjernih nesigurnosti, u ovom će poglavlju biti analizirana primjena regulariziranog DVC protokola pri ispitivanju mjerne nesigurnosti kod sve četiri ispitivane arhitekture vlakana. Isti će CT skenovi sada biti analizirani primjenom regulariziranog DVC algoritma koji se zasniva na implementaciji mehaničke regularizacije, čime se pretpostavlja linearna elastičnost odziva materijala. Time se ostvaruje filtriranje koje uzima u obzir samo mehanički signal iz polja pomaka. U prijašnjim je istraživanjima pokazano kako je primjenom predložene metode moguće sniziti mjernu nesigurnost globalnog pristupa DVC metode [142, 29].

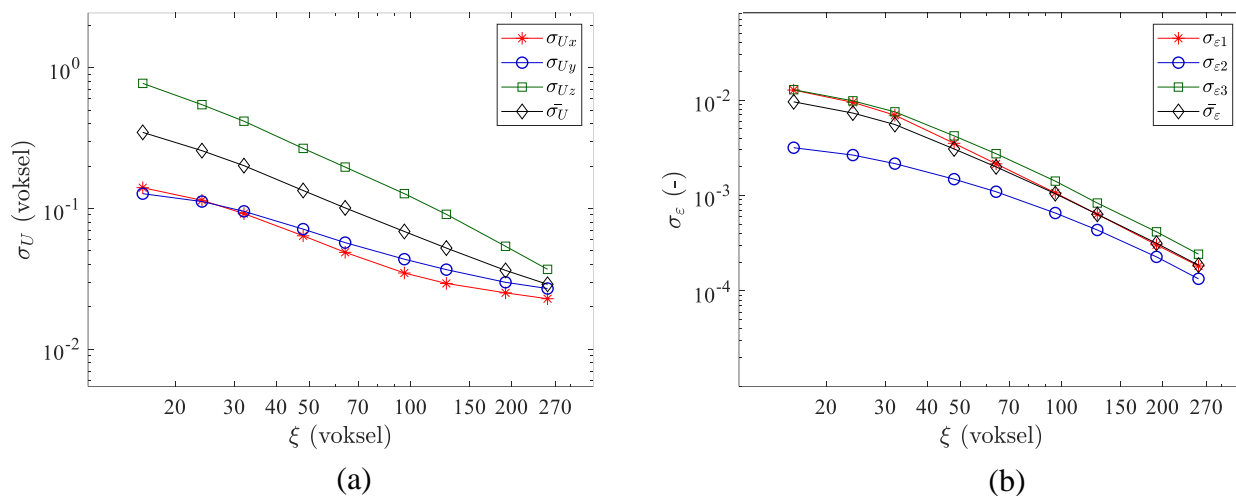
Na slici 5-19 prikazane su standardne mjerne nesigurnosti pomaka i deformacija ostvarene primjenom regulariziranog DVC protokola pri analizi polimernog kompozita ojačanog *MAT* arhitekturom vlakana. Može se uočiti kako se, kao i kod standardnog DVC protokola, kod regulariziranog pristupa iznosi mjernih nesigurnosti pomaka i deformacija također razlikuju po osima, budući da oni ovise o gradijentu susjednih vokselu po osima. Također se može primijetiti trend porasta mjerne nesigurnosti pomaka i deformacija sa smanjenjem regularizacijske duljine. Za regularizacijske duljine veće od 96 vokselu zabilježene su približno jednake vrijednosti standardne mjerne nesigurnosti. Usporedivši iznose standardnih mjernih nesigurnosti pomaka

i deformacija pri korištenju najviših i najnižih regularizacijskih duljina, bilježi se razlika u njihovim vrijednostima za jedan red veličine. Nadalje, uočava se kako je čak i kod najniže korištene regularizacijske duljine ($\xi = 16$ voksel) zadovoljen kriterij za mjernu nesigurnost pomaka od 10^{-1} voksel.

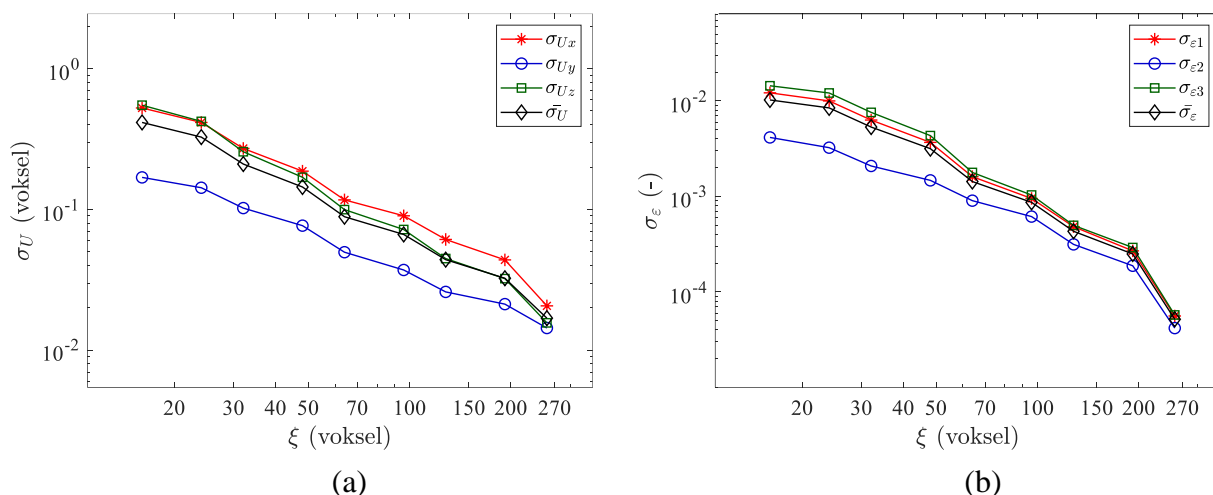


Slika 5-19 Standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija u ovisnosti o primijenjenim regularizacijskim duljinama kod ispitivanja uzorka s MAT arhitekturom vlakana

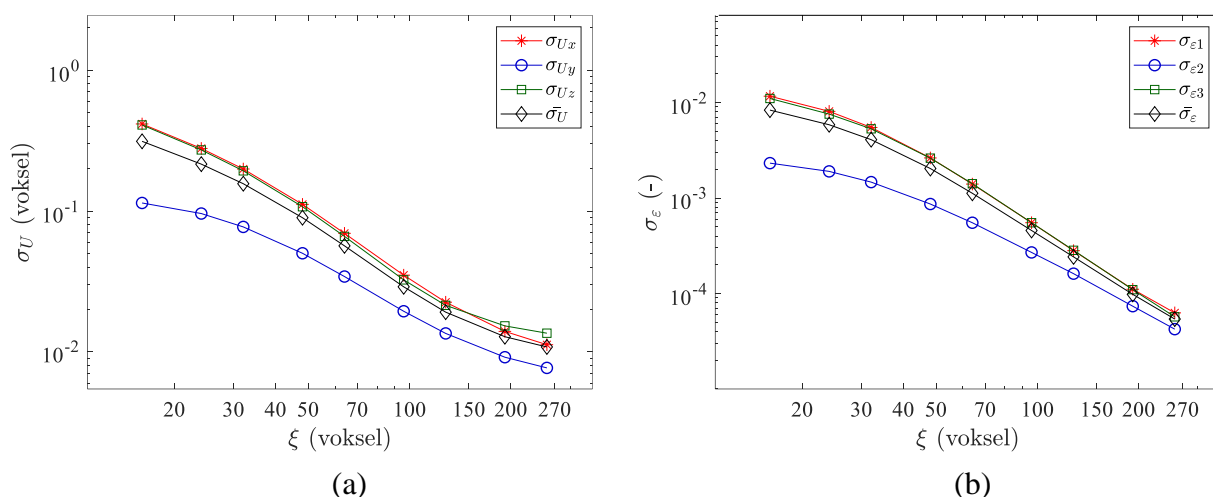
Trend porasta mjernih nesigurnosti sa smanjenjem regularizacijske duljine može se primijetiti i kod UD (slika 5-20), WF (slika 5-21) i AP (slika 5-22) arhitekture vlakana. Najniže vrijednosti mjernih nesigurnosti i kod ovih su arhitektura vlakana prisutne u y smjeru, uz napomenu kako su kod UD arhitekture, kao što je bio slučaj i kod standardnog DVC protokola, mjerne nesigurnosti pomaka i deformacija u y i x smjeru gotovo identične. Kod WF i AP arhitekture vlakana bilježe se približno jednake vrijednosti mjernih nesigurnosti pomaka i deformacija u x i z smjeru, ali uvećane u odnosu na y smjer.



Slika 5-20 Standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija u ovisnosti o primijenjenim regularizacijskim duljinama kod ispitivanja uzorka s UD arhitekturom vlakana



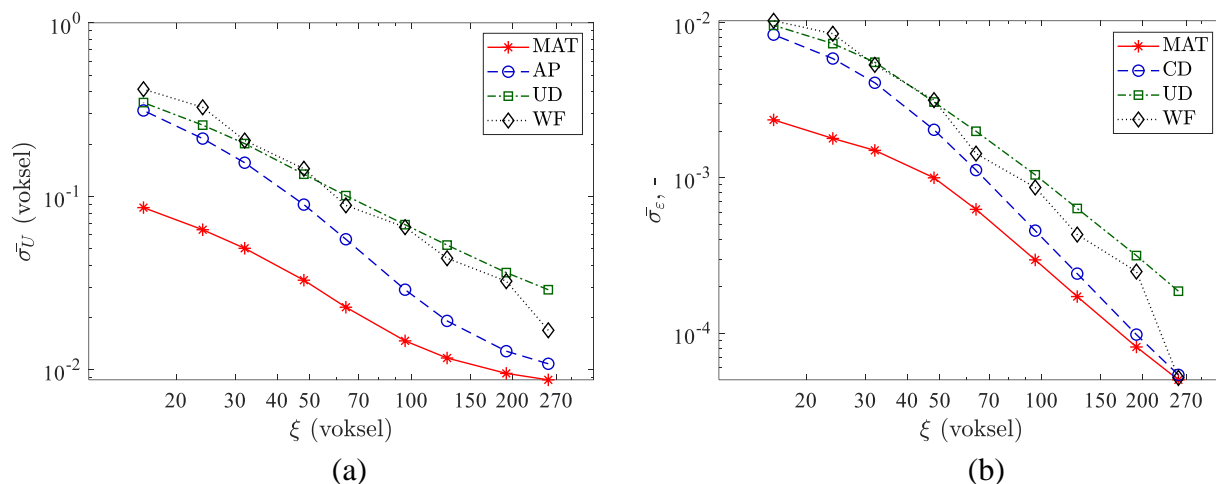
Slika 5-21 Standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija u ovisnosti o primijenjenim regularizacijskim duljinama kod ispitivanja uzorka s WF arhitekturom vlakana



Slika 5-22 Standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija u ovisnosti o primijenjenim regularizacijskim duljinama kod ispitivanja uzorka s AP arhitekturom vlakana

Usporedba srednjih standardnih mjernih nesigurnosti pomaka i deformacija kod četiri analizirane arhitekture vlakana polimernog kompozita primjenom regulariziranog DVC protokola prikazana je na slici 5-23. Prisutan je isti trend kao i kod korištenja standardnog DVC protokola. Naime, ispitni uzorak s implementiranom MAT arhitekturom vlakana rezultirao je s najnižim iznosima srednjih standardnih mjernih nesigurnosti za sve analizirane regularizacijske duljine. Nadalje, kod UD i WF arhitekture vlakana zabilježene su najveće mjerne nesigurnosti regulariziranog DVC pristupa. Navedene arhitekture bilježe znatno veći rast mjerne nesigurnosti smanjenjem regularizacijskih duljina, dok kod $\xi > 64$ voksela vrijednosti mjernih nesigurnost AP, UD i WF rezultiraju približno jednakim iznosima mjerne nesigurnosti. Nadalje, primjenom većih regularizacijskih duljina ($\xi > 128$ voksela), svaka od četiri analizirane arhitekture vlakana poprima za red veličine niži iznos srednjih standardnih mjernih

nesigurnosti u odnosu na slučaj kada je primijenjena standardna DVC metoda koja koristi konačne elemente jednake veličine.

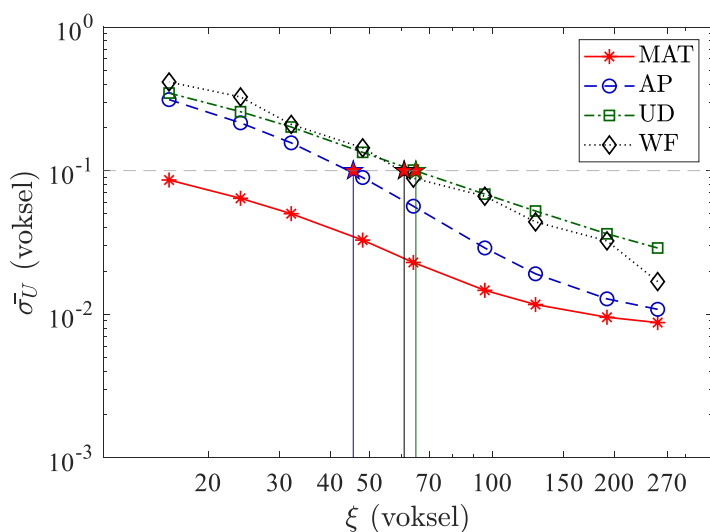


Slika 5-23 Srednje standardne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija polimera ojačanih s četiri različite vrste arhitekture vlakana ostvarene primjenom regulariziranog DVC protokola

Iako primjena velikih regularizacijskih duljina vodi postizanju nižih mjernih nesigurnosti, njihovu primjenu kod regulariziranog DVC protokola treba uzeti u obzir s velikom dozom opreza. Korištenje većih regularizacijskih duljina može, naime, onemogućiti uočavanje veoma malih fluktuacija pomaka uzorkovanih mehaničkim signalom. U tom smislu, veće regularizacijske duljine trebaju biti korištene samo kao „početni pokušaj“ određivanja nepoznatih polja pomaka ili pak, u slučaju kada je korisnik siguran da je elastičnost dominantno ponašanje materijala. Ako se nakon toga koriste niže vrijednosti regularizacijskih duljina, moguće je dobiti pouzdanije vrijednosti izmjerenih polja pomaka s većom mogućnosti detekcije lokalizacijskih fenomena [29].

Unutar ovog dijela rada također se željelo odrediti koje je minimalne vrijednosti regularizacijskih duljina ξ potrebno koristiti, kako bi se za svaku pojedinu izvedbu arhitekture polimera ojačanih staklenim vlaknima (eng. *Glass Fiber Reinforced Polymers* – GFRP) zadovoljio zahtjev da srednja standardna nesigurnost izmjerenih pomaka ne premaši prethodno utvrđeni iznos od 10^{-1} voksel kada se koristi diskretizacija mrežom konačnih elemenata veličine $\ell = 12$ voksel. Postupak određivanja prihvatljivih iznosa regularizacijskih duljina prikazan je na slici 5-24, dok su inicijalne regularizacijske duljine za svaku arhitekturu vlakana predložene u tablici 5-7. Iz rezultata prikazanih na slici 5-24 može se uočiti kako je za MAT arhitekturu vlakana potrebno koristiti regularizacijske duljine tek malo veće od korištenih konačnih elemenata (tj. $16 < \xi < 13$). Najveće regularizacijske duljine trebaju biti primijenjene

kod *UD* i *WF* arhitekture vlakana. Preporučene regularizacijske duljine kod ovih dvaju arhitektura vlakana gotovo su pet puta veće od veličine korištenog elementa. Za razliku od standardnog DVC pristupa, gdje je za *AP* arhitekturu vlakana preporučeno korištenje mreže konačnih elemenata veličine $\ell = 30$ voksel, primjenom DVC protokola s implementiranom mehaničkom regularizacijom, traženi kriterij (tj. $\bar{\sigma}_U \leq 10^{-1}$ voksel) moguće je postići korištenjem diskretizacije s veličinom konačnog elementa $\ell = 12$ voksel i dodatnom mehaničkom regularizacijom kada se koriste regularizacijske duljine ξ veće od 43 voksel.



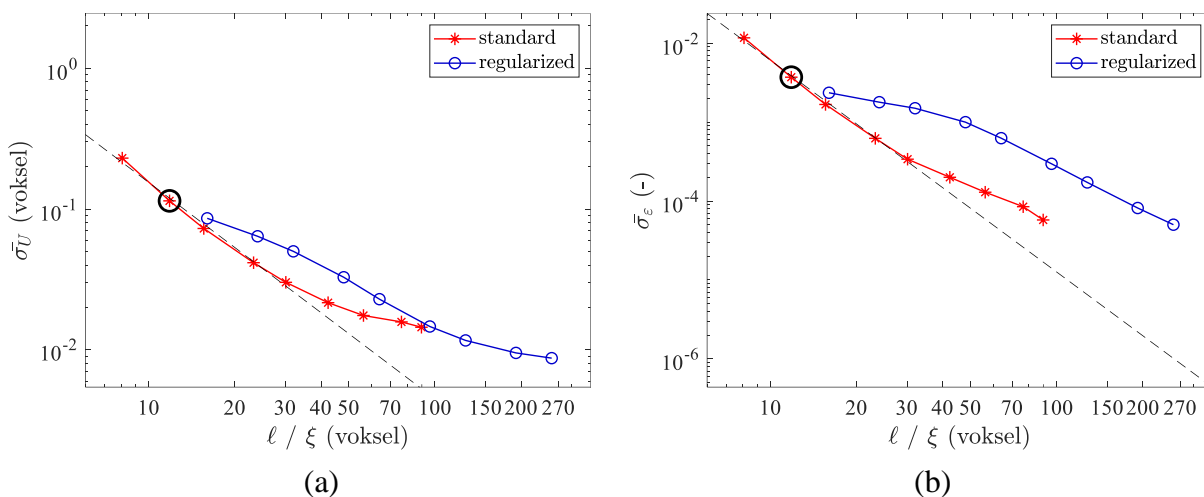
Slika 5-24 Određivanje minimalnih vrijednosti regularizacijskih duljina pri ispitivanju uzoraka različite arhitekture vlakana. Uzorci su diskretizirani mrežom konačnih elemenata veličine $\ell = 12$ voksel

Tablica 5-7 Preporučene vrijednosti regularizacijskih duljina GFRP materijala s različitim arhitekturom vlakana za slučaj kada se koristi diskretizacija mrežom konačnih elemenata veličine $\ell = 12$ voksel

Arhitektura vlakana	Regularizacijska duljina, ξ (vokseli)
<i>MAT</i>	12
<i>UD</i>	65
<i>WF</i>	61
<i>AP</i>	43

Dodatno je, s ciljem određivanja utjecaja regularizacije na mjernu nesigurnost izmjerenih pomaka i izračunatih deformacija, za *MAT* arhitekturu vlakana dana usporedba srednjih standardnih mjernih nesigurnosti dobivenih standardnim i regulariziranim DVC pristupom. Na slici 5-25 prikazane su vrijednosti srednjih standardnih mjernih nesigurnosti u odnosu na veličinu korištenog konačnog elementa kod klasičnog DVC pristupa, dok je mjerna nesigurnost regulariziranog DVC algoritma definirana u ovisnosti o regularizacijskoj duljini ξ (vidi

poglavlje 3.3.3). Kod regularizacijske DVC metode, primijenjena je mreža konačnih elemenata s finom diskretizacijom, gdje je prosječna veličina elementa $\ell = 12$ voksel. Standardna mjerna nesigurnost regulariziranog DVC pristupa procijenjena je za devet regulacijskih duljina, kako bi se utvrdila minimalna regularizacijska duljina čija će implementacija zadovoljiti prethodno definirani kriterij maksimalne standardne nesigurnost izmjerenih pomaka ($\bar{\sigma}_U \leq 10^{-1}$ voksel).



Slika 5-25 Usporedba standardnog i regulariziranog DVC pristupa pri analizi GFRP kompozita s MAT arhitekturom vlakana. (a) Standardna nesigurnost izmjerenih pomaka i (b) standardna nesigurnost deformacija u ovisnosti o veličini elementa / regularizacijskoj duljini. Crna isprekidana linija označava interpolaciju zakona potencije srednje mjerne nesigurnosti standardnog DVC protokola. Crni krug označava mjernu nesigurnost standardnog DVC pristupa s veličinom elementa korištenom kod regulariziranog DVC pristupa

Uspoređujući dva DVC protokola na slici 5-25, može se uočiti kako regularizirani DVC nadmašuje standardni DVC pristup u pogledu izračunatih standardnih nesigurnosti pomaka i deformacija. Primjena regulariziranog protokola rezultira manjim mjernim rezolucijama u odnosu na standardni DVC pristup kada se koriste jednaki elementi veličine 12 voksel. Nadalje, ostvareni iznosi standardnih mjernih nesigurnosti primjenom regulariziranog DVC protokola s regularizacijskim duljinama višim od 96 voksel, niži su nego što je to slučaj kada je primijenjen standardni DVC protokol s veličinama konačnih elemenata većim od 97 voksel. Kod regulariziranog DVC protokola početak zasićenja uočen je kod regularizacijskih duljina manjih od 32 voksel. Na temelju prijašnjih istraživanja [29], očekuje se kako za regularizacijske duljine manje od veličine korištenog konačnog elementa, neće biti filtrirane nemehaničke pojave (npr. fluktuacije polja pomaka uzrokovane akvizicijskim šumom). Standardna mjerna nesigurnost pomaka u tom će slučaju biti jednaka onoj ostvarenoj primjenom neregulariziranog (tj. standardnog) DVC protokola. Na slici 5-25 također se može

uočiti postojanje trenda promjene srednje standardne nesigurnosti deformacija i pomaka ovisno o primijenjenoj regularizacijskoj duljini. Ovaj trend je sličan onome kakav se javlja kod standardnog DVC algoritma. Naime, kao procjena prvog reda, duljina regularizacije igra istu ulogu kao duljina elementa kada se standardni DVC i regularizirani DVC uspoređuju u smislu mjernih nesigurnosti.

5.5. Zaključak i diskusija

Ispitivanje prezentirano unutar ovog poglavlja bavilo se kvantifikacijom standardnih mjernih nesigurnosti metode korelacije digitalnih volumena pri analizi različitih izvedbi staklenim vlaknima ojačanih polimera. Ispitni uzorci sa stohastički raspoređenim kontinuiranim vlaknima (tj. *MAT* arhitektura), kontinuiranim uzdužnim vlaknima (tj. *UD* arhitektura), uzdužno i poprečno pletenim vlaknima (tj. *WF* arhitektura) te s naizmjenično postavljanim $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ kontinuiranim vlaknima (tj. *AP* arhitektura), skenirani su korištenjem CT skenera *Werth TomoScope S* ustupljenog od strane tvrtke *Yazaki Europe Limited*. Kako bi se procijenila mjerna nesigurnost DVC metode, svaki je ispitni uzorak dva puta uzastopno skeniran u neopterećenom stanju. Budući da uzastopno skeniranje istog uzorka pod nepromijenjenim akvizicijskim uvjetima dovodi do pojave šumova, artefakata i drugih slučajnih grešaka koje se razlikuju između skenova, DVC algoritmi registrirat će lažne pomake. Ovi pomaci nisu posljedica primijenjenog opterećenja, već su izvor mjerne nesigurnosti metode. Kako bi se odredila mjerna nesigurnost DVC metode, promatrano područje interesa svakog ispitnog uzorka diskretizirano je mrežom konačnih elemenata različite duljine, što je ostvareno korištenjem *Correli 3.0* globalnog algoritma, razvijenom u programskom paketu *MATLAB*. Za svaku arhitekturu vlakana formirano je devet neovisnih mreža konačnih elemenata, pri čemu su veličine konačnih elemenata iznosile 97, 76, 56, 42, 30, 23, 16, 12 i 8 vokseli. Korištenjem standardnog DVC protokola, za svaku arhitekturu vlakana kvantificirana je mjerna nesigurnost pomaka i glavnih deformacija u ovisnosti o veličini korištenog konačnog elementa (tj. s obzirom na različitu prostornu rezoluciju).

Početno su, primjenom standardnog DVC protokola utvrđena polja pomaka i deformacija za istu veličinu mreže po različitim osima te je utvrđeno kako je kod svake arhitekture vlakana najmanja mjerna nesigurnost prisutna u y smjeru koji odgovara smjeru slaganja slojeva vlakana prilikom proizvodnje kompozitnih ploča iz kojih su kasnije izrezani ispitni uzorci. Dodatno je, za svaku arhitekturu vlakana, utvrđena vrijednost gradijenta slike po osima trodimenzionalne slike. Rezultati su pokazali kako je najveća vrijednost gradijenta slike za svaku arhitekturu vlakana upravo u y smjeru, što znači da je u tom smjeru ostvaren najpovoljniji kontrast za

korelaciju. Drugim riječima, pokazana je izrazita ovisnost mjerne nesigurnosti o vrijednosti gradijenta slike na način da viši gradijent sive nijanse tonova rezultira manjom mjernom nesigurnosti DVC metode. Nadalje, kod svih ispitnih uzoraka utvrđeni su veći čvorni pomaci pri korištenju finije diskretizacije promatranog volumena interesa. Uzevši u obzir kriterij koji definira prihvatljivu vrijednost mjerne nesigurnosti pomaka kada se DVC metoda koristi u mehanici čvrstih tijela, a koji iznosi 10^{-1} voksela ili manje [4], određene su minimalne veličine konačnih elemenata za svaku arhitekturu vlakana. Kod *MAT* arhitekture vlakana preporuča se, stoga, korištenje diskretizacije mrežom konačnih elemenata veličine 12 voksela. S druge pak strane, prihvatljive vrijednosti mjerne nesigurnosti DVC metode kod ispitivanja materijala *AP* arhitekture vlakana, postići će se primjenom mreže konačnih elemenata veličine 30 voksela. Kod ispitivanja *WF* arhitekture vlakana, potrebno je koristiti diskretizaciju mrežom konačnih elemenata veličine 68 voksela, dok je najgrublja diskretizacija potrebna kod *UD* arhitekture vlakana kod koje je potrebno koristiti konačne elemente veličine 95 voksela. Ostvareni rezultati u skladu su s izračunatim vrijednostima kontrasta trodimenzionalne slike, pa se zaključuje kako arhitekture s izraženijim kontrastom mogu mjeriti pomake s višom prostornom rezolucijom.

S obzirom na već utvrđenu spoznaju o povećanju mjerne nesigurnosti pri korištenju finije diskretizacije i s obzirom na činjenicu kako upravo finija diskretizacija pruža mogućnost boljeg opisivanja i praćenja lokalizacijskih fenomena prisutnih u unutrašnjosti materijala (npr. pojava inicijalnih pukotina unutar vlaknima ojačanih polimera), vrijedi još jednom napomenuti kako je kod primjene DVC metode intencija koristiti što je moguće finiju diskretizaciju, ali koja će još uvijek zadovoljiti prethodno definirani kriterij prihvatljive mjerne nesigurnosti pomaka od 10^{-1} voksela. U tom smislu, kako bi se dodatno snizila mjerna nesigurnost DVC metode, odnosno kako bi se za svaku promatranu arhitekturu vlakana omogućila primjena finije diskretizacije, ostvareno je filtriranje koje uzima u obzir samo mehanički signal iz polja pomaka. Ovo je izvršeno primjenom regulariziranog DVC protokola čije korištenje dokazano vodi smanjenju mjerne nesigurnosti DVC metode, što je već demonstrirano kod ispitivanja drugih vrsta materijala [142, 29]. Regularizirani DVC protokol, ostvaren također korištenjem *Correli 3.0* algoritma, podrazumijevao je upotrebu jedne diskretizacije kod koje je veličina konačnog elementa iznosila 12 voksela, dok su vrijednosti mjernih nesigurnost za četiri arhitekture vlakana kvantificirane s obzirom na različite regularizacijske duljine. Pritom je korišteno devet različitih regularizacijskih duljina tj. 256, 192, 128, 96, 64, 48, 32, 24 i 16 voksela. Provedeno ispitivanje pokazalo je kako, kod sve četiri arhitekture vlakana, primjena većih regularizacijskih duljina rezultira smanjenjem mjernih nesigurnosti pomaka i

deformacija. Primjenom mehaničke regularizacije implementirane u globalni DVC algoritam, najniže mjerne nesigurnosti zabilježene su za *MAT* arhitekturu vlakana, dok su kod *UD* i *WF* zabilježene najveće mjerne nesigurnosti. Iz tog je razloga, kako bi se zadovoljio kriterij prihvatljive vrijednosti standardne mjerne nesigurnosti pomaka od 10^{-1} voksel, kod *UD* i *WF* arhitekture vlakana potrebno koristiti veće regularizacijske duljine nego što je to slučaj s *MAT* arhitekturom. Također je, kao i kod standardnog DVC protokola, analizirajući mjerne nesigurnosti po osima utvrđeno kako su najniže mjerne nesigurnosti ostvarene kod svih arhitektura vlakana upravo u smjeru slaganja slojeva vlakana (tj. u y smjeru). U odnosu na kriterij o prihvatljivom iznosu mjerne nesigurnosti pomaka od 10^{-1} voksel, za svaku je arhitekturu vlakana određena minimalna regularizacijska duljina te je ustanovljeno kako je kod *MAT* arhitekture potrebno koristiti regularizacijske duljine tek malo veće od korištenih konačnih elemenata (tj. $16 < \xi < 13$). S druge pak strane, prihvatljive vrijednosti mjernih nesigurnosti izmjerenih pomaka kod *WF* i *UD* arhitekture vlakana, postići će se pri korištenju regularizacijskih duljina od 61, odnosno 65 voksel, što znači da je potrebno koristiti regularizacijske duljine koje se gotovo pet puta veće od veličine konačnog elementa. Kod *AP* arhitekture vlakana, za razliku od standardnog DVC protokola gdje se preporuča korištenje mreže konačnih elemenata veličine 30 voksel, prihvatljive iznose mjernih nesigurnosti moguće je postići primjenom regulariziranog protokola kada se koriste regularizacijske duljine veće od 43 voksel pri diskretizaciji mrežom konačnih elemenata veličine 12 voksel. Dodatno je u ovom dijelu rada utvrđeno kako je primjenom većih regularizacijskih duljina ($\xi > 128$ voksel) svaka od četiri analizirane arhitekture vlakana poprimila za red veličine niži iznos srednjih standardnih mjernih nesigurnosti u odnosu na slučaj kada je primijenjen standardni DVC protokol koji koristi konačne elemente jednake veličine.

Pažljiva interpretacija ostvarenih rezultata mjernih nesigurnosti pri primjeni, kako standardnog tako i regulariziranog DVC protokola, dodatno upućuje na izrazitu povezanost mikrostrukturnih značajki vlaknima ojačanih polimera s mjernom nesigurnosti DVC metode. *MAT* arhitektura vlakana, koja se odlikuje stohastičkom distribucijom pojedinačnih vlakana unutar slojeva i najpovoljnijim volumnim omjerom vlakana i matrice u smislu zastupljenosti različitih nijansi sive boje, bilježi najniže vrijednosti mjernih nesigurnosti. Zahvaljujući tim karakteristikama, ova arhitektura omogućuje primjenu najveće prostorne rezolucije pri ispitivanju DVC metodom. Nasuprot tome, *UD* arhitektura, kod koje analiza slika snimljenih primjenom računalne tomografije upućuje na najvećeg volumni udio vlakana, bilježi najveće vrijednosti mjernih nesigurnosti. Zbog svoje homogenosti i jednosmjernog usmjerenja vlakana, koje

uzorkuje siromašnu teksturu za korelacijska mjerenja, ova arhitektura ograničava prostornu rezoluciju koju je moguće postići primjenom DVC metode. U tom smislu, provedeno ispitivanje potvrđuje važnost *a priori* određivanja mjerne nesigurnosti, jer tekstura materijala i s njom povezana kvaliteta slike, izrazito utječu na pouzdanost podataka dobivenih primjenom DVC metode. Tijekom analize rezultata dobivenih na polimerima ojačanim različitim arhitekturama vlakana, utvrđeno je kako se kvaliteta volumetrijskih slika, u smislu mikrostruktura pogodnih za provedbu DVC mjerenja, može procijeniti na temelju srednjeg kontrasta zabilježenih CT skenova. Naime, vrijednosti srednjeg kontrasta dobivene za različite arhitekture slojeva vlakana i specifične načine slaganja slojeva vlakana unutar matrice koreliraju sa standardnim mjernim nesigurnostima DVC metode. Slike s višim vrijednostima kontrasta mogu se analizirati primjenom veće prostorne rezolucije, dok slike s nižim vrijednostima srednjeg kontrasta zahtijevaju primjenu grubljih mreža konačnih elemenata. Ovo upućuje na važnost određivanja utjecaja dodatnih faktora na kontrast i kvalitetu volumetrijskih slika dobivenih CT skeniranjem.

Zbog potencijalnog problema zatvaranja mikropukotina te pogrešnog interpretiranja mehaničkog oštećenja kod ispitivanja FRP materijala (poglavlje 2.7.2), preferira se *in-situ* pristup mehaničkog ispitivanja (poglavlje 2.8.2). Za određivanje pouzdanosti DVC metode korištene u tom kontekstu, od ključne je važnosti razumjeti utjecaj okoline koja okružuje ispitni uzorak (tj. cjevaste potpore *in-situ* ispitnog uređaja) na dobivene rezultate. Kao što je opisano u poglavlju 2.9.1., cjevasta potpora u potpunosti okružuje ispitivani objekt, zbog čega njezino prisustvo u procesu CT skeniranja predstavlja prepreku prodiranju X-zračenja kroz ispitivani objekt. Pretpostavka je kako će korištenje cjevaste potpore koja okružuje ispitni uzorak rezultirati dobivanjem volumetrijskih slika slabijeg kontrasta i višeg akvizicijskog šuma, u usporedbi sa slučajem kada je u putanji X-zračenja prisutan samo promatrani objekt, što je bio slučaj kod CT skeniranja provedenog unutar ovog poglavlja. Stoga je, zbog očekivanog slabijeg kontrasta trodimenzionalnih slika i viših razina šuma nastalih skeniranjem ispitnog uzorka okruženog cjevastom potporom, u sljedećem poglavlju provedeno istraživanje s ciljem kvantificiranja utjecaja materijala cjevaste potpore *in-situ* ispitnog uređaja na mjernu nesigurnost DVC metode.

6. ODREĐIVANJE UTJECAJA ISPITNOG OKRUŽENJA NA MJERNU NESIGURNOST DVC METODE I ISPITIVANJE PONAŠANJA MATERIJALA KOD IN-SITU MEHANIČKOG ISPITIVANJA

U ovom poglavlju analiziran je utjecaj ispitnog okruženja na standardnu mjernu nesigurnost pomaka i deformacija metode korelacije digitalnih volumena. Tijekom *in-situ* ispitivanja, ispitni uzorak okružen je cjevastom potporom koja prenosi opterećenje na uzorak. Budući da rendgenska zraka mora proći ispitni uzorak te cijev koja ga okružuje, dolazi do povećanja akvizicijskog šuma na registriranim 3D slikama. Povećanje šuma smanjuje standardnu mjernu rezoluciju te onemogućuje točno određivanje malih fluktuacija pomaka uzrokovanih mehaničkim signalom. Detaljno se razmatraju čimbenici koji doprinose povećanju šuma te njihovi specifični utjecaji na mjernu rezoluciju i konačne rezultate ispitivanja. Stoga je u prvom dijelu istraživanja određen utjecaj materijala cjevaste potpore *in-situ* ispitnog uređaja na mjernu nesigurnost DVC metode [143].

Nadalje, cjevaste potpore tijekom mehaničkog ispitivanja podnose opterećenje koje je ekvivalentno opterećenju ispitnog uzorka. Tijekom skeniranja ispitnog uzorka, opterećenje na uzorku ostaje konstantno, što znači da je pomak aktuatora onemogućen kako bi se minimizirali pomaci ispitnog uzorka. Na taj se način rekonstruirani volumen ne zamućuje zbog eventualnih pomaka ispitnog uzorka tijekom snimanja dvodimenzionalnih projekcija. Osim toga, kontroliranje pomaka aktuatora osigurava stabilnost uzorka, što je ključno za postizanje visoke točnosti i preciznosti prilikom provedbe DVC metode. Ovo pridonosi pouzdanosti mjernih podataka i omogućuje precizniju analizu mehaničkih svojstava ispitivanih materijala. Budući da CT skeniranje jedne trodimenzionalne slike može potrajati i do nekoliko sati, postoji mogućnost relaksacije cjevastih potpora. To može dovesti do pogrešnog interpretiranja ponašanja ispitivanog materijala. Da bi se ovi utjecaji uzeli u obzir kod analize ponašanja materijala, potrebno je poznavati stanje relaksacije cjevaste potpore i ispitnog uzorka tijekom cijelog procesa skeniranja. Zbog toga se u ovom poglavlju dodatno pristupilo identificiranju ponašanja cjevastih potpora izrađenih od različitih materijala pod konstantnim opterećenjem, kao i ponašanja polimernih kompozita različite arhitekture. Detaljno je analiziran odziv različitih materijala cjevastih potpora na dugotrajno opterećenje tijekom CT skeniranja te utjecaj tih materijala na stabilnost ispitnog uzorka i točnost mjerenja. Osim toga, istražit će se kako arhitektura polimernih kompozita može utjecati na njihovu sposobnost podnošenja opterećenja bez značajne relaksacije. Cilj je identifikacija optimalnih materijala i konstrukcije

za cjevaste potpore, što vodi minimiziranju rizika od relaksacije i osiguravanju visoke točnosti i pouzdanosti metode korelacije digitalnih volumena. Rezultati ovih analiza doprinose boljem razumijevanju utjecaja konstrukcijskog okruženja na preciznost mjerenja te pružaju smjernice za razvoj potpornih sustava u budućim istraživanjima.

6.1. Određivanje utjecaja materijala cjevaste potpore in-situ ispitnog uređaja na mjernu nesigurnost DVC metode

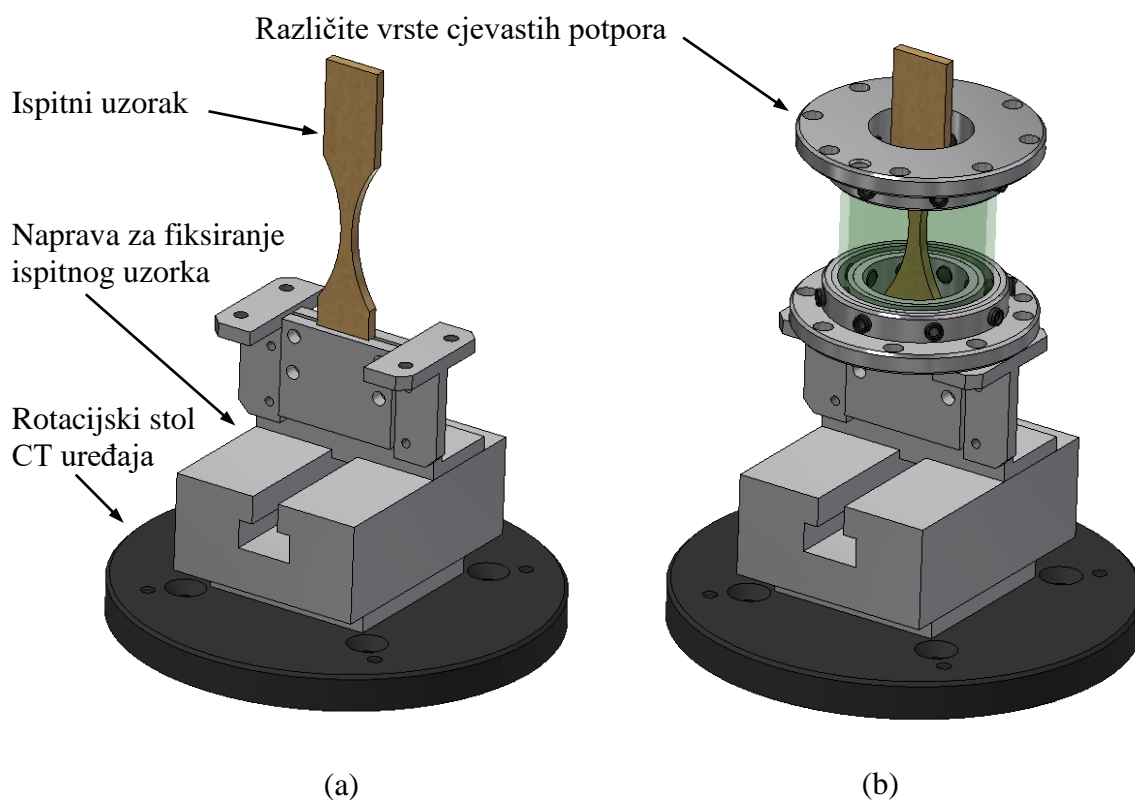
Unutar poglavlja 2.9.1 detaljno je objašnjeno kako najčešća izvedba *in-situ* kidalica uključuje primjenu cjevaste potpore koja, povezujući pokretne i nepokretne dijelove ispitnog uređaja, prenosi potrebno opterećenje na ispitni uzorak. Ovakvom izvedbom kidalice postiže se kompaktnost koja je osobito poželjna u kontekstu *in-situ* mehaničkih ispitivanja primjenom laboratorijske tomografije, gdje se najčešće koriste CT uređaji relativno malog radnog prostora. Osim potrebe za instalacijom kidalice unutar ograničenog radnog područja CT skenera ovakva izvedba *in-situ* kidalica također zahtijeva korištenje cjevastih potpora što je moguće manjeg promjera. Na ovaj se način, naime, omogućava približavanje ispitnog uzorka (koji je unutar cjevaste potpore) izvoru rendgenskog zračenja, čime je omogućeno postizanje većih prostornih rezolucija.

Budući da cjevasta potpora u potpunosti okružuje ispitivani objekt, njeno prisustvo u procesu CT skeniranja predstavlja prepreku prodiranju X-zračenja kroz ispitivani objekt. Kako se nalazi na putanji X-zračenja, prisustvo cjevaste potpore uzrokuje, naime, drugačije očitavanje intenziteta oslabljenog zračenja na detektoru CT uređaja. Zbog atenuacijskog broja X-zraka dobit će se dvodimenzionalne slike koje su različitog kontrasta u odnosu na slučaj kada se na putanji X-zračenja nalazi samo promatrani objekt (npr. kao kod znatno složenije izvedbe *in-situ* kidalice s traverzama). Kako bi se postigao zadovoljavajući kontrast na slikama zabilježenim prilikom *in-situ* ispitivanja s kidalicama cjevaste izvedbe, najčešće se koristi veća snaga snopa rendgenskog zračenja. Time se nastoji kompenzirati činjenica kako rendgenski snop, osim kroz ispitivani objekt treba penetrirati i kroz dvije stijenke cjevaste potpore. Usprkos nastojanju da se kroz korištenje veće snage snopa rendgenskog zračenja izvrši navedena kompenzacija, nužno je konstatirati kako prisustvo cjevaste potpore, ovisno o korištenom materijalu cijevi, može dovesti do registriranja slika slabije kvalitete. Slijedom navedenog, može se zaključiti kako će kvaliteta snimljenih slika ovisiti, među ostalim, i o materijalu korištene cjevaste potpore. Razlog ovome leži u činjenici kako različiti materijali imaju različite vrijednosti linearnog koeficijenta prigušenja. Ovo uzrokuje drugačija očitavanja vrijednosti intenziteta zračenja kada se koriste različiti materijali cjevaste potpore, pa time dolazi i do registriranja slika drugačije

kvalitete i kontrasta, koji je izuzetno bitan kod mjerne nesigurnosti DVC metode. Pošto pregledom dostupne znanstvene i stručne literature nije utvrđeno postojanje sličnih studija, unutar ovog rada pristupilo se procjeni utjecaja vrste materijala cjevaste potpore *in-situ* kidalice na kvalitetu DVC mjerenja, iskazanu preko ostvarenih mjernih nesigurnosti predložene metode. Istraživanje je ograničeno na vlaknima ojačane polimere s MAT arhitekturom vlakana.

6.1.1. Eksperimentalni postav

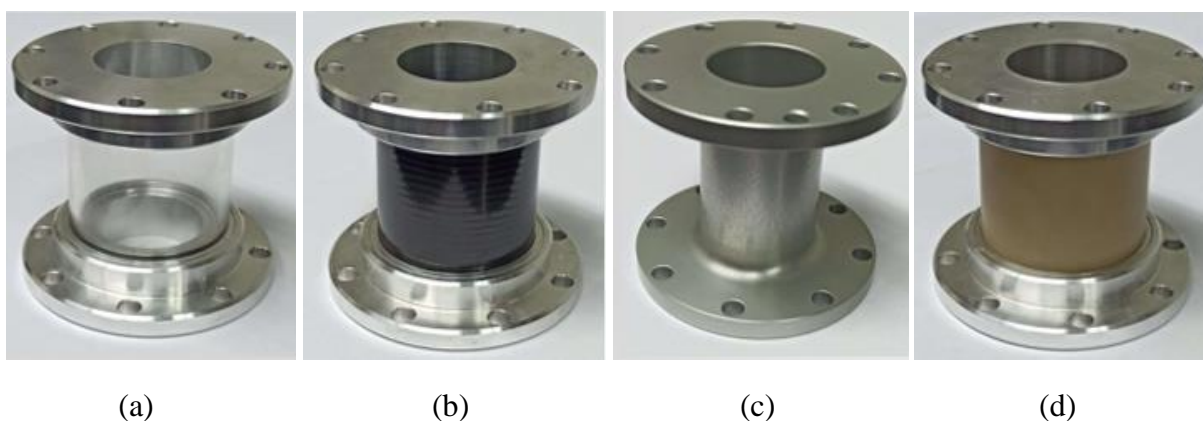
Za potrebe ovog dijela istraživanja razvijen je jednostavan prihvat koji služi za montažu ispitnog uzorka u centar rotacijskog stola CT uređaja (slika 6-1). Predloženi prihvat ispitnog uzorka ima odgovarajuće sučelje koje omogućuje jednostavnu instalaciju različitih vrsta cjevastih potpora, pri čemu je također osigurana centričnost ispitnog uzorka u odnosu na potpornu cijev. Konstrukcija prihvata simulira *in-situ* kidalicu s cjevastom potporom te omogućuje instalaciju četiriju vrsta cjevastih potpora proizvedenih u svrhu ovog ispitivanja, a detaljno opisanih unutar poglavlja 2.9.1.



Slika 6-1 Prihvat za montažu ispitnog uzorka (a) bez instalirane cjevaste potpore i (b) s instaliranom cjevastom potporom

Odabir materijala cjevastih potpora izvršen je na osnovu pregleda trenutnog stanja istraživanja, pri čemu je utvrđeno kako se u konstrukciji *in-situ* kidalice najčešće koriste cijevi izrađene od polimetilmetakrilata (PMMA), dok primjenu također nalaze aluminijske cijevi, kao i cijevi

izrađene od polimera ojačanih ugljičnim vlaknima. Dodatno je u istraživanje uključena i cijev od poli(eter-eter-eton)-a (PEEK). Iako dosada nije zabilježena upotreba PEEK materijala za izradu cjevastih potpora, ovaj materijal svoju primjenu ipak nalazi kod određenih izvedbi *in-situ* uređaja, kao npr. izvedba steznih čeljusti *in-situ* uređaja [45] ili izvedba naprave za tlačni test [114]. Povoljna mehanička svojstva PEEK materijala ukazuju na mogućnost njegova korištenja pri izvedbi cjevastih potpora, pri čemu je prethodno potrebno ispitati na koji način ova vrsta materijala utječe na propusnost X-zraka prilikom skeniranja. Korištene cjevaste potpore prikazane su na slici 6-2.



Slika 6-2 Cjevaste potpore izrađene iz (a) PMMA, (b) epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima, (c) aluminijske i (d) PEEK materijala

6.1.2. Ispitni uzorak

U ovom dijelu istraživanja korišten je samo jedan ispitni uzorak izrađen od vinilesterske smole ojačane kontinuiranim mat vlaknima (tj. *MAT* arhitekture vlakana). Radi se o identičnom tipu ispitnog uzorka kakav je korišten u eksperimentalnom ispitivanju opisanom u prethodnom poglavlju, kada se određivao utjecaj različite arhitekture vlakana na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode. Materijal korištenog ispitnog uzorka detaljno je opisan unutar poglavlja 4.4.1, dok su geometrija i dimenzije uzorka prikazane na slici 5-1.

6.1.3. Provedba eksperimentalnog istraživanja

Skeniranje ispitnog uzorka provedeno je na laboratorijskom CT uređaju *X50+ North Star Imaging* u *Laboratoire de Mécanique Paris - Saclay* u Francuskoj. Pritom je ostvareno pet različitih konfiguracija eksperimentalnog postava koje su definirane u nastavku:

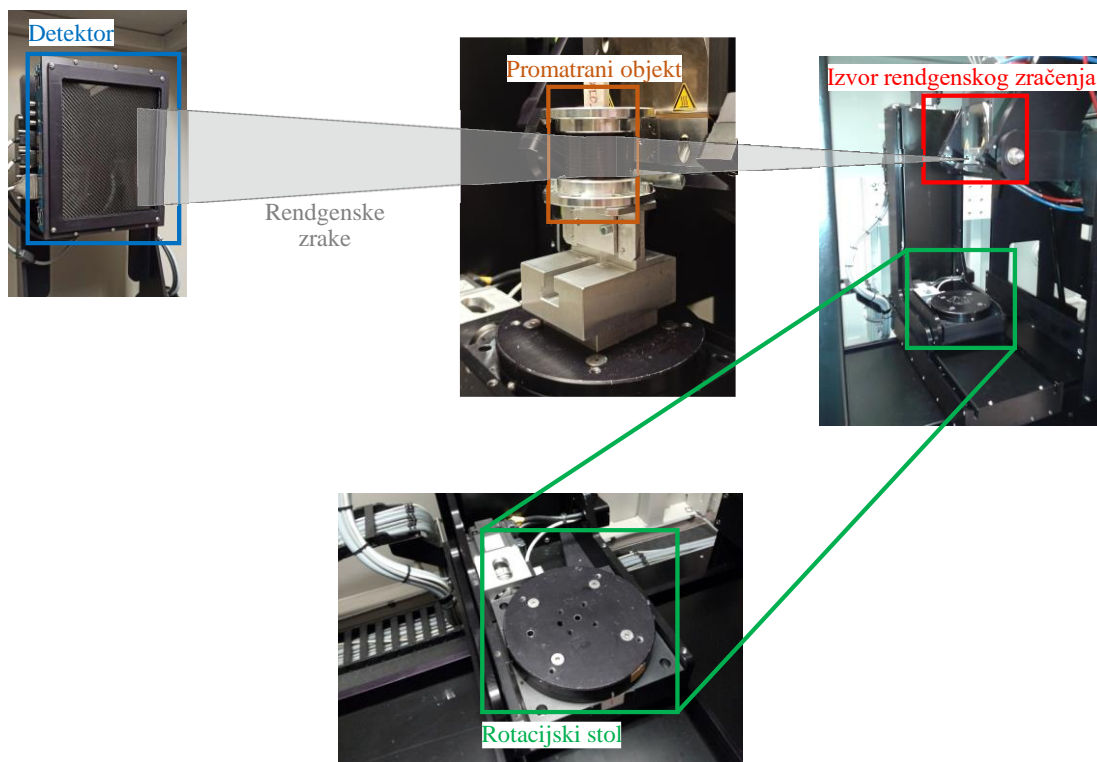
1. konfiguracija: CT skeniranje ispitnog uzorka bez prisustva cijevi
2. konfiguracija: CT skeniranje kada je ispitni uzorak okružen s cijevi od PMMA
3. konfiguracija: CT skeniranje kada je ispitni uzorak okružen s polimernom cijevi ojačanom ugljičnim vlaknima (odnosno s cijevi izrađenom od epoksidne smole koja je

ojačana ugljičnim vlaknima)

4. konfiguracija: CT skeniranje kada je ispitni uzorak okružen aluminijskom cijevi
5. konfiguracija: CT skeniranje kada je ispitni uzorak okružen s cijevi od PEEK.

Prva konfiguracija, odnosno skeniranje ispitnog uzorka bez prisustva cijevi koja ga okružuje, provedena je u svrhu definiranja referentnog slučaja koji će služiti za usporedbu rezultata dobivenih kod preostale četiri konfiguracije. Napominje se kako ovakav slučaj ne postoji kod većine *in-situ* kidalica korištenih za mehanička ispitivanja (tj. kod kidalica s cjevastom potporom), ali je prisutan kod specijalnih, znatno složenijih i rjeđe korištenih izvedbi kidalica s traverzama opisanih u poglavlju 2.9.2.

Ekperimentalni postav korišten unutar ovog dijela rada prikazan je na slici 6-3.



Slika 6-3 Ekperimentalni postav korišten za određivanje utjecaja okoline na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode

Kao u prvom dijelu istraživanja (poglavlje 5), za svaku predloženu konfiguraciju zabilježene su dvije volumetrijske slike u neopterećenom stanju, pri čemu nije došlo do pomaka krutog tijela. Kod svakog su slučaja registrirana dva visokokvalitetna skena koji su uključivali 800 projekcija snimljenih u trenucima između pojedinih inkrementalnih pomaka; dok je rotacijski stol CT uređaja zajedno s ispitnim uzorkom mirovao. Za definiciju svake finalne projekcije zabilježeno je 20 projekcija, čija je srednja vrijednost piksela uzeta u obzir za provedbu

rekonstrukcije. Predloženim protokolom smanjuje se akvizicijski šum CT skenera. Detaljni parametri skeniranja provedenog u svrhu određivanja utjecaja okoline na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode dani su u tablici 6-1.

Tablica 6-1 Parametri CT skeniranja kod određivanja utjecaja okoline na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode

CT uređaj	<i>X50+ North Star Imaging</i>
Izvor X zračenja	XRyWorX XWT-240-CT
Cilj / Anoda	W (refleksijski mod)
Filter	-
Napon zračenja	120 kV (slučaj bez cijevi, PMMA cijev)
	150 kV (polimerna cijev ojačana ugljičnim vlaknima, PEEK cijev)
	200 kV (aluminijska cijev)
Struja zračenja	250 μ A (slučaj bez cijevi, PMMA cijev)
	200 μ A (polimerna cijev ojačana ugljičnim vlaknima, PEEK cijev)
	150 μ A (aluminijska cijev)
Promjer žarišne točke	5 μ m
Udaljenost izvor zračenja - detektor	910 mm
Udaljenost izvor zračenja – ispitni objekt	55 mm
Detektor	Dexela 2323
Definicija	1507 \times 1849 piksela (2 \times 2 biniranje)
Broj projekcija	800
Ukupan kutni pomak	360°
Prosječni broj zabilježenih slika	20 po jednoj projekciji
Brzina snimanja slika	6 fps
Trajanje skeniranja	55 min
Rekonstrukcijski algoritam	Filtrirana inverzna projekcija
Amplituda sive skale	8 bitova
Veličina obrezanog volumena	685 \times 726 \times 860 voksela (nakon obrezivanja)
Vidno polje	5,7 \times 6,0 \times 7,1 mm ³ (nakon obrezivanja)
Mjerilo slike	8,3 μ m/voksel
Uzorak	Prikazan na slikama 6-4 do 6-8

Valja napomenuti kako su vrijednosti struje i napona zračenja odabrani iskustveno, pa su, ovisno o korištenoj cjevastoj potpori, primijenjene vrijednosti struje varirale u rasponu od 150 μA do 250 μA , dok je korišten napon iznosio od 120 kV do 200 kV. Prethodno navedenih 800 projekcija snimljenih po jednom skenu, u kombinaciji s brojem snimljenih slika po jednoj projekciji (eng. *Frame Average*) i brzinom snimanja slika (eng. *Frame Rate*), rezultiralo je akvizicijskim vremenom od 55 minuta za jedan sken.

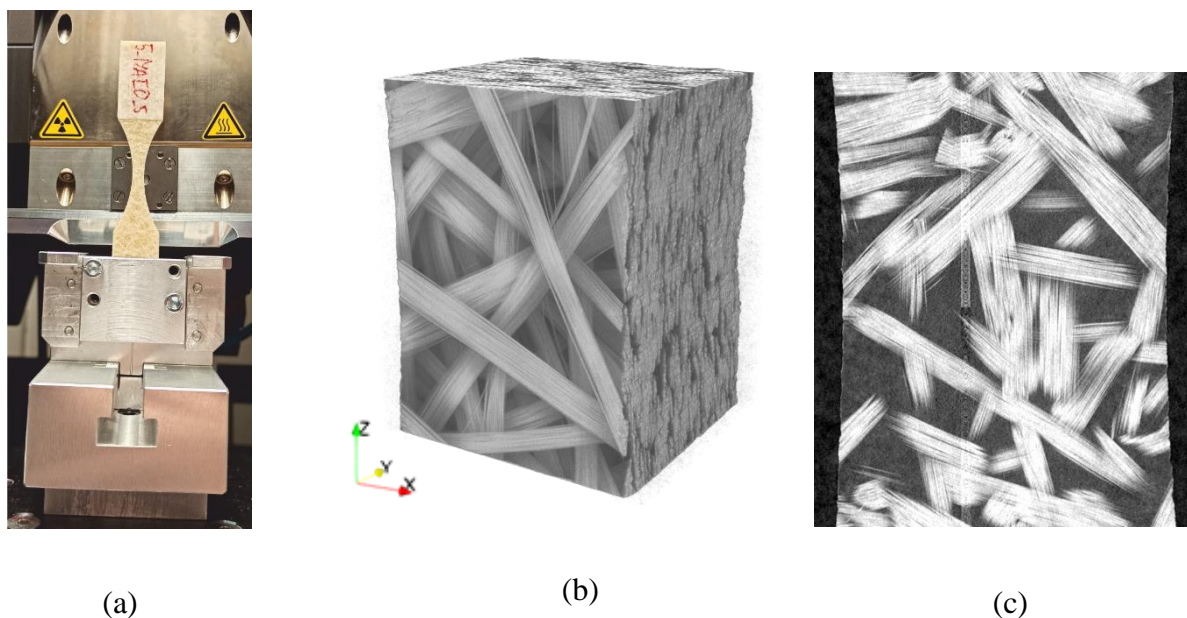
Prilikom zamjene cjevastih potpora, nije se pristupilo vađenju ispitnog uzorka iz prihvata, već su se cjevaste potpore pažljivo mijenjale kako bi se osiguralo da ispitni uzorak ostane u nepromijenjenom položaju, udaljen 55 mm od izvora zračenja i 910 mm od detektora CT skenera. Za razliku od prvog dijela ispitivanja (poglavlje 5), gdje je korišten aluminijski filter, u ovom dijelu rada CT skeniranje provedeno je bez prisustva filtera.

Proces rekonstrukcije 3D volumena iz zabilježenih dvodimenzionalnih projekcija temeljen je na filtriranoj inverznoj projekciji iz koje je dobivena trodimenzionalna slika promatranog objekta s različitim vrijednostima skale sivih tonova, pri čemu fizička veličina jednog voksel iznosi 8,3 μm . Kao rezultat rekonstrukcije 3D volumena iz snimljenih je dvodimenzionalnih projekcija, za svaki ispitni uzorak dobiven inicijalni sken čije dimenzije nakon obrezivanja (eng. *Crop*) iznose $685 \times 726 \times 860$ voksel. Uzimajući u obzir postignutu prostornu rezoluciju od 8,3 μm /voksel, definirani volumen promatranog područja interesa približnih je dimenzija $5,7 \times 6,0 \times 7,1 \text{ mm}^3$. Sveobuhvatni parametri CT skeniranja prikazani su u tablici 6-1.

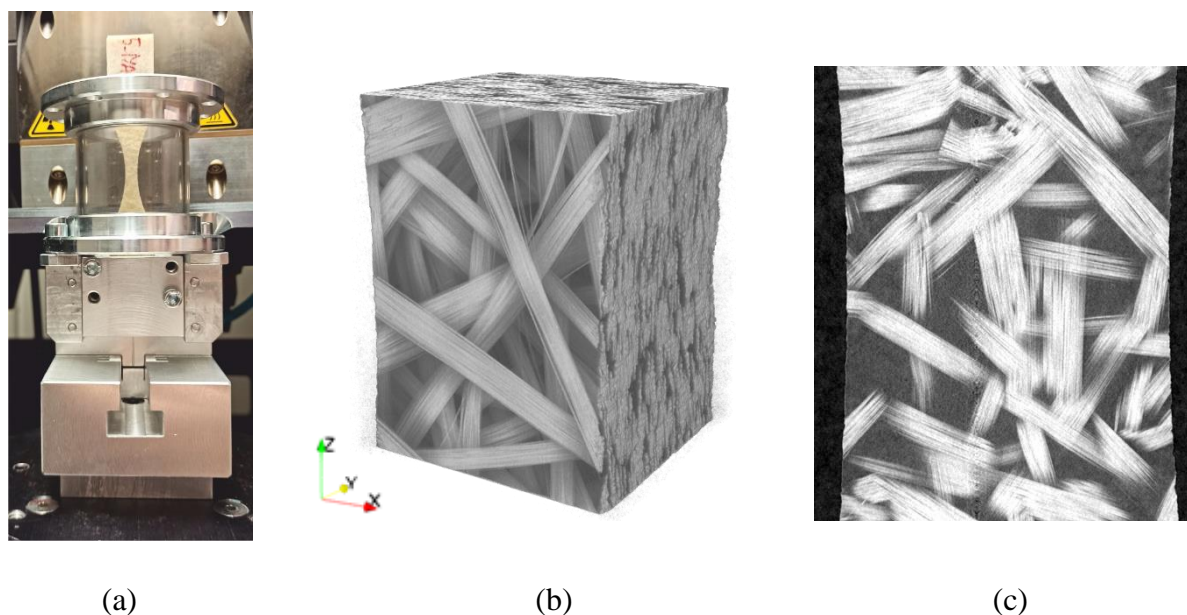
Kvalitativne informacije o postignutim kontrastima pri skeniranju ispitnog uzorka s *MAT* arhitekturom vlakana, pri upotrebi različitih vrsta cjevastih potpora, prikazane su na slikama 6-4 do 6-8. Za svaku konfiguraciju ispitivanja (tj. CT skeniranja) prikazan je eksperimentalni postav s odgovarajućom cjevastom potporom, rekonstruirani 3D volumen te središnji presjek kroz ravninu *x-z* rekonstruiranog volumena.

Vizualnim pregledom rekonstruiranih 3D volumena, kao i prikazanih središnjih presjeka, preliminarno je zaključeno kako će slučaj kada se koristi aluminijska cjevasta potpora (slika 6-7) biti najizazovniji za DVC analizu, pošto ovaj slučaj rezultira najlošijom kvalitetom slika. Smanjena kvaliteta ovako dobivenih slika rezultat je većeg linearnog atenuacijskog koeficijenta kod aluminijske materije nego što je to slučaj s tri preostale vrste materijala cjevaste potpore. Nadalje, smanjena kvaliteta volumetrijskih slika nastalih kada se koristi aluminijska cjevasta potpora, odnosu na kvalitetu volumetrijskih slika iz prvog dijela ispitivanja (slika 4-9), posljedica je prolaska rendgenskog zračenja kroz dvostruku stijenu aluminijske cijevi čija je širina 2 mm (vidjeti sliku 2-26 i tablicu 2-1). Za razliku od ovog slučaja, u prvom je dijelu istraživanja

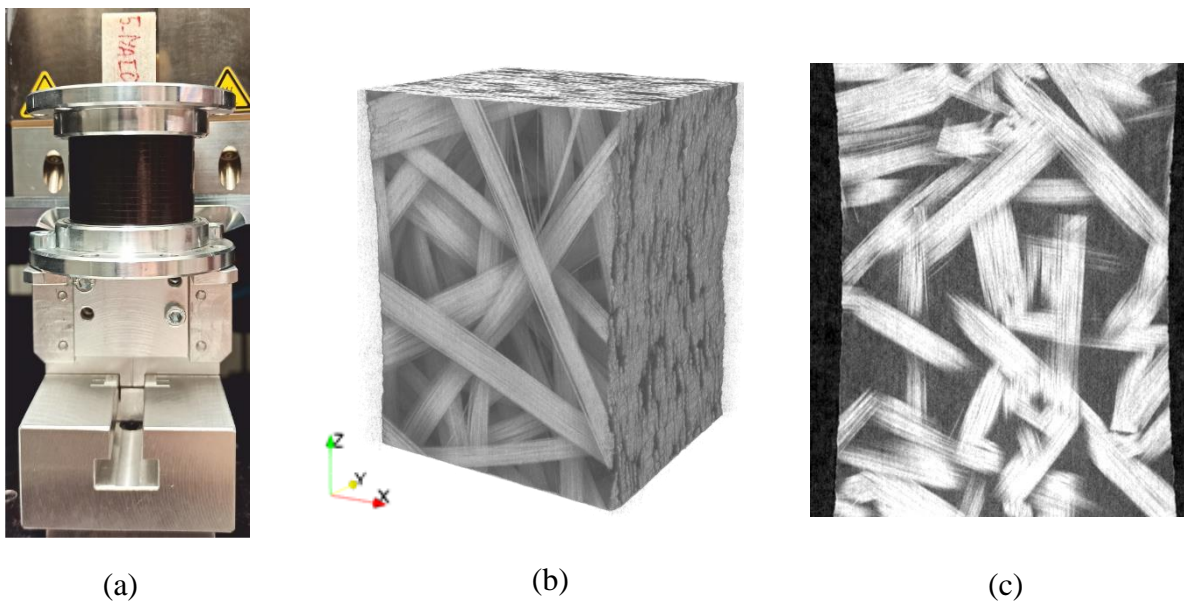
korišten aluminijski filter debljine svega 1 mm. Nadalje, vizualnim pregledom rekonstruiranih volumena i slika središnjih presjeka za slučajeve kada je ispitni uzorak okružen cijevi od PMMA (slika 6-5(b) i slika 6-5(c)), zatim s polimernom cijevi ojačanom ugljičnim vlaknima (slika 6-6(b) i slika 6-6(c)) te s cijevi od PEEK (slika 6-8(b) i slika 6-8(c)) može se ustanoviti kako se radi o približno jednakoj kvaliteti slika.



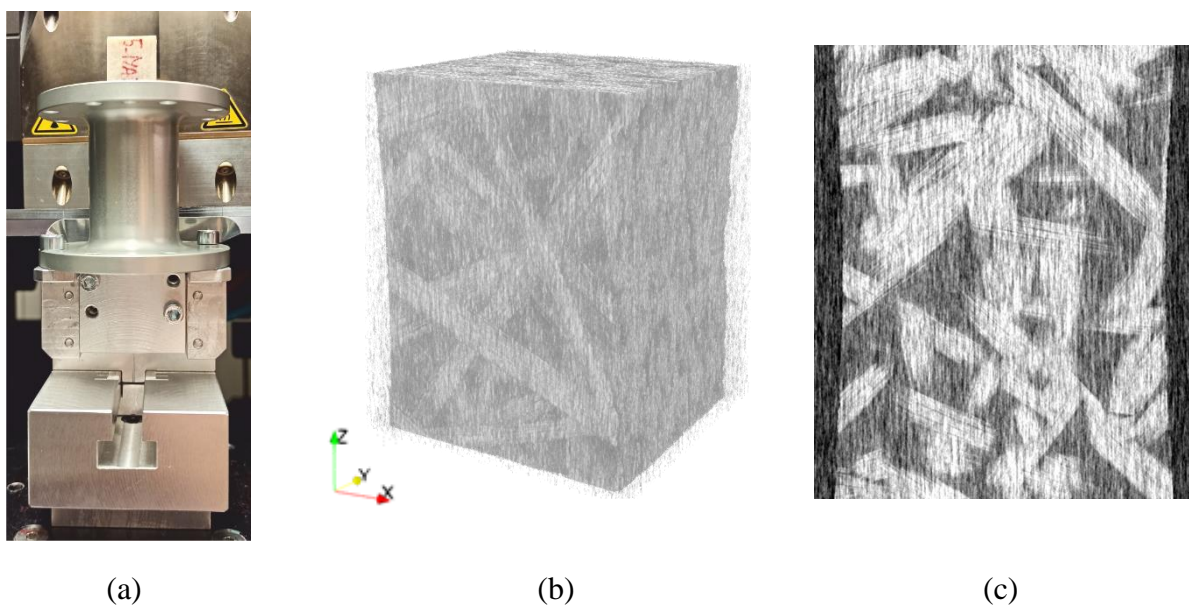
Slika 6-4 Rezultat skeniranja kada se ne koristi cjevasta potpora; (a) ispitni postav, (b) rekonstruirani volumen i (c) središnji presjek kroz x - z ravninu



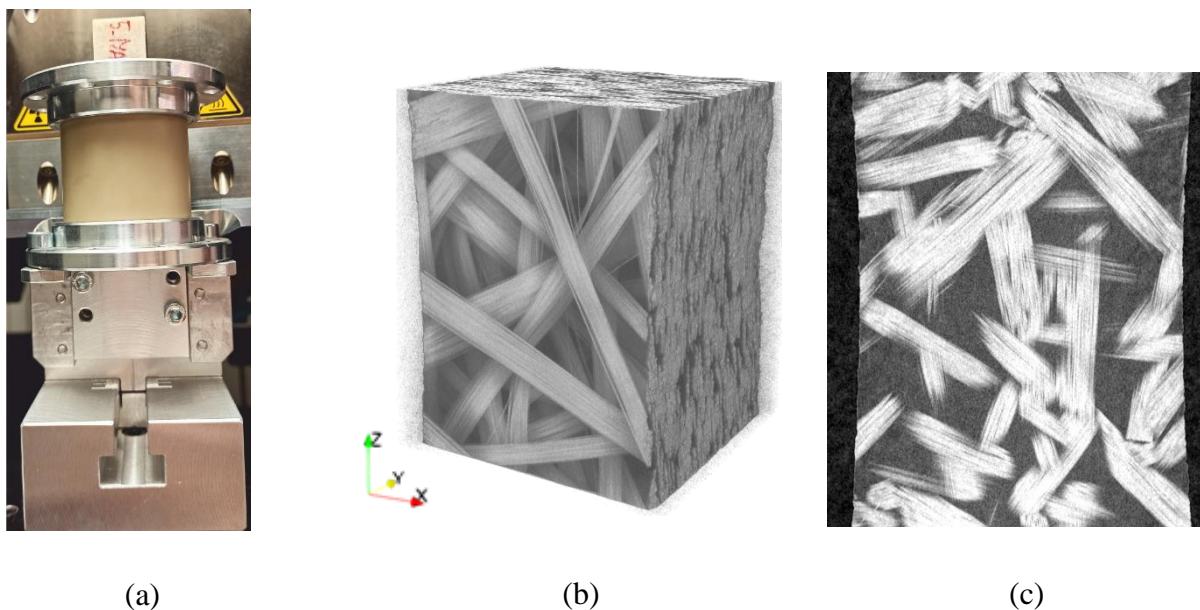
Slika 6-5 Rezultat skeniranja kada se koristi cjevasta potpora od PMMA; (a) ispitni postav, (b) rekonstruirani volumen i (c) središnji presjek kroz x - z ravninu



Slika 6-6 Rezultat skeniranja kada se koristi cjevasta potpora od polimerne cijevi ojačane ugljičnim vlaknima; (a) ispitni postav, (b) rekonstruirani volumen i (c) središnji presjek kroz x - z ravninu



Slika 6-7 Rezultat skeniranja kada se koristi cjevasta potpora od aluminijske cijevi; (a) ispitni postav, (b) rekonstruirani volumen i (c) središnji presjek kroz x - z ravninu



Slika 6-8 Rezultat skeniranja kada se koristi cjevasta potpora od PEEK; (a) ispitni postav, (b) rekonstruirani volumen i (c) središnji presjek kroz x - z ravninu

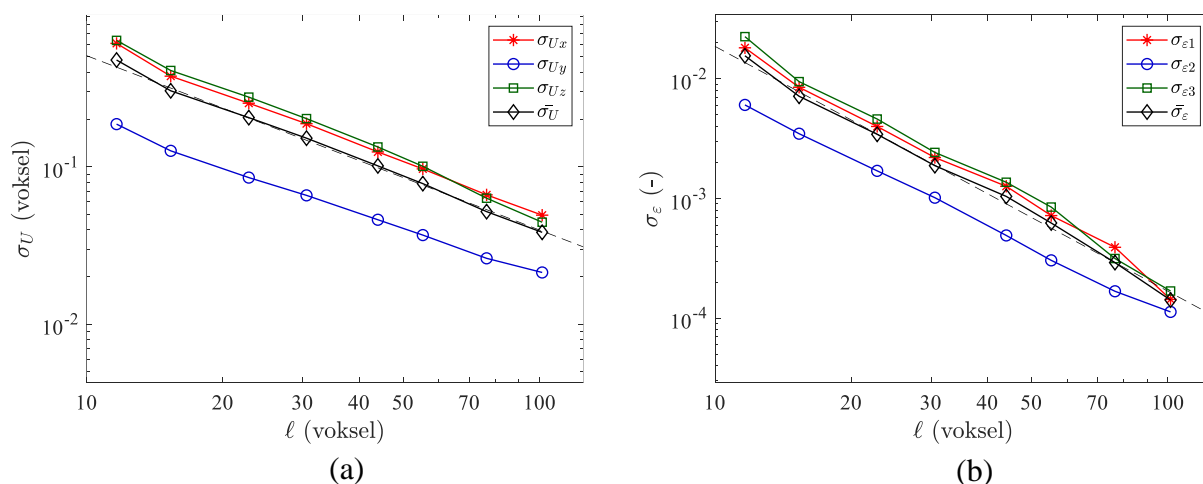
6.1.4. Mjerenje 3D polja pomaka i određivanje standardne mjerne nesigurnosti DVC metode ovisno o ispitnom okruženju

Utvrđivanju mjerne nesigurnosti DVC metode pristupilo se mjerenjem polja pomaka, što je ostvareno korištenjem *Correli 3.0* algoritma [138] razvijenom u programskom paketu *MATLAB*. Za razliku od prvog dijela istraživanja, utjecaj ispitnog okruženja na mjernu nesigurnost DVC metode ispitan je primjenom standardnog DVC algoritma, pri čemu mehanička regularizacija nije primijenjena. Promatrano područje interesa diskretizirano je mrežom konačnih elemenata veličine 101, 76, 55, 44, 30, 22, 15 i 11 vokseli. Korišteni su tetraedarski konačni elementi prvog reda (T4) [141] opisani linearnim funkcijama oblika, a kao kriterij podudaranja slika u referentnoj i deformiranoj konfiguraciji implementirana je suma kvadrata razlike u DVC algoritam. Aproksimacija vrijednosti sive skale boje s čvornih pomaka mreže konačnih elemenata izvršena je bikubičnom interpolacijom na razini vokseli. Kompletni parametri DVC analize primijenjeni unutar ovog poglavlja dani su u tablici 6-2.

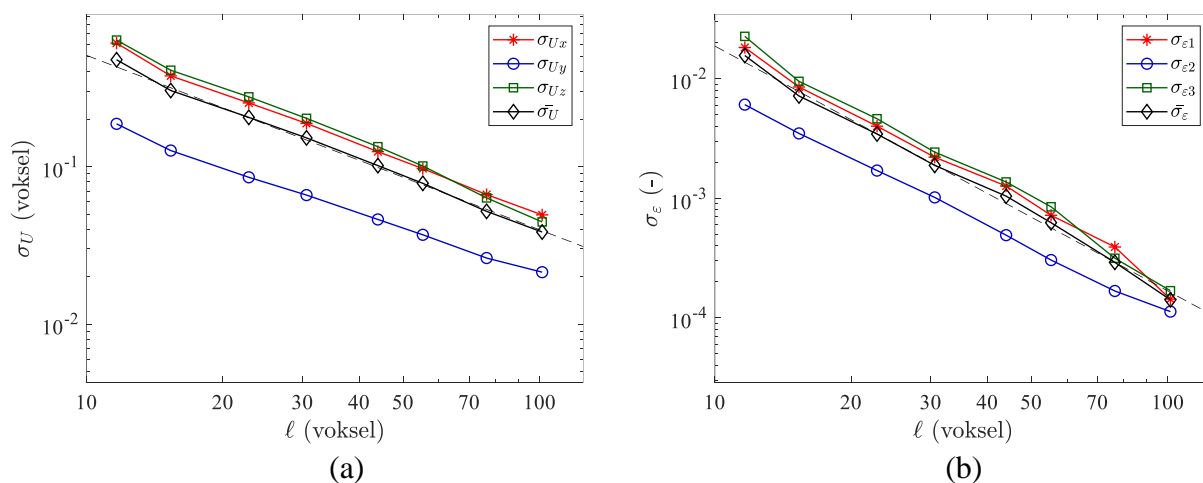
Tablica 6-2 Parametri DVC analize kod određivanja utjecaja okoline na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode

DVC algoritam	<i>Correli 3.0</i> [138]
Srednja veličina elementa (vokseli)	101, 76, 55, 44, 30, 22, 15, 11
Funkcija oblika	Linearna funkcija (T4)
Kriterij podudaranja	Penalizirana suma kvadrata razlika (SSD)
Interpolacija	Bikubična

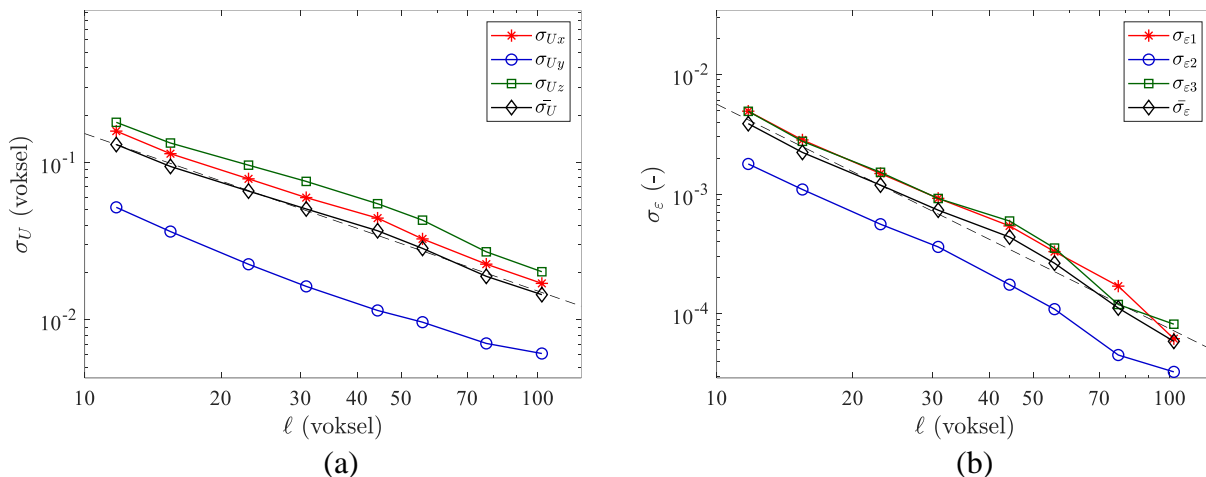
Rezultati standardnih nesigurnosti izmjerenih pomaka i pripadajućih deformacija, za svaki od pet analiziranih slučajeva, prikazani su na slikama 6-9 do 6-13. Osim standardnih nesigurnosti u x , y i z smjeru, na navedenim su slikama, u svrhu daljnjih usporedbi, prikazane i vrijednosti srednjih standardnih nesigurnosti (crne krivulje) kao i pravci proizašli iz aproksimacije srednjih standardnih nesigurnosti potencijalnim zakonom (crne isprekidane linije). Ono što se može uočiti za svaku od analiziranih konfiguracija jest postizanje najnižih vrijednosti standardnih nesigurnosti u y smjeru, dok su u preostala dva smjera te vrijednosti otprilike jednake. Ovaj je trend u potpunosti konzistentan s rezultatima prvog dijela eksperimentalnog ispitivanja za ispitni uzorak s *MAT* arhitekturom vlakana. Također se može primijetiti kako su kod svake od ispitivanih konfiguracija vrijednosti mjernih nesigurnosti deformacija otprilike za red veličine niže nego što je to slučaj s mjernim nesigurnostima pomaka.



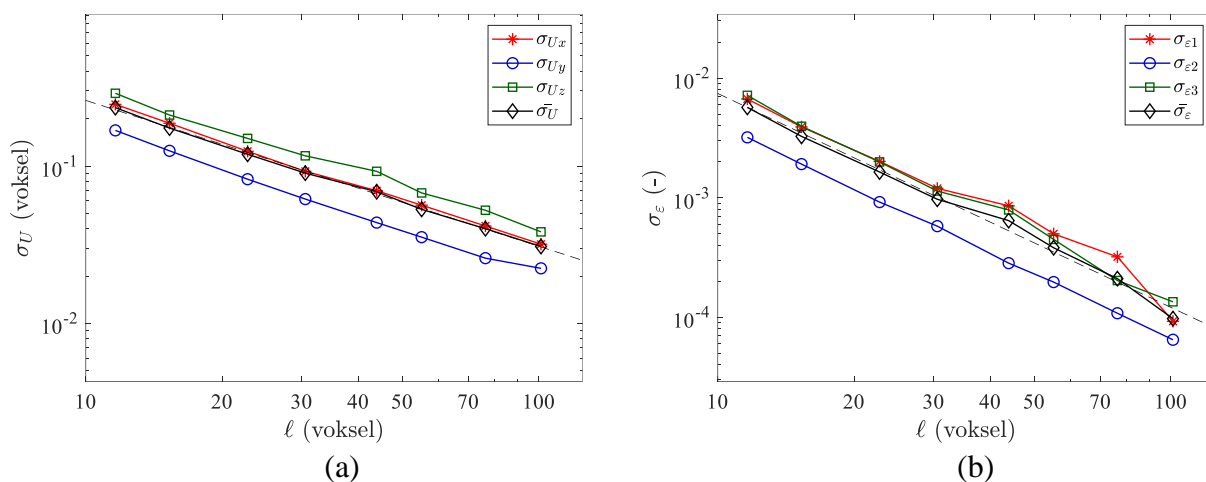
Slika 6-9 Standardna mjerna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata kod polimera ojačanog staklenim vlaknima s *MAT* arhitekturom vlakana koji nije bio okružen s cijevi prilikom CT skeniranja



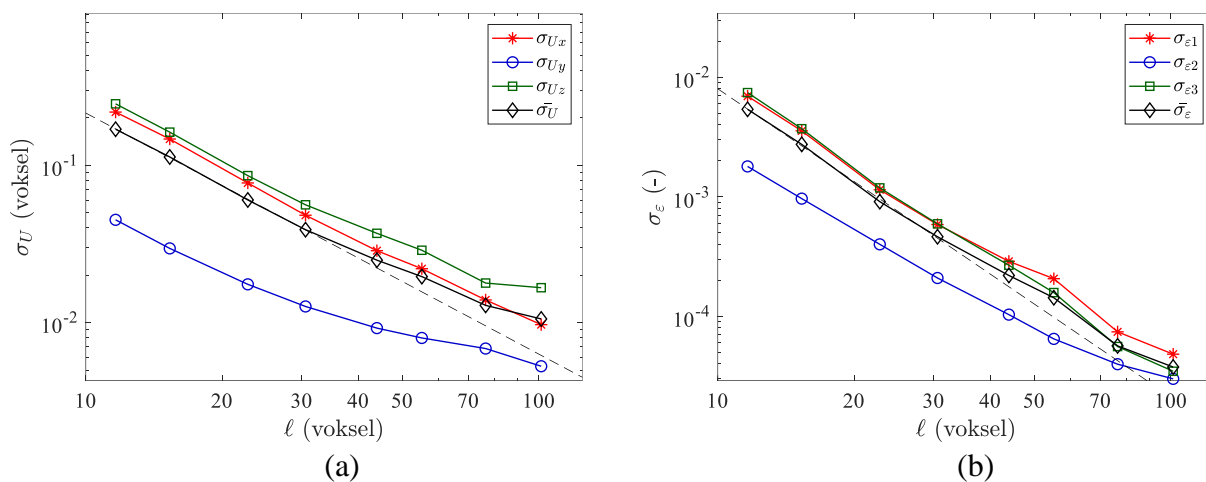
Slika 6-10 Standardna mjerna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata kod polimera ojačanog staklenim vlaknima s *MAT* arhitekturom vlakana, okružen cijevi od PMMA prilikom CT skeniranja



Slika 6-11 Standardna mjerna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata kod polimera ojačanog staklenim vlaknima s MAT arhitekturom vlakana, okružen cijevi od polimera ojačanog ugljičnim vlaknima prilikom CT skeniranja



Slika 6-12 Standardna mjerna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata kod polimera ojačanog staklenim vlaknima s MAT arhitekturom vlakana, okružen aluminijskom cijevi prilikom CT skeniranja



Slika 6-13 Standardna mjerna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata kod polimera ojačanog staklenim vlaknima s MAT arhitekturom vlakana, okružen cijevi od PEEK prilikom CT skeniranja

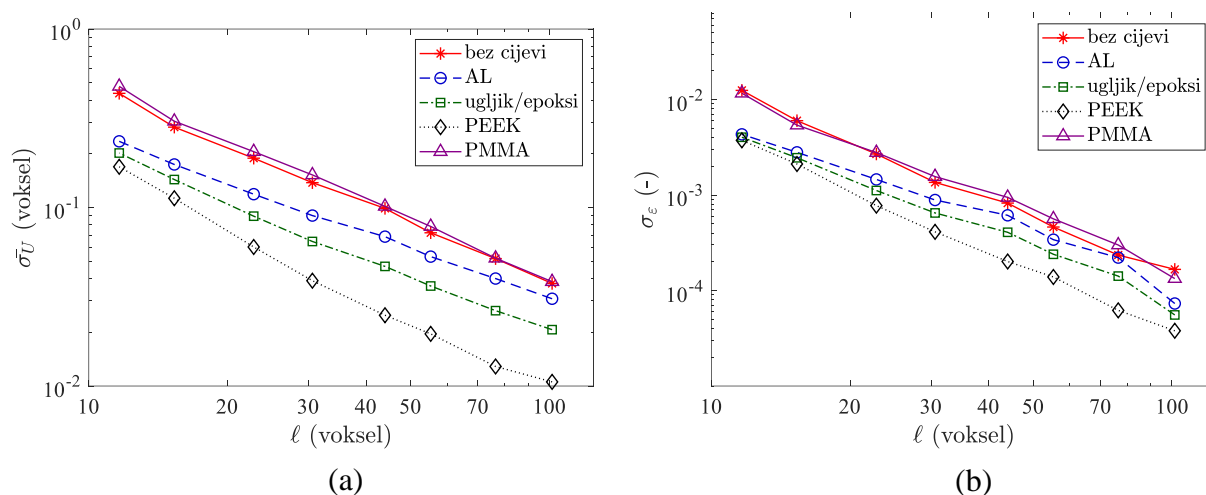
Ostvarivanje nižih vrijednosti mjernih nesigurnosti u y smjeru može se objasniti izračunatim srednjim kontrastima zabilježenih volumetrijskih slika. Određivanjem vrijednosti kvadratne sredine (RMS) gradijenta slike za svaki smjer, utvrđeno je kako je najpovoljniji (tj. najveći) kontrast kod svake od analiziranih konfiguracija prisutan upravo u y smjeru (vidi tablicu 6-3), koji odgovara smjeru polaganja slojeva staklenih vlakana prilikom proizvodnje kompozita iz kojeg su rezani ispitni uzorci. Kako u ovom dijelu rada nisu skenirane različite arhitekture vlakana, već je skeniran samo uzorak s *MAT* arhitekturom vlakana, srednje vrijednosti gradijenta slike po osima (tablica 6-3) dane su samo za slučaj kad je ispitni uzorak okružen jednom vrstom cijevi. Pošto su razlike u gradijentima slike po osima uvjetovane arhitekturom, odnosno distribucijom vlakana unutar matrice, a ne vrstom materijala koji okružuje ispitni uzorak, u tablici su navedene samo vrijednosti za slučaj kada je uzorak okružen s cijevi od PMMA. Kod korištenja ostalih materijala cijevi za očekivati je podjednake iznose RMS po osima. Više vrijednosti srednje vrijednosti gradijenta slike po osima u tablici 6-3, u odnosu na *MAT* slučaj prikazan u tablici 5-4, posljedica su skeniranja ispitnih uzoraka korištenjem različitih CT skenera, odnosno korištenjem različitih parametara skeniranja.

Tablica 6-3 Srednje vrijednosti gradijenta slike (RMS) ostvarene skeniranjem ispitnog uzorka korištenjem parametara definiranim u tablici 6-1

	RMS(∇f_x)	RMS(∇f_y)	RMS(∇f_z)
	($GL/voksel$)	($GL/voksel$)	($GL/voksel$)
Ispitni uzorak okružen s cijevi od PMMA	11,3	26,3	10,7

Usporedba srednjih standardnih nesigurnosti izmjerenih pomaka i pripadajućih deformacija za analizirane konfiguracije eksperimentalnog postava prikazana je na slici 6-14. Iz dobivenih se rezultata može uočiti kako se najniži iznosi standardnih nesigurnosti registriraju kod korištenja cjevaste potpore izrađene od PEEK materijala. Za konfiguracije kada se koriste aluminijska cijev i cijev od epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima, zabilježene su neznatno više vrijednosti za elemente manje od 22 voksel. Međutim, kod navedenih konfiguracija standardne nesigurnosti DVC metode znatno su veće za $\ell \geq 22$ voksel. Najviši iznosi srednjih standardnih nesigurnosti dobiveni su za slučaj bez cijevi i za slučaj kada se koriste cjevaste potpore izrađene od PMMA. Vrijednosti za ove konfiguracije približno su jednake. Pretpostavka je kako cjevaste potpore izrađene iz epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima i PEEK materijala filtriraju određene neželjene pojave nastale uslijed emisije X-zračenja (npr. filtriranje niskoenergetskih rendgenskih zraka), što posljedično rezultira s nižim razinama šuma

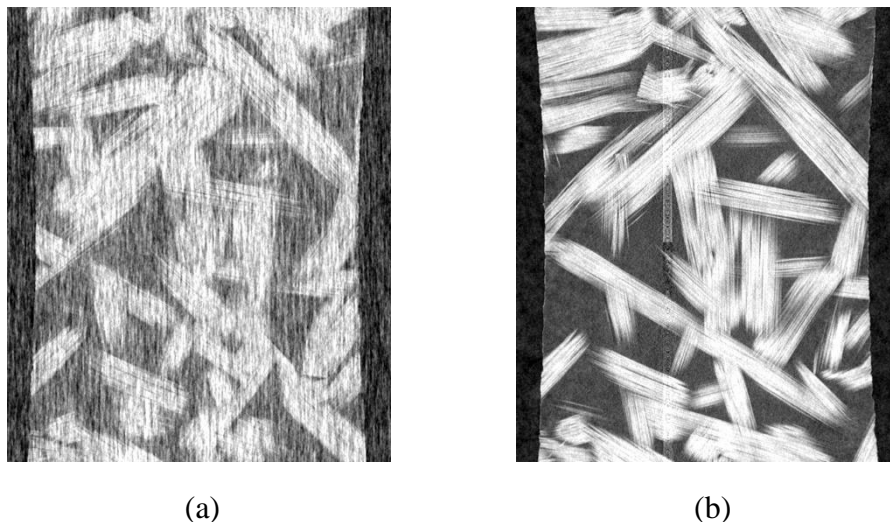
te znatno manjim vrijednostima standardnih mjernih nesigurnosti.



Slika 6-14 Srednje standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija kod različitih izvedbi cjevastih potpora. Standardne mjerne nesigurnosti pomaka i deformacija prikazane su u ovisnosti o veličini korištenih konačnih elemenata

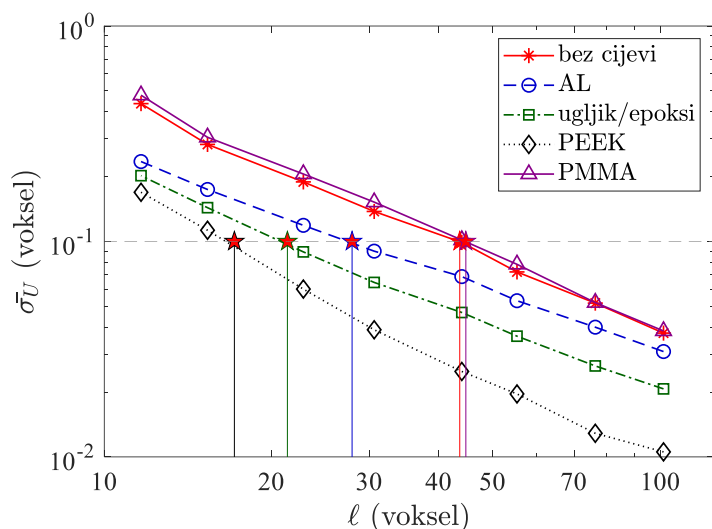
Također je zanimljivo promotriti rezultate standardnih mjernih nesigurnosti nastalih pri korištenju aluminijske cjevaste potpore. Iako ovaj slučaj kvalitativno rezultira slikama najlošije kvalitete, standardne mjerne nesigurnosti izmjerenih pomaka, i posljedično mjerne nesigurnosti deformacija, bit će u ovom slučaju niže nego primjerice, kod slučaja kada ispitni uzorak nije okružen nikakvom cijevi. Navedeni se fenomen može dovesti u vezu s činjenicom kako je upravo aluminijski filter često korišten kod određenih izvedbi rendgenskih cijevi. Komponenta izrađena od aluminijske koristi se za prekrivanje otvora kroz koji snop X-zraka izlazi iz rendgenske cijevi. Kada rendgensko zračenje prolazi kroz aluminijski filter, dolazi do apsorpcije X-zračenja niže energije, tj. X-zraka većih valnih duljina. S druge strane, X-zračenje veće energije, tj. X-zrake manjih valnih duljina, prolazi kroz aluminijski filter bez značajnijeg smanjenja intenziteta. Filtriranje niskoenergetskih rendgenskih zraka uzrokuje smanjenje pozadinskog šuma, što poboljšava kontrast slike. Ovaj proces smanjuje šum, koji je obično neželjeni signal ili smetnja u slikama. Kao rezultat, kvaliteta rendgenskih slika se poboljšava, što omogućava jasniju vizualizaciju strukture i detalja. Za razliku od opisanog slučaja kada se aluminijski filter nalazi na samom izvoru rendgenskog zračenja, u ovom se testu aluminijska cijev nalazi u neposrednoj blizini promatranog ispitnog objekta. Nadalje, debljina aluminijske cijevi iznosi 2 mm. Budući da cijev okružuje promatrani objekt, rendgenske zrake moraju prolaziti kroz stijenke aluminijske cijevi dva puta, što ukupno čini 4 mm. S druge strane, debljina aluminijskog filtera korištenog pri određivanju mjernih nesigurnosti DVC metode za različite arhitekture iznosi 1 mm. Pretpostavka je kako navedeni faktori uzrokuju smanjenu

kvalitetu dobivenih slika (slika 6-15), dok je opisani karakter aluminijskog filtra odgovaran za postizanje nižih vrijednosti standardnih mjernih nesigurnosti kada je uzorak okružen aluminijskom cijevi.



Slika 6-15 Usporedba kvalitete dobivenih skenova za slučaj kada je ispitni uzorak okružen (a) aluminijskom cijevi te kada je skeniran (b) bez prisustva cijevi

Ograničenje srednjih standardnih nesigurnosti izmjerenih pomaka, prema prethodno definiranom kriteriju za izračun pouzdanih vrijednosti deformacija, iznosi 10^{-1} voksel. Na temelju ovog ograničenja, moguće je definirati prihvatljive veličine diskretizacije za svaki od promatranih slučajeva. Postupak određivanja ovih veličina prikazan je na slici 6-16, a dobiveni rezultati navedeni su u tablici 6-4. Za mjerenje polja pomaka i računanje polja deformacija uočava se kako se kod korištenja cjevaste potpore od PEEK materijala može koristiti najfinija diskretizacija, odnosno konačni elementi duljine 17 voksel. Nasuprot tome, okruži li se polimerni materijal s *MAT* arhitekturom vlakana cjevastom potporom od PMMA, bit će zabilježene najveće vrijednosti mjernih nesigurnosti, pa je u ovom slučaju potrebno koristiti diskretizaciju s najgrubljom mrežom (tj. $\ell = 45$ voksel). Gotovo identični rezultati mjernih nesigurnosti dobit će se ako se ispitni uzorak skenira bez prisustva ikakve cijevi te bez prisustva aluminijskog filtra na izvoru rendgenskog zračenja. Kako bi se zadovoljio kriterij koji definira prihvatljivu vrijednost srednje standardne mjerne nesigurnosti pomaka 10^{-1} voksel, potrebno je u tom slučaju koristiti diskretizaciju mrežom konačnih elemenata duljine 44 voksel. Koriste li se pak cjevaste potpore izrađene od polimerne cijevi ojačane ugljičnim vlaknima ili od aluminijske, preporuča se koristiti diskretizaciju mrežama konačnih elemenata duljine 22, odnosno 28 voksel.



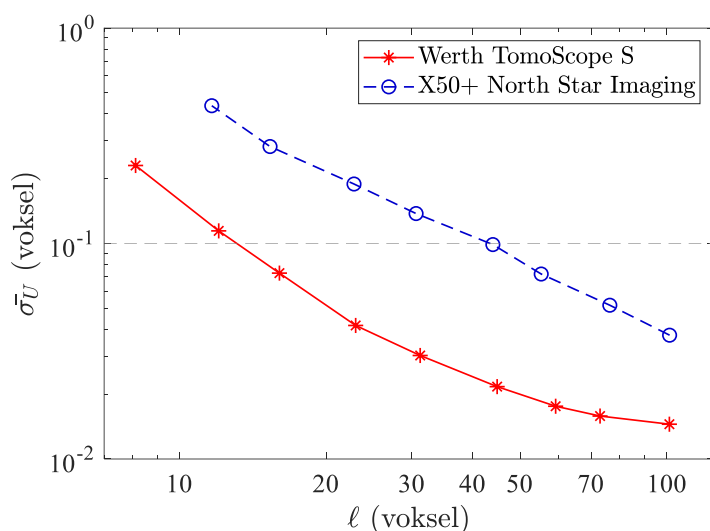
Slika 6-16 Određivanje optimalne veličine konačnog elementa l za različite konfiguracije okruženja ispitnog uzorka

Tablica 6-4 Preporučene veličine konačnih elemenata za različite vrste materijala korištenih cjevastih potpora

Materijal cijevi koja okružuje ispitni uzorak	Duljina elementa, l (vokseli)
Nema cijevi	44
PMMA	45
Polimer ojačan ugljičnim vlaknima	22
Aluminij	28
PEEK	17

Usporedbom rezultata mjernih nesigurnosti dobivenih u ovom dijelu istraživanja s rezultatima mjernih nesigurnosti *MAT* arhitekture vlakana dobivenim u poglavlju 5, na koje se nadovezuju preporučene veličine diskretizacije mrežom konačnih elemenata, može se uočiti značajne razlike, čije je uzroke bitno komentirati. Naime, iako se u oba slučaja radilo o istom ispitnom uzorku *MAT* arhitekture vlakana, slučaj promatran unutar ovog ispitivanja rezultirao je znatno višom vrijednosti srednje standardne nesigurnosti izmjerenih pomaka i posljedično višom prostornom rezolucijom primijenjene DVC metode. Preporučena veličina konačnog elementa kod konfiguracije bez cijevi tijekom ovog ispitivanja iznosi 44 voksel, dok je za slučaj promatran u prvom dijelu eksperimentalnog istraživanja preporučena veličina diskretizacije $l = 12$ voksel (tablica 5-5). Razlog za značajna odstupanja u izmjerenim standardnim nesigurnostima pomaka u prvom redu leži u činjenici da su u uspoređivanim slučajevima korišteni različiti akvizicijski parametri pri skeniranju ispitnih uzoraka (kao što je brzina

snimanja slika). Također, skeniranje je provedeno na različitim laboratorijskim CT uređajima, što dodatno doprinosi varijacijama u rezultatima. Nadalje, kod prvotnog eksperimentalnog ispitivanja korišten je adekvatni aluminijski filter. Ovo je u skladu s zaključkom iznesenim u [122], gdje se značajna odstupanja u mjernim nesigurnostima DVC metode pripisuju specifičnom karakteru svakog pojedinog korištenog CT uređaja. Usporedba dvaju navedenih slučajeva prikazana je na slici 6-17.



Slika 6-17 Srednje standardne mjerne nesigurnosti izmjerenih pomaka DVC metode za slučaj korištenog ispitnog uzorka MAT arhitekture vlakana primjenom CT skenera Werth TomoScope S i X50+North Star Imaging

6.2. Određivanje relaksacije naprezanja cjevaste potpore i vinilesterske smole ojačane različitom arhitekturom vlakana kod in-situ mehaničkih ispitivanja

Zbog viskoelastičnih svojstava vlaknima ojačanih polimera, tijekom *in-situ* mehaničkih ispitivanja ove vrste materijala dolazi do smanjenja naprezanja unutar materijala, iako se opterećenje održava konstantnim. Ova pojava, poznata kao relaksacija naprezanja, rezultat je kombinacije elastičnih i viskoznih karakteristika materijala. Elastične komponente omogućuju materijalu da se vrati u prvobitni oblik nakon uklanjanja opterećenja, dok viskozne komponente uzrokuju trajne deformacije i postupno smanjenje naprezanja tijekom vremena. Budući da je relaksacija materijala ovisna o vremenu, tijekom *in-situ* mehaničkih ispitivanja vlaknima ojačanih polimera primjenom računalne tomografije, registracija skenova često ne započinje odmah nakon dostizanja planiranog opterećenja. Umjesto toga, čeka se određeno vrijeme kako bi se omogućila stabilizacija naprezanja. Ovakva praksa ključna je za dobivanje preciznih i pouzdanih podataka, jer materijal prolazi kroz fazu u kojoj unutarnje naprezanje postupno opada prije nego što dosegne stabilno stanje. Time se osigurava da skenovi prikazuju realno stanje materijala pod opterećenjem, uzimajući u obzir dinamičku prirodu viskoelastičnih

svojstava vlaknima ojačanih polimera. Slijedom navedenog, jasno je kako fenomen relaksacije materijala ispitnog uzorka može dovesti do duljeg vremena ispitivanja. Pritom također valja imati na umu kako nedovoljno poznavanje relaksacijskog karaktera ispitivanog materijala može uzrokovati pogrešnu interpretaciju rezultata dobivenih primjenom računalne tomografije u kombinaciji s DVC metodom. Problem relaksacije materijala posebno je prisutan u slučajevima kada se mehaničko ispitivanje provodi pomoću *in-situ* uređaja s cjevastom potporom, kakvi su opisani u poglavlju 2.9.1. Svojom kompaktnošću, ovaj tip ispitnih uređaja omogućuje približavanje ispitnog uzorka izvoru zračenja, osiguravajući pritom visoke prostorne rezolucije. Međutim, cjevasta potpora *in-situ* ispitnih uređaja preuzima reakcijsko opterećenje s ispitnog uzorka, te i ona sama, ovisno o korištenom materijalu, može doživjeti pojavu relaksacije naprezanja. Relaksacija potpore može utjecati na točnost određivanja odziva ispitnog uzorka, budući da će istovremeno biti zabilježena relaksacija ispitnog uzorka i cjevaste potpore. Drugim riječima, zabilježeni odziv će odgovarati superponiranoj relaksaciji naprezanja potporne cijevi i ispitnog uzorka. Ovaj fenomen može dovesti do netočnih interpretacija rezultata, pošto se neće moći jednostavno razlikovati doprinos relaksacije naprezanja potpore od stvarnog odziva ispitnog uzorka. Stoga je ključno uzeti u obzir ovaj efekt prilikom analize rezultata i potencijalno koristiti korektivne metode kako bi se izolirao stvarni odziv ispitnog uzorka. Slijedom navedenog, nameće se potreba kvantificiranja relaksacije ispitnih uzoraka i korištenih cjevastih potpora, kako bi se adekvatno karakteriziralo ponašanje vlaknima ojačanih polimera u uvjetima opterećenja. Precizno kvantificiranje relaksacije omogućit će razlikovanje doprinosa relaksacije naprezanja ispitnog uzorka i potpore, što je ključno za točno određivanje mehaničkog odziva materijala. Ovaj pristup uključuje detaljna mjerenja i analize vremenski ovisnih promjena naprezanja u oba elementa, što će osigurati pouzdanost rezultata i bolje razumijevanje viskoelastičnih svojstava vlaknima ojačanih polimera.

Unutar ovog poglavlja provedena je serija mehaničkih testova s ciljem kvantificiranja relaksacije naprezanja cjevastih potpora izrađenih iz pet različitih materijala. Nadalje, za ispitne uzorke izrađene od vinilesterske smole ojačane staklenim vlaknima s različitom arhitekturom vlakana, određeno je mehaničko ponašanje kod konstantne deformacije. Dobivenim eksperimentalnim podacima utvrditi će se optimalni materijal potporne cijevi (tj. materijal cijevi koji je najmanje ovisan o relaksaciji naprezanja). Predloženi rezultati bit će korišteni za buduće unapređenje eksperimentalnog postava za mehanička *in-situ* ispitivanja vlaknima ojačanih polimera promatranih računalnom tomografijom.

6.2.1. Eksperimentalni postav i mjerna oprema

Mehanička ispitivanja za određivanje relaksacije naprezanja ispitnih uzorka i potpornih cijevi provedena su primjenom *in-situ* kidalice razvijene na Katedri za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje (vidi poglavlje 2.9.1). Elektromehanička kidalica ima mogućnost ostvarivanja aksijalnog pomaka od ± 5 mm i ostvarivanja maksimalne aksijalne sile od 5 kN. Monitoring narinute aksijalne sile ostvaren je preko senzora sile ugrađenog unutar kućišta ispitnog uređaja (slika 2-24(b)). Unutar novorazvijenog ispitnog uređaja implementiran je senzor sile tvrtke CALT, tip: *DYLF-102-800 kg* prikazan na slici 6-18, koji ima mogućnost mjerenja sile u rasponu od 0 do 800 kgf, a čije su detaljne specifikacije dane u tablici 6-5.

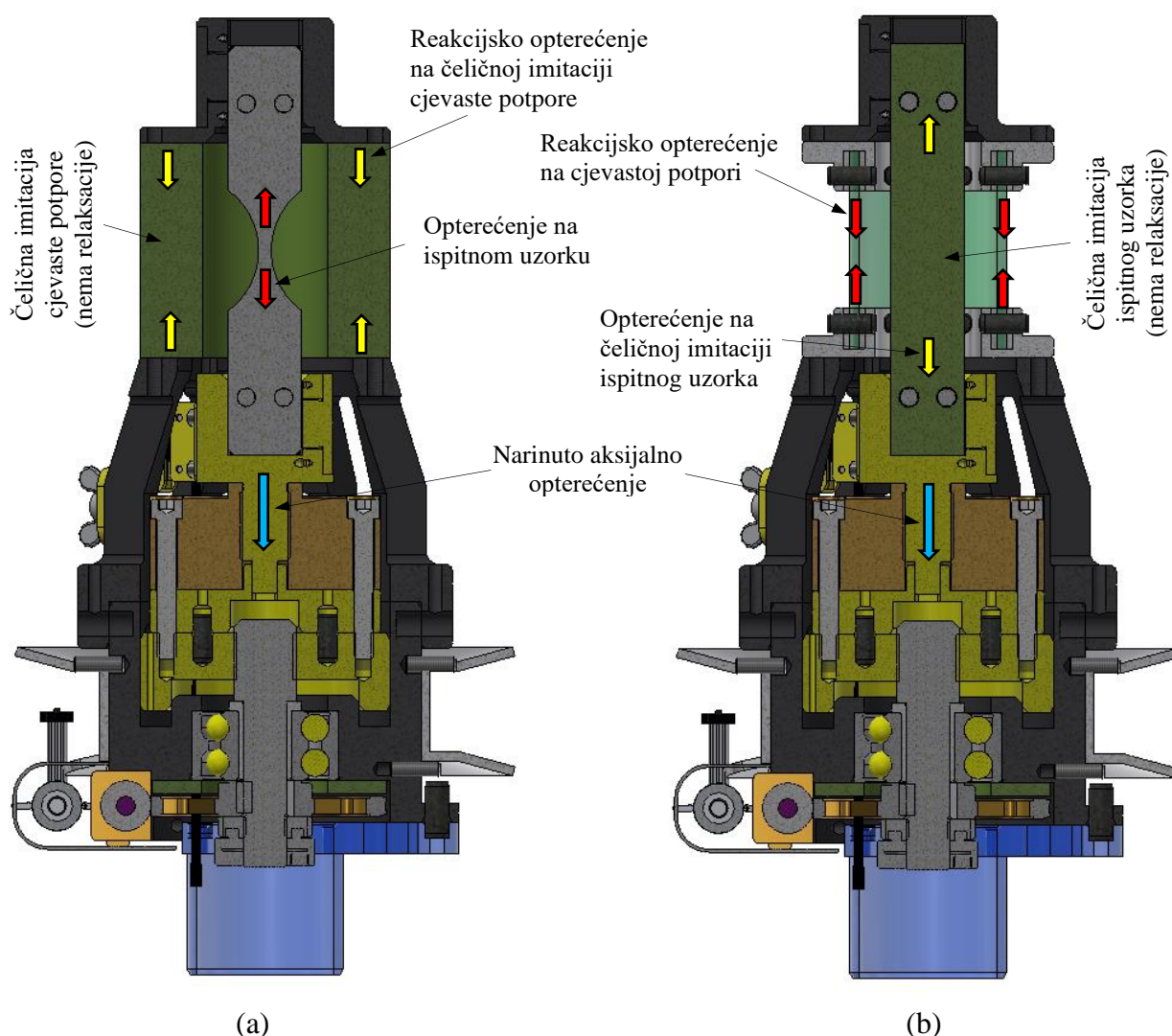


Slika 6-18 Mjerač sile *DYLF-102-800 kg* ugrađen unutar *in-situ* kidalice razvijene na Katedri za eksperimentalnu mehaniku [144]

Tablica 6-5 Osnovne karakteristike mjerača sile *DYLF-102-800 kg* [144]

Mjerno područje	0 – 800 kgf
Nazivni učinak (eng. <i>Rated Output</i>)	$2.0 \pm 10\%$ mV/V
Nulto stanje (eng. <i>Zero Balance</i>)	$\pm 1\%$ F.S.
Nelinearnost	0,05% F.S.
Histereza	0,05% F.S.
Ponovljivost	0,05% F.S.
Puzanje (30 min)	0,03% F.S.
Temperaturni efekt na izlazu	0,03% F.S. /10°C
Temperaturni efekt na nuli	0,03% F.S. /10°C
Frekvencija	10 kHz
Impedancija	20 – 1000 kg: 700 / 1000 Ω
Raspon radne temperature	-20 / 80°C

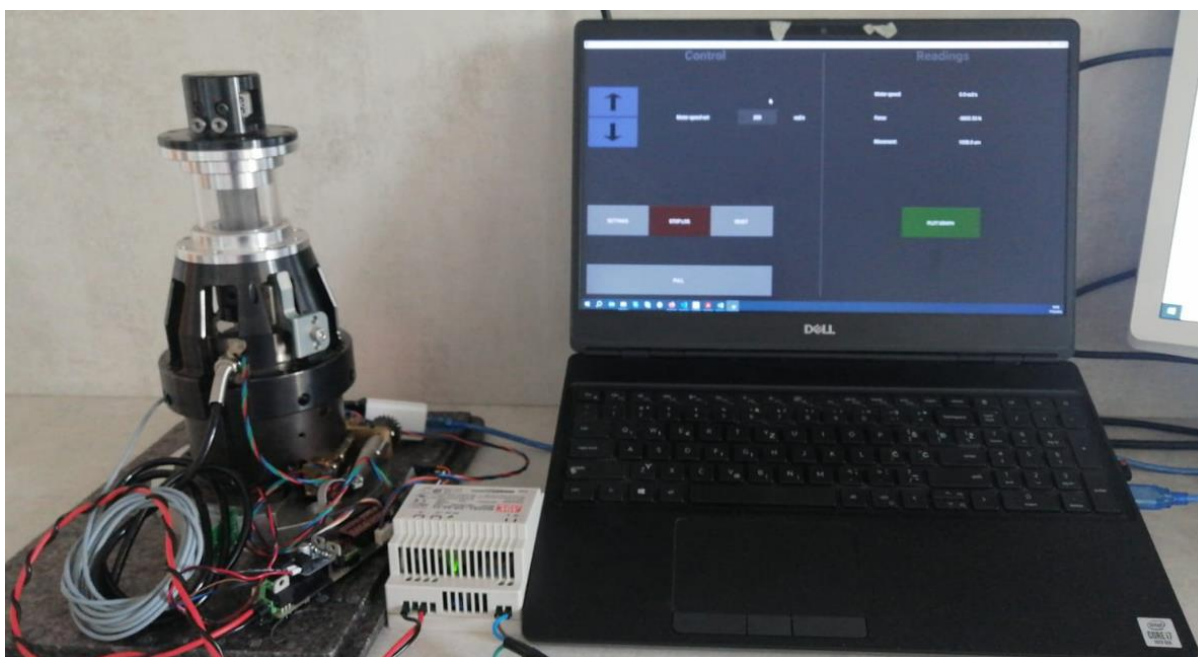
Za potrebe provedbe referentnih mehaničkih ispitivanja proizvedeni su dodatni ispitni uzorak i cjevasta potpora koji su izrađeni od čelika. Upotreba ovih dodatnih komponenti je neophodna, pošto one preuzimaju reakcijsko opterećenje prilikom provođenja mehaničkih testova relaksacije materijala. Drugim riječima, kada se mehaničkim testovima utvrđuje relaksacija ispitnog uzorka, potrebno je na *in-situ* ispitnom uređaju instalirati cjevastu potporu koja neće imati izražen fenomen relaksacije naprezanja. Na taj se način eliminira mogućnost preklapanja relaksacije naprezanja cijevi i ispitnog uzorka tijekom testiranja. U tu svrhu koristi se čelična cjevasta potpora (slika 6-19(a)). Nadalje, kada se mehaničkim testovima utvrđuje relaksacija cjevaste potpore, potrebno je unutar *in-situ* ispitnog uređaja instalirati čeličnu imitaciju ispitnog uzorka koja također neće doživjeti relaksaciju prilikom opterećenja (slika 6-19(b)).



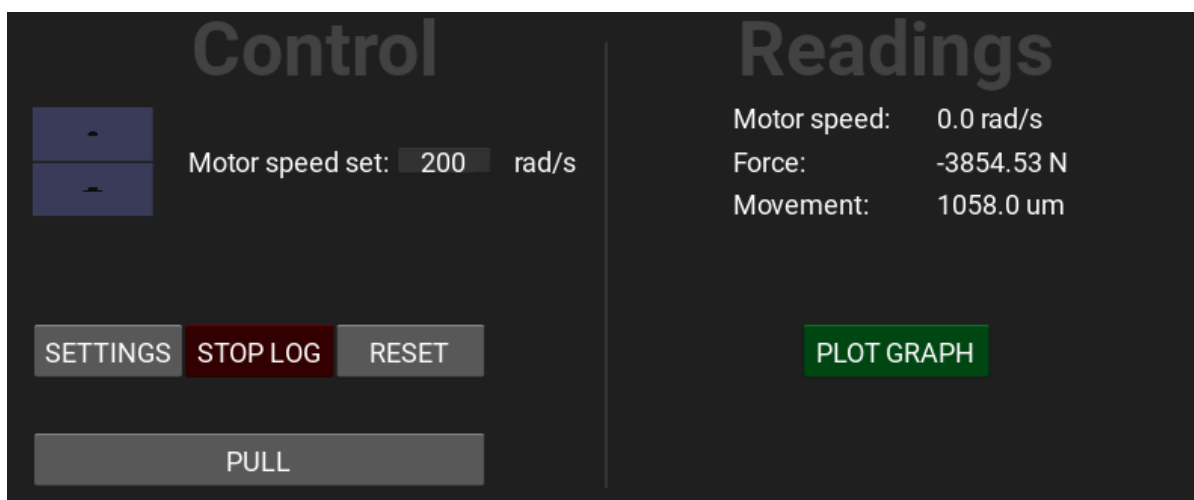
Slika 6-19 Konfiguracije eksperimentalnog postava za određivanje relaksacije naprezanja (a) vlaknima ojačanih polimera i (b) cjevaste potpore *in-situ* kidalice

Upotrebom prethodno navedenih dodatnih komponenti, izoliraju se specifični slučajevi relaksacije materijala, čime se omogućuje precizna kvantifikacija relaksacije konkretno ispitivane komponente. Ovaj pristup osigurava da se dobiveni rezultati odnose isključivo na relaksaciju ispitnog uzorka ili potpore, bez utjecaja potencijalnih smetnji ili preklapanja efekata između njih.

Na slici 6-20 prikazan je eksperimentalni postav koji uključuje *in-situ* kidalicu, laboratorijsko napajanje i upravljačko računalo, dok je na slici 6-21 prikazano implementirano grafičko korisničko sučelje za kontrolu ispitnog uređaja. Primjenom predložene eksperimentalne opreme određena je relaksacija naprezanja različitih FRP uzoraka i cjevaste potpore.



Slika 6-20 Eksperimentalni postav za određivanje relaksacije naprezanja različitih cijevi *in-situ* ispitnog uređaja

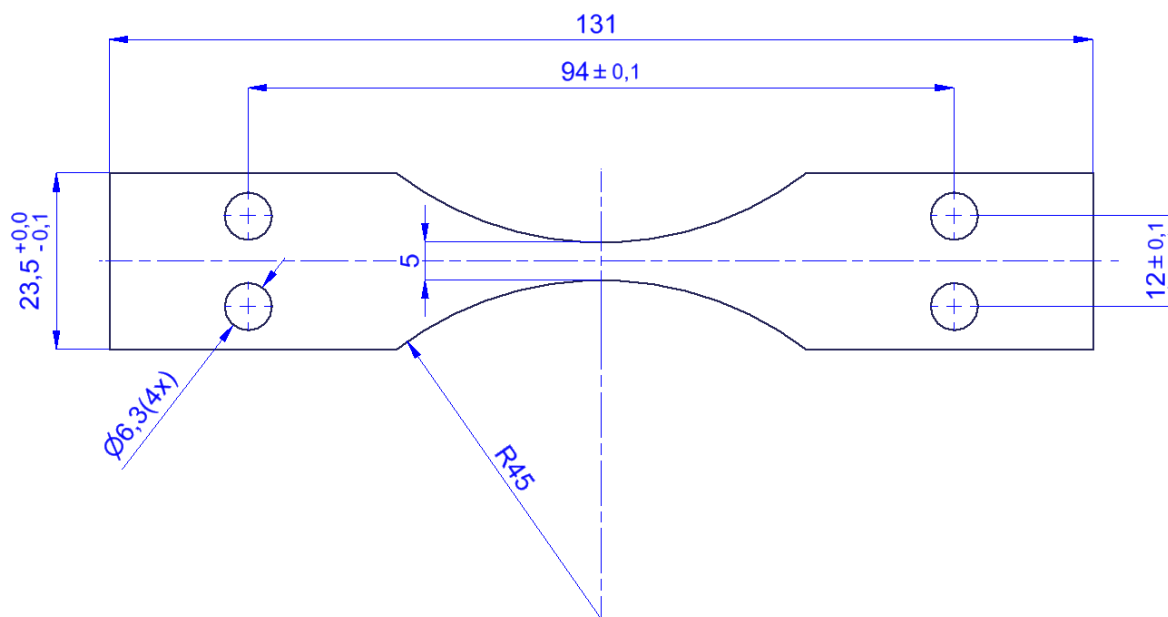


Slika 6-21 Grafičko sučelje *in-situ* kidalice

6.2.2. Ispitni uzorci

Mehanička ispitivanja provedena su na ispitnim uzorcima debljine 5 mm, izrezanih iz ploča čiji su postupak proizvodnje te detaljna mikrostruktura dani u poglavlju 4.4. Radi se o istim materijalima koji su korišteni za potrebe određivanja mjerne nesigurnosti DVC metode s obzirom na arhitekturu vlakana (tj. vinilesterske smole ojačane *MAT*, *UD*, *WF* i *AP* arhitekturom vlakana). Rezanje ispitnih uzoraka ostvareno je tehnologijom vodenog mlaza prema geometriji i dimenzijama definiranim na slici 6-22. Orijehtacija vlakana izrezanih ispitnih uzoraka identična je orijentaciji kakva je primijenjena za ispitne uzorke korištene u poglavlju 5, odnosno odgovara slučaju prikazanom u tablici 4-6 za *UD* arhitekturu, zatim tablici 4-9 za *WF* arhitekturu, odnosno tablici 4-12 za *AP* arhitekturu vlakana.

Prijenos opterećenja na ispitne uzorke ostvaren je trenjem pomoću steznih čeljusti *in-situ* ispitnog uređaja te oblikom preko četiri provrta promjera 6,3 mm. Središnji dio ispitnog uzorka stanjen je s polumjerom od 45 mm. Širina ligamenta ispitnog uzorka na najužem dijelu promatrane zone interesa iznosi 5 mm.



Slika 6-22 Geometrija i dimenzije (mm) ispitnih uzoraka korištenih za određivanje relaksacije različitih vrsta vlaknima ojačanih polimera

Određivanje fenomena relaksacije uslijed konstantnog opterećenja cjevastih potpora provedeno je za četiri različita materijala opisana u poglavlju 2.9.1. Radi se o cjevastim potporama izrađenima od PMMA, epoksidne smole ojačanog ugljičnim vlaknima, aluminijske te od PEEK-a. Vanjski promjer cjevaste potpore od PMMA iznosi 50 mm, dok je debljina stijenke 3 mm. Vanjski promjer cjevaste potpore izrađene od epoksidne smole ojačane ugljičnim

vlaknima iznosi 48,8 mm, a debljina stijenke 1,4 mm. Cjevasta potpora od aluminijskog vanjskog je promjera 38 mm i debljine stijenke 2 mm, dok je cjevasta potpora izrađena od PEEK materijala vanjskog promjera 50 mm, a debljine stijenke također 2 mm. Geometrija i dimenzije korištenih cjevastih potpora dane su na slici 2-26 i u tablici 2-1.

6.2.3. Provedba ispitivanja

Provedba eksperimenta uključuje kontinuirano opterećivanje ispitnog uzorka, tj. cjevaste potpore, sve dok opterećenje ne dosegne vrijednost od 4000 N. Kada se dostigne ta vrijednost, zaustavlja se daljnje relativno pomicanje steznih čeljusti ispitnog uređaja, a ostvareni pomak se zadržava konstantnim. Kontinuiranim praćenjem vrijednosti postignute aksijalne sile pomoću senzora sile ugrađenog u ispitni uređaj, bilježi se eventualna relaksacija naprezanja ispitivanih komponenti tijekom trajanja mehaničkog ispitivanja. Provedba mehaničkog ispitivanja za određivanje relaksacije naprezanja ispitnih uzoraka i cjevaste potpore trajala je dva sata. Predloženo vrijeme odabrano je jer odgovara trajanju akvizicije CT skena visoke kvalitete kod *in-situ* mehaničkih ispitivanja primjenom računalne tomografije. Vrijednost narinutog aksijalnog opterećenja od 4000 N odabrana je na osnovu nazivnog aksijalnog opterećenja korištenog ispitnog uređaja, kao i iskustvenih podataka koji pokazuju da pri ovoj vrijednosti opterećenja ne dolazi do loma nijednog od korištenih ispitnih uzoraka.

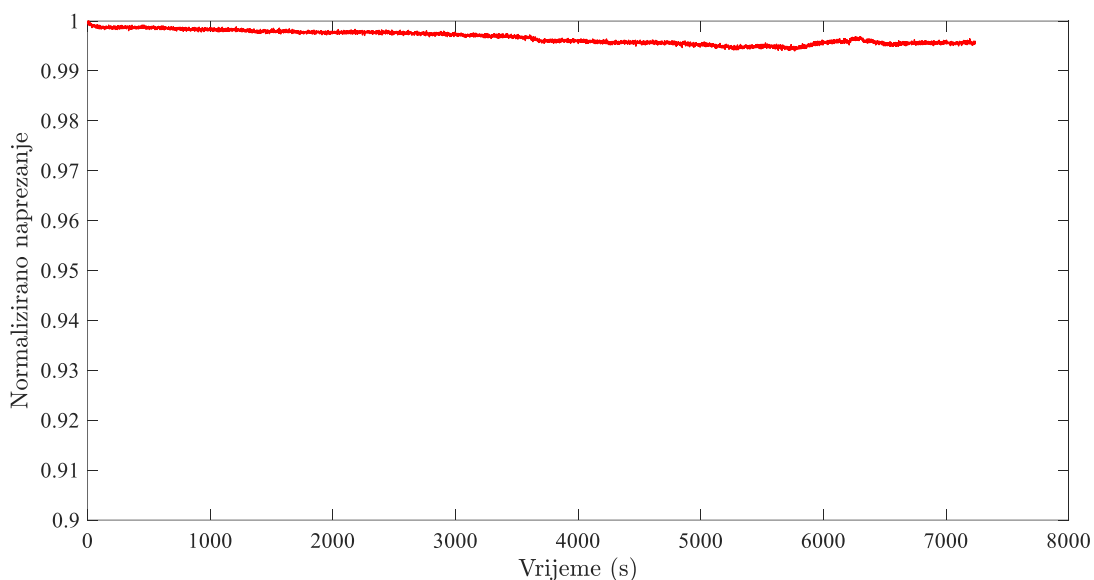
Uzimajući u obzir različite izvedbe cjevastih potpora i uzorke s različitim arhitekturama vlakana, definirano je osam slučajeva nad kojima su provedeni mehanički testovi. Nadalje, dodatno je uveden i referentni slučaj kod kojeg je testiran odziv ispitne opreme. Naime, kod referentnog se slučaja koriste čelična imitacija ispitnog uzorka te čelična cjevasta potpora, kako bi se utvrdio eventualni pad vrijednosti aksijalnog opterećenja nastao kao posljedica nesavršenosti mjerne opreme te same konstrukcije ispitnog uređaja. Sve ispitivane kombinacije cjevastih potpora i ispitnih uzoraka dane su u tablici 6-6.

Tablica 6-6 Plan pokusa za određivanje relaksacije naprezanja za ispitne uzorke različitih arhitektura vlakana i za cjevaste potpore izradene od različitih materijala

Ispitivanje 1:	
Komponenta 1:	Čelični ispitni uzorak
Komponenta 2:	Čelična cjevasta potpora
Ispitivanje 2:	
Komponenta 1:	Čelični ispitni uzorak
Komponenta 2:	Cjevasta potpora od PMMA
Ispitivanje 3:	
Komponenta 1:	Čelični ispitni uzorak
Komponenta 2:	Cjevasta potpora od epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima
Ispitivanje 4:	
Komponenta 1:	Čelični ispitni uzorak
Komponenta 2:	Cjevasta potpora od aluminijske
Ispitivanje 5:	
Komponenta 1:	Čelični ispitni uzorak
Komponenta 2:	Cjevasta potpora od PEEK
Ispitivanje 6:	
Komponenta 1:	Ispitni uzorak <i>MAT</i> arhitekture vlakana
Komponenta 2:	Čelična cjevasta potpora
Ispitivanje 7:	
Komponenta 1:	Ispitni uzorak <i>UD</i> arhitekture vlakana
Komponenta 2:	Čelična cjevasta potpora
Ispitivanje 8:	
Komponenta 1:	Ispitni uzorak <i>WF</i> arhitekture vlakana
Komponenta 2:	Čelična cjevasta potpora
Ispitivanje 9:	
Komponenta 1:	Ispitni uzorak <i>AP</i> arhitekture vlakana
Komponenta 2:	Čelična cjevasta potpora

6.2.4. Rezultati ispitivanja

Prvo ispitivanje provedeno je s konfiguracijom čeličnog ispitnog uzoraka i čelične cijevi (vidi tablicu 6-6), budući da je cilj bio odrediti odziv senzora sile i same konstrukcije ispitnog uređaja. Rezultati ispitivanja prikazani su kao ovisnost normaliziranog naprežanja i vremena trajanja ispitivanja. Normalizirano naprežanje predstavlja omjer trenutnog naprežanja u odnosu na početno (tj. maksimalno) naprežanje. Provedenim ispitivanjem potvrđeno je kako pri ovoj konfiguraciji ne dolazi značajnijeg pada vrijednosti izmjerene sile (tj. relaksacije) za vrijeme trajanja konstantnog opterećenja (vidi sliku 6-23). Tijekom trajanja mehaničkog ispitivanja zabilježene su male fluktuacije naprežanja. Zabilježena je maksimalna promjena naprežanja u vremenu trajanja ispitivanja od dva sata u iznosu od 0,5 %. Predloženo ispitivanje definirano je kao referentni slučaj, budući da su primijenjene 'idealne' komponente koje nisu osjetljive na relaksaciju.

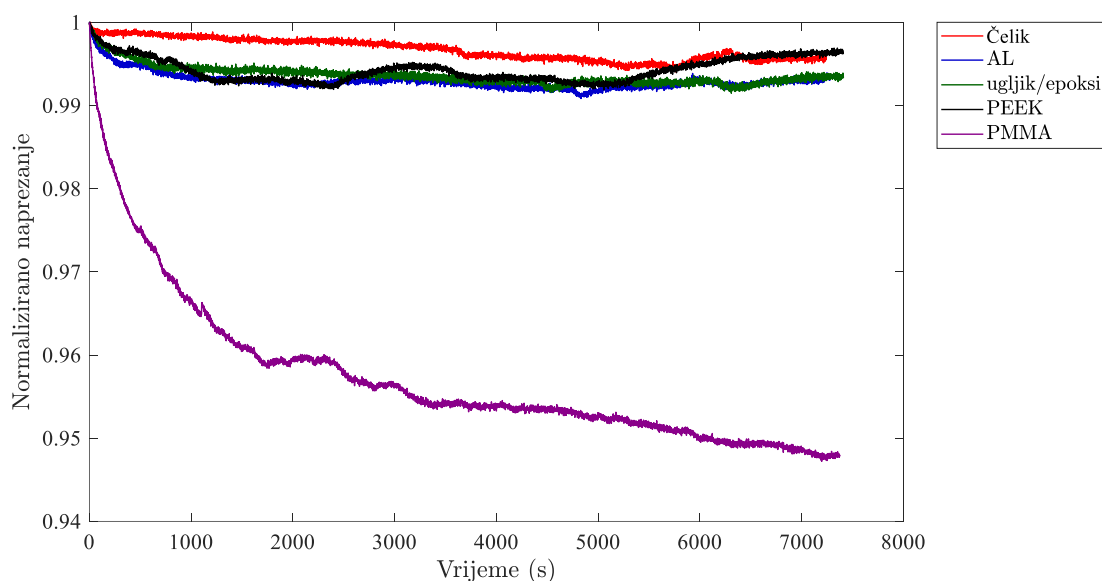


Slika 6-23 Relaksacija naprežanja kod Ispitivanja 1 kada je korištena čelična cijev i čelični ispitni uzorak

6.2.4.1. *Rezultati relaksacije naprežanja cjevastih potpora izrađenih od različitih materijala*

Relaksacija naprežanja četiriju vrsta cjevastih potpora in-situ ispitnog uređaja određena su primjenom čeličnog ispitnog uzorka (vidi Ispitivanje 2 – Ispitivanje 5 u tablici 6-6). Odziv materijala cijevi uslijed konstantnog opterećenja prikazan je na slici 6-24. Za sve ispitne uzorke (tj. različite materijale cjevastih potpora) zabilježena je relaksacija naprežanja. Ona je najizraženija za PMMA materijal kod kojeg do smanjenja brzine relaksacije naprežanja dolazi nakon 50 minuta. Unutar početnih 50 minuta trajanja mehaničkog ispitivanja, kod ove vrste cjevaste potpore dolazi do pada naprežanja u iznosu od 5 % s obzirom na naprežanje ostvareno kod najvećeg opterećenja od 4000 N.

Mehanička ispitivanja provedena na cjevastim potporama izrađenima od epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima, aluminijski i PEEK-a rezultiraju približno jednakim ponašanjem materijala kod konstantnog opterećenja. Do stabilizacije naprezanja kod ove tri vrste materijala dolazi nakon 10 minuta te rezultira maksimalnim smanjenjem naprezanja od približno 1%. Usporedbom navedenih materijala s referentnim ispitivanjem (tj. *Ispitivanje 1*), zabilježena je dva puta veća relaksacija naprezanja. Međutim, budući da relaksacija naprezanja iznosi 1 %, može se utvrditi kako je utjecaj cijevi izrađenih iz epoksi/ugljik, aluminijski i PEEK-a zanemarivo mali na smanjenje naprezanja. Kod PEEK materijala zabilježene su najveće promjene vrijednosti naprezanja tijekom dva sata ispitivanja. Naime, na kraju ispitivanja izmjerene su više vrijednosti naprezanja nego one ostvarene kod pedesete minute ispitivanja. Pretpostavka je da je do ovakvog ponašanja materijala došlo zbog nesavršene montaže ispitnog uzorka u prihvat ispitnog uzroka. Iako je zabilježena relaksacija naprezanja kod cjevastih potpora izrađenih od epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima, aluminijski i PEEK-a, njihov utjecaj na provedbu i analizu mehaničkih *in-situ* ispitivanja može se zanemariti, budući da je smanjenje naprezanja zanemarivo malo.



Slika 6-24 Relaksacija naprezanja cjevastih potpora izrađenih iz različitih materijala

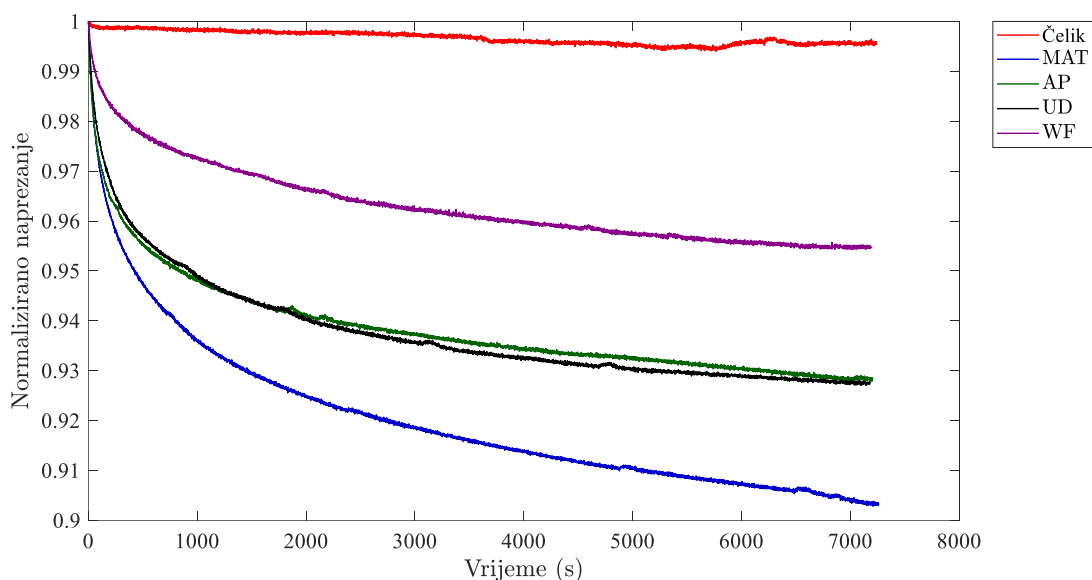
6.2.4.2. Rezultati relaksacije naprezanja vinilesterske smole ojačane staklenim vlaknima različite arhitekture

Fenomen relaksacije naprezanja izražen je kod viskoelastičnih materijala, među kojima su i vlaknima ojačani polimeri. Iz tog je razloga, u ovom poglavlju izmjerena relaksacija kod kompozita ojačanih različitom arhitekturom vlakana (vidi *Ispitivanje 6 – Ispitivanje 9* u tablici 6-6). Ispitni uzorci izrađeni od vinilesterske smole i ojačani *MAT*, *UD*, *WF* i *AP* arhitekturom

vlakana podvrgnuti su konstantnom opterećenju pri kontroli pomaka, s maksimalnom narinutom silom od 4000 N. Rezultati relaksacije napreznja vinilesterske smole ojačane staklenim vlaknima različite arhitekture prikazani su na slici 6-25.

Uzorak izrađen od vinilesterske smole ojačan *MAT* arhitekturom vlakana pokazuje najizraženiju relaksaciju napreznja. Napreznje se smanjuje za približno 10% od maksimalnog napreznja nakon dva sata ispitivanja, što predstavlja značajno smanjenje. Kod *AP* i *UD* arhitekture vlakana zabilježena je približno jednaka stopa relaksacije napreznja. Napreznje se kod ovih dviju arhitektura smanjuje za približno 5%, što je znatno smanjenje, ali manje izraženo nego kod *MAT* arhitekture vlakana.

Relaksacija napreznja kod *AP* i *UD* arhitekture vlakana bilježi približno jednako smanjenje napreznja kao i cjevasta potpora izrađena od PMMA materijala. Korištenje ove konfiguracije (tj. *AP* ili *UD* arhitektura vlakana ispitnih uzoraka i cjevasta potpora izrađena od PMMA materijala) rezultiralo bi duplom pogreškom mjerenja napreznja, dok bi još nepovoljniji rezultat bio ostvaren ako se koristi ispitni uzorak *MAT* arhitekture vlakana. Iz tog razloga, korištenje cijevi izrađene od PMMA nije prihvatljivo za provedbu *in-situ* mehaničkih ispitivanja. Ispitni uzorak ojačan *WF* arhitekturom vlakana pokazuje najmanju relaksaciju među promatranim kompozitnim materijalima. Sa smanjenjem napreznja od 3% u odnosu na najveće narinuto opterećenje od 4000 N, *WF* arhitektura vlakana bilježi najbolju otpornost na relaksaciju napreznja.



Slika 6-25 Relaksacije napreznja vinilester smole ojačane s četiri različite arhitekture vlakana

Na temelju rezultata danih u ovom poglavlju, zaključuje se kako je odabir odgovarajućeg materijala cjevaste potpore ključan za točnost i pouzdanost *in-situ* mehaničkih ispitivanja

vlaknima ojačanih polimera. Rezultati pokazuju da različite arhitekture vlakana i materijali cjevaste potpore imaju različite stupnjeve relaksacije naprezanja, čime se bitno utječe na interpretaciju rezultata ispitivanja. Stoga je pažljiv odabir ovih komponenti nužan za osiguranje preciznih i pouzdanih mjerenja.

6.3. Zaključak i diskusija

Zbog ograničenog radnog prostora laboratorijskih CT uređaja kod *in-situ* mehaničkih ispitivanja, koja se oslanjaju na primjenu računalne tomografije u kombinaciji s DVC metodom, od izuzetne je važnosti koristiti ispitne uređaje kompaktne izvedbe. Osim toga, predloženi uređaji trebaju omogućiti jednostavnu instalaciju na zakretni stol CT skenera. Zbog navedenih ograničenja, najčešće se koriste *in-situ* ispitni uređaji (tj. kidalice) kod kojih je povezivanje gornjeg i donjeg, odnosno pomičnog i nepomičnog dijela uređaja, ostvareno preko cjevaste potpore koja prenosi mehaničko opterećenje na ispitni uzorak. Budući da cjevasta potpora u potpunosti okružuje ispitni uzorak, njeno prisustvo rezultirat će povećanjem akvizicijskog šuma na registriranim volumetrijskim slikama, pošto rendgenska zraka osim prolaska kroz ispitni uzorak treba penetrirati i kroz dvije stijenke cjevaste potpore. Pretpostavka je kako se ovisno o materijalu koji okružuje ispitni uzorak registriraju CT skenovi slabije kvalitete u odnosu na idealizirani slučaj kada se u putanji X-zračenja nalazi samo promatrani objekt. Budući da postoji rastuća potreba za provedbom *in-situ* mehaničkih ispitivanja koja se prate računalnom tomografijom, radi sveobuhvatne karakterizacije heterogenih materijala, cilj je ovog poglavlja istražiti utjecaj ispitnog okruženja na mjernu nesigurnost metode korelacije digitalnih volumena. Kod kompaktnih *in-situ* kidalica najčešće se koriste cjevaste potpore izrađene od polimetilmetakrilata (tj. PMMA), aluminijske ili polimera ojačanog ugljičnim vlaknima. Pošto navedeni materijali imaju različite vrijednosti linearnog koeficijenta prigušenja za očekivati je drugačije očitavanje vrijednosti intenziteta zračenja, a time i različitu kvalitetu registriranih slika ovisno o korištenom materijalu cjevaste potpore. U sklopu ovog istraživanja pristupilo se procjeni utjecaja vrste materijala koja okružuje ispitni uzorak na kvalitetu DVC mjerenja iskazanu preko izračunatih mjernih nesigurnosti predložene metodologije. Nadalje, iz razloga što snimanje visokokvalitetnog skena može potrajati i do nekoliko sati, efekt relaksacije materijala također treba uzeti u obzir kada se pristupa određivanju pouzdanosti ponašanja materijala uslijed mehaničkog opterećenja. Budući da se opterećenje prenosi na ispitni uzorak preko cjevaste potpore, ta će potpora biti mehanički opterećena tijekom cijelog trajanja ispitivanja. Zbog toga može doći do njezine relaksacije tijekom registriranja 2D projekcija za rekonstrukciju CT skenova, što može rezultirati pogrešnim interpretiranjem rezultata

ispitivanja. Naime, relaksacija naprezanja cjevaste potpore može biti protumačena kao mehaničko ponašanje ispitnog uzorka. Kako bi se dao sveobuhvatni pregled utjecaja ispitnog okruženja na točnost mjerenja DVC metode unutar ovog poglavlja također je izmjerena relaksacija naprezanja cjevastih potpora izrađenih od različitih materijala. Dodatno je određena relaksacija naprezanja ispitnih uzorka različitih arhitektura vlakana kako bi se procijenila eventualna pogreška kod identifikacije globalnog ponašanja polimera ojačanog vlaknima tijekom *in-situ* mehaničkog ispitivanja.

Eksperimentalno ispitivanje usmjereno na određivanje utjecaja materijala cjevaste potpore na mjernu nesigurnost DVC metode uključivalo je korištenje četiriju različitih vrsta materijala. Ispitan je utjecaj materijala koji se najčešće koriste za izradu cjevastih potpora *in-situ* ispitnih uređaja: PMMA, polimera ojačanog ugljičnim vlaknima i aluminijski. Dodatno je u ispitivanje uključen i poli(eter-eter-keton) (PEEK). Iako primjena PEEK materijala u izradi cjevastih potpora dosad nije zabilježena, povoljna mehanička svojstva predloženog materijala ukazuju na mogućnost budućeg korištenja u ovakvim aplikacijama.

Tijekom prvog dijela ovog istraživanja korišten je jedan ispitni uzorak izrađen od vinilesterske smole ojačane *MAT* arhitekturom vlakana, a izmjenjivane su cjevaste potpore koje okružuju ispitni uzorak. Na taj je način dobiveno pet konfiguracija eksperimentalnog postava koje simuliraju *in-situ* uvjete mehaničkog ispitivanja. Važno je naglasiti kako prva konfiguracija uključuje praćenje objekta bez prisustva cijevi koja okružuje uzorak, što omogućuje procjenu utjecaja okruženja u usporedbi s idealiziranim slučajem. Kao i u prethodnom poglavlju, za potrebe ovih ispitivanja zabilježene su dvije visokokvalitetne volumetrijske slike ispitnog uzorka u neopterećenom stanju, bez pomaka krutog tijela, za svaku konfiguraciju. Skeniranje je provedeno na CT skeneru *X50+ North Star Imaging* instaliranom u *Laboratoire de Mécanique Paris - Saclay* u Francuskoj. Volumetrijske slike najslabije kvalitete ostvarene su kada je ispitni uzorak okružen aluminijskom cijevi, dok su preostale konfiguracije eksperimentalnog postava rezultirale slikama približno jednake kvalitete. Kako bi se kvantificirala mjerna nesigurnost standardnog DVC algoritma, područje interesa diskretizirano je mrežama konačnih elemenata veličine 101, 76, 55, 44, 30, 22, 15 i 11 vokseli. Ostvareni rezultati mjernih nesigurnosti po osima za svaku korištenu cijev najniži su u *y* smjeru (tj. smjeru polaganja vlakana), što je u potpunosti konzistentno s prvim dijelom ispitivanja (poglavlje 5) kada je ispitivan utjecaj arhitekture vlakana na mjernu nesigurnost DVC metode. Nadalje, usporedbom srednjih standardnih mjernih nesigurnosti pomaka i pripadajućih deformacija uočeno je kako se najniži iznosi mjernih nesigurnosti ostvaruju kada je ispitni uzorak okružen

cijevi od PEEK materijala, što se objašnjava pretpostavkom kako cijevi od PEEK materijala filtriraju niskoenergetske rendgenske zrake što posljedično rezultira nižim razinama šuma. Za konfiguracije koje koriste aluminijsku cijev i cijev od epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima zabilježene su neznatno više vrijednosti za elemente manje od 22 vokseli. Međutim, kod navedenih konfiguracija standardne nesigurnosti DVC metode znatno su veće za $\ell \geq 22$ vokseli u odnosu na slučaj kada se koristi PEEK cijev. Najviši iznosi srednjih standardnih nesigurnosti dobiveni su za referentnu konfiguraciju bez cijevi i za slučaj kada se koristi cijev od PMMA materijala. Navedeni rezultati standardnih mjernih nesigurnosti su neočekivani, s obzirom na to da kod referentne konfiguracije rendgensko zračenje nije trebalo prolaziti kroz dodatni medij. Pretpostavlja se da su cijevne potpore izrađene od PEEK-a, epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima i aluminijske pozitivno utjecale na razine šuma 2D projekcija tijekom CT skeniranja, poboljšavajući time kvalitetu trodimenzionalnih slika te smanjujući akvizicijski šum i artefakte. Iako su kod korištenja aluminijske cijevi zabilježene slike lošije kvalitete, one su imale niže razine akvizicijskog šuma, budući da se aluminij često koristi kao filter kod CT skeniranja (vidi tablicu 5-1). Primjena aluminijskog filtera u računalnoj tomografiji često igra ključnu ulogu u poboljšanju kvalitete slika. Ovaj filter omogućava precizniju dijagnostiku kroz smanjenje šuma, artefakata i neželjenog zračenja, čime se značajno doprinosi točnosti i pouzdanosti dobivenih rezultata. Budući da u ovoj eksperimentalnoj kampanji nije korišten aluminijski filter (vidjeti tablicu 6-1), pretpostavlja se kako je aluminijska stijenka korištene cijevi djelomično preuzela ulogu filtriranja niskoenergetskih rendgenskih zračenja. Ovakvim eksperimentalnim postavom smanjen je pozadinski šum, što je u konačnici rezultiralo nižim mjernim nesigurnostima DVC metode u odnosu na referentnu konfiguraciju.

Nadalje, uzevši u obzir kriterij koji definira prihvatljivu vrijednost mjerne nesigurnosti pomaka kada se DVC metoda koristi u mehanici čvrstih tijela, a koji iznosi 10^{-1} vokseli ili manje [4], određene su minimalne veličine konačnih elemenata za pojedini materijal cjevaste potpore pri ispitivanju polimera ojačanog MAT arhitekturom vlakana. Najfiniju diskretizaciju moguće je koristiti kada se koristi cjevasta potpora od PEEK materijala. U tom se slučaju može koristiti mreža konačnih elemenata s duljinom elemenata od 17 vokseli. Nasuprot tome, najmanja prostorna rezolucija promatranog područja interesa (tj. $\ell = 45$ vokseli) potrebna je kada se koristi cijev od PMMA. Ovo je gotovo identično veličini preporučenih konačnih elemenata za slučaj kada ispitni uzorak nije okružen cijevi i kada na izvoru zračenja nije prisutan aluminijski filter (tj. $\ell = 44$ vokseli). Preporučena veličina diskretizacija za slučaj kad je ispitni uzorak

okružen polimernom cijevi ojačanom ugljičnim vlaknima iznosi $\ell = 22$ vokseli, dok za slučaj aluminijske cijevi iznosi $\ell = 28$ vokseli. Navedeni rezultati dokazuju kako točnost DVC metode primijenjene kod *in-situ* mehaničkih ispitivanja vlaknima ojačanih polimera u značajnoj mjeri ovisi o materijalu korištene cjevaste potpore *in-situ* ispitnog uređaja.

Ekperimentalno ispitivanje usmjereno na kvantificiranje relaksacije naprezanja cjevastih potpora izrađenih od različitih vrsta materijala uključivalo je linearno vlačno opterećenje u iznosu od 4000 N čeličnog ispitnog uzorka (tj. na uzorka koji nije osjetljiv na relaksaciju naprezanja), upotrebom *in-situ* kidalice razvijene na *Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu*. Tijekom ispitivanja relaksacije, cjevasta je potpora preuzela reakcijsko tlačno opterećenje istog iznosa kao ono koje je primijenjeno na ispitni uzorak. Kontinuiranim praćenjem vrijednosti postignute aksijalne sile u sljedećih 120 minuta bilježila se relaksacija naprezanja za cjevaste potpore izrađene iz četiri različita materijala. Rezultati ispitivanja pokazuju kako cjevasta potpora od PMMA bilježi najizraženiju relaksaciju naprezanja. U početnih 50 minuta mehaničkog ispitivanja, naprezanje se kod PMMA cijevi smanjuje za 5% u odnosu na naprezanje postignuto pri maksimalnom opterećenju od 4000 N. Nasuprot tome, cjevaste potpore izrađene od polimera ojačanog ugljičnim vlaknima, aluminijske i PEEK-a bilježe približno jednake vrijednosti relaksacije. Kod ovih materijala stabilizacija naprezanja nastupa nakon otprilike 10 minuta, a smanjenje naprezanja iznosi oko 1%. Može se zaključiti kako je utjecaj relaksacije cjevaste potpore izrađene od aluminijske, PEEK-a ili polimera ojačanog ugljičnim vlaknima zanemariv u kontekstu *in-situ* mehaničkih ispitivanja. Dodatno, ispitivanjem utjecaja relaksacije ispitnih uzoraka s obzirom na korištenu arhitekturu vlakana, utvrđeno je kako *MAT* arhitektura vlakana pokazuje najizraženiju relaksaciju naprezanja. Ona nakon 120 minuta iznosi 10% u odnosu na naprezanje postignuto pri maksimalnom opterećenju od 4000 N. Nasuprot tome, ispitni uzorak s *WF* arhitekturom vlakana bilježi najmanju relaksaciju od 3% u odnosu na primijenjeno opterećenje, dok kod *AP* i *UD* arhitekture vlakana relaksacija naprezanja iznosi oko 5%.

S obzirom na rezultate mjernih nesigurnosti ostvarene korištenjem cjevastih potpora izrađenih od različitih materijala, kao i rezultate relaksacijskih testova, može se zaključiti kako je PEEK materijal optimalan izbor za cjevastu potporu *in-situ* ispitnog uređaja. Ovaj materijal ne samo da ostvaruje zanemarujuću relaksaciju, već omogućava i postizanje najnižih mjernih nesigurnosti DVC metode. Iako se primjenom mehaničke regularizacije može dodatno smanjiti mjernu nesigurnost DVC metode za sve materijale cjevastih potpora, PEEK materijal omogućava

korištenje manjih regularizacijskih duljina u usporedbi s PMMA, aluminijem i polimerom ojačanim ugljičnim vlaknima. Ova prednost PEEK materijala doprinosi preciznijim i pouzdanim rezultatima pri primjeni metoda mjerenja cijelog polja pomaka. Nadalje, ostvareni rezultati upućuju na važnost kvantificiranja relaksacijskog karaktera cjevastih potpora i ispitnih uzoraka izrađenih od FRP materijala, pošto je ova informacija neophodna za interpretaciju rezultata dobivenih primjenom *in-situ* mehaničkih ispitivanja unutar CT skenera i DVC metode. Prema autorovim saznanjima, ovo je prvo istraživanje koje je usmjereno određivanju relaksacijskog karaktera obiju komponenti opterećenih tijekom *in-situ* testiranja (tj. ispitnog uzorka i cjevaste potpore ispitnog uređaja).

Nadalje, usporedbom vrijednosti standardnih mjernih nesigurnosti za ispitni uzorak s *MAT* arhitekturom vlakana, dobivenih tijekom eksperimentalne kampanje opisane u petom poglavlju, s mjernim nesigurnostima ostvarenim u ovom istraživanju, uočava se značajna razlika. Naime, za *MAT* ispitni uzorak koji nije bio okružen cjevastom potporom (*Konfiguracija 1* iz poglavlja 6.1.3), zabilježen je znatno veći iznos mjernih nesigurnosti DVC metode u usporedbi s ispitivanjem provedenim u petom poglavlju. Uzme li se u obzir kriterij prihvatljive vrijednosti srednje standardne mjerne nesigurnosti ($\bar{\sigma}_U \leq 10^{-1}$ voksel), može se primijetiti kako rezultati iz petog poglavlja sugeriraju da je optimalna veličina konačnog elementa za diskretizaciju ispitnog uzorka s *MAT* arhitekturom vlakana $\ell = 12$ voksel. S druge strane, rezultati iz šestog poglavlja preporučuju korištenje diskretizacije mrežom konačnih elemenata veličine $\ell = 44$ voksel za ispitivanje uzorka iste arhitekture. Ovako značajna razlika u mjernim nesigurnostima te posljedično u preporučenim veličinama diskretizacije, jednim se dijelom objašnjava nekorištenjem aluminijskog filtera na izvoru rendgenskog zračenja kod eksperimentalne kampanje opisane unutar poglavlja 6.1. Usporede li se, međutim, akvizicijski parametri skeniranja primijenjeni unutar petog poglavlja (vidi tablicu 5-1), s parametrima primijenjenim unutar šestog poglavlja (vidi tablicu 6-1), uočit će se da je skeniranje provedeno korištenjem različitih CT uređaja te da nisu korišteni identični parametri skeniranja. Korištene su različite struje i naponi zračenja, različita je bila udaljenost između izvora zračenja i detektora kao i udaljenost između izvora zračenja i ispitnog objekta. Vrijeme trajanja skeniranja također se značajno razlikovalo. Trajanje jednog skena unutar petog poglavlja trajalo je 2 sata i 35 minuta, dok je unutar šestog poglavlja trajanje jednog skena iznosilo 55 minuta. Podatak o trajanju skeniranja osobito je interesantan u kontekstu stalne intencije za smanjenjem vremena skeniranja pri provođenju *in-situ* mehaničkih testova. Stoga bi bilo izuzetno korisno istražiti

utjecaj trajanja skeniranja, odnosno utjecaj kvalitete skenova dobivenih različitim trajanjem skeniranja, na mjerne nesigurnosti DVC metode. S obzirom na prisutnost razlika u više pojedinačnih parametara skeniranja unutar eksperimentalnih kampanja opisanih u petom i šestom poglavlju, usporedba rezultata iz tih dviju kampanja ne omogućava donošenje zaključaka o utjecaju trajanja skeniranja (tj. kvalitete skenova dobivenih različitim trajanjem skeniranja) na mjernu nesigurnost DVC metode. Nasuprot tome, ispravan bi pristup bio varirati isključivo parametre vezane uz trajanje skeniranja, poput broja projekcija, broja zabilježenih slika po jednoj projekciji i odgode snimanja, dok bi svi ostali parametri skeniranja ostali konstantni za sve promatrane slučajeve. S obzirom na cilj provođenja *in-situ* mehaničkih ispitivanja u realnom vremenu unutar CT skenera, u sljedećem će poglavlju biti provedeno istraživanje usmjereno na određivanje utjecaja akvizicijskih parametara skeniranja na mjernu nesigurnost DVC metode.

7. ODREĐIVANJE UTJECAJA AKVIZICIJSKIH PARAMETARA SKENIRANJA NA MJERNU NESIGURNOST DVC METODE

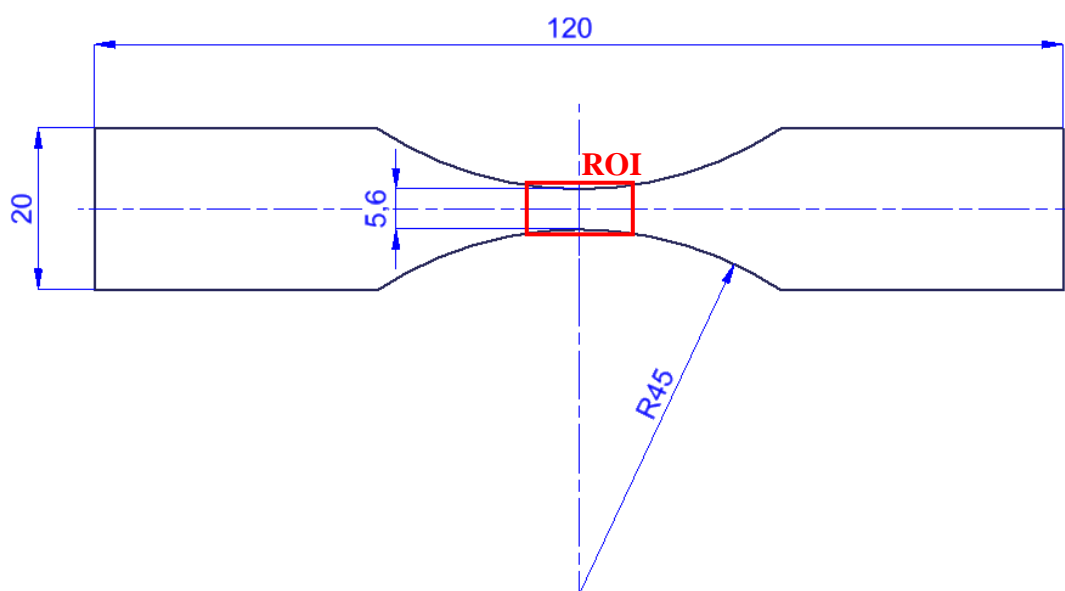
Registriranje visokokvalitetnih skenova dugotrajan je proces koji u nekim slučajevima traje i preko dva sata. Za adekvatnu karakterizaciju ponašanja materijala u uvjetima opterećenja, potrebno je pratiti cijelu povijest opterećenja ispitnog uzorka. Kako bi se odredilo ponašanje materijala tijekom *in-situ* mehaničkog ispitivanja potrebna je registracija većeg broja skenova što dovodi do značajnog utroška vremena, pogotovo kada se snimaju visokokvalitetni skenovi. Jedan od pristupa postizanju vremenskih ušteda jest primjena metode korelacije digitalnih volumena temeljene na 2D projekcijama (eng. *Projection-based Digital Volume Correlation*, P-DVC) [145], kod koje se mjerenje kinematskih veličina (tj. polja pomaka i deformacija) provodi direktno iz nekoliko radiografa umjesto iz rekonstruiranih volumetrijskih slika. Osim vremenske uštede, primjena ovog pristupa povoljna je također s aspekta relaksacije materijala vezane uz ispitivanje vlaknima ojačanih polimera i uz primjenu odgovarajuće vrste cjevaste potpore. Fenomen relaksacije materijala pritom je eliminiran, pošto se ovdje radi o trenutnom zabilježavanju radiografa tijekom opterećivanja ispitnog uzorka, za razliku od klasičnog snimanja visokokvalitetnih skenova tijekom kojeg se prekida opterećivanje. Drugi pristup, koji također vodi značajnim vremenskim uštedama, podrazumijeva korištenje konvencionalne DVC analize provedene nad trodimenzionalnim slikama koje su dobivene korištenjem skenova različitih kvaliteta [2]. U ovom se slučaju vremenske uštede postižu snimanjem skenova slabije kvalitete, što je moguće postići većim brzinama snimanja, manjim brojem snimljenih slika po jednoj projekciji, manjim brojem projekcija itd.

U ovom poglavlju razmatran je utjecaj kvalitete registriranih skenova na mjernu nesigurnost metode korelacije digitalnih volumena. Istraživanje mjerne nesigurnosti provedeno je s dva aspekta. Prvi aspekt obuhvaća ispitivanje mjerne nesigurnosti globalne DVC metode s obzirom na broj korištenih projekcija za rekonstrukciju CT skena [146], dok drugi aspekt uključuje primjenu različitih pristupa skeniranja. Prvi pristup skeniranja, *korak po korak* (eng. *Stepwise Approach*) podrazumijevao je da se rotacijski stol CT skenera zajedno s ispitnim uzorkom zakreće te nakon zakreta miruje (tj. kod svakog inkrementalnog kutnog pomaka zaustavlja se gibanje zakretnog stola CT uređaja te se snimanje pojedinih projekcija odvija kada rotacijski stol miruje). Ovaj je pristup uspoređen s kontinuiranim pristupom (eng. *On-the-fly Approach*), kod kojeg zbog vremenske uštede nema zaustavljanja rotacije zakretnog stola (tj. rotacija ispitnog uzorka odvija se sinkronizirano sa zabilježavanjem projekcija). Obje studije provedene

su na ispitnom uzorku izrađenom od vinilesterske smole ojačane staklenim vlaknima *MAT* arhitekture.

7.1. Ispitni uzorak

Iz polimerne ploče ojačane kontinuiranim vlaknima *MAT* arhitekture debljine 5,2 mm izrađen je ispitni uzorak tehnologijom rezanja vodenim mlazom. Centralni dio ispitnog uzorka je stanjen, formirajući ligament debljine 5,6 mm. Ova geometrija uzorka za vlačno ispitivanje omogućava da je duljina prodiranja rendgenskih zraka kroz materijal približno jednaka za svaku projekciju unutar područja interesa tijekom rotacije ispitnog uzorka prilikom skeniranja. Ispitni uzorak, s promatranim područjem interesa definiranim crvenim pravokutnikom, prikazan je na slici 7-1.



Slika 7-1 Geometrija i dimenzije (mm) ispitnog uzorka korištenog za analizu utjecaja parametara skeniranja na standardnu mjernu nesigurnost pomaka DVC metode. Crvenim pravokutnikom prikazano je skenirano područje interesa

7.2. Provedba eksperimentalnog istraživanja

Skeniranje ispitnog uzorka provedeno je na laboratorijskom CT uređaju *X50+ North Star Imaging* na *Laboratoire de Mécanique Paris- Saclay* u Francuskoj s identičnim prihvatom korištenim u poglavlju 6.1 (vidi sliku 6-1(a)). Pritom su ostvarena četiri skena:

1. sken visoke kvalitete (*HQ sken*),
2. uzastopni sken visoke kvalitete (*HQ bis sken*),
3. sken niske kvalitete (*LQ sken*),
4. *kontinuirani sken*.

Zabilježavanje navedenih skenova provedeno je pri vrijednostima napona izvora od 150 kV i

struje izvora od 80 μ A. Sva četiri skena registrirana su dok je ispitni uzorak u neopterećenom stanju, bez prisustva cijevi koja bi okruživala ispitni uzorak. Udaljenost ispitnog objekta od izvora zračenja iznosila je 53 mm, dok je udaljenost od između izvora zračenja i detektora iznosila 910 mm. Kao i u prethodnom poglavlju, ni u ovom slučaju nije korišten aluminijski filter na izvoru rendgenskog zračenja.

Kao rezultat rekonstrukcije 3D volumena iz zabilježenih dvodimenzionalnih radiografa dobiveni su skenovi dimenzija $485 \times 590 \times 1237$ vokseli. Time je, uzimajući u obzir postignutu prostornu rezoluciju od 14,6 μ m/vokselu, definiran volumen promatranog područja interesa približnih dimenzija $7,1 \times 8,6 \times 18,1$ mm³. U tablici 7-1 prezentirani su parametri skeniranja za tri konfiguracije skenova. Akvizicijski parametri su pritom bili različiti za tri promatrana slučaja. *HQ* i *HQ bis* skenovi te *LQ* sken rekonstruirani su iz radiografa koji su snimani u konfiguraciji koja podrazumijeva rotaciju zakretnog stola CT uređaja u inkrementalnom modu. To je značilo da se zakretni stol, zajedno s ispitnim uzorkom rotira *korak po korak*, a snimanje radiografa odvija se između pojedinih koraka – kada rotacijski stol miruje. Drugi pristup skeniranja, tj. kontinuirano snimanje dvodimenzionalnih projekcija, definiran je tako da ne dolazi do zaustavljanja rotacije zakretnog stola ispitnog uređaja uslijed registriranja 2D radiografa. Naime, rotacija ispitnog uzorka i snimanje projekcija odvijalo se istovremeno. Pri rotaciji ispitnog uzorka za puni krug (360°), snimljeno je 800 radiografa za *HQ* i *LQ* parametre skeniranja. Za rekonstrukciju *kontinuiranog skena* zabilježeno je 768 dvodimenzionalnih projekcija. Svaki radiograf iz *HQ skena* uprosječen je s 20 projekcija kako bi se smanjila slučajna fluktuacija šuma. Iako je za rekonstrukciju *HQ skenova* korišteno 800 projekcija, ukupno je snimljeno 16000 radiografa. Trajanje skeniranja za ove je parametre iznosilo približno jedan sat. U *LQ* konfiguraciji skeniranja zabilježena je samo jedna projekcija po kutu zakreta te je stoga trajanje snimanja projekcija iznosilo svega 13 minuta. Istovremenom rotacijom ispitnog uzorka i zabilježavanjem projekcija pod različitim kutovima postignuto je najkraće vrijeme trajanja skeniranja od 2 minute (vidi tablicu 7-1).

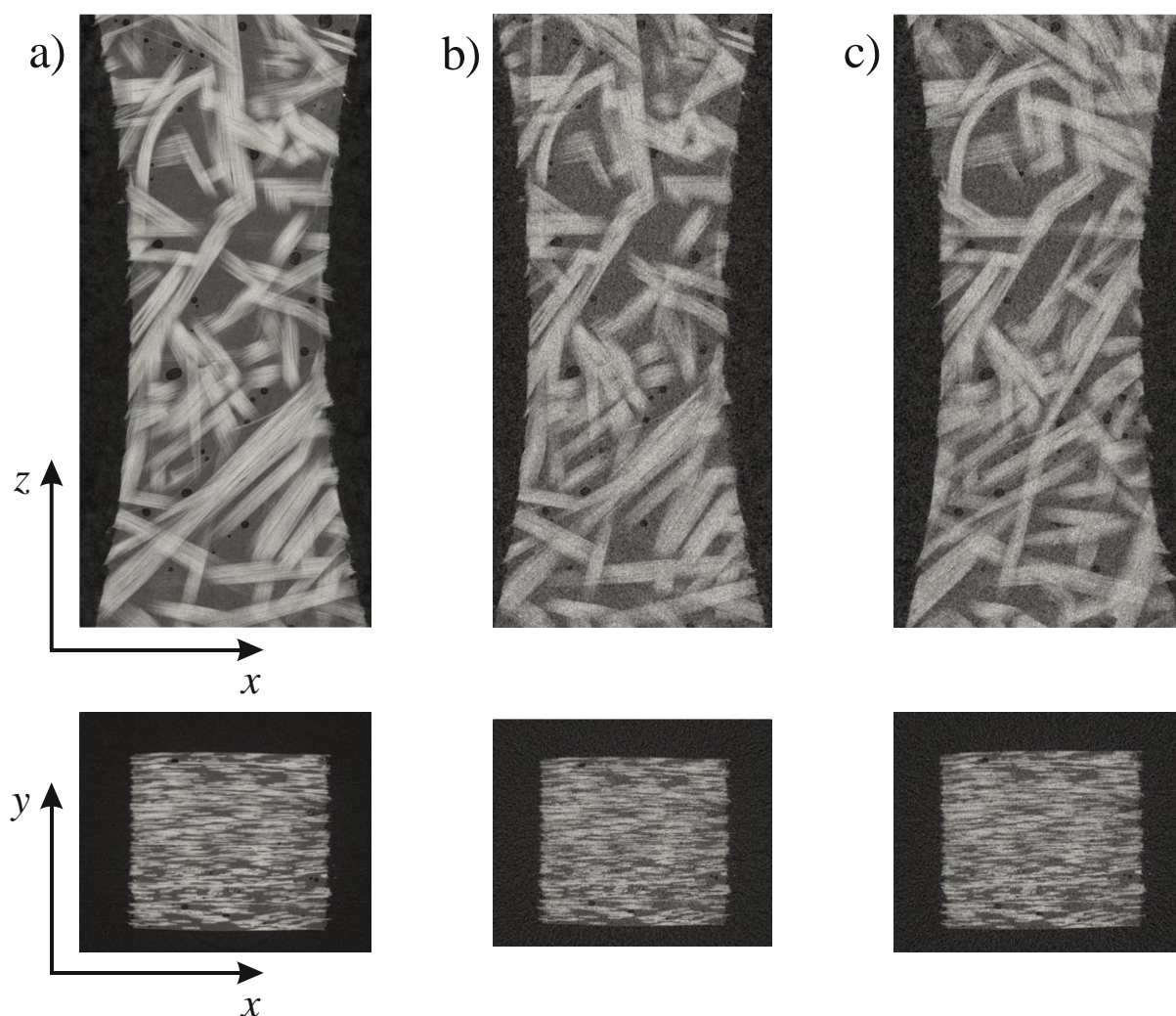
Tablica 7-1 Parametri CT skeniranja kod određivanja utjecaja kvalitete registriranih skenova na standardnu mjernu nesigurnost pomaka DVC metode

CT uređaj	<i>X50+ North Star Imaging</i>
Izvor X zračenja	XRyWorX XWT-240-CT
Cilj / Anoda	W (refleksijski mod)
Filter	-
Napon zračenja	150 kV

Struja zračenja	80 μ A
Promjer žarišne točke	5 μ m
Udaljenost izvor zračenja - detektor	910 mm
Udaljenost izvor zračenja – ispitni objekt	53 mm
Detektor	Dexela 2323
Definicija	1507 \times 1849 piksela (2 \times 2 biniranje)
Broj projekcija	800 (<i>HQ sken</i>)
	800 (<i>LQ sken</i>)
	768 (<i>kontinuirani sken</i>)
Broj zabilježenih slika po jednoj projekciji	20 (<i>HQ sken</i>)
	1 (<i>LQ sken</i>)
	1 (<i>kontinuirani sken</i>)
Odgoda snimanja	50 ms (<i>HQ sken</i>)
	50 ms (<i>LQ sken</i>)
	0 ms (<i>kontinuirani sken</i>)
Trajanje skeniranja	55 min (<i>HQ sken</i>)
	13 min (<i>LQ sken</i>)
	2 min (<i>kontinuirani sken</i>)
Ukupan kutni pomak	360°
Brzina snimanja slika	6 fps
Rekonstrukcijski algoritam	Filtrirana inverzna projekcija
Amplituda sive skale	8 bitova
Veličina obrezanog volumena	485 \times 590 \times 1237 voksel (nakon obrezivanja)
Vidno polje	7,1 \times 8,6 \times 18,1 mm ³ (nakon obrezivanja)
Mjerilo slike	14,6 μ m/voksel
Uzorak	Prikazan na Slika 7-2

Kvalitativne informacije o ostvarenim kontrastima pri skeniranju ispitnog uzorka, primjenjujući različite parametre skeniranja, dane su na slici 7-2. Pritom su za svaki od triju analiziranih slučajeva prikazani središnji presjeci kroz *x-z* ravninu i *x-y* ravninu rekonstruiranih volumena. Analizirajući sliku, primjećuje se kako je šum kod *LQ skena* (slika 7-2(b)) i kod *kontinuiranog skena* (slika 7-2(c)) značajno veći nego kod *HQ skena* (slika 7-2(a)). Iako su zabilježene više razine šuma kod *LQ skena* i *kontinuiranog skena*, međusobno se između njih ne uočavaju

značajne kvalitativne razlike te se čini da su razine šuma u ova dva slučaja podjednake.



Slika 7-2 Središnji presjeci rekonstruiranih volumena; (a) *HQ sken*, (b) *LQ sken* i (c) *kontinuirani sken*

7.3. Mjerenje 3D polja pomaka i određivanje mjerne nesigurnosti DVC metode kod skenova različite kvalitete

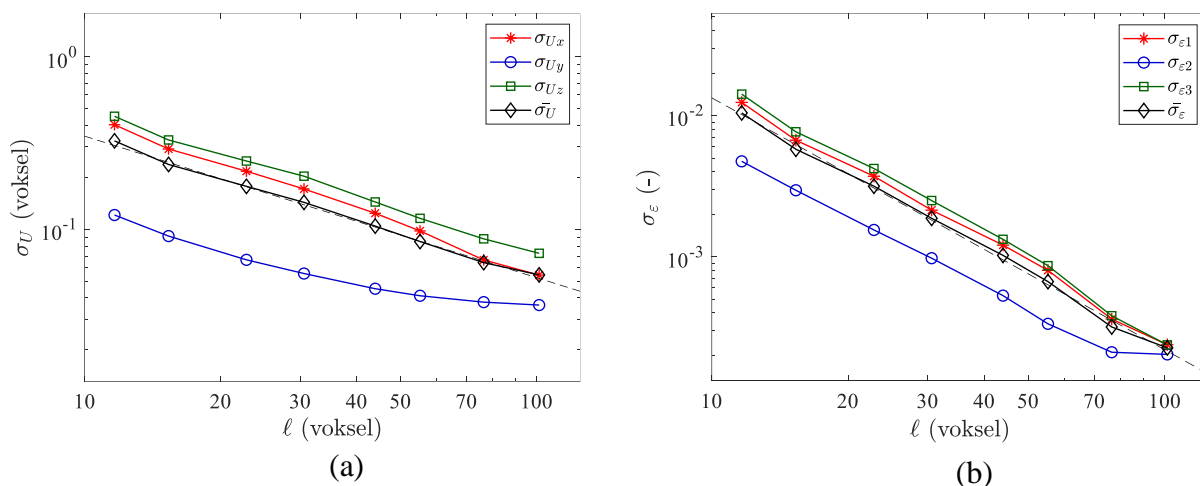
Mjerenju 3D polja pomaka pristupilo se primjenom standardnog DVC protokola kroz *Correli 3.0* algoritam [138] implementiranom u programskom paketu *MATLAB*. Kao i u prethodnom poglavlju, promatrano područje interesa diskretizirano je mrežom konačnih elemenata veličine 101, 76, 55, 44, 30, 22, 15 i 11 vokselâ, a korišteni su tetraedarski konačni elementi prvog reda opisani linearnom funkcijom oblika. Suma kvadrata razlike implementirana je u DVC algoritam kao kriterij podudaranja, dok je aproksimacija vrijednosti sive skale boje s čvornih pomaka mreže konačnih elemenata izvršena bilinearnom interpolacijom na razini vokselâ. Kompletni parametri DVC analize primijenjeni unutar eksperimentalne kampanje opisane u ovom poglavlju dani su u tablici 7-2.

Tablica 7-2 Parametri DVC analize kod određivanja utjecaja kvalitete registriranih skenova na standardnu mjernu nesigurnost pomaka DVC metode

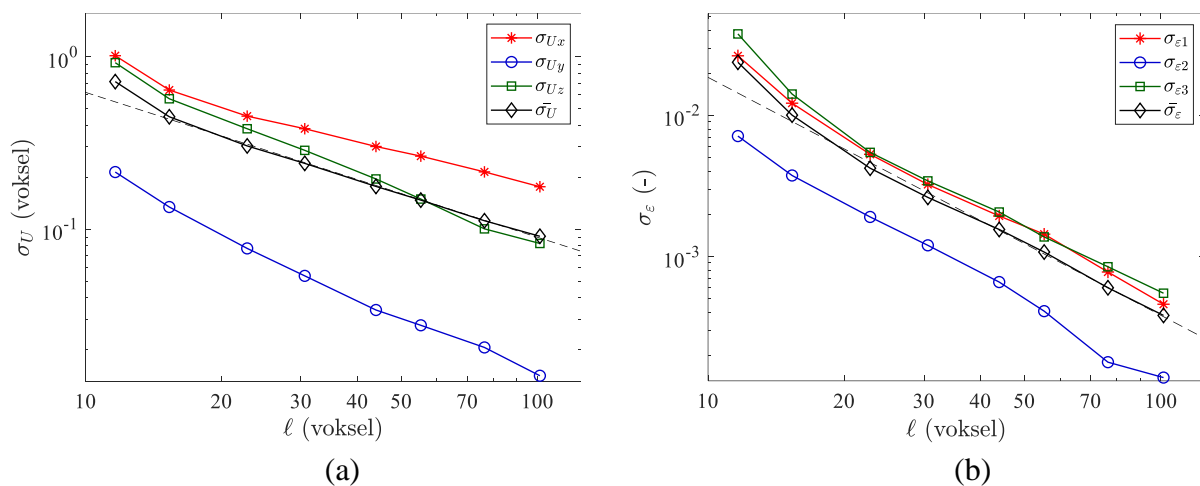
DVC algoritam	<i>Correli 3.0</i> [138]
Srednja veličina elementa (vokseli)	101, 76, 55, 44, 30, 22, 15, 11
Funkcija oblika	Linearna funkcija (T4)
Kriterij podudaranja	Penalizirana suma kvadrata razlika (SSD)
Interpolacija	Bilinearna

Pristup za određivanje mjerne nesigurnosti DVC metode u kontekstu utjecaja kvalitete volumetrijskih slika uključuje usporedbu četiri uzastopno snimljena skena s različitim parametrima skeniranja u neopterećenom stanju. Kako bi se utvrdio utjecaj parametara skeniranja, referentne vrijednosti standardne mjerne rezolucije pomaka i deformacija bit će definirane na temelju analiza skenova visoke kvalitete (*HQ* i *HQ bis skenova*). Mjerna nesigurnost DVC metode za *LQ* i *kontinuiranu* konfiguraciju skeniranja bit će određena korelacijom referentnog *HQ skena* s deformiranim *LQ skenom* u prvom slučaju, te referentnog *HQ skena* s deformiranim *kontinuiranim skenom* u drugom slučaju. Pritom će se za mjernu nesigurnost, kao i u prethodnim analizama, uzimati vrijednost standardne devijacije svih čvornih pomaka i deformacija, za svaku od osam promatranih veličina diskretizacije.

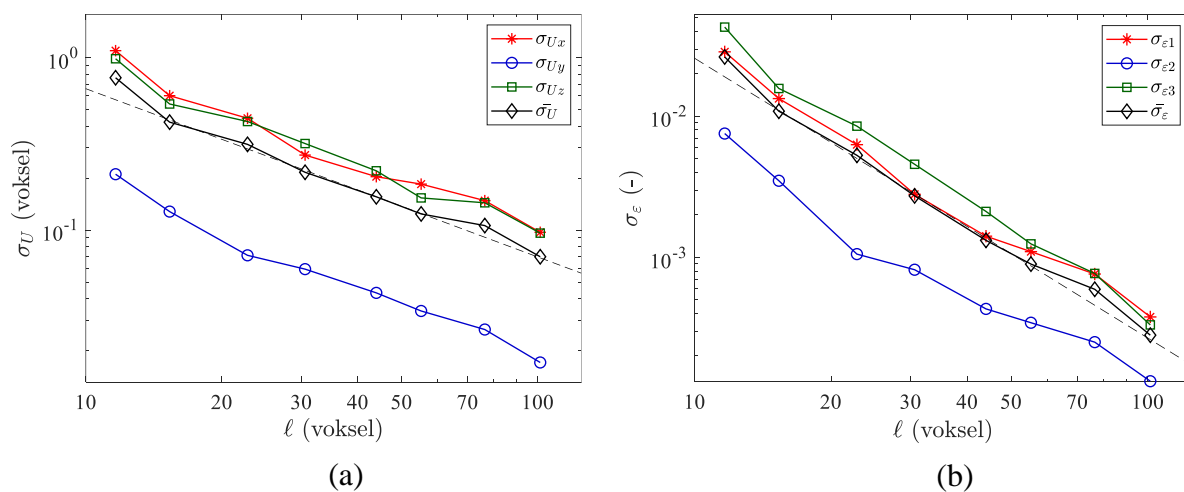
Pogledavši rezultate standardnih mjernih nesigurnosti pomaka i deformacija (slike 7-3 do 7-5), po osima uočava se kako su za sve tri konfiguracije najniže vrijednosti postignute u smjeru slaganja slojeva vlakana, odnosno u *y* smjeru. U tom je smislu ostvarena potpuna konzistentnost s rezultatima dobivenima unutar poglavlja 5 i 6, uz napomenu kako su zbog korištenja aluminijskog filtera u poglavlju 5 apsolutne vrijednosti registriranih mjernih nesigurnosti nešto niže. Dodatno se uočava kako je za slučaj *LQ skena* (slika 7-4) pri veličinama diskretizacije većima od 20 voksela primjetan blagi porast u razlici mjernih nesigurnosti pomaka u smjerovima osi *x* i *z* za razliku od preostale dvije konfiguracije (tj. *HQ* konfiguracija prikazana na slici 7-3 i *kontinuirana* konfiguracija prikazana na slici 7-5), kod kojih je ta razlika gotovo pa neprimjetna. Usporedbom mjernih nesigurnosti pomaka i deformacija, primijetit će se pak, kako su kod sve tri promatrane konfiguracije zabilježene vrijednosti standardnih mjernih nesigurnosti deformacija otprilike za dva reda veličine niža nego što je to slučaj s mjernim nesigurnostima pomaka.



Slika 7-3 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitni uzorak MAT arhitekture vlakana dobivene koreliranjem HQ referentnog skena i HQ bis deformiranog skena

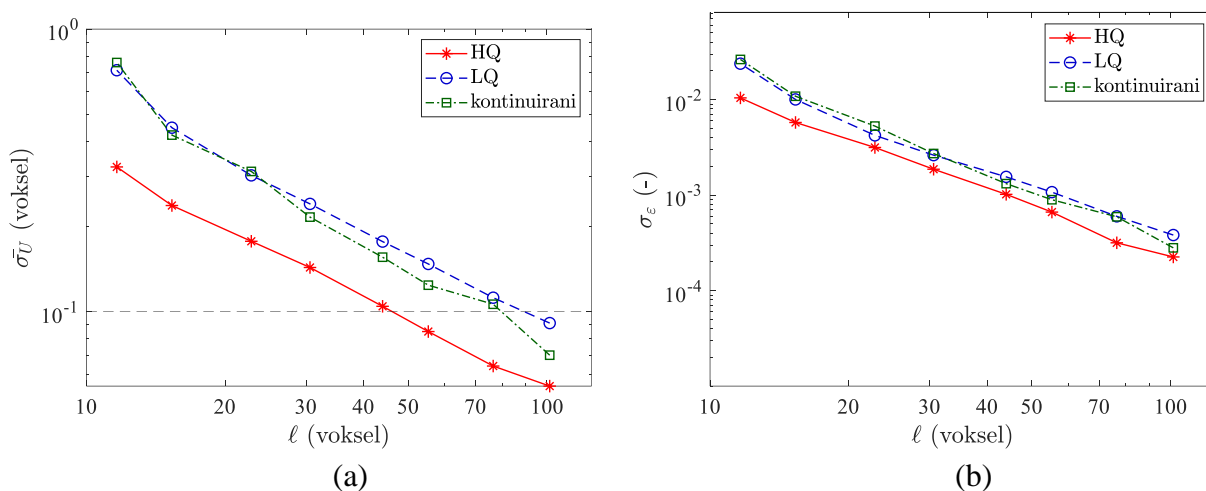


Slika 7-4 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitni uzorak MAT arhitekture vlakana dobivene koreliranjem HQ referentnog skena i LQ deformiranog skena



Slika 7-5 Standardna nesigurnost (a) izmjerenih pomaka i (b) izračunatih deformacija kao funkcija veličine konačnih elemenata za ispitni uzorak MAT arhitekture vlakana dobivene koreliranjem HQ referentnog skena i kontinuiranog deformiranog skena

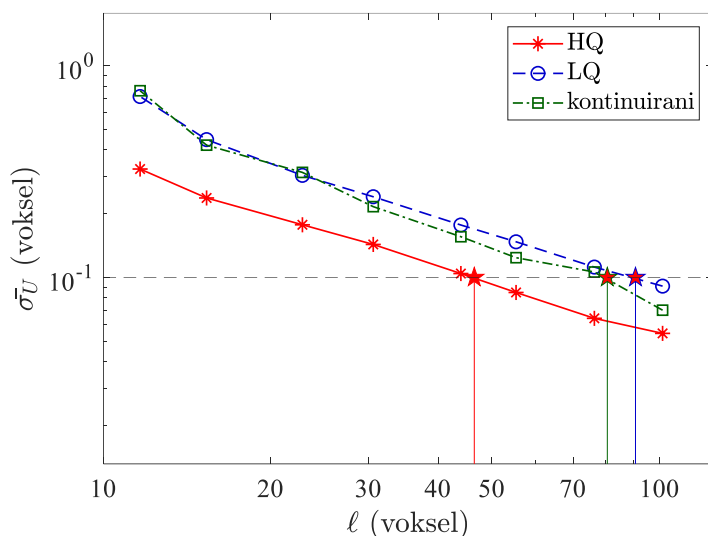
Usporede li se srednje standardne vrijednosti mjernih nesigurnosti pomaka i deformacija (slika 7-6), uočit će se kako su najniže vrijednosti ostvarene kod prve konfiguracije koja je uključivala korelaciju dva visokokvalitetna skena (tj. *HQ sken* i *HQ bis sken*), dok su više vrijednosti mjernih nesigurnosti zabilježene kada se kao slika deformiranog stanja uzimao *LQ sken*, odnosno *kontinuirani* sken. Valja pritom primijetiti kako su razlike u ostvarenim mjernim nesigurnostima između *LQ* i *kontinuirane* konfiguracije gotovo neprimjetne, iz čega se generalno može zaključiti kako se primjenom kontinuiranog akvizicijskog protokola mogu postići vremenske uštede koje kao rezultat neće imati bitno smanjenu točnost DVC metode u odnosu na slučaj kad se za registriranje deformiranog skena koristi *LQ* akvizicijski protokol.



Slika 7-6 Srednje standardne mjerne nesigurnosti (a) pomaka i (b) deformacija za ispitni uzorak *MAT* arhitekture vlakana ostvarene koreliranjem skenova različite kvalitete. Mjerne nesigurnosti prikazane su kao funkcija veličine konačnih elemenata

Na osnovu dobivenih rezultata srednjih standardnih mjernih nesigurnosti pomaka, moguće je pristupiti definiranju preporučenih veličina konačnih elemenata korištenih pri diskretizaciji ispitnih uzoraka od vinilesterske smole ojačane *MAT* arhitekturom vlakana, u ovisnosti o kvaliteti registriranih skenova. Uzevši u obzir kriterij za mjernu nesigurnost pomaka koji definira da prihvatljiva vrijednost srednje standardne mjerne nesigurnosti pomaka ne smije premašiti 10^{-1} voksela [4], određene su preporučene veličine diskretizacije. Koristeći se parametrima skeniranja definiranim u tablici 7-1, na osnovu izmjerenih standardnih devijacija svih čvornih pomaka, preporuča se u slučaju upotrebe dvaju visokokvalitetnih skenova koristiti konačne elemente veličine $\ell = 46$ voksela. Upotrijebi li se za definiranje deformirane slike *LQ sken* preporuča se korištenje mreže konačnih elemenata veličine $\ell = 80$ voksela, dok se najgrublja diskretizacija preporuča kada se kao slika deformiranog stanja koristi kontinuirani

sken. Tada je potrebno koristi mrežu konačnih elemenata veličine $\ell = 90$ voksel. Postupak određivanja grafički je prikazan na slici 7-7, dok su dobiveni rezultati preporučenih veličina konačnih elemenata sumirani u tablici 7-3.



Slika 7-7 Određivanje optimalne veličine konačnog elementa ℓ obzirom na kvalitetu registriranih skenova

Tablica 7-3 Preporučene veličine konačnih elemenata kod ispitivanja vinilesterske smole ojačane MAT arhitekturom vlakana obzirom na kvalitetu registriranih skenova

Kvaliteta registriranog skena	Duljina elementa, ℓ (vokseli)
<i>HQ sken</i>	46
<i>LQ sken</i>	80
<i>Kontinuirani sken</i>	90

7.4. Zaključak i diskusija

Istraživanje provedeno unutar ovog poglavlja usmjereno je na utvrđivanje utjecaja kvalitete registriranih skenova na mjernu nesigurnost DVC metode. U tu je svrhu provedena serija uzastopnih skeniranja ispitnih uzoraka izrađenih od vinilesterske smole ojačane MAT arhitekturom vlakana, pri čemu su razmatrani različiti parametri koji utječu na vrijeme trajanja skeniranja (tj. broj projekcija, broj zabilježenih slika po jednoj projekciji, vrijeme odgode snimanja), dok su svi ostali parametri bili nepromijenjeni. Na taj su način zabilježena četiri skena s tri različita protokola skeniranja, nakon čega se pristupilo korelaciji u svrhu određivanja mjernih nesigurnosti. Skeniranje ispitnih uzoraka provedeno je korištenjem laboratorijskog CT uređaja X50+ North Star Imaging na Laboratoire de Mécanique Paris- Saclay u Francuskoj s prihvatom identičnim onom koji je korišten u poglavlju 6.1. CT skeniranjem registrirana su ukupno četiri skena, od kojih su dva visokokvalitetna (tj. *HQ sken*) kod kojih je vrijeme trajanja

skeniranja iznosilo 55 minuta, jedan sken niže kvalitete (tj. *LQ sken*) za koji je vrijeme skeniranja iznosilo 13 minuta te jedan *kontinuirani* sken kod kojeg nije dolazilo do zaustavljanja zakretnog stola CT uređaja pa je vrijeme trajanja skeniranja iznosilo svega dvije minute.

Postupak određivanja mjernih nesigurnosti bio je usklađen s metodama primijenjenima u prethodnim poglavljima. Mjerna nesigurnost definirana je kao standardna devijacija svih čvornih pomaka izmjerenih DVC metodom između dvaju skenova neopterećenog stanja, pri čemu nije primijenjen pomak krutog tijela. U *HQ* konfiguraciji CT skeniranja, korelacija se provodila između dva visokokvalitetna, uzastopno registrirana skena. Ova metoda osigurava visoku preciznost u mjerenju nesigurnosti. U *LQ* konfiguraciji, za sliku referentnog stanja korišten je visokokvalitetni sken (*HQ*), dok je za sliku deformiranog stanja korišten sken niže kvalitete (*LQ*). Ova kombinacija omogućava usporedbu rezultata dobivenih različitim razinama kvalitete slika. U slučaju *kontinuirane konfiguracije*, za sliku referentnog stanja također je korišten *HQ sken*, dok je za sliku deformiranog stanja korišten sken koji je registriran korištenjem kontinuiranog akvizicijskog protokola. Ovaj pristup omogućava praćenje utjecaja različitih akvizicijskih parametara na mjerne nesigurnosti DVC metode.

Mjerne nesigurnosti izračunate su iz izmjerenih polja pomaka i deformacija primjenom standardnog DVC protokola, korištenjem *Correli 3.0* algoritma implementiranog u programskom paketu *MATLAB*. Regularizacijski DVC protokol nije primijenjen. Polja pomaka izmjerena su za osam različitih prostornih rezolucija, odnosno korištene su mreže konačnih elemenata veličine 101, 76, 55, 44, 30, 22, 15 i 11 voksela. Korištenjem finije diskretizacije promatranog volumena interesa, zabilježen je porast vrijednosti čvornih pomaka, odnosno porast vrijednosti mjernih nesigurnosti DVC metode kod sve tri konfiguracije. Također, rezultati ostvarenih mjernih nesigurnosti po osima kod sve tri promatrane konfiguracije ukazuju na prisustvo najnižih mjernih nesigurnosti u *y* smjeru, odnosno u smjeru polaganja slojeva vlakana pri proizvodnji kompozitne ploče iz koje su kasnije rezani ispitni uzorci. Navedeni rezultati u potpunosti su u skladu s rezultatima mjernih nesigurnosti za *MAT* ispitne uzorke ostvarene u petom poglavlju, kao i s rezultatima za slučaj skeniranja *MAT* ispitnog uzorka u šestom poglavlju, kada ispitni uzorak nije bio okružen cijevi. Na osnovu registriranih čvornih pomaka, referirajući se na kriterij o prihvatljivoj vrijednosti srednje standardne mjerne nesigurnosti pomaka ($\bar{\sigma}_V \leq 10^{-1}$ voksela), definirane su preporučene veličine diskretizacije s obzirom na kvalitetu registriranih skenova. Ovim istraživanjem utvrđena je optimalna veličina konačnih elemenata za *HQ* konfiguraciju pri diskretizaciji promatranog područja interesa

ispitnog uzorka od vinilesterske smole ojačanog *MAT* arhitekturom vlakana, koja iznosi $\ell = 46$ voksel. Ovo je tek neznatno veća vrijednost od preporučene vrijednosti dobivene unutar eksperimentalne kampanje opisane u poglavlju 6, gdje je preporučena veličina iznosila $\ell = 45$ voksel. Sličnost u rezultatima ne iznenađuje, pošto su skeniranja provedena korištenjem istog laboratorijskog CT uređaja, a razlike u primijenjenim akvizicijskim parametrima su neznatne. S druge strane, preporučena veličina diskretizacije od $\ell = 46$ voksel znatno je veća od preporučene veličine definirane u poglavlju 5 koja je za *MAT* arhitekturu vlakana pri primjeni standardnog DVC protokola iznosila $\ell = 12$ voksel. Ovako izražena razlika u preporučenim veličinama diskretizacije posljedica je korištenja različitih laboratorijskih CT uređaja te nekorištenja aluminijskog filtera na izvoru rendgenskog zračenja u eksperimentalnoj kampanji primijenjenoj u ovom poglavlju. Utjecaj specifičnog karaktera na mjernu nesigurnost DVC metode prethodno je opisan (vidi poglavlje 3.4.2), dok je neprisuštvom aluminijskog filtera na izvoru zračenja onemogućeno filtriranje niskoenergetskih rendgenskih zraka, što rezultira povećanim šumom u registriranim slikama.

Za razliku od rezultata dobivenih korelacijom dvaju uzastopno registriranih *HQ skenova*, kada se koristi *LQ sken* ili *kontinuirani sken* za sliku deformiranog stanja, zabilježene su gotovo dvostruko veće vrijednosti čvornih pomaka. Stoga, preporučena veličina diskretizacije za *LQ* konfiguraciju iznosi $\ell = 80$ voksel, dok za kontinuiranu konfiguraciju preporučena veličina diskretizacije iznosi $\ell = 90$ voksel. Iako se radi o osjetno višim preporučenim vrijednostima diskretizacije, a imajući na umu kako je za promatranje lokalizacijskih fenomena kod ispitivanja FRP materijala poželjno koristiti što je moguće finiju mrežu konačnih elemenata, može se zaključiti kako bi primjena regulariziranog DVC protokola u ovom slučaju bila izuzetno korisna. S jedne strane, primjena *LQ* i *kontinuiranih skenova* omogućila bi značajne vremenske uštede, jer bi se izbjeglo snimanje visokokvalitetnih, dugotrajnih skenova. S druge strane, uz upotrebu odgovarajućih regularizacijskih protokola, mjerna nesigurnost mogla bi se dodatno smanjiti na razinu koja je približno jednaka onoj postignutoj korištenjem *HQ skenova*. U tom bi slučaju bilo potrebno koristiti regularizacijsku duljinu jednaku minimalnoj veličini elementa kod koje je zadovoljen uvjet $\bar{\sigma}_U \leq 10^{-1}$ voksel, što je već uspješno demonstrirano u poglavlju 5.4.2. Drugim riječima, bilo bi potrebno koristiti regularizacijske duljine $\xi = 80$ voksel za *LQ sken*, odnosno $\xi = 90$ voksel za *kontinuirani sken*, čime bi bila omogućena finija

diskretizacija promatranog područja interesa.

Na kraju, valja istaknuti važnost registriranja sličnih vrijednosti čvornih pomaka pri primjeni *LQ* i *kontinuiranog* akvizicijskog protokola. Dok vrijeme trajanja skeniranja kod *LQ* protokola iznosi 13 minuta, kod *kontinuiranog* protokola ono je znatno kraće, svega 2 minute. S obzirom na gotovo neprimjetne razlike u mjernim nesigurnostima pomaka i deformacija DVC metode, opravdano je preferirati *kontinuirani* akvizicijski protokol zbog njegove brzine i učinkovitosti u odnosu na *LQ* protokol. Time će se postići značajne vremenske uštede uz zanemarive razlike u točnosti izmjerenih rezultata, što čini *kontinuirani* akvizicijski protokol optimalnim izborom za ubrzanje procesa skeniranja bez kompromisa u kvaliteti podataka.

8. ZAKLJUČAK

Istraživanje provedeno u okviru ovog doktorskog rada započelo je kao odgovor na potrebu za razvojem metode *in-situ* mehaničkog ispitivanja polimera ojačanih vlaknima uz primjenu računalne tomografije. U novije vrijeme računalna tomografija sve više pronalazi primjenu u eksperimentalnoj mehanici, omogućavajući detaljno praćenje ponašanja materijala pod mehaničkim opterećenjem u realnom vremenu. Primjena računalne tomografije za praćenje strukturalnih promjena unutar materijala tijekom opterećenja pruža ključne informacije o ponašanju materijala na mikroskopskoj razini, čime se identificiraju kritični mehanizmi oštećenja koji utječu na njihovu čvrstoću i pouzdanost. U kombinaciji s eksperimentalnim tehnikama koje se temelje na metodama mjerenja cijelog polja pomaka, računalna tomografija (CT) pruža uvid u analizu deformacija i mikrostrukturnih promjena materijala te omogućava sveobuhvatno praćenje razvoja pukotina i oštećenja unutar materijala tijekom mehaničkog opterećenja.

Primjena predložene metodologije izuzetno je korisna za proučavanje ponašanja višefaznih materijala, pri čemu se posebno ističu vlaknima ojačani polimeri. Zbog svoje heterogene mikrostrukture, ovi materijali pokazuju kompleksan odziv uslijed narinutog mehaničkog opterećenja. Računalna tomografija u kombinaciji s metodom korelacije digitalnih volumena (DVC) omogućava detaljnu analizu interakcija između vlakana i matrice, kao i promjena koje se događaju unutar mikrostrukture tijekom opterećenja. Time se olakšava razumijevanje mehanizama koji upravljaju njihovim ponašanjem i omogućava optimizacija konstrukcije i primjene tih materijala. Međutim, budući da predložena metodologija uključuje primjenu niza različitih tehnika, počevši od mehaničkih ispitivanja unutar CT skenera, preko akvizicijskih tehnika, pa do analize podataka, jasno je da postoji mnogo faktora koji utječu na njezinu pouzdanost i učinkovitost. Svaka faza, od postava za provedbu mehaničkih ispitivanja do kvalitete snimanja i obrade slika, može značajno utjecati na konačne rezultate, što zahtijeva pažljivo planiranje i optimizaciju svih koraka unutar metodologije, kako bi se osigurala točnost i ponovljivost dobivenih podataka. U tom kontekstu, optimizacija parametara *in-situ* eksperimentalnog protokola pri ispitivanju vlaknima ojačanih polimera predstavlja glavni cilj ovog doktorskog rada. Naime, cilj je kroz razvijenu metodu definirati najveću prostornu rezoluciju prilikom mjerenja polja pomaka i računanja pripadajućih polja deformacija. Pritom se maksimalne prostorne rezolucije određuju kvantificiranjem standardne mjerne nesigurnosti metode korelacije digitalnih volumena.

Budući da je uvidom u dostupnu znanstvenu i stručnu literaturu utvrđen značajan nedostatak

istraživanja usmjerenih na procjenu pouzdanosti primjene predložene metodologije u ispitivanju vlaknima ojačanih polimera, unutar ovog doktorskog rada provedene su eksperimentalne kampanje s ciljem problematiziranja ključnih utjecaja. Konkretno, istražen je utjecaj mikrostrukture ispitivanog FRP materijala, utjecaj ispitnog okruženja (tj. cjevaste potpore *in-situ* ispitnog uređaja) te utjecaj akvizicijskih parametara CT skeniranja na pouzdanost dobivenih rezultata.

Činjenica kako je odabirom vrste i načina distribucije vlakana unutar polimerne matrice, kao i prilagodbom udjela konstituenata, moguće razviti materijal koji zadovoljava specifične zahtjeve različitih primjena, omogućava postizanje bitno različitih mikrostrukturnih značajki vlaknima ojačanih polimera. Ova je konstatacija izuzetno važna jer je poznato da se DVC metoda oslanja na prirodnu mikrostrukturu ispitivanog materijala, osobito na njezinu heterogenost koja omogućava konvergenciju procesa korelacije. Stoga je očekivano da će vrsta ispitivanog FRP materijala značajno utjecati na mjernu nesigurnost DVC metode. U okviru ovog doktorskog rada istraživanja su provedena na kompozitima s polimernom matricom od vinilesterske smole, ojačanima različitim arhitekturama staklenih vlakana. Analizirane su četiri različite arhitekture vlakana: stohastički raspoređena kontinuirana vlakna (*MAT* arhitektura), kontinuirana uzdužna vlakna (*UD* arhitektura), uzdužno i poprečno pletena vlakna (*WF* arhitektura), te naizmjenično postavljena $+45^\circ/-45^\circ$ kontinuirana vlakna (*AP* arhitektura). Snimanjem optičkim mikroskopom te CT skeniranjem za svaku je od promatranih arhitektura registrirana pripadajuća mikrostruktura te su dodatno određeni volumni i maseni udjeli između konstituenata.

U prvom dijelu eksperimentalne kampanje analiziran je utjecaj arhitekture vlakana na standardnu mjernu nesigurnost DVC metode. CT skeniranje ispitnih uzoraka provedeno je s istim akvizicijskim parametrima. Rezultati DVC mjerenja pokazali su da heterogene strukture polimera s *MAT* arhitekturom vlakana rezultiraju znatno nižim mjernim nesigurnostima u usporedbi s FRP materijalima s *WF*, *UD* i *AP* arhitekturama vlakana. Uzimajući u obzir prihvatljive vrijednosti mjernih nesigurnosti DVC metode definirane u relevantnoj literaturi, u ovom su radu određene optimalne veličine konačnih elemenata korištenih pri diskretizaciji promatranih volumena interesa. S ciljem postizanja kompromisa između propisane maksimalne mjere nesigurnosti i odabrane prostorne rezolucije, pokazano je kako je za FRP materijale ojačane *MAT* arhitekturom vlakana optimalno koristiti mrežu veličine 12 vokseli. Za *AP*, *WF* i *UD* arhitekture preporučuje se korištenje mreža konačnih elemenata veličine 30, 68, odnosno 95 vokseli. Određivanjem optimalnih diskretizacija rekonstruiranih volumena potvrđena je

prva hipoteza doktorskog rada, koja dovodi u vezu kvantificiranje mjerne nesigurnosti s primjenom viših prostornih rezolucija kod mjerenja polja pomaka. Provedeno ispitivanje također potvrđuje važnost *a priori* određivanja mjerne nesigurnosti, pošto tekstura (tj. mikrostruktura) i kvaliteta rekonstruiranih volumena snažno utječu na pouzdanost izmjerenih podataka. Utjecaj zabilježenih vrijednosti standardnih mjernih nesigurnosti pokazao je izravan odnos s izračunatim srednjim kontrastom registriranih trodimenzionalnih slika. Naime, viši iznosi kontrasta promatranih mikrostruktura rezultiraju nižim vrijednostima standardnih nesigurnosti izračunatih primjenom DVC metode. Dodatno je unutar ove eksperimentalne kampanje istražen utjecaj mehaničke regularizacije na mjernu nesigurnost DVC metode. Primjenom mehaničke regularizacije, koja uzima u obzir samo mehanički dozvoljene pomake, potvrđena je pretpostavka kako je moguće dodatno smanjiti standardnu mjernu nesigurnost pomaka i deformacija globalnog DVC pristupa koristeći finiju diskretizaciju promatranog volumena interesa. Rezultati ove analize pokazuju kako je moguće zadovoljiti propisanu mjernu nesigurnost uz visoku prostornu rezoluciju, neovisno o arhitekturi vlakana FRP materijala. Također, u radu su kvantificirane minimalne veličine regularizacijskih duljina u ovisnosti o arhitekturi vlakana FRP materijala, s ciljem ostvarivanja kriterija maksimalne standardne mjere nesigurnosti DVC metode.

U drugom dijelu eksperimentalne kampanje ispitivan je utjecaj ispitnog okruženja, odnosno utjecaj materijala cjevaste potpore *in-situ* ispitnog uređaja, na mjernu nesigurnost DVC metode. Budući da cilindrična potpora *in-situ* ispitnog uređaja u potpunosti okružuje ispitni uzorak, njeno prisustvo prilikom skeniranja uzorkovat će smanjenu kvalitetu registriranih skenova, pošto rendgensko zračenje osim prolaska kroz ispitni uzorak treba i dvaput proći kroz stijenu cjevaste potpore. U sklopu ovog istraživanja analizirano je prisustvo cjevaste potpore izrađene od četiri različita materijala: polimetilmetakrilata (PMMA), aluminijska, polimera ojačanog ugljičnim vlaknima i poli(eter-eter-eton)-a (PEEK). Istraživanje je provedeno na ispitnom uzorku s *MAT* arhitekturom vlakana. Rezultati DVC analize pokazuju kako se najniže vrijednosti standardne mjerne nesigurnosti postižu kada je na ispitnim *in-situ* uređajima instalirana PEEK cjevasta potpora, dok se nešto viša mjerna nesigurnost postiže upotrebom cjevaste potpore izrađene od polimera ojačanog ugljičnim vlaknima. Provedena eksperimentalna kampanja pokazala je također kako korištenje cjevaste potpore izrađene od polimetilmetakrilata, materijala učestalo korištenog za izradu cjevastih potpora, vodi najnižoj točnosti DVC metode. Usporedbom rezultata zabilježenih u prvoj i drugoj eksperimentalnoj kampanji, može se zaključiti kako je za *in-situ* mehanička ispitivanja FRP materijala

preporučena upotreba filtera tijekom CT skeniranja zbog njihovog značajnog utjecaja na vrijednosti standardne mjere nesigurnosti. Naime, aluminijski filter tijekom CT skeniranja FRP materijala smanjuje dozu zračenja i poboljšavaju kontrast slike, što omogućava jasniju vizualizaciju unutarnjih struktura i defekata. Također, upotreba aluminijskog filtera dovodi do apsorpcije visokoenergetskih zrake, čime se minimiziraju artefakti i akvizicijski šum, što poboljšava preciznost izmjerenih pomaka kod *in-situ* mehaničkih ispitivanja. Prisustvo cjevaste potpore *in-situ* ispitnog uređaja promatrano je i u kontekstu moguće relaksacije naprezanja tijekom provedbe ispitivanja, budući da cjevasta potpora preuzima opterećenje koje je narinuto na ispitni uzorak. Iz tih razloga provedena su mehanička ispitivanja na prethodno navedenim cjevastim potporama kako bi se simuliralo preuzimanje reakcijskog opterećenja. Rezultati mehaničkih ispitivanja potvrdili su kako je korištenje PMMA cjevaste potpore popraćeno značajnom relaksacijom materijala, dok testovi provedeni nad cjevastim potporama izrađenima od aluminijskog, polimera ojačanog ugljičnim vlaknima i PEEK materijala nisu utvrdili značajnu prisutnost fenomena relaksacije naprezanja. Dodatno su provedeni relaksacijski testovi nad ispitnim uzorcima različite arhitekture vlakana (tj. *MAT*, *UD*, *WF* i *AP* arhitekture vlakana), pri čemu je određen relaksacijski karakter kod četiri tipa FRP materijala. Na osnovu rezultata relaksacije naprezanja cjevastih potpora, kao i rezultata utjecaja materijala cjevaste potpore na mjernu nesigurnost DVC metode, zaključeno je kako je upotreba poli(eter-eterketon)-a (PEEK) optimalan izbor za izradu cjevaste potpore *in-situ* ispitnog uređaja, pošto ostvaruje najnižu relaksaciju, a istovremeno omogućava postizanje najnižih vrijednosti mjernih nesigurnosti DVC metode. S druge strane, rezultati mehaničkih ispitivanja i DVC analize ukazuju na to kako bi, prema dostupnoj literaturi, najčešće korišteni materijal za izradu cjevastih potpora, polimetilmetakrilat (PMMA) trebalo izbjegavati prilikom ispitivanja FRP materijala. PMMA pokazuje visok stupanj relaksacije naprezanja i istovremeno uzrokuje visoke razine mjerne nesigurnosti DVC metode.

U završnom dijelu istraživanja pristupilo se određivanju utjecaja kvalitete registriranih skenova, odnosno akvizicijskih parametara povezanih s vremenom trajanja skeniranja, na mjernu nesigurnost DVC metode. Zabilježena su dva visokokvalitetna skena (*HQ* i *HQ bis*) ispitnog uzorka s *MAT* arhitekturom vlakana, pri čemu je snimanje jednog skena trajalo 55 minuta. Također je zabilježen jedan niskokvalitetni sken (*LQ* sken), čije je snimanje trajalo 13 minuta te jedan sken registriran primjenom kontinuiranog akvizicijskog protokola (*kontinuirani* sken), čije je snimanje trajalo dvije minute. Provedbom standardne DVC analize, pri čemu je *HQ* sken odabran kao referentni, a ostali (tj. *HQ bis*, *LQ* i *kontinuirani*) definirani kao deformirani

skenovi, utvrđena je mjerna nesigurnost predložene metode mjerenja cijelog polja pomaka. Za svaku konfiguraciju skeniranja utvrđene su preporučene veličine elemenata kojima je diskretiziran promatrani volumen interesa. Dobivenim rezultatima definirana je preporuka za korištenje mreže konačnih elemenata veličine $\ell = 80$ vokseli za *LQ* sken te $\ell = 90$ vokseli za *kontinuiranu* konfiguraciju skeniranja. Ove preporučene veličine mreže otprilike su dvostruko grublje u usporedbi s veličinom mreže preporučenom za visokokvalitetne skenove (tj. za *HQ* konfiguraciju preporučena je veličina $\ell = 46$ vokseli). Budući da je u prvom dijelu eksperimentalne kampanje demonstrirano kako primjena mehaničke regularizacije može bitno sniziti vrijednosti mjernih nesigurnosti i dovesti ih do prihvatljivih razina, može se zaključiti kako je opravdana primjena niskokvalitetnih skenova ili primjena kontinuiranog akvizicijskog protokola pri ispitivanju FRP materijala, pošto se time mogu postići značajne vremenske uštede prilikom *in-situ* mehaničkog ispitivanja. Štoviše, preporuka je korištenje *kontinuiranog* skeniranja, budući da su razlike u mjernim nesigurnostima DVC metode u usporedbi s *LQ* konfiguracijom zanemarive. Ovim je potvrđena druga hipoteza doktorskog rada, koja se odnosi na optimizaciju parametara računalne tomografije u vezi s vremenom provedbe testiranja. Naime, primjenom DVC metode s implementiranom mehaničkom regularizacijom i kontinuiranim akvizicijskim parametrima, moguće je ostvariti značajne uštede u trajanju mehaničkog ispitivanja unutar CT skenera, dok se istovremeno postižu prihvatljive vrijednosti standardne rezolucije izmjerenih pomaka i izračunatih deformacija na volumetrijskim slikama različite kvalitete.

8.1. Znanstveni doprinos

Rezultati istraživanja provedenih unutar ovog doktorskog rada doprinose pouzdanijoj primjeni metode korelacije digitalnih volumena u kombinaciji s računalnom tomografijom pri ispitivanju vlaknima ojačanih polimera.

Najvažniji doprinosi rada su:

- Izračunate su standardne mjerne nesigurnosti DVC metode s obzirom na kontrast 3D slike koji je određen arhitekturom vlakana FRP materijala
- Definirane su maksimalne prostorne rezolucije (tj. minimalne veličine elemenata mreže konačnih elemenata) globalne DVC metode s obzirom na promatranu arhitekturu vlakana (tj. kontrast trodimenzionalne slike definiran raspodjelom staklenih vlakana u polimernoj matrici) FRP materijala
- Implementacijom mehaničke regularizacije u globalni DVC algoritam ostvareno je

smanjenje mjerne nesigurnosti predložene tehnike mjerenja polja pomaka primjenom fine diskretizacije promatranog volumena interesa na slikama s niskim kontrastom

- Unaprijeđen je eksperimentalni postav za provedbu mehaničkih *in-situ* ispitivanja vlaknima ojačanih polimera promatranih računalnom tomografijom određivanjem optimalnih materijala za izradu ispitnih uređaja
- Razvijena je metoda za optimizaciju parametara CT skeniranja, koja omogućava učinkovitu provedbu DVC analize na volumetrijskim slikama različite kvalitete
- Ostvareno je značajno smanjenje vremena potrebnog za provođenje *in-situ* mehaničkih ispitivanja korištenjem računalne tomografije, čime se otvara mogućnost za brže i efikasnije ispitivanje materijala, što je od velike važnosti za industrijsku primjenu predložene metodologije za karakterizaciju materijala.

Na kraju je potrebno istaknuti kako rezultati i zaključci proizašli iz provedenih eksperimentalnih istraživanja omogućavaju pouzdaniju analizu mehaničkog ponašanja FRP materijala u uvjetima opterećenja. Sveobuhvatnom analizom ponašanja postojećih vlaknima ojačanih polimera doprinijet će se razvoju novih, poboljšanih materijala i tehnologija koje se temelje na boljem razumijevanju odziva materijala uslijed mehaničkog opterećenja. Nadalje, rezultati ovog istraživanja značajno pridonose razvoju naprednih metoda za analizu materijala, omogućujući preciznije, brže i učinkovitije ispitivanje vlaknima ojačanih polimera, što može imati široku primjenu u industriji, posebice u područjima gdje su sigurnost i pouzdanost komponente od presudne važnosti. Iako je u ovom radu, povezivanjem naprednih eksperimentalnih tehnika mjerenja polja pomaka i računalne tomografije, razvijena metoda za pouzdaniju karakterizaciju vlaknima ojačanih polimera, vrijedi napomenuti kako su procedure razvijene u ovom radu općenite i mogu se primijeniti na različite vrste materijala.

8.2. Buduća istraživanja

Na temelju istraživanja provedenih tijekom izrade ovog doktorskog rada, moguća su sljedeća daljnja istraživanja:

- Provedba eksperimentalnih istraživanja koja će uključivati određivanje standardnih mjernih nesigurnosti DVC metode na drugim heterogenim i strukturno složenim materijalima (npr. pjene, nodularni lijev, kompoziti ojačani različitim materijalima vlakana, beton). Predloženim istraživanjima usporedit će se srednji kontrast trodimenzionalnih slika s izračunatim standardnim nesigurnostima DVC metode te identificirati maksimalne prostorne rezolucije predložene tehnike mjerenja cijelog polja pomaka. Ovakvom analizom identificirat će se optimalna veličina prostorne rezolucije

na temelju kontrasta slike, čime će se omogućiti brza *a priori* procjena pouzdane prostorne rezolucije.

- Provedba *in-situ* mehaničkih ispitivanja vlaknima ojačanih polimera u konfiguraciji eksperimentalnog postava s PEEK cjevastom potporom te usporedba rezultata s konfiguracijom bez cijevi, ali s aluminijskim filterom na izvoru rendgenskog zračenja. Evaluacijom rezultata predloženih eksperimentalnih ispitivanja odredio bi se utjecaj PEEK cjevaste potpore na karakterizaciju FRP materijala pod mehaničkim opterećenjem u usporedbi s idealiziranim slučajem korištenja ispitnih uređaja s pomičnom travezom.
- Provedba interlaboratorijske studije s ciljem procjene pogreške metode korelacije digitalnih volumena uzrokovane opremom za računalnu tomografiju te parametrima skeniranja definiranim od strane korisnika.
- Implementacija *in-situ* mehaničkih ispitivanja s ciljem validacije korištenja skenova lošije kvalitete (*LQ*) te onih zabilježenih *kontinuiranim* skeniranjem. Predlaže se da se, kod različitih iznosa konstantnog opterećenja, zabilježe tri skena s različitim konfiguracijama definiranim u ovom radu, kako bi se procijenila pouzdanost detekcije i kvantifikacije mehanizama oštećenja u odnosu na različitu kvalitetu registriranih slika.

POPIS LITERATURE

- [1] Prashanth S, Subbaya K, Nithin K, Sachhidananda S. Fiber Reinforced Composites - A Review. *Journal of Material Science & Engineering*. 2017. (06).
- [2] Vrgoč A, Tomičević Z, Smaniotto B, Hild F. Application of different imaging techniques for the characterization of damage in fiber reinforced polymer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021. (150).
- [3] Okoli OI, Smith GF. The effects of strain rate and failure modes on the failure energy of fibre reinforced composites. *Composite Structures*. 1998. (54) 299–303.
- [4] Buljac A, Jailin C, Mendoza A, Neggers J, Taillandier-Thomas T, Bouterf A, et al. Digital Volume Correlation: Review of Progress and Challenges. *Experimental Mechanics*. 2018. (58) 661–708.
- [5] Bay BK, Smith TS, Fyhrie DP, Saad M. Digital volume correlation: Three-dimensional strain mapping using x-ray tomography. *Experimental Mechanics*. 1999. (39) 217–226.
- [6] Garcea SC, Wang Y, Withers PJ. X-ray computed tomography of polymer composites. *Composites Science and Technology*. 2018. (156) 305–319.
- [7] Vrgoč A, Tomičević Z, Zaplatic A, Hild F. Comparison of Different Digital Image Registration Techniques for Damage Analysis of Fiber REinforced Polymers. *ECCOMAS MSF 2021 5th International Conference on Multi-scale Computational Methods for Solids and Fluids*. Split, 2021.
- [8] Patterson BM, Cordes NL, Henderson K, Williams JJ, Stannard T, Singh SS, et al. In situ X-ray synchrotron tomographic imaging during the compression of hyper-elastic polymeric materials. *Journal of Materials Science*. 2015. (51) 171–187.
- [9] Patterson BM, Henderson K, Smith Z. Measure of morphological and performance properties in polymeric silicone foams by X-ray tomography. *Journal of Materials Science [Internet]*. 2013. (48) 1986–1996.
- [10] Patterson BM, Henderson K, Gilbertson RD, Tornga S, Cordes NL, Chavez ME, et al. Morphological and performance measures of polyurethane foams using X-ray CT and mechanical testing. *Microscopy and Microanalysis*. 2014. (20) 1284–1293.
- [11] Vopalensky M, Koudelka P, Sleichrt J, Kumpova I, Borovinsek M, Vesenjask M, et al. Fast 4D on-the-fly tomography for observation of advanced pore morphology (APM) foam elements subjected to compressive loading. *Materials*. 2021. (14).
- [12] Fila T, Koudelka P, Vopalensky M, Šleishrt J, Rada V, Zlamal P, et al. Time-lapse micro-CT analysis of fatigue microcrack propagation in cortical bone. *Journal of Instrumentation*. 2020. (15).
- [13] Maire E, Withers PJ. Quantitative X-ray tomography. *International Materials Reviews*. 2014. (59) 1–43.
- [14] Garcea SC, Sinclair I, Spearing SM, Withers PJ. Mapping fibre failure in situ in carbon fibre reinforced polymers by fast synchrotron X-ray computed tomography. *Composites Science and Technology*. 2017. (149) 81–89.
- [15] Maire E, Le Bourlot C, Adrien J, Mortensen A, Mokso R. 20 Hz X-ray tomography during an in situ tensile test. *International Journal of Fracture*. 2016. (200) 3–12.
- [16] Roux S, Hild F, Viot P, Bernard D. Three-dimensional image correlation from X-ray

computed tomography of solid foam. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008. (39) 1253–1265.

[17] Yang J, Hazlett L, Landauer AK, Franck C. Augmented Lagrangian Digital Volume Correlation (ALDVC). *Experimental Mechanics*. 2020. (60) 1205–1223.

[18] Smith TS, Bay BK, Rashid MM. Digital volume correlation including rotational degrees of freedom during minimization. *Experimental Mechanics*. 2002. (42) 272–278.

[19] Hild F, Roux S. Comparison of Local and Global Approaches to Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*. 2012. (52) 1503–1519.

[20] Andriollo T, Zhang Y, Fæster S, Kouznetsova V. Analysis of the correlation between micro-mechanical fields and fatigue crack propagation path in nodular cast iron. *Acta Materialia*. 2020. (188) 302–314.

[21] Réthoré J, Limodin N, Buffière JY, Roux S, Hild FÇ. Three-dimensional analysis of fatigue crack propagation using X-Ray tomography, digital volume correlation and extended finite element simulations. *Procedia IUTAM*. 2012. (4) 151–158.

[22] ISO/IEC Guide 99–12:2007. International vocabulary of metrology—basic and general concepts and associated terms, VIM. Geneva: International Organization for Standardization.

[23] Gras R, Leclerc H, Hild F, Roux S, Schneider J. Identification of a set of macroscopic elastic parameters in a 3D woven composite: Uncertainty analysis and regularization. *International Journal of Solids and Structures*. 2015. (55) 2–16.

[24] Neggers J, Mathieu F, Hild F, Roux S. Simultaneous full-field multi-experiment identification. *Mechanics of Materials*. 2019. (133) 71–84.

[25] Limodin N, Réthoré J, Adrien J, Buffière JY, Hild F, Roux S. Analysis and Artifact Correction for Volume Correlation Measurements Using Tomographic Images from a Laboratory X-ray Source. *Experimental Mechanics*. 2011. (51) 959–970.

[26] Buljac A, Taillandier-Thomas T, Helfen L, Morgeneyer TF, Hild F. Evaluation of measurement uncertainties of digital volume correlation applied to laminography data. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2017. (53) 49–65.

[27] Bay BK. Methods and applications of digital volume correlation. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2008. (43) 745–760.

[28] Croom BP, Jin H, Mills B, Li X. Effect of Fragile Speckle Patterns on Accuracy of Digital Volume Correlation. *Experimental Mechanics*. 2019. (59) 991–1005.

[29] Tomičević Z, Hild F, Roux S. Mechanics-aided digital image correlation. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2013. (48) 330–343.

[30] Mendoza A, Neggers J, Hild F, Roux S. Complete mechanical regularization applied to digital image and volume correlation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2019. (355) 27–43.

[31] Zwanenburg EA, Williams MA, Warnett JM. Review of high-speed imaging with lab-based x-ray computed tomography. *Measurement Science and Technology*. 2022. (33).

[32] Xuanhao Z, Lijuan S, Bo W, Bing P. Effect of the number of projections in X-ray CT imaging on image quality and digital volume correlation measurement. *Measurement*. 2022. (194).

[33] Borstnar G, Gillard F, Mavrogordato MN, Sinclair I, Spearing SM. Three-dimensional

deformation mapping of Mode I interlaminar crack extension in particle-toughened interlayers. *Acta Materialia*. 2016. (103) 63–70.

[34] Croom B, Wang WM, Li J, Li X. Unveiling 3D Deformations in Polymer Composites by Coupled Micro X-Ray Computed Tomography and Volumetric Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*. 2016. (56) 999–1016.

[35] Tomicevic Z, Bouterf A, Surma R, Hild F. Damage observation in glass fiber reinforced composites via μ -tomography. *Materials Today: Proceedings*. 2019. 185–191.

[36] Schöberl E, Breite C, Rosini S, Swolfs Y, Mavrogordato MN, Sinclair I, et al. A novel particle-filled carbon-fibre reinforced polymer model composite tailored for the application of digital volume correlation and computed tomography. *Journal of Composite Materials*. 2021. (55) 1907–1934.

[37] Wang P, Wen J, Lei H, Xu B, Liu Y, Yang L, et al. Morphology characterization and in-situ three-dimensional strain field monitor of short carbon fiber-reinforced polymer composites under tension. *Composite Structures*. 2021. (262) 113634.

[38] Mendoza A, Schneider J, Parra E, Obert E, Roux S. Differentiating 3D textile composites: A novel field of application for Digital Volume Correlation. *Composite Structures*. 2019. (208) 735–743.

[39] Mrzljak S, Delp A, Schlink A, Zarges JC, Hülsbusch D, Heim HP, et al. Constant temperature approach for the assessment of injection molding parameter influence on the fatigue behavior of short glass fiber reinforced polyamide 6. *Polymers*. 2021. (13).

[40] Buffiere JY, Ferrie E, Proudhon H, Ludwig W. Three-dimensional visualisation of fatigue cracks in metals using high resolution synchrotron X-ray micro-tomography. *Materials Science and Technology*. 2006. (22) 1019–1024.

[41] Messenger A, Junet A, Palin-Luc T, Buffiere JY, Saintier N, Ranc N, et al. In situ synchrotron ultrasonic fatigue testing device for 3D characterisation of internal crack initiation and growth. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2020. (43) 558–567.

[42] Nakamura T, Yoshinaka F, Nakayama S, Oguma H, Shiozawa D, Nakai Y, et al. Detection of small internal fatigue cracks in Ti-6Al-4V by using synchrotron radiation μ CT imaging. *Mechanical Engineering Letters*. 2016. (2).

[43] Rolland H, Saintier N, Wilson P, Merzeau J, Robert G. In situ X-ray tomography investigation on damage mechanisms in short glass fibre reinforced thermoplastics: Effects of fibre orientation and relative humidity. *Composites Part B: Engineering*. 2017. (109) 170–186.

[44] Brault R, Germaneau A, Dupré JC, Doumalin P, Mistou S, Fazzini M. In-situ Analysis of Laminated Composite Materials by X-ray Micro-Computed Tomography and Digital Volume Correlation. *Experimental Mechanics*. 2013. (53) 1143–1151.

[45] Singh SS, Williams JJ, Hruby P, Xiao X, De Carlo F, Chawla N. In situ experimental techniques to study the mechanical behavior of materials using X-ray synchrotron tomography. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*. 2014. (3) 109–122.

[46] Chapman TP, Kareh KM, Knop M, Connolley T, Lee PD, Azeem MA, et al. Characterisation of short fatigue cracks in titanium alloy IMI 834 using X-ray microtomography. *Acta Materialia*. 2015. (99) 49–62.

[47] Haboub A, Bale HA, Nasiatka JR, Cox BN, Marshall DB, Ritchie RO, et al. Tensile testing of materials at high temperatures above 1700°C with in situ synchrotron X-ray micro-

- tomography. *Review of Scientific Instruments*. 2014. (85).
- [48] Hülsbusch D, Mrzljak S, Walther F. In situ computed tomography for the characterization of the fatigue damage development in glass fiber-reinforced polyurethane. *Materialpruefung/Materials Testing*. 2019. (61) 821–828.
- [49] Pottmeyer F, Bittner J, Pinter P, Weidenmann KA. In-Situ CT Damage Analysis of Metal Inserts Embedded in Carbon Fiber-Reinforced Plastics. *Experimental Mechanics*. 2017. (57) 1411–1422.
- [50] Schöttl L, Kolb P, Liebig W V., Weidenmann KA, Inal K, Elsner P. Crack characterization of discontinuous fiber-reinforced composites by using micro-computed tomography: Cyclic in-situ testing, crack segmentation and crack volume fraction. *Composites Communications*. 2020. (21).
- [51] Hufenbach W, Böhm R, Gude M, Berthel M, Hornig A, Ručevskis S, et al. A test device for damage characterisation of composites based on in situ computed tomography. *Composites Science and Technology*. 2012. (72) 1361–1367.
- [52] Bouterf A, Adrien J, Maire E, Brajer X, Hild F, Roux S. Failure Mechanisms of Plasterboard in Nail Pull Test Determined by X-ray Microtomography and Digital Volume Correlation. *Experimental Mechanics*. 2016. (56) 1427–1437.
- [53] Kalender WA. X-ray computed tomography. *Physics in Medicine and Biology*. 2006. (51) 29-43.
- [54] Orhan K. Micro-computed Tomography (micro-CT) in Medicine and Engineering. Springer Nature Switzerland AG; 2020.
- [55] Davis GR, Elliott JC. Artefacts in X-ray microtomography of materials. *Materials Science and Technology*. 2006. (22) 1011–1018.
- [56] Pan B. Thermal error analysis and compensation for digital image/volume correlation. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018. (101) 1–15.
- [57] Cantatore A, Müller P. Introduction to computed tomography. DTU Mechanical Engineering; 2011.
- [58] Sasov A. Comparison of fan-beam, cone-beam, and spiral scan reconstruction in x-ray micro-CT. *Developments in X-Ray Tomography III*. 2002. (4503) 124.
- [59] M. Franz, Ch. Funk, J. Hiller, S. Kasperl, M. Krumm SS. Reliability of dimensional measurements by computed tomography for industrial applications., *4th European-American Workshop on Reliability of NDE*. Berlin, 2009.
- [60] Horvatić Novak A. Uspostavljanje sljedivosti kod računalne tomografije u dimenzionalnom mjeriteljstvu [doktorska disertacija]. *Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje*; 2018.
- [61] Sun, W, Brown, S B, Leach RK. An overview of industrial X-ray computed tomography. Queen's Print. Controll. HMSO. 2012.
- [62] Welkenhuyzen F, Kiekens K, Pierlet M, Dewulf W, Bleys P, Voet A. Industrial computer tomography for dimensional metrology: Overview of influence factors and improvement strategies. 2009.
- [63] Nikl M. Scintillation detectors for x-rays. *Measurement Science and Technology*. 2006. (37).

- [64] Lanca L, Silva A. Digital radiography detectors - A technical overview : Part 1. *Radiography*. 2009. (15) 58–62.
- [65] Zargar S, Phad V, Poola PK, John R. Role of filtering techniques in computed tomography (CT) image reconstruction. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. 69–74.
- [66] Reinhart C. Industrial Computer Tomography - A Universal Inspection Tool. *17th World Conference on Nondestructive Testing*. Šangaj, 2008.
- [67] ISO 15708-1:2002, Non-destructive testing – Radiation methods – Computed tomography – Part 1 Principles.
- [68] Ahmed OMH, Song Y. A Review of Common Beam Hardening Correction Methods for Industrial X-ray Computed Tomography. *Sains Malaysiana*. 2018. (47) 1883–1890.
- [69] Tan D, Wu Y, He P, Chao H, Sun L, Min Y. Ring artifacts suppression for X-ray CT images by fusion of dual-domain images based on improved UNet. *Preliminary version of manuscript*. 2023.
- [70] Šaplachta J, Zikmund T, Zemek M, Brinek A, Takeda Y, Omote K, et al. Complete Ring Artifacts Reduction Procedure for Lab-Based X-ray Nano CT Systems. *Sensors (Switzerland)*. 2021. 1–20.
- [71] Horvatić Novak A, Runje B, Keran Z, Orošnjak M. Image Artefacts in Industrial Computed Tomography. *Tehnički glasnik*. 2020. (14) 434–439.
- [72] Schörner K. Development of Methods for Scatter Artifact Correction in Industrial X-ray Cone-beam Computed Tomography. 2012.
- [73] Wiegert J. Scattered radiation in cone-beam computed tomography: analysis, quantification and compensation [doktorska disertacija]. *Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen*; 2007.
- [74] Neuser E, Suppes A. Visualizing internal 3D structures with submicrometer resolution. *International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography*. Lyon; 2007.
- [75] Nachtrab F, Firsching M, Uhlmann N, Speier C, Takman P, Tuohimaa T, et al. NanoXCT: development of a laboratory nano-CT system. In S. R. Stock (Ed.), *Developments in X-Ray Tomography IX Article 92120L (Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering; Vol. 9212)*; 2014.
- [76] Müller D, Graetz J, Balles A, Stier S, Hanke R, Fella C. Laboratory-based nano-computed tomography and examples of its application in the field of materials research. *Crystals*. 2021. (11) 1–14.
- [77] Egbert A. High-Resolution X-Ray CT for 3D Failure Analysis and Metrology. *Sweden society for non-destructive testing*. 2012.
- [78] Wang Y, Garcea SC, Withers PJ. Computed tomography of composites. *Comprehensive Composite Materials II*. 2017. (7) 101–118.
- [79] Zabler S, Fella C, Dietrich A, Nachtrab F, Salamon M, Volland V, et al. High-resolution and high-speed CT in industry and research. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*; 2012.
- [80] Warnett JM, Titarenko V, Kiraci E, Attridge A, Lionheart WRB, Withers PJ, et al. Towards in-process x-ray CT for dimensional metrology. *Measurement Science and Technology*. 2016.

(27).

[81] Mađerić G. Konstrukcija uređaja za in-situ mehanička ispitivanja u μ -CT skeneru [diplomski rad]. *Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje*; 2020.

[82] <https://deben.co.uk/tensile-testing/muxct/tensile-stages-for-x-ray-ct-tomography/> (16.8.2024.).

[83] Koudelka P, Kytir D, Fila T, Šleichrt J, Rada V, Zlamal P, et al. A method for evaluation the fatigue microcrack propagation in human cortical bone using differential X-ray computed tomography. *Materials*. 2021. (14).

[84] Fila, T., Šleichrt, J., Kumpova, I., Vopalensky, M., Zlamal, P., Rada, V., Vavrik, D., Koudelka, P., Senck S. Deformation analysis of the spongy sample in simulated physiological conditions based on in-situ compression, 4D computed tomography and fast readout detector. *Journal of Instrumentation*. 2018. (13).

[85] <https://deben.co.uk/tensile-testing/open-frame-torsion-tension-and-compression-stage> (8.8.2023.).

[86] Wang Q, Ri S. Sampling Moiré method for full-field deformation measurement: A brief review. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2022. (12) 100327.

[87] Horstmann J, Spahr H, Buj C, Münter M, Brinkmann R. Full-field speckle interferometry for non-contact photoacoustic tomography. *Physics in Medicine and Biology*. 2015. (60) 4045–4058.

[88] Grédiac M, Sur F, Blaysat B. The Grid Method for In-plane Displacement and Strain Measurement: A Review and Analysis. *Strain*. 2016. (52) 205–243.

[89] Abed Zadeh A, Barés J, Brzinski TA, Daniels KE, Dijksman J, Docquier N, et al. Enlightening force chains: a review of photoelasticity in granular matter. *Granular Matter*. 2019. (21).

[90] Grédiac M. The use of full-field measurement methods in composite material characterization: Interest and limitations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2004. (35) 751–761.

[91] Lucas BD, Kanade T. An Iterative Image Registration Technique With an Application To Stereo Vision. *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. 1981. (2) 674–679.

[92] Sutton M, Wolters W, Peters W, Ranson W, McNeill S. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing*. 1983 (1) 133–139.

[93] Chu TC, Ranson WF, Sutton MA. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*. 1985. (25) 232–244.

[94] Pan B, Qian K, Xie H, Asundi A. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. *Measurement Science and Technology*. 2009. (20).

[95] Surjak M. Validacija numeričkih modela mehaničkoga ponašanja životinjskih i ljudskih kostiju [doktorska disertacija]. *Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje*; 2015.

[96] Mertz J. Introduction to Optical Microscopy. Second Edition. Cambridge University Press. 2019.

[97] Joseph Goldstein, Dale E. Newbury, David C. Joy, Charles E. Lyman, Patrick Echlin, Eric

Lifshin, Linda Sawyer JRM. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis: Third Edition. 2012. 690.

[98] Williams DB, Carter CB. A Textbook for Materials Science. *Transmission Electron Microscopy*. Second. 2009. 3–22.

[99] Binning G, Quate CF. Atomic Force Microscope (AFM). *Physicall Review Letters*. 1986. (56) 930–934.

[100] Lionello G, Cristofolini L. A practical approach to optimizing the preparation of speckle patterns for digital-image correlation. *Measurement Science and Technology*. 2014. (25).

[101] Tomičević Z. Identification of the mechanical properties of nodular graphite cast iron via multiaxial tests [doktorska disertacija]. *Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje*; 2015.

[102] Bay BK. Experimental measurement of three- dimensional continuum-level strain fields in tra- becular bone. *Adv. Expl Medicine and Biology*. 2001. (496) 181–197.

[103] Bay BK, Smith TS, Fyhrie D, Martin RB, Reimann D, Saad M. Three-dimensional texture correlation measurement of strain in trabecular bone. *Proc. Orthop. Res. Soc.*. 1998. (23).

[104] Dahdah N, Limodin N, El Bartali A, Witz JF, Seghir R, Charkaluk E, et al. Damage Investigation in A319 Aluminium Alloy by X-ray Tomography and Digital Volume Correlation during In Situ High-Temperature Fatigue Tests. *Strain*. 2016. (52) 324–335.

[105] Marter AD, Dickinson AS, Pierron F, Browne M. A Practical Procedure for Measuring the Stiffness of Foam like Materials. *Experimental Techniques*. 2018. (42) 439–452.

[106] Croom BP, Jin H, Mills B, Carroll J, Long K, Brown J, et al. Damage mechanisms in elastomeric foam composites: Multiscale X-ray computed tomography and finite element analyses. *Composites Science and Technology*. 2019. (169) 195–202.

[107] Vrgoč A, Tomičević Z, Smaniotto B, Hild F, Vrgoč A, Tomičević Z, et al. Damage characterization in fiber reinforced polymer via Digital Volume Correlation. *Coupled Systems Mechanics*. 2021. (C) 545–560.

[108] Tomičević Z, Mađerić G, Bilobrk J, Hild F. Identifikacija oštećenja u kompozitima ojačanim staklenim vlaknima primjenom μ -tomografije. *Zbornik radova Desetog susreta Hrvatskog društva za mehaniku*. 2020. 289–294.

[109] Shi H, Hosdez J, Rougelot T, Xie S, Shao J, Talandier J, et al. Digital volume correlation applied to X-ray micro-tomography images in uniaxial creep tests on anisotropic clayey rock. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. (10) 1–15.

[110] Pan B, Wu D, Wang Z. Internal displacement and strain measurement using digital volume correlation: A least-squares framework. *Measurement Science and Technology*. 2012. (23).

[111] Leclerc H, Périé JN, Hild F, Roux S. Digital volume correlation: What are the limits to the spatial resolution? *Mechanics and Industry*. 2012. (13) 361–371.

[112] Vrgoč A, Tomičević Z, Smaniotto B, Hild F. Characterization of glass fiber reinforced polymer via Digital Volume Correlation: Investigation of notch sensitivity. *Mechanics of Materials*. 2023. (177).

[113] Taillandier-Thomas T, Roux S, Morgeneyer TF, Hild F. Localized strain field measurement on laminography data with mechanical regularization. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2014.

(324) 70–79.

[114] Benoit A, Guérard S, Gillet B, Guillot G, Hild F, Mitton D, et al. 3D analysis from micro-MRI during in situ compression on cancellous bone. *Journal of Biomechanics*. 2009. (42) 2381–2386.

[115] Rannou J, Limodin N, Réthoré J, Gravouil A, Ludwig W, Baietto-Dubourg MC, et al. Three dimensional experimental and numerical multiscale analysis of a fatigue crack. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2010. (199) 1307–1325.

[116] Leclerc H, Périé JN, Roux S, Hild F. Voxel-Scale Digital Volume Correlation. *Experimental Mechanics [Internet]*. 2011. (51) 479–490.

[117] Hild F, Bouterf A, Chamoin L, Leclerc H, Mathieu F, Neggers J, et al. Toward 4D mechanical correlation. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*. 2016. (3).

[118] Morgeneyer TF, Helfen L, Mubarak H, Hild F. 3D Digital Volume Correlation of Synchrotron Radiation Laminography Images of Ductile Crack Initiation: An Initial Feasibility Study. *Experimental Mechanics*. 2013. (53) 543–556.

[119] EN4861, Aerospace series - Metrological assessment procedure for kinematic fields measured by digital image correlation. European Committee for Standardization (CEN). 2020.

[120] Standardization, Good Practices, and Uncertainty Quantification Committee. A Good Practices Guide for Digital Image Correlation. *International Digital Image Correlation Society*. 2018 .

[121] Vintache A, Smaniotto B, Fau A, Hild F, Farina I, Fraternali F. Early Debonding Quantification via Digital Volume Correlation. *Preliminary version of manuscript*. 2018.

[122] Croom BP, Burden D, Jin H, Vonk NH, Hoefnagels JPM, Smaniotto B, et al. Interlaboratory Study of Digital Volume Correlation Error Due to X-Ray Computed Tomography Equipment and Scan Parameters: an Update from the DVC Challenge. *Experimental Mechanics*. 2021. (61) 395–410.

[123] Tozzi G, Dall’Ara E, Palanca M, Curto M, Innocente F, Cristofolini L. Strain uncertainties from two digital volume correlation approaches in prophylactically augmented vertebrae: Local analysis on bone and cement-bone microstructures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2017. (67) 117–126.

[124] Tavana S, Clark JN, Prior J, Baxan N, Masouros SD, Newell N, et al. Quantifying deformations and strains in human intervertebral discs using Digital Volume Correlation combined with MRI (DVC-MRI). *Journal of Biomechanics*. 2020. (102).

[125] Wang B, Pan B, Tao R, Lubineau G. Systematic errors in digital volume correlation due to the self-heating effect of a laboratory x-ray CT scanner. *Measurement Science and Technology*. 2017. (28).

[126] Pan B, Yu L, Wu D. High-Accuracy 2D Digital Image Correlation Measurements with Bilateral Telecentric Lenses: Error Analysis and Experimental Verification. *Experimental Mechanics*. 2013. (53) 1719–1733.

[127] Mehdikhani M, Breite C, Swolfs Y, Soete J, Wevers M, Lomov S V., et al. Digital volume correlation for meso/micro in-situ damage analysis in carbon fiber reinforced composites. *Composites Science and Technology*. 2021. (213).

[128] Schöberl E, Breite C, Melnikov A, Swolfs Y, Mavrogordato MN, Sinclair I, et al. Fibre-direction strain measurement in a composite ply under quasi-static tensile loading using Digital

Volume Correlation and in situ Synchrotron Radiation Computed Tomography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020. (137) 105935.

[129] Ćorić D, Filetin T. Materijali u zrakoplovstvu. *Fakultet strojarstva i brodogradnje [Internet]*. 2012 .

[130] Cyril A. Dostal. Engineered Materials Handbook: Composites, Volume 1. Ohio: ASM International; 1987.

[131] Huang X. Fabrication and Properties of Carbon Fibers. *Materials*. 2009. 2369–2403.

[132] <https://www.servicethread.com/blog/what-are-the-differences-between-meta-aramid-and-para-aramid-yarns> (9.8.2023.).

[133] Sathishkumar TP, Satheeshkumar S, Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites - A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2014. (33) 1258–1275.

[134] Gamstedt EK, Andersen SI. Fatigue Degradation and Failure of Rotating Composite Structures – Materials Characterisation and Underlying Mechanisms. Risø Natl. Lab. 2001.

[135] Talreja R, Singh CV. Damage in composite materials. *Damage and Failure of Composite Materials*. 2012. 36–56.

[136] Hammami A, Gebart BR. Analysis of the vacuum infusion molding process. *Polymer Composites*. 2000. (21) 28–40.

[137] Bartulović A, Tomičević Z, Bubalo A, Hild F. Assessment of DVC measurement uncertainty on GFRPs with various fiber architectures. *Coupled Systems Mechanics*. 2022. (11) 15–32.

[138] Leclerc H, Neggers J, Mathieu F, Hild F, Roux S. Correli 3.0, Agence pour la Protection des Programmes, IDDN.FR.001.520008.000.S.P.2015.0.0.0.31500. 2015 .

[139] Tran AP, Yan S, Fang Q. Improving model-based functional near-infrared spectroscopy analysis using mesh-based anatomical and light-transport models. *Neurophotonics*. 2020. (7).

[140] Geuzaine C, Remacle JF. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2009. (79) 1309–1331.

[141] Zienkiewicz O., Taylor R., Zhu J. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 2005. 6–8.

[142] Vrgoč A, Tomičević Z, Smaniotto B, Hild F. Characterization of glass fiber reinforced polymer via digital volume correlation: Quantification of strain activity and damage growth. *Composites Science and Technology*. 2023. (234).

[143] Tomičević Z, Bartulović A, Smaniotto B, Hild F. Influence of testing environment on Digital Volume Correlation uncertainties. *ECCOMAS MSF 2023 Thematis Conference*. Sarajevo, 2023.

[144] <https://caltsensor.com/product/pancake-load-cells-dylf-102/> (16.8.2024.).

[145] Taillandier-Thomas T, Roux S, Hild F. Soft Route to 4D Tomography. *Physical Review Letters*. 2016. (117) 1–5.

[146] Tomičević Z, Bartulović A, Smaniotto B, Hild F. Influence of X-Ct Scanning Parameters on Dvc Measurement Uncertainty. *38th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*. Poros, 2022.

ŽIVOTOPIS

Ante Bartulović rođen je 27. srpnja 1989. godine u Splitu. Osnovnu školu pohađao je u Šestanovcu nakon čijeg završetka upisuje Opću gimnaziju u Omišu. Godine 2008. upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB), studij strojarstva, proizvodni smjer. Diplomirao je 2013. godine na usmjerenju *Obradni sustavi*, s temom diplomskog rada *Bušenje kamena*, pod mentorstvom prof. dr. sc. Tome Udiljka. Prilikom studiranja nagrađen je Medaljom Fakulteta za postignuti uspjeh na preddiplomskom studiju te Velikom pohvalom za uspjeh na diplomskom studiju.

Završetkom diplomskog studija zapošljava se kao konstruktor u tvrtki HSTec d.d u Zadru gdje sudjeluje u razvoju specijalnih rješenja u području alatnih strojeva i inženjerske automatizacije. Kao član tima sudjeluje u zajedničkom projektu Fakulteta strojarstva i brodogradnje i tvrtke HSTec d.d usmjerenom na izgradnju kapaciteta za razvoj i umjeravanje optičkih i rendgenskih vizijskih sustava– projekt *IKARUS*.

Od 2019. do 2024. godine zaposlen je u tvrtki INETEC na poziciji Stručnjak za razvoj proizvoda gdje se bavi razvojem daljinski upravljanih manipulatora za provedbu nerazornih ispitivanja u nuklearnim elektranama te je uključen i u samu provedbu nerazornih ispitivanja vitalnih komponenti nuklearnih elektrana. Član je INETEC-ovog tima koji sudjeluje u razvoju najvećeg svjetskog eksperimentalnog tokamak fuzijskog reaktora u sklopu projekta *ITER*.

Od svibnja 2024. zaposlen je kao direktor u tvrtki *Delian Solutions d.o.o.* u kojoj je suvlasnik. U studenom 2013. godine upisuje poslijediplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, smjer *Proizvodno strojarstvo*. Bavi se istraživanjima na području proizvodnog inženjerstva i eksperimentalne mehanike. Do sada je kao autor ili koautor objavio osam znanstvenih radova.

Govori i piše engleskim jezikom, a služi se njemačkim jezikom. Oženjen je i otac dvoje djece.

CURRICULUM VITAE

Ante Bartulović was born on July 27, 1989, in Split. He attended elementary school in Šestanovac and high school „Jure Kaštelan Gymnasium“ in Omiš. He enrolled in the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture (FAMENA), University of Zagreb, in 2008 and graduated in 2013 with diploma thesis: *Stone drilling*. During his studies, he was awarded the *Medal of the Faculty for Accademic Excellence* for his achievements in the undergraduate program and *Faculty's Commendation for Accademic Excellence* for his success in the graduate program.

After completing his graduate studies, he began his career as a mechanical design engineer at HSTec d.d in Zadar, where he contributed to the development of specialized solutions in the field of machine tools and engineering automation. As a team member, he participated in a collaborative project between the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture and HSTec d.d which was focused on building capabilities for the development and calibration of optical and X-ray vision systems – the *IKARUS* project.

From 2019 to 2024, he was employed at INETEC as a Product Development Specialist, focusing on the development of remotely operated manipulators for non-destructive testing in nuclear power plants. He was also involved in the actual execution of non-destructive testing on vital components of nuclear power plants. He was a member of INETEC's team contributing to the development of the world's largest experimental tokamak fusion reactor - the *ITER* project.

Since May 2024, he has been employed as a director in a company *Delian Solutions d.o.o.* in which he is a co-owner.

In November 2013, he enrolled in a postgraduate study in Mechanical Engineering at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in the *Mechanical Engineering Technology* course. He is involved in research in the field of production engineering and experimental mechanics. To date, he has authored or co-authored eight scientific papers.

He is fluent in both spoken and written English, and he is proficient in the German language as well. He is married and a father of two children.