

# Određivanje rezolucije pomaka i deformacija metodom korelacije digitalnih volumena na epoksidnoj smoli ojačanoj staklenim vlaknima

---

**Mađerić, Gabrijel**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*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:235:559531>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-27**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Gabrijel Maderić**

Zagreb, 2019. godine

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević

Gabrijel Mađerić

Zagreb, 2019. godine

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Zvonimiru Tomičeviću na brojnim stručnim savjetima, strpljenju i potpori tijekom izrade ovog rada.

Gabrijel Mađerić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur.broj:   |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Gabrijel MAĐERIĆ**

Mat. br.: 0035203829

Naslov rada na hrvatskom jeziku:

**Određivanje rezolucije pomaka i deformacija metodom korelacije digitalnih volumena na epoksidonoj smoli ojačanoj staklenim vlaknima**

Naslov rada na engleskom jeziku:

**Evaluation of displacement and strain resolution of digital volume correlation algorithm applied on glass fiber reinforced epoxy resin**

Opis zadatka:

Računalna tomografija rendgenskim zrakama (*eng. X-ray CT*) je tehnika zabilježavanja slika koja koristi računalno rekonstruirane snimke za izradu 3D skena specifičnog područja skeniranog objekta. Tomografija se razvila krajem sedamdesetih godina prošlog stoljeća, a svoju prvotnu primjenu pronašla je u medicini. Razvojem industrijskih i laboratorijskih CT uređaja tomografija se počinje primjenjivati u znanosti o materijalima budući da je moguće promatrati ponašanje materijala unutar uzorka, a ne samo na površini. Digitalni zapis podataka zabilježenih CT-om analiziran metodom korelacije digitalnih volumena (*eng. DVC – Digital Volume Correlation*) daje polje pomaka i deformacija cijelog ispitnog uzorka. U dosadašnjim istraživanjima pokazano je kako DVC metoda zabilježava više vrijednosti standardne rezolucije pomaka i deformacija od klasičnih 2D metoda korelacije digitalne slike budući da nije moguće kontrolirati teksturu unutar materijala.

U ovom radu je potrebno odrediti standardnu rezoluciju pomaka i deformacija izmjerenih globalnim C8 Correli DVC algoritmom na ispitnom uzorku epoksidne smole ojačane stohastički raspoređenim staklenim vlaknima. Također je potrebno ispitati utjecaj veličine mreže konačnih elemenata na mjernu nesigurnost primijenjene metode.

Tijekom rada potrebno je:

1. Upoznati se s radom računalnog tomografa NIKON XT H i globalnim DVC algoritmom C8 Correli.
2. Odrediti standardnu rezoluciju pomaka i deformacija na uzorku epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima.
3. Analizirati rezultate mjerne nesigurnosti globalnog DVC algoritma uzimajući u obzir veličinu kubnih 3D elemenata.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

|   |      |
|---|------|
| SADRŽAJ .....   | I    |
| POPIS SLIKA .....   | II   |
| POPIS TABLICA.....  | IV   |
| POPIS ENGLSKIH SKRAĆENICA .....   | V    |
| SAŽETAK.....  | VI   |
| SUMMARY .....   | VIII |
| 1. UVOD.....  | 1    |
| 2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....   | 3    |
| 2.1. Vlaknima ojačani polimerni kompoziti.....                                | 5    |
| 2.2. Epoksidna smola ojačana stohastički raspoređenim staklenim vlaknima..... | 7    |
| 3. NERAZORNA ISPITIVANJA NA KOMPOZITIMA .....                                 | 11   |
| 3.1. Termografija.....  | 12   |
| 3.2. Radiografija.....  | 14   |
| 4. RAČUNALNA TOMOGRAFIJA X-ZRAKAMA (X-CT) .....                               | 15   |
| 4.1. Klasifikacija industrijskih CT uređaja .....                             | 18   |
| 4.2. Čimbenici koji utječu na mjerne nesigurnosti.....                        | 18   |
| 4.2.1. Hardver.....   | 19   |
| 4.2.2. Softver/Obrada podataka.....   | 20   |
| 4.2.3. Mjerni objekt i okolina.....   | 23   |
| 4.3. Artefakti .....  | 24   |
| 4.4. Mehanička ispitivanja .....  | 25   |
| 4.4.1. Ex-situ .....  | 26   |
| 4.4.2. In-situ .....  | 26   |
| 4.4.3. Usporedba kontinuiranog i isprekidanog ispitivanja .....               | 27   |
| 5. OPIS DVC ALGORITMA .....   | 29   |
| 6. OPIS EKSPERIMENTA .....  | 33   |
| 7. REZULTATI CT SKENIRANJA .....  | 36   |
| 7.1. Mikrostruktura .....   | 37   |
| 7.2. Izmjerena polja pomaka .....   | 39   |
| 7.3. Izmjerena polja deformacija.....   | 45   |
| 7.4. Mape korelacijskih reziduala .....                                       | 51   |
| 7.5. Standardna rezolucija pomaka i deformacija .....                         | 53   |
| 8. ZAKLJUČAK.....   | 55   |
| 9. BIBLIOGRAFIJA .....  | 57   |
| PRILOZI.....  | 59   |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Porast udjela kompozita u konstrukciji zrakoplova [3] od 1965. do 2010. godine.....   | 4  |
| Slika 2. Shematski prikaz udjela različitih materijala od kojih je sastavljen Boing 787 [4].....   | 5  |
| Slika 3- Prikaz porasta udjela kompozita u konstrukciji zrakoplova[3] .....  | 5  |
| Slika 4. Platno [6].....   | 8  |
| Slika 5. Roving [6]. .....   | 8  |
| Slika 6. Mat staklena vlakna [7].....  | 9  |
| Slika 7. Izrađena polimerna kompozitna ploča ojačana mat staklenim vlaknima. ....  | 10 |
| Slika 8. Shematski prikaz principa rada termografije [10].....   | 13 |
| Slika 9. Shematski prikaz osnovnih dijelova 3D CT uređaja [13]. .....  | 15 |
| Slika 10. Shematski prikaz pojednostavljenog 2D CT uređaja [14]. .....   | 17 |
| Slika 11. Shematski prikaz postava za (a) računalnu tomografiju i (b) računalnu laminografiju.<br>[15]. .....  | 17 |
| Slika 12. Ovisnost rezolucije o mjernom području za određene vrste industrijskih uređaja [1].<br>.....   | 18 |
| Slika 13. Efekt fokusne točke [1]. .....   | 19 |
| Slika 14. Prikaz voxela u izmjerenom 3D volumenu [1]. .....  | 20 |
| Slika 15. Primjena rubne/granične vrijednosti. (a) zabilježena slika i (b) idealizirana slika.<br>Zelena linija na predstavlja segmentaciju ruba objekta od zraka [1]. ..... | 21 |
| Slika 16. Promjene veličine slike/projeksija i količine podataka do 2004. godine [1]. .....  | 22 |
| Slika 17. Primjer objekata koji se koriste za kalibraciju [1]. .....   | 22 |
| Slika 18. Artefakti nastali za vrijeme skeniranja. Crvene strelice prikazuju mjesta artefakata<br>[19]. .....  | 24 |
| Slika 19. Zabilježavanje 3D volumena kod ex-situ mehaničkih ispitivanja primjenom<br>računalne tomografije.[22]. .....   | 26 |
| Slika 20. Zabilježavanje 3D volumena kod in-situ mehaničkih ispitivanja primjenom<br>računalne tomografije [22]. .....   | 27 |
| Slika 21. Zabilježavanje 3D volumena kod isprekidanog in-situ mehaničkih ispitivanja<br>primjenom računalne tomografije [22]. .....  | 28 |
| Slika 22. Zabilježavanje 3D volumena kod kontinuiranog mehaničkog ispitivanja primjenom<br>računalne tomografije [22]. .....   | 28 |
| Slika 23. Uzorak za vlačno ispitivanje. ....   | 33 |
| Slika 24. Industrijski CT uređaj korišten za eksperiment [27].....   | 34 |
| Slika 25. Grupiranje pixela kojim se iz veličine 1x1 mm dobiva veličina 2x2 mm [28]. .....   | 35 |
| Slika 26. Usporedba diskretizacije s veličinom elementa od a) 16 voxela i b) 128 voxela. ....  | 36 |
| Slika 27. 3D mikrostruktura ispitivanog uzorka. ....   | 38 |
| Slika 28. Prikaz mikrostrukture u ravninama a) $x$ - $y$ , b) $x$ - $z$ i c) $y$ - $z$ . .....   | 38 |
| Slika 29. Polje pomaka u $x$ smjeru za elemente veličine 16 voxela. ....   | 40 |
| Slika 30. Polje pomaka u $x$ smjeru za elemente veličine 128 voxela. ....  | 41 |
| Slika 31. Polje pomaka u $y$ smjeru za elemente veličine 16 voxela. ....   | 42 |
| Slika 32. Polje pomaka u $y$ smjeru za elemente veličine 128 voxela. ....  | 43 |
| Slika 33. Polje pomaka u $z$ smjeru za elemente veličine 16 voxela. ....   | 44 |
| Slika 34. Polje pomaka u $z$ smjeru za elemente veličine 128 voxela. ....  | 45 |
| Slika 35. Polje deformacija u $x$ smjeru za elemente veličine 16 voxela. ....  | 46 |
| Slika 36. Polje deformacija u $x$ smjeru za elemente veličine 128 voxela. ....   | 47 |
| Slika 37. Polje deformacija u $y$ smjeru za elemente veličine 16 voxela. ....  | 48 |
| Slika 38. Polje deformacija u $y$ smjeru za elemente veličine 128 voxela. ....   | 49 |

---

|   |    |
|---|----|
| Slika 39. Polje deformacija u $z$ smjeru za elemente veličine 16 voxela.....  | 50 |
| Slika 40. Polje deformacija u $z$ smjeru za elemente veličine 128 voxela..... | 51 |
| Slika 41. Prikaz reziduala na mreži elemenata veličine 16 voxela. ....        | 52 |
| Slika 42. Prikaz reziduala na mreži elemenata veličine 128 voxela. ....       | 52 |
| Slika 43. Standardna rezolucija pomaka u $x$ , $y$ i $z$ smjeru. ....         | 53 |
| Slika 44. Standardna rezolucija deformacija u $x,y$ i $z$ smjeru.....         | 54 |



## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Opis tri najčešća ojačavala [2]. .....  | 6  |
| Tablica 2. Oznake staklenih vlakana i svojstva koja posjeduju vlakna s tim oznakama [6]..... | 7  |
| Tablica 3. Kontaktne metode [8].....   | 11 |
| Tablica 4. Beskontaktne metode [8].....  | 12 |
| Tablica 5. Udio konstituenata u promatranom području.....                                    | 39 |

**POPIS ENGLESKIH SKRAĆENICA**

| <b>Oznaka</b> | <b>Značenje</b>                  |
|---------------|----------------------------------|
| CT            | Computed Tomography              |
| DVC           | Digital Volume Correlation       |
| NDE           | Non- Destructive Evaluation      |
| NDT           | Non- Destructive Testing         |
| NDI           | Non- Destructive Inspection      |
| IC            | Infrared                         |
| X-CT          | Computed Tomography with X- rays |
| CL            | Computed Laminography            |
| DIC           | Digital Image Correlation        |
| ROI           | Region of Interest               |

## SAŽETAK

Jedna od najčešće korištenih suvremenih metoda za nerazorna ispitivanja kompozitnih materijala je računalna tomografija (CT). S obzirom na sve veću primjenu kompozita u svim granama industrije potrebna su sve naprednija ispitivanja koja vrlo precizno mogu procijeniti odziv materijala uslijed mehaničkog opterećenja. Računalna tomografija radiološka je metoda koja koristi snop ionizirajućeg zračenja kako bi se mogla odrediti vanjska i unutarnja struktura mjernog objekta. Osim toga, pomoću ove metode mjerenja dostupne su informacije o geometriji ispitnog uzorka i mikrostrukturi promatranog objekta. Kod mjerenja CT uređajem javljaju se različiti šumovi i mjerne nesigurnosti, uzrokovane vanjskim i unutarnjim čimbenicima, koje direktno utječu na kvalitetu dobivenih 3D volumena.

S obzirom da su zabilježeni 3D skenovi niz digitalno zapisanih slika, na rekonstruiranim volumenima moguće je provesti mjerenja cijelog polja pomaka i deformacija primjenom korelacije digitalnih volumena (DVC) čiji se algoritam temelji na metodi korelacije digitalne slike. Osim mjerenja na površini ispitnog uzorka DVC metoda nam dozvoljava pristup odziva materijala unutar ispitnog uzorka.

U ovom radu provedeno je skeniranje uzorka za vlačno ispitivanje. Skeniranje je provedeno pomoću industrijskog  $\mu$ -tomografa NIKON XT H 225. Uzorak za vlačno ispitivanje kompozitni je materijal izrađen od mat staklenih vlakana koja se nalaze u matrici od epoksidne smole. Skeniranje je provedeno uzastopno dva puta kada je uzorak bio u neopterećenom stanju. Provedenom rekonstrukcijom registriranih projekcija definiran je 3D volumen na kojem je zatim primijenjena DVC metoda s ciljem određivanja polja pomaka odnosno deformacija unutar ispitnog uzorka. U ovom radu korišten je globalni DVC algoritam Correli C8 koji se zasniva na metodi konačnih elemenata. Iz izmjerenih podataka promatrano je kako šumovi i mjerne nesigurnosti utječu na veličinu konačnih elemenata korištenih kod mjerenja pomaka i deformacija. Glavni cilj ovog rada je određivanje standardne rezolucija pomaka i deformacija za različite veličine konačnih elemenata. Izmjerene vrijednosti standardne rezolucija pomaka i deformacija analizirane kod neopterećenog ispitnog uzorka važne su za daljnja mehanička ispitivanja. Poznavanjem standardne rezolucije pomaka i deformacija definiran je najmanji prirast pomaka odnosno deformacija koje se može mjeriti ovom tehnikom s obzirom na primijenjenu veličinu konačnog elementa.

Ključne riječi: kompozit, nerazorna ispitivanja, računalna tomografija X-zrakama (X-CT), korelacija digitalnog volumena, standardna rezolucija pomaka, standardna rezolucija deformacija

## SUMMARY

Computed tomography (CT) is one of the most commonly used modern methods for non-destructive testing of composite materials. Considering increased application of composite materials in many industries, more advanced tests are required to accurately estimate material behaviour due to mechanical loading. Computed tomography is a radiological method that uses the beam of ionizing radiation to determine external and internal structure of the measuring object. Moreover, informations about the geometry and the microstructure of the observed object are available when proposed measurement method is applied. Various noise and uncertainties, caused by different external and internal factors, are generated while acquiring radiographs with the CT device which can directly affects the quality of the obtained 3D volumes.

Since registered 3D scans are series of digitally recorded images, measurement of the entire displacement and strain fields can be performed on the reconstructed volumes applying the Digital Volume Correlation (DVC), based on the already established Digital Image Correlation (DIC). However, in addition to measurements on the surface of the test sample, the DVC method allows us to access the material response within the test sample.

Within this work the 3D volume of the uniaxial dog bone sample was conducted. The device used for this test was industrial  $\mu$ -tomograph NIKON XT H 225. The dog bone sample was made of the mat glass fibers embedded in epoxy resin. The acquisition of the 3D scans was performed two times consecutively when the sample was in unloaded state. 3D volume was then reconstructed from the recorded 2D projections. Afterwards, the DVC method was applied to measure displacement and strain fields within the dog bone specimen. In this work, global DVC algorithm Correli C8, based on the finite element method, was used. The aim was to observe the influence of the noise and uncertainties on finite element size, for measuring displacements and strains, was then observed from measured data.

The objective of this work is to determine the standard displacement and strain resolution for different size of C8 finite elements. Registered values of the standard displacement and strain resolution, analyzed in the unloaded sample, are very important for further mechanical testing via  $\mu$ -tomography. The smallest increase of the displacement and strain values, considering the applied finite element size, that can be measured with the proposed technique are defined by accessing the standard displacement and strain resolution.

Keywords: composite material, non-destructive testing, X-ray computed tomography (X-CT), Digital Volume Correlation (DVC), standard displacement resolution, standard strain resolution

## 1. UVOD

Razvoj računalne tomografije krenuo je s otkrićem rendgenskih zraka 1901. godine, a svoju primjenu je prvotno našao u području medicine. Iako je doprinos računalne tomografije u području medicine bio zamjetan od samog otkrića, trebalo je proći mnogo godina do izrade prvog funkcionalnog CT uređaja. Prvi prototip CT uređaj predstavio je Godfrey Newbold Hounsfield 1972. Nakon izrade prvog prototipa CT uređaja njegova upotreba odmah se prihvatila u medicini te se razvoj računalne tomografije smatra jednim od najvećih postignuća u radiološkoj dijagnostici.

Povećani interes za novim tehnologijama koje imaju mnogo veću preciznost, što odgovara konstantnoj težnji industrije za boljom kontrolom kvalitete i pouzdanošću, doveo je također do primjene računalne tomografije u različitim istraživačkim i industrijskim granama. Prva upotreba CT uređaja u industriji započela je u području nerazornih ispitivanja. U početku se računalna tomografija koristila isključivo za vizualizaciju i prikaz strukture različitih materijala. Međutim današnji CT uređaji imaju široku primjenu u industriji npr. određivanje geometrijskih karakteristika ispitnog objekta, ispitivanje sastava nekog materijala, ispitivanje nehomogenosti u gustoći kod različitih objekata, određivanja poroznosti unutar materijala, identifikacija volumnog udjela te raspodjele konstituenata kod heterogenih materijala i dr. Osim toga, zahvaljujući razvoju hardverskih komponenti i naprednih softvera, CT je postao robustan i široko upotrebljiv alat koji se koristi u znanosti o materijalima sa svrhom procjene ponašanja materijala uslijed različitih mehaničkih ispitivanja. Jedna od najvažnijih prednosti korištenja računalne tomografije u usporedbi s tradicionalnim metodama je da se kompletna analiza vanjske i unutarnje geometrije može provesti bez oštećenja ili uništavanja ispitnog uzorka, a s mnogo većom preciznošću. Informacije koje se mogu dobiti iz CT skenova zabilježenih uslijed opterećenja ne govore samo o sastavu i raspodjeli mikrostrukture materijala unutar promatranog volumena, već nam daju uvid i u ponašanje materijala mjerenjem cijelog polja pomaka i/ili deformacija primjenom napredne metode korelacije digitalnih volumena (engl. Digital Volume Correlation - DVC). Iako je računalna tomografija razvijena do te mjere da se lako može postići mikro i nano metarska rezolucija i dalje je to relativno nova metoda koja se još može unaprijediti. Naime, kod primjene mjerne metode računalna tomografija dolazi do mjernih nesigurnosti zbog različitih parametara. Kako bi se poboljšala predložena mjerna metoda potrebno je prvo poznavati uzrok nesavršenosti zabilježenih na 3D skenu a nakon toga implementirati poboljšanja. Iz tog razloga su današnja

istraživanja u području računalne tomografije fokusirana na otklanjanje nesavršenosti na registriranim 3D volumenima, a s ciljem postizanja veće preciznosti i pouzdanosti predložene mjerne tehnike. Osim toga, CT uređaji bi pronašli primjenu u novim industrijskim i znanstvenim područjima, čime bi ova metoda postala dostupnija [1].

S obzirom na konstantan razvoj suvremenih kompozitnih materijala i s obzirom na činjenicu da se njihova svojstva vrlo lako mogu podesiti, tako da zadovoljavaju širok spektar zahtijevanih karakteristika, oni se danas koriste u gotovo svim granama industrije. Sama primjena tih materijala u industriji zahtjeva vrlo detaljna ispitivanja njihovih mehaničkih karakteristika kao što su čvrstoća i modul elastičnosti. Budući da imaju heterogenu strukturu u kojoj se mogu pojaviti razni defekti, također je bitno dobiti informacije o raspodjeli i udjelu komponenata unutar samog kompozita. Jedna od najčešćih metoda za ispitivanje kompozita je skeniranje CT uređajem, jer pomoću nje možemo dobiti uvid u samu mikrostrukturu i vidjeti razna mikro i makro oštećenja.

Cilj ovog rada je opisivanje glavnih karakteristika CT uređaja, njihove primjene kod ispitivanja kompozitnih materijala te određivanje standardne rezolucije pomaka i deformacija skeniranjem kompozitnog materijala izrađenog od mat staklenih vlakana i epoksidne smole. U prvom dijelu opisat će se kompozitni materijali s naglaskom na kompozite ojačane staklenim vlaknima. Opisat će se razne metode nerazornih ispitivanja tih materijala, od kojih je najčešće korištena radiografija odnosno vrsta radiografije, računalna tomografija (CT). Nakon toga detaljno će se objasniti glavne funkcije, osnovni dijelovi te prednosti i nedostaci današnjih CT uređaja koji se koriste u industriji. Prikazat će se klasifikacija CT uređaja, mjerne nesigurnosti koje se javljaju tijekom skeniranja tj. obrade podataka te opisati artefakti koji nastaju kao posljedica mjernih nesigurnosti. Također će biti prikazane vrste mehaničkih ispitivanja kod računalne tomografije. Nadalje, bit će izveden opis DVC algoritma korištenog u računalnoj tomografiji pomoću kojeg se iz 2D skenova dobiva kompletna slika skeniranog volumena zajedno s poljima pomaka i deformacija. Na kraju, prezentirat će se rezultati skeniranja kompozitnog materijala, epoksidne smole ojačane stohastički raspoređenim mat staklenim vlaknima, odredit će se polja pomaka, deformacija i reziduala te standardna rezolucija pomaka i deformacija globalnim pristupom.



## 2. KOMPOZITNI MATERIJALI

Kompozitni materijali dobiveni su umjetnim spajanjem dva ili više materijala različitih svojstava kako bi se dobio materijal takvih svojstava kakva ne posjeduje ni jedna komponenta sama za sebe. Time se mogu postići različite kombinacije svojstava kao što su krutost, čvrstoća, težina, ponašanje na visokim temperaturama, tvrdoća, kemijska postojanost ili vodljivost. Kompoziti mogu biti: metalno-metalni, metalno-keramički, metalno-polimerni, keramičko-polimerni, keramičko-keramički, polimerno-polimerni i polimerno-metalni [2]. Prema navedenom temeljna podjela kompozita s obzirom na osnovni materijal (tj. matricu) je na:

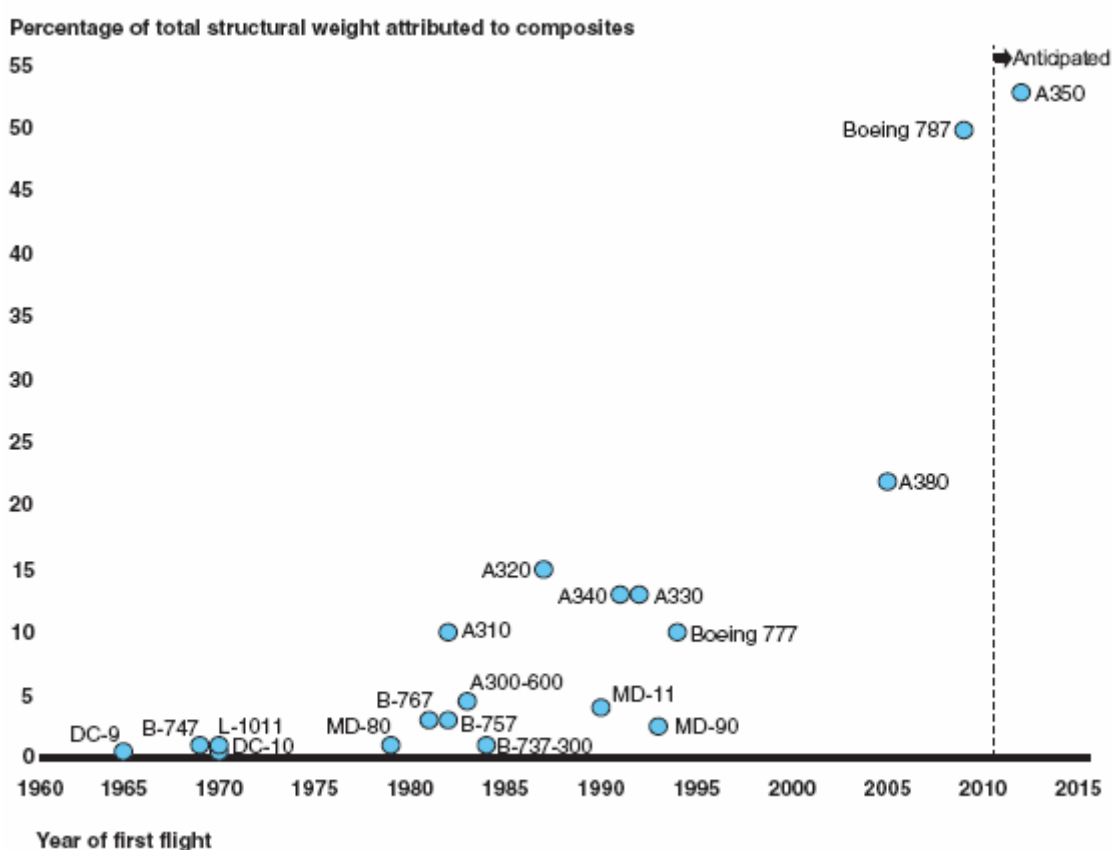
- metalne,
- keramičke i
- polimerne.

Metali, keramika ili polimeri su matrica kojoj se pridodaju različiti dodaci kako bi se prilagodila (tj. poboljšala) svojstva osnovnog materijala. Može se zaključiti da su kompoziti višefazni materijali kod kojih je jedna faza kontinuirana i okružuje ostale disperzirane faze. Osim toga, kompozite možemo podijeliti na: kompozite s česticama, vlaknima ojačane kompozite i strukturne kompozite. Kompoziti ojačani disperzijom malih čestica i velikim česticama spadaju u kompozite s česticama. Kod njih se povećana čvrstoća postiže ekstremno malim česticama (od 10 do 250 nm) koje usporavaju gibanje dislokacija na razini atoma ili velikim česticama djelovanjem samih čestica unutar matrice. Efikasnost ojačanja najveća je kod kompozita s vlaknima. Kod ovih kompozita vlakna nose većinu opterećenja koja se na njih prenose preko matrice koja je u većini slučajeva osrednje duktilna. Raspored vlakana uvelike utječe na svojstva. Vlakna mogu biti duga ili kratka te ih se može pozicionirati tako da budu usmjerena ili slučajno raspoređena. Pod grupu strukturnih kompozita spadaju slojeviti kompoziti (laminati) i sendvič konstrukcije. Kod njih se postiže relativno visoka čvrstoća i krutost uz relativno nisku gustoću [2].

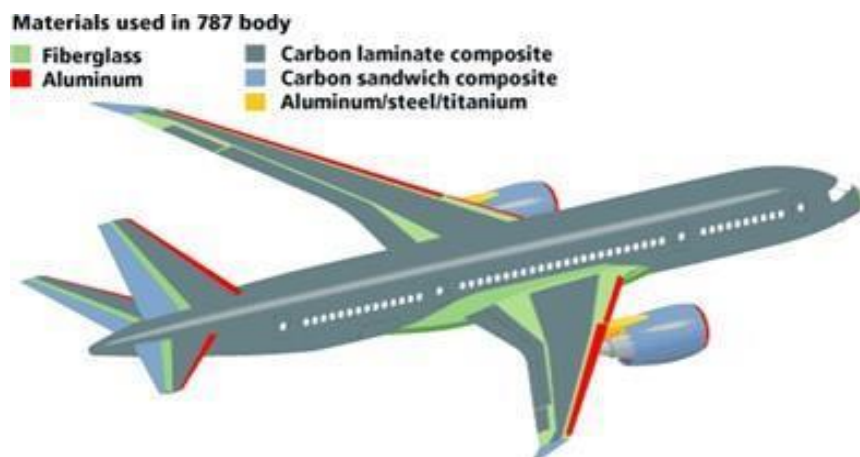
Kompozitni materijali, zbog svojih jedinstvenih svojstava, danas imaju jako široku primjenu. Dijelovi napravljeni od kompozita često imaju dulji vijek trajanja od klasičnih materijala i zahtijevaju manje održavanja. Kombinacija visoke čvrstoće, relativno male mase u usporedbi s klasičnim materijalima kao i kemijska postojanost dovele su do upotrebe kompozita u gotovo svim granama industrije (građevini, zrakoplovstvu, autoindustriji,

medicini i sportu). Vrlo dobar primjer porasta primjene kompozitnih materijala može se vidjeti u zrakoplovnoj industriji (Slika 1). Kroz 60 godina ukupni udio kompozitnih materijala u konstrukciji zrakoplova porastao je od otprilike 1% (1965. godina) do 50% (2010. godina). Na slika 2 može se vidjeti kako je u modernim zrakoplovima kao što je Boing 787 većina dijelova izrađena upravo od kompozitnih materijala. Konstrukcija aviona većinom je izrađena od strukturnih i vlaknima ojačanih kompozita dok se u manjem dijelu koriste aluminij, titan i čelik.

**Figure 1: Commercial Airplane Models over Time by Percentage of Composites**



Slika 1. Porast udjela kompozita u konstrukciji zrakoplova [3] od 1965. do 2010. godine.



Slika 2. Shematski prikaz udjela različitih materijala od kojih je sastavljen Boeing 787 [4].

## 2.1. Vlaknima ojačani polimerni kompoziti

Kompoziti ojačani vlaknima generalno su karakterizirani s visokom čvrstoćom i krutosti. Sastavljeni su od polimerne matrice i vlakana kao komponentom za ojačavanje. Ovisno o rasporedu vlakana unutar matrice variraju svojstva kompozita. Matrica je uobičajeno žilav i duktilan materijal kojeg se dodatno ojačava. Budući da materijal matrice mekša, tali se ili razgrađuje pri određenoj temperaturi, ona određuje najvišu radnu temperaturu. Najjeftinije i najraširenije matrice su polimerne smole, poliesteri i vinil esteri, dok su epoksidne smole znatno skuplje i primjenjuju se na primjer u zrakoplovstvu. Epoksidne smole također imaju bolja mehanička svojstva te bolju otpornost prema vlazi u usporedbi s poliesterskim ili vinil esterskim smolama. Za visoku temperaturnu primjenu primjenjuju se poliimidi ili plastomeri kao što su polietereterketon (PEEK), polifenilensulfid (PPS) i polieterimid (PEI) [2]. Zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava, niske cijene te dostupnosti sirovina za izradu, kao ojačavalo najčešće se koriste staklena vlakna. Međutim, za zahtjevniju primjenu gdje se traže znatno veća čvrstoća i krutost koriste se ostale vrste ojačavala. Prema vrsti ojačavala možemo napraviti sljedeću podjelu:

- polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima,
- polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima,
- polimerni kompoziti ojačani aramidnim vlaknima i
- polimerni kompoziti ojačani ostalim vlaknastim materijalima (borna vlakna, silicij-karbid vlakna, aluminij-oksidi vlakna).

Staklena vlakna kao što je već spomenuto lako su dobavljiva i imaju najrašireniju primjenu. Mogu biti kontinuirana ili diskontinuirana i primjenjuju se za izradu raznih spremnika i cijevi. Nedostatak staklenih vlakana je relativno niža krutost s obzirom na ostala vlakna i temperatura primjene do maksimalno 200°C. Ugljična vlakna imaju visok modul elastičnosti i zadržavaju ga i pri visokim temperaturama što je prednost u odnosu na staklena vlakna. Koriste se u automobilske industriji i zrakoplovstvu, a nedostatak im je oksidacija pri visokim temperaturama. Kada se traži da materijal ima širok temperaturni raspon primjene, tada se kompozit najčešće izrađuje od aramidnih vlakana koja imaju i izuzetno dobar omjer čvrstoće i gustoće. Detaljniji opis osnovnih karakteristika, nedostataka i primjene pojedinih vlakana može se vidjeti u tablica 1.

Tablica 1. Opis tri najčešća ojačavala [2].

| VRSTA VLAKANA   | OSNOVNE KARAKTERISTIKE   | NEDOSTACI  | PRIMJENA                               |
|-----------------|--|--|--|
| <b>Staklena</b> | mogu biti kontinuirana ili diskontinuirana   | usprkos visoke čvrstoće vlakna nisu kruta                      | kućišta vozila, trupovi plovila        |
|                 | lako dobavljiva  | mogu se primjenjivati do maksimalno 200°C                      | cijevi, spremnici, industrijski podovi |
|                 | njihovom primjenom dobiva se kompozit vrlo visoke specifične čvrstoće              |  |  |
|                 | kombiniranjem s različitim polimerima postiže se kemijska inertnost                |  |  |
|                 | lako se izvlače iz rastaljenog stanja  |  |  |
| <b>Ugljična</b> | najveći specifični modul i najveća specifična čvrstoća                             | oksidacija pri visokim temperaturama                           | sportska i rekreacijska oprema         |
|                 | visoki vlačni modul i čvrstoću zadržavaju i pri visokim temperaturama              | postupci proizvodnje razlikuju se ovisno o polaznom materijalu | spremnici pod tlakom                   |
|                 | razvijeni su relativno jeftini postupci proizvodnje tih vlakana                    |  | konstrukcijski dijelovi                |
| <b>Aramidna</b> | visokočvrsti i visokomodulni materijali izuzetnog omjera čvrstoća-gustoća          | podložni degradaciji s jakim kiselinama i bazama               | neprobojni prsluci, sportski artikli   |
|                 | otpornost na udar i na puzanje, širok temperaturni raspon primjene (-200 do 200°C) | relativno slaba pri pritiskivanju                              | gume, užad, projektili, tlačne posude  |

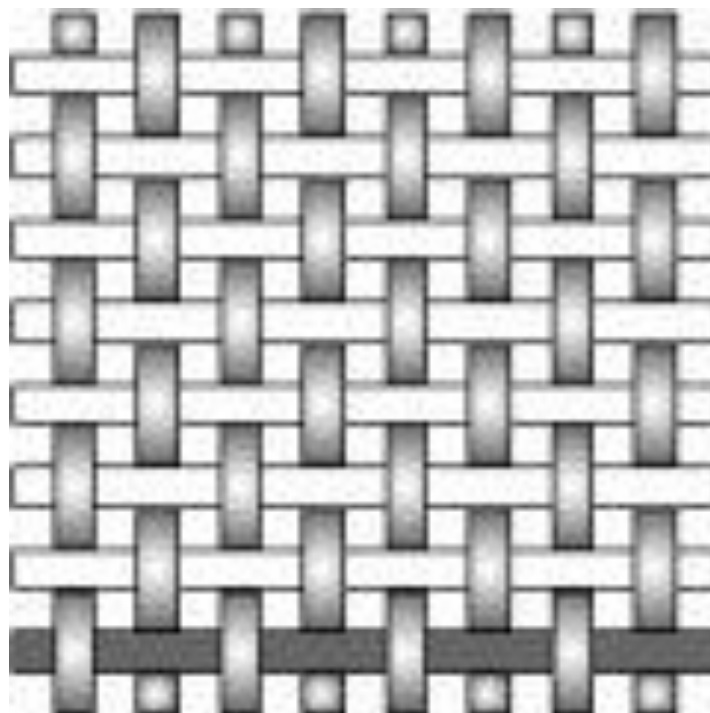
## 2.2. Epoksidna smola ojačana stohastički raspoređenim staklenim vlaknima

U ovom radu jedan od ciljeva je odrediti standardnu rezoluciju pomaka i deformacija metode korelacije digitalnih volumena na ispitnom uzorku izrađenom od epoksidne smole ojačane mat staklenim vlaknima. Staklena vlakna su najčešće korišteno ojačavalo pri izradi vlaknima ojačanog kompozita. Razlog tome je što se jednostavno izrađuju, a sirovine za njihovu proizvodnju lako su dostupne. Prema njihovoj primjeni mogu se podijeliti u dvije kategorije: staklena vlakna za opću primjenu (više od 90% spada u tu kategoriju) i staklena vlakna za specijalne primjene. Staklena vlakna za opću primjenu označavaju se kao E-stakla dok se ostala označavaju prema drugačijim oznakama koje karakteriziraju posebna svojstva [5]. U tablica 2 mogu se vidjeti oznake i svojstva koja se karakteriziraju tim oznakama.

Tablica 2. Oznake staklenih vlakana i svojstva koja posjeduju vlakna s tim oznakama [6].

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| E | Niska električna vodljivost          |
| S | Visoka čvrstoća                      |
| C | Visoka kemijska postojanost          |
| M | Visoka krutost                       |
| A | Alkalna vlakna                       |
| D | Niska dielektrična konstanta         |
| R | Visoka čvrstoća i kemijska otpornost |

Sve vrste staklenih vlakana, nakon što prođu proces proizvodnje, pripremaju se u obliku poluproizvoda. Individualna vlakna grupiraju se u strukove. Najčešći oblici poluproizvoda su roving, platno i mat. Roving je jednostavna ukrižana tkanina koja najčešće sadrži strukove jednake debljine (Slika 5). Platno je slično rovingu, ali ima daleko veću prilagodljivost (Slika 4) i može se dobiti raznim vrstama tkanja. Mat, čiju strukturu možemo vidjeti na slika 6, sastoji se od jednoliko debelog sloja vlakana, površinski razbacanih u svim smjerovima (stohastičkih). Na okupu ih drži posebno ljepilo, koje mora biti topivo u matrici ili su okomito na površinu prošivena vlaknima od istog ili drugog materijala [6].



Slika 4. Platno [6].



Slika 5. Roving [6].



Slika 6. Mat staklena vlakna [7].

Odabrani osnovni materijal za promatrani kompozit je epoksidna smola. Predložena polimerna matrica je duromer koji kada se podvrgne toplini stvara netopivu i netaljivu matricu umrežene strukture. Najvažnije karakteristike matrica od epoksidnih smola su dobra adhezijska svojstva, što je vrlo važno za prijenos naprezanja, dobra mehanička svojstva i kemijska postojanost. Takve matrice ne mekšaju zagrijavanjem, ali postoji gornja temperatura uporabe pri kojoj im se smanjuje krutost. Zbog odličnih fizikalnih svojstava, danas su najčešće korištene matrice za suvremene kompozite koji se mogu proizvoditi na više načina. Jedan uključuje predimpregnirane kompozitne oblike. Prvo se vlakna impregniraju smolom kako bi nastao prepreg, koji se onda oblikuje s obzirom na geometriju. Zatim se odvija učvršćivanje uz visoki tlak i temperaturu. Osim opisanog postupka koriste se još i ručni dodatni postupak laminiranja, dodirni postupak sa štrcanjem vlakana, centrifugalno lijevanje itd. [5].

Uzorak korišten za ovaj rad izrađen je od mat R-staklenih vlakana (vlakna visoke čvrstoće) s površinskom gustoćom od  $300 \text{ g/m}^2$  i duljinom staklenih vlakana od 50 mm. Kao matrica korištena je smjesa epoksidne smole koja je nanošena kistom i valjkom i nakon toga je tretirana pod visokim tlakom 24 h i zatim ostavljena 3 h na temperaturi od  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Opisanim postupkom dobivena je kompozitna ploča dimenzija  $300 \times 300 \times 5,6 \text{ mm}$  prikazana na slika 7.



Slika 7. Izrađena polimerna kompozitna ploča ojačana mat staklenim vlaknima.



### 3. NERAZORNA ISPITIVANJA NA KOMPOZITIMA

Nerazorna ispitivanja (NDT, NDE i NDI) je široka skupina tehnika koje se koriste u znanosti i tehnologiji za procjenu svojstava materijala, komponenti ili sustava bez nanošenja oštećenja. Područje nerazornih ispitivanja uključuje identifikaciju oštećenja na površini ili u samom materijalu, određivanje i mjerenje položaja, mjerenje dimenzija i utvrđivanje strukture i mikrostrukture bez uništavanja ili bilo kakvog štetnog djelovanja za materijal. Mogu se primijeniti na individualne uzorke ili za provjeru kvalitete kod samog procesa nastajanja materijala. U metode nerazornih ispitivanja spadaju: ultrazvučno ispitivanje, termografija, vizualno ispitivanje, ispitivanje akustičnom emisijom, magnetska mjerenja, ispitivanje penetrantima, radiografija. Primjena nerazornih ispitivanja kod kompozitnih materijala od velike je važnosti zbog heterogene mikrostrukture i kompleksnog ponašanja materijala uslijed opterećenja. Nerazorna ispitivanja mogu se podijeliti u dvije grupe: kontaktne i beskontaktne metode. Neke od najčešće korištenih kontaktnih metoda su ultrazvučno ispitivanje, ispitivanje penetrantima, magnetska i elektromagnetska ispitivanja. Osnovne karakteristike tih ispitivanja prikazane su u tablica 3.

Tablica 3. Kontaktne metode [8].

|   |  |
|---|--|
| Ultrazvučno ispitivanje:                  | Temelji se na upotrebi zvuka s frekvencijom iznad gornje granice čujnosti ljudskog uha. Metoda funkcionira na principu odbijanja ultrazvučnog vala od defekata u materijalu i prikazivanju te reflektirane energije u odnosu na vrijeme. |
| Ispitivanje penetrantima:                 | Zasniva se na curenju tekućine u pukotine i površinske greške svojstvom kapilarnosti. Penetrantska tekućina nakon nekog vremena se ukloni te greške u materijalu postaju vidljive pod UV svjetlom.                                       |
| Magnetska i elektromagnetska ispitivanja: | Magnetska metoda koristi vrlo sitne magnetne čestice za otkrivanje grešaka u materijalu, dok elektromagnetska koristi još i elektricitet. Materijal kojeg se ispituje mora biti feromagnetičan.  |

Najčešće korištene beskontaktne metode ispitivanja su termografija, radiografija, vizualno i lasersko ispitivanje, čije osnovne karakteristike prikazuje tablica 4.

Tablica 4. Beskontaktno metode [8].

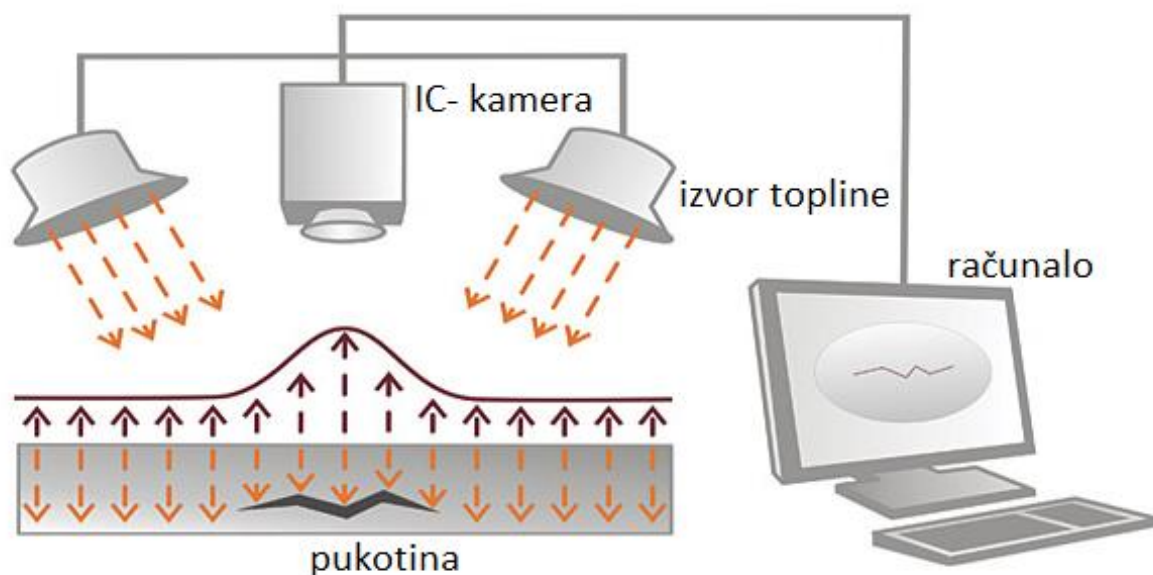
|  |   |
|--|---|
| Termografija:                              | Metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini tijela. Pošto je temperatura odraz stanja same površine ili odraz strukture i unutrašnjeg stanja pomoću nje otkrivaju se različiti defekti samog materijala. |
| Vizualno ispitivanje:                      | Najosnovnija vrsta beskontaktnog ispitivanja. Najveća prednost je brzina ovog ispitivanja i to što ne zahtijeva nikakvu opremu.   |
| Lasersko ispitivanje (engl. Shearography): | Ispitivanje se vrši kamerom koja snima interferometrijske slike površine u opterećenom i neopterećenom stanju.  |
| Radiografija:                              | Ova metoda koristi elektromagnetsko zračenje koje prolazi kroz objekt i dolazi na detektor zračenja.  |

Prema literaturi [8] za različite kompozitne materijale primjenjuju se odgovarajuće tehnike nerazornih ispitivanja. Za materijal predložen u ovom radu (tj. polimerni kompozit ojačan staklenim vlakna) najčešće se primjenjuju termografija i radiografija [8].

### 3.1. Termografija

Beskontaktna metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini tijela. Cilj ovog mjerenja je poslati određenu količinu energije u promatrani objekt i promatrati njegov odziv na tu toplinsku pobudu. Mjerenja ovom metodom rezultiraju termogramom koji daje raspodjelu temperature na površini objekta kojeg promatramo. Temperaturna raspodjela zatim daje informaciju o različitim stanjima same površine ili je odraz strukture i unutrašnjeg stanja. Postoje mnoge prednosti i nedostaci ove metode. Kao prednost ističe se da se mogu ispitivati velike površine. Nedostatak je jako skupa i osjetljiva oprema koja zahtijeva stručnu osobu koja njome upravlja. Termografija se može podijeliti na aktivnu i pasivnu. Aktivnom se promatra dinamičko ponašanje površine na toplinsku pobudu, dok se pasivnom promatraju objekti u

stacionarnom stanju. Termografski se sustav sastoji od termografske kamere i jedinice za obradu termograma (računalo). U samoj kameri integrirana je IC (infracrvena) optika, osjetnik IC zračenja, jedinica za pretvorbu električnog u video signal, monitor i kartica za pohranu podataka. Računalo služi za obradu termograma prema određenom softveru i u njega se podaci učitavaju s kartice koja se nalazi u kameri. S obzirom na to da su karakteristike elektromagnetskog zračenja jednake za cijeli elektromagnetski spektar, optika koja se koristi u IC uređajima po obliku je jednaka onoj kod fotografskih uređaja, no različiti su materijali od kojih je napravljena. Materijali koji se koriste za izradu leća moraju biti propusni za IC zračenje, a to su: cink sulfid, germanij, cink selenid za dugovalna IC zračenja te silikon, safir, kvarc ili magnezij za srednjevalna IC zračenja. Da bi se iz zračenja koje dolazi na osjetnik kamere izračunala korektna vrijednost temperature promatranog objekta potrebno je poznavati svojstva površine objekta, temperaturu okolišnih objekata, udaljenost kamere od promatranog objekta, temperaturu i relativnu vlažnost zraka. Svi ti podaci prethodno se podešavaju kao ulazni parametri u softveru kamere. Ako se radi o objektu koji je na temperaturi bliskoj okolišnoj ili ima nisku vrijednost emisijskog faktora, utjecaj zračenja iz okoliša treba biti sveden na minimum [9]. Na slika 8 kao primjer možemo vidjeti princip rada termografski uređaj.



Slika 8. Shematski prikaz principa rada termografije [10].

### 3.2. Radiografija

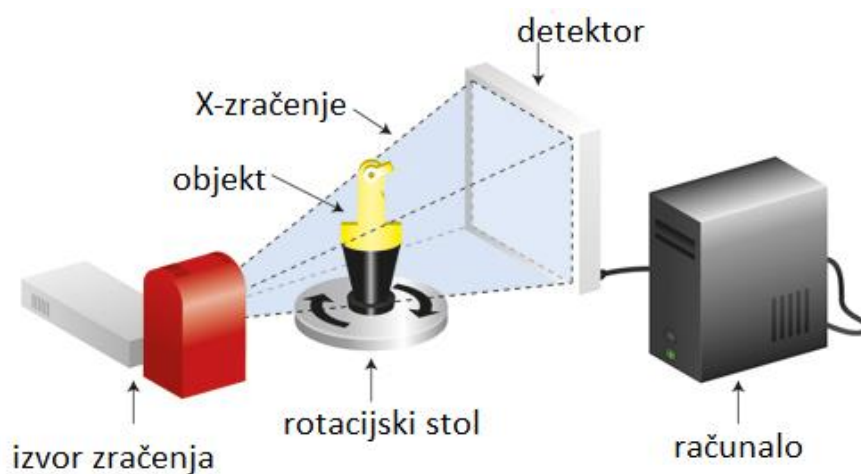
Radiografskim ispitivanjem objekt koji se ispituje postavlja se između izvora ionizirajućeg zračenja i detektora. Detektor bilježi slabljenje zračenja koje prolazi kroz ispitivani objekt uslijed razlika u gustoći i same strukture objekta. Ovo je najčešće korištena metoda mjerenja kompozitnih materijala. Postoji više vrsta radiografije i svaka ima posebnu primjenu. One se dijele na:

- filmsku radiografiju,
- računalnu radiografiju,
- računalnu tomografiju i
- digitalnu radiografiju.

Filmska radiografija koristi jednokratni film na koji je nanosena emulzija koja sadrži kristale srebrovog klorida i srebrovog bromida, osjetljivih na zračenje. Zračenje koje prolazi kroz objekt ostavlja otisak (latentna slika) na filmu koji se postavlja s druge strane skeniranog objekta. Film se zatim razvija postupkom kemijskog razvijanja u mračnoj prostoriji. U računalnoj radiografiji se umjesto prethodno opisanog filma koristi film na koji je nanosen sloj foto osjetljivog fosfora. Taj film nalazi se u kazeti te se nakon snimanja ona stavlja u skener [11]. Digitalna radiografija umjesto filma koristi detektor zračenja koji direktno pretvara zračenja, koja dolaze na detektor, u električni signal pomoću kojeg dobivamo digitalnu sliku [12]. Velika prednost računalne tomografije (CT-a) u usporedbi s ostalim metodama je dobivanje slika presjeka i prikaza kompletnog volumena ispitivanog objekta. Kod ove metode mogu se koristiti X-zrake ili  $\gamma$ -zrake. Gama zrake imaju kraću valnu duljinu i veću energiju od X-zraka [8]. U ovom radu za ispitivanje kompozita primijenjena je upravo metoda računalne tomografije s X-zrakama (XCT) pa će se u nastavku ona i detaljnije opisati.

#### 4. RAČUNALNA TOMOGRAFIJA X-ZRAKAMA (X-CT)

CT je radiološka metoda koja koristi snop ionizirajućeg zračenja kako bi se mogla odrediti vanjska i unutarnja struktura mjernog objekta. Osim toga pomoću ove metode mjerenja dostupne su informacije o geometriji ispitnog uzorka. U početku se računalna tomografija koristila isključivo u medicini, međutim sa sve većim razvojem ove metode počela se primjenjivati i u različitim granama industrije. Uređaj na kojem se provodi ispitivanje, CT uređaj (vidi Slika 9), sastoji se od izvora X-zraka, različitih filtera zračenja ovisno o skeniranom mjernom objektu, rotacijskog stola, detektora emitiranih zraka i računalne jedinice za prikupljanje, obradu i vizualizaciju podataka. CT zabilježava projekcije (tj. slike) promatranog presjeka emitiranjem snopa fotona, pod određenim kutom, kroz jednu ravninu objekta koji se nalazi na rotacijskom stolu. Kako X-zrake (tj. emitirani fotoni) prolaze kroz objekt, određeni dio njih se apsorbira, reflektira ili prolaze kroz objekt. Proces reduciranja intenziteta X-zraka naziva se atenuacija (slabljenje). Zrake koje oslabe zbog interakcije s objektom ne dolaze do detektora. Iz niza projekcija gdje detektor bilježi signale onih fotona koji pod različitim kutovima stignu do njega, uz pomoć računala se vizualizira te se stvara rekonstruirana 3D slika skeniranog objekta. Volumen objekta definiran je matricom voxela (tj. volumetrički pixel). Svaki voxel definiran je lokalnim koeficijentom atenuacije. Drugim riječima, svakom voxelu je pripisana vrijednost sive skale koja predstavlja lokalnu gustoću apsorpcije X-zraka.

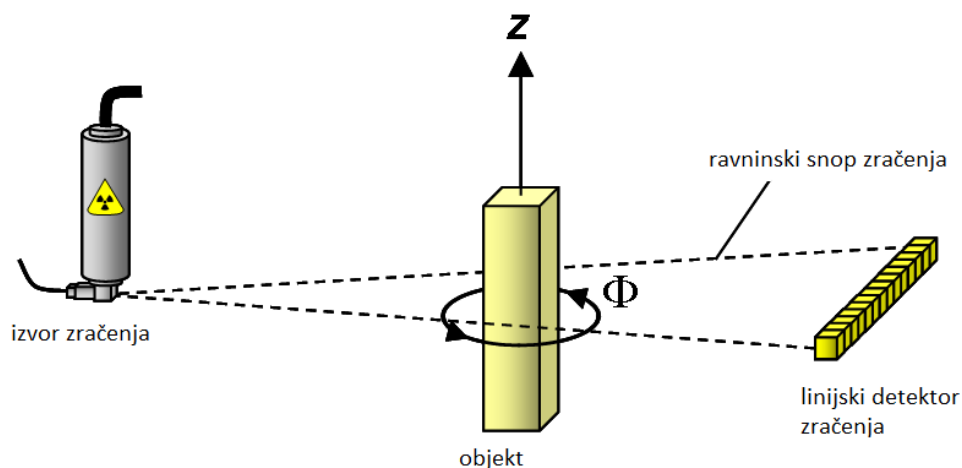


Slika 9. Shematski prikaz osnovnih dijelova 3D CT uređaja [13].

Proces skeniranja nekog objekta generalno se može podijeliti u 6 faza:

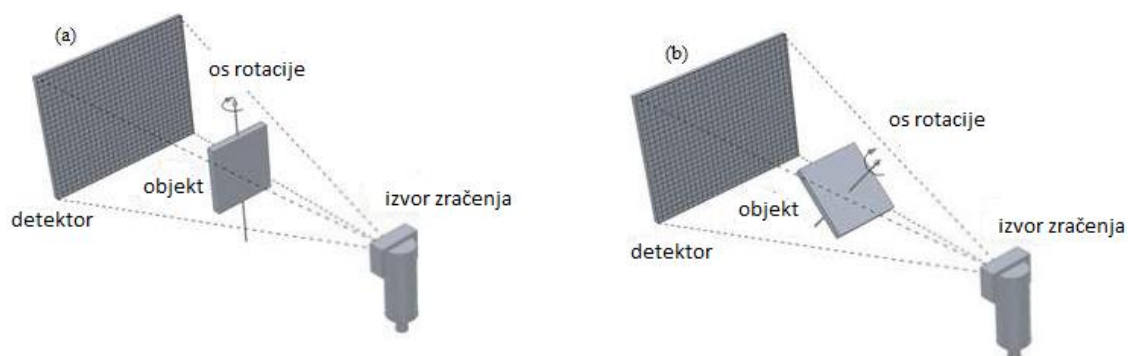
1. Podešavanje glavnih parametra CT uređaja: pojačanje (vidi jednadžbu (16)), orijentacija objekta, energija izvora zračenja, integracijsko vrijeme detektora.
2. Skeniranje mjernog objekta čime se dobiju nizovi 2D projekcija iz kojih se matematičkim algoritmima dobiva rekonstruiran 3D volumen. U ovom koraku mogu se primijeniti i korekcijske tehnike za smanjivanje grešaka koje se javljaju zbog različitih utjecajnih faktora koji će biti kasnije opisani (vidi poglavlje 4.2). Sljedeći koraci se odnose na određivanje informacija mjernog objekta (tj. obradu zabilježnog 3D volumena).
3. Vrijednosti sive skale boja pretvaraju se u binarne čime se dobiva očigledna razlika između crne površine i granica objekta. Ovim korakom određena je rekonstruirana geometrija.
4. Generiranje podataka o izmjerenom volumenu i površini mjernog objekta.
5. Mjerenje dimenzija u volumenu ili na površini mjernog objekta iz 3D skenova.
6. Dobivanje rezultata mjerenjima na 3D volumenu ispitnog uzorka.

Postoje dvije osnovne vrste industrijskih CT uređaja: 2D i 3D CT uređaji. 2D CT uređaji imaju ravninski izvor zračenja u obliku lepeze i linijski detektor kao što se može vidjeti na slika 10. Kod skeniranja ovim uređajima objekt se istovremeno i translacija i rotira te dobivamo skeniran jedan presjek. Taj postupak se ponavlja ovisno o broju presjeka koji moraju biti rekonstruirani. Glavna mana ove vrste uređaja je dugo vrijeme skeniranja, posebno kada skeniramo velike objekte. Druga osnovna vrsta CT uređaja, 3D tomografi, sastoje se od ravninskog detektora X-zraka i izvora zračenja u obliku stošca (tj. konusa). Primjer pojednostavljenog 3D uređaja prikazan je na slika 9. Prednost ovog uređaja naspram 2D uređaja je da se rekonstrukcija objekta može dobiti sa skeniranjem pri samo jednom okretaju rotacijskog stola, čime se znatno smanjuje vrijeme skeniranja, ali dolazi do drugih problema vezanih uz izvor zračenja koje se rasipa na rubovima objekta i to izravno utječe na kvalitetu rekonstruirane geometrije. Zbog geometrijskih razloga kvaliteta skeniranog prikaza pada kako se odmičemo od centra objekta. Najnovija inovacija u radu s 3D CT uređajima je spiralno skeniranje kod kojeg se tijekom skeniranja objekt rotira i istovremeno translacija po rotacijskoj osi. Pri tome dobivamo kvalitetniji 3D rekonstruirani volumen zbog toga što smo translacijom smanjili rasipanje na rubovima objekta. Također jedna od glavnih prednosti spiralnog skeniranja je ta što se može dobiti veći broj skeniranih presjeka. Osim toga moguće je skenirati mjerni objekt čije su dimenzije veće u smjeru rotacijske osi od detektora [1].



Slika 10. Shematski prikaz pojednostavljenog 2D CT uređaja [14].

Ako se ispituju objekti koji imaju jednu dimenziju puno veću (ili manju) od ostale dvije ne mogu se primijeniti metode klasičnih industrijskih ili laboratorijskih tomografa. budući da energija X-zrake nije dovoljno velika da prođe kroz veću dimenziju ispitnog uzorka (npr. tanke ploče, lim). Ako se poveća energija X-zrake, ona će moći proći kroz veću dimenziju tankog ispitnog uzorka dok će manja dimenzija biti prezračena te neće zabilježiti strukturu ispitnog uzorka. Iz tog razloga razvijena je računalna laminografija (CL). CL isto tako koristi izvor X-zračenja koji nije okomit na objekt, kao što je to slučaj kod računalne tomografije, nego je objekt nagnut pod kutom manjim od  $90^\circ$  u odnosu na izvor zračenja. Taj kut naziva se laminografski kut i njegov odabir je vrlo bitan za kvalitetu rekonstruirane slike. Istraživanjem se pokazalo da je optimalni kut  $45^\circ$ . Osnovni dijelovi CT-a i CL-a su isti, dok je jedina razlika to što je rotacijska os objekta u slučaju računalne laminografije zakrenuta pod kutom manjim od  $90^\circ$  što se može vidjeti na slika 11 [15].



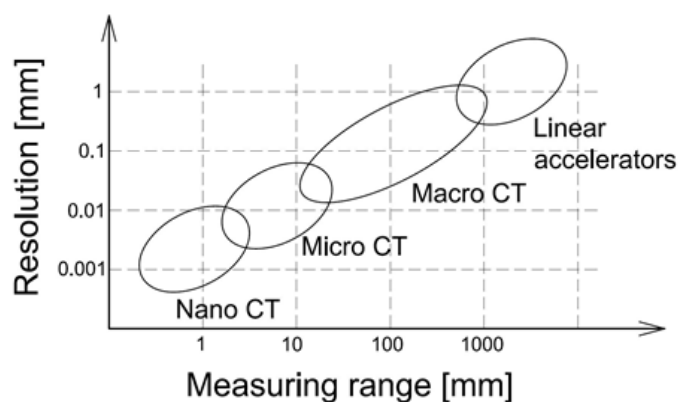
Slika 11. Shematski prikaz postava za (a) računalnu tomografiju i (b) računalnu laminografiju. [15].

#### 4.1. Klasifikacija industrijskih CT uređaja

Klasifikacija CT uređaja temelji se na postignutoj rezoluciji, mjernom području i veličini fokusne točke X-zračenja. Temeljna podjela CT uređaja je na:

- linearne akceleratora,
- makro CT,
- mikro CT i
- nano CT.

Makro CT uređaji koriste se za veće objekte dimenzija od 10 do 1000 mm. U tom mjernom području postižu rezolucije između 0,01 i 1 mm. Mikro i nano CT uređaji koriste se za mjerenje manjih objekata dimenzija manjih od 1 mm pa sve do 10 mm. Kod njih rezolucija u tom mjernom području kreće se od 0,001 do 0,01 mm. Mikro CT uređaji mogu imati izvor zračenja s malom veličinom fokusne točke (1-50  $\mu\text{m}$ ) te se ispitni objekti pozicioniraju u blizini fokusa. Tako se može postići veće geometrijsko uvećanje. Izvori zračenja s nano-fokusom (fokusne točke manje od 1  $\mu\text{m}$ ) najprikladniji su za ispitivanje malih mjernih objekata. Slika 12 prikazuje rezolucije koje se mogu postići u ovisnosti o mjernom rasponu svakog od CT uređaja spomenutih u temeljnoj podjeli [1].



Slika 12. Ovisnost rezolucije o mjernom području za određene vrste industrijskih uređaja [1].

#### 4.2. Čimbenici koji utječu na mjerne nesigurnosti

Kada se radi o bilo kakvim mjerenjima koja rezultiraju kvantitativnim rezultatom, zahtjeva se određena točnost. Taj zahtjev za točnošću opisuje se mjernom nesigurnošću koja predstavlja kvalitetu specifičnog mjernog rezultata. Prilikom svakog mjerenja potrebno je uzeti u obzir mjernu nesigurnost kako bi se ostvarila sljedljivost rezultata prema osnovnim SI jedinicama i kako bi se uspostavila sukladnost ili nesukladnost s tolerancijama. Kod CT uređaja javljaju se mnogi čimbenici koji utječu na mjerne nesigurnosti i variraju od mjerenja



do mjerenja. Zbog toga je određivanje mjernih nesigurnosti kod CT uređaja vrlo zahtjevno i do sada još nisu definirani međunarodni standardi za specifične slučajeve CT mjerenja.

U nastavku će biti opisani najbitniji čimbenici koji utječu na mjernu nesigurnost tijekom procesa skeniranja CT uređajem i obrade podataka [16].

#### 4.2.1. Hardver

X-zrake su elektromagnetski valovi s valnom duljinom manjom od 10 nm. Manja valna duljina korespondira s većom energijom. Energija X-zračenja obično se izražava u eV ( $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{J}$ ). Najvažnije varijable koje određuju kvalitetu emisijskog spektra X-zračenja su: veličina fokusne točke, spektar generiranih energija zračenja i intenzitet zračenja. Fokusna točka utječe na prostornu rezoluciju određujući broj mogućih putanja, između izvora zračenja i detektora, koje prolaze kroz neku točku objekta (kako se povećava broj putanja tako se povećava zamućenje skenirane značajke). Na slika 13 prikazan je efekt fokusne točke i vidi se da s manjom veličinom fokusne točke možemo dobiti oštriju sliku rubova (vidi Slika 13.a). Spektar generiranih energija određuje dubinu prodiranja zračenja u objekt kao i njihovo relativno slabljenje kada stignu do detektora. X-zračenje s većom energijom će efektivnije prodirati u objekt od zračenja s manjom energijom. Intenzitet zračenja u osnovi je ograničen najvećom mogućom disipacijom topline ispitivanog objekta. Zbog toga zračenje većeg intenziteta zahtjeva veće objekte i time limitira rezoluciju [1]. Također treba spomenuti da je vrlo važan odabir jakosti struje i napona na izvoru. Odabir jakosti struje utječe samo na intenzitet zračenja, dok napon utječe i na intenzitet i na spektar generiranih energija. [1].



Slika 13. Efekt fokusne točke [1].

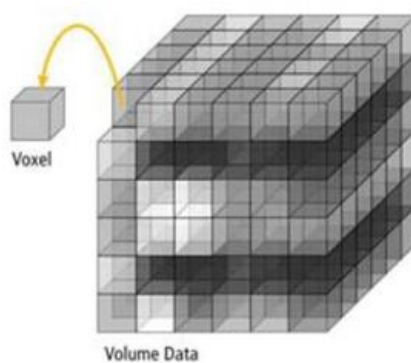
Rotacijski stol osnovni je dio laboratorijskog i industrijskog CT uređaja koji može imati veliki utjecaj na kvalitetu mjerenja ako dođe do odstupanja između rotacijskog stola, izvora zračenja i detektora. Centralna zraka iz izvora mora presjeći os rotacijskog stola koja ide kroz njegovo središte te se mora projicirati na sredini detektora. Ako navedeni dijelovi

nisu pravilno poravnati dolazi do pojave artefakata na skeniranim projekcijama koji uzrokuju i artefakte na rekonstruiranom 3D volumenu.

Detektor X-zračenja prima zračenja koja su prošla kroz objekt i pretvara podražaje oslabljenih X-zraka u električni signal. Osnovni parametri kod detektora zračenja su: kvantna efikasnost, broj pixela, brzina očitavanja i dinamički raspon. Kvantna efikasnost definira se kao omjer broja fotona koji dolaze na detektor i izlazne energije (tj. fotoni i šumovi koje detektor ne apsorbira). Dinamički raspon definira se kao raspon između maksimalnog i minimalnog intenziteta koji se može prikazati. Broj pixela i brzina očitavanja ovise o vrsti izvedbe detektora. U novije vrijeme došlo je do znatnog napretka i mnogih poboljšanja međutim i dalje svaki tip detektora ima određene nedostatke koji dovode do mjerne nesigurnosti [1].

#### 4.2.2. Softver/Obrada podataka

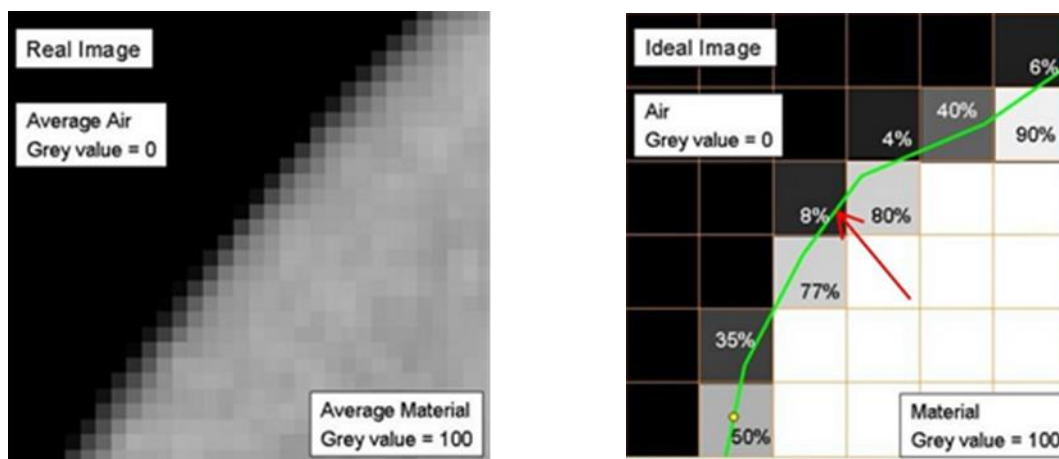
Nakon procesa skeniranja, različiti matematički algoritmi koriste se kako bi se rekonstruirao volumen skeniranog objekta iz zabilježenih projekcija. Rekonstruirane 3D slike sastavljene su od voxela (Slika 14). Voxeli su primitivni elementi 3D strukture. Njihova veličina funkcija je veličine pixela i međusobne udaljenosti između izvora zračenja, objekta i detektora. Tijekom rekonstrukcije mogu se pojaviti određene greške kao što su odstupanja u vrijednostima voxela i koeficijenta atenuacije, koje se događaju prvenstveno zbog pomicanja objekta tijekom skeniranja i beam hardening efekta. Uzrok navedenog efekt javlja se budući da se fotoni niže energije mnogo brže apsorbiraju od fotona više energije. Iz tog razloga raste energija objekta te se kaže kako snop postaje tvrdi [17].



Slika 14. Prikaz voxela u izmjerenom 3D volumenu [1].

Za dobivanje kvalitetno rekonstruirane geometrije također je bitno određivanje rubne/granične vrijednosti (engl. threshold value). Rubna vrijednost kritični je parametar kod CT skena a koristi se za točnu segmentaciju i određivanje podataka o površini koji su bitni za

rekonstruiranu geometriju. Predloženi kriterij pretvara vrijednosti sive skale u binarne. Novonastala slika sastoji se od dva seta od kojeg jedan predstavlja pozadinu (npr. crno), a drugi objekt (npr. bijelo) [1]. Glavna funkcija rubne vrijednosti je da ona određuje granice skeniranog objekta i zraka, te se primjenjuje na svakom voxelu unutar volumena (vidi Slika 15).

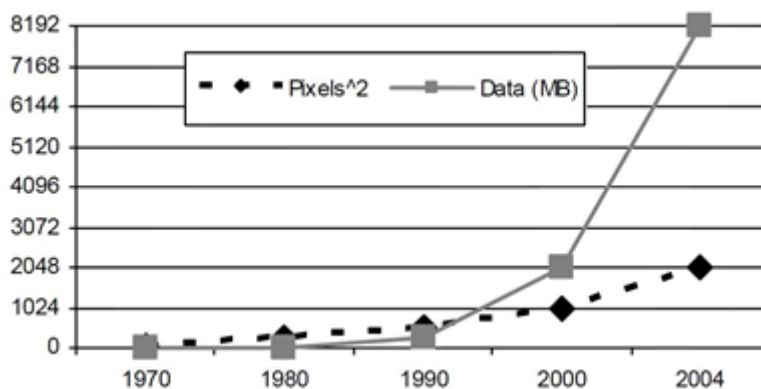


(a) prava slika

(b) idealizirana slika

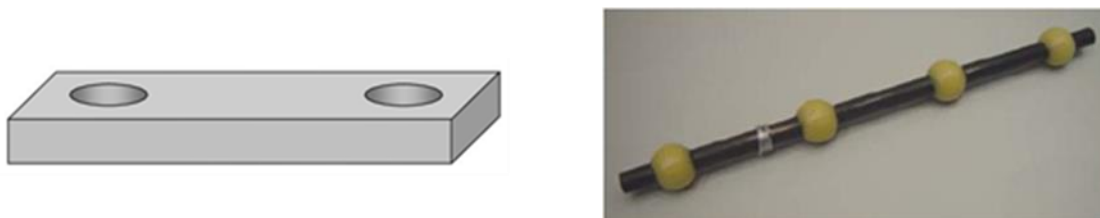
Slika 15. Primjena rubne/granične vrijednosti. (a) zabilježena slika i (b) idealizirana slika. Zelena linija na predstavlja segmentaciju ruba objekta od zraka [1].

Tijekom godina kako se razvijala sama metoda skeniranja CT uređajima i kako su se poboljšavale komponente CT uređaja dobivalo se sve više podataka koji daju točniju rekonstrukciju. Osim toga mijenjala se i veličina dobivenih slika. Početkom primjene laboratorijskih CT uređaja zabilježene su projekcije veličine  $256 \times 256$  pixela, dok je danas njihova prostorna rezolucija veća od  $1024 \times 1024$  pixela (Slika 16). Zbog sve veće količine podataka koja se treba analizirati, povećava se vrijeme njihove obrade (tj. rekonstrukcije 3D volumena). Iz tog razloga se u današnje vrijeme ulaže veliki napor s ciljem pronalaženja načina na koji bi se velike količine podataka dobivene skeniranjem, a potrebne za vizualizaciju, mogle obraditi u relativno kratkom vremenu bez da narušimo pouzdanost rekonstruirane slike [1].



Slika 16. Promjene veličine slike/projeksija i količine podataka do 2004. godine [1].

Kako bi se provelo pouzdano mjerenje CT uređajem vrlo važna procedura je kalibracija kojom dolazimo do korigirane vrijednosti voxela koju je moguće koristiti u daljnjem mjerenju. Za kalibraciju se uobičajeno koriste objekti koji su prezentirani na slika 17. Kod njih je poznata udaljenost od karakterističnih markera (npr. udaljenost centara sfera, udaljenost osi kružnih otvora). Naknadnim uspoređivanjem izmjerenih udaljenosti markera dobivenih skeniranjem CT uređajem korigira se veličina pixela. Kao referentnu udaljenost biramo upravo udaljenosti između osi kružnih otvora ili središta sfera zato što na te vrijednosti ne utječe efekt rubnih vrijednosti [1].



Slika 17. Primjer objekata koji se koriste za kalibraciju [1].

Faktor uvećanja ( $CF$ ) definiran je prema izrazu:

$$CF = \frac{\text{referentna vrijednost}}{\text{izmjerena vrijednost}} \quad (1)$$

Korigirana vrijednost jednog pixela/voxela  $s$  izračunava se prema izrazu:

$$s = CF \cdot s_0, \quad (2)$$

gdje je  $s_0$  prvobitno određena vrijednost pixela /voxela.

### 4.2.3. Mjerni objekt i okolina

Sastav mjerenog objekta ima veliki utjecaj na kvalitetu skeniranja CT uređajem. Interakcija X-zračenja s nekom tvari je elektromagnetske prirode i teoretski može rezultirati time da su X-zrake potpuno apsorbirane, da se zrake elastično raspršuju ili da se zrake neelastično raspršuju. Broj fotona koji su transmitirani kroz objekt, koji korespondira s linearnim koeficijentom atenuacije ovisi o debljini, gustoći, atomskom broju materijala, energiji individualnih fotona, a eksponencijalno se smanjuje prolaskom kroz tvar (objekt). Za materijale velikog atomskog broja X-zrake imaju veću mogućnost interakcije s fotonima pa će i vrijednost atenuacije za njih biti veća nego za materijale malog atomskog broja. Nadalje, s tim je povezano i da materijali manjeg atomskog broja imaju manju gustoću pa će zračenje lakše prolaziti kroz takve materijale. Osim toga sastav mjerenog objekta definirat će i dubinu prodiranja X-zraka u materijal. Dubina prodiranja zračenja u objekt uvjetovana je s geometrijom i dimenzijama objekta [1].

Nadovezujući se na prethodno opisane interakcije X-zračenja i materijala opisat će se i raspršivanje zračenja koje može imati negativan utjecaj na kvalitetu mjerenja. Raspršivanje zračenja je preusmjerenje fotona uslijed interakcije s elektronima u materijalu što može utjecati na kvalitetu mjerenja način da:

- detektor neće registrirati raspršeno zračenje,
- foton će dio svoje energije prenijeti na elektrone,
- foton će doći do detektora ali „krivom putanjom“ što će utjecati na točnost rekonstrukcije.

Važan faktor samog mjernog objekta koji može utjecati na točnost mjerenja je hrapavost površine. Svaki objekt ima površinsku hrapavost zbog čega je dosta teže odrediti rubne vrijednosti (eng. threshold value) i s velikom preciznošću/točnošću rekonstruirati samu geometriju. Procjena nesigurnosti uzrokovanih hrapavošću površine još je u razvoju, a do sada se koristila relacija:

$$u_{wi} = \sqrt{\left(\frac{b \cdot R_{zmean}}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

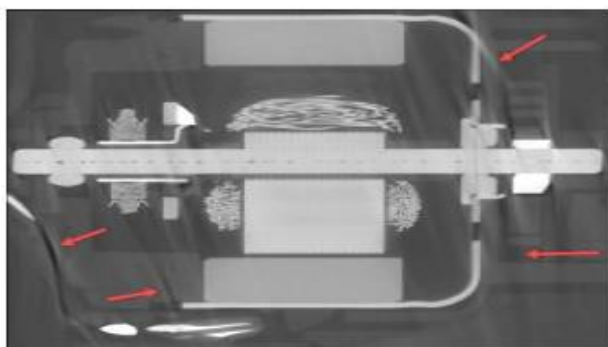
gdje je  $R_{zmean}$  srednja visina hrapavosti određena mjerenjem hrapavosti objekta u nekoliko točaka te se smatra reprezentativnom za cijeli objekt. Faktor  $b$  se određuje prema literaturi

[1] (npr. za pravokutnu raspodjelu pixela uzima se kao  $b=0.6$ ). Pošto je veličina pixela znatno veća od vrhova na površini skeniranog materijala zbog njegove hrapavosti izuzetno je teško pixelima opisati rubove geometrije. Zbog toga se za pogrešku uzima pola vrijednosti  $R_{zmean}$  [1].

Uz opisane parametre samog objekta, hardvera i softvera, vrlo je važno i promatranje vanjskih uvjeta. Temperatura, vlaga i vibracije su najrelevantniji okolišni faktori budući da unose u mjerenja dodane šumove. U tom slučaju utjecaja okoline na mjerenje nužno je filtrirati neželjene podatke prije same rekonstrukcije volumena [1].

### 4.3. Artefakti

Provođenjem mjerenja CT uređajem, prethodno opisani utjecajni faktori mogu dovesti do pojave određenih artefakata na skeniranim slikama. Artefaktom smatramo svako odstupanje između stvarne gustoće i strukture materijala i rekonstruiranih vrijednosti. Obično se pojavljuju kao svijetle i/ili tamne pruge ili sjene [19]. Generalno, artefakte možemo podijeliti na artefakte koji nastaju na fizikalnim osnovama, artefakte vezane za objekt i artefakte vezane za uređaj [17]. Neki od artefakata u tim skupinama su cirkularni artefakti, artefakti zbog šuma, artefakti parcijalnog volumena, artefakti uslijed *beam hardening* efekta (opisano u poglavlju 4.2.2) i raspršivanja zračenja (opisano u poglavlju 4.2.3). Na slika 18 prikazan je primjer artefakata koji se mogu pojaviti tijekom skeniranja.



Slika 18. Artefakti nastali za vrijeme skeniranja. Crvene strelice prikazuju mjesta artefakata [19].

Cirkularni artefakti nastaju zbog grešaka u samom detektoru zračenja. Na CT skenovima artefakti se pojavljuju kao koncentrične kružnice koje utječu na vrijednosti sive skale boja u zonama gdje su zabilježeni. Problemi u detektoru povezani su s individualnim odazivom pixela na detektoru. U najgorem slučaju ako na detektoru postoje mjesta sa smanjenim performansama (greške u proizvodnji), na tim mjestima pojavljuju se cirkularni

artefakti i nema podataka o vrijednosti sive skale [18]. Ne postoji propisana metoda kojom bi se uklonili ovi artefakti, međutim ponovnom kalibracijom detektora zračenja [20] moguće je smanjenje artefakata.

Šumovi se pojavljuju kod skeniranja s konusnim snopom zračenja. Oni utječu na kvalitetu rezolucije i smanjuju mogućnost kvalitetnog segmentiranja (prepoznavanje različitih vrijednosti gustoća unutar uzorka). Šum se definira kao neželjeno ometanje signala koji treba doći do detektora. Ometanje signala je stohastičke prirode te je neravnomjerno raspodijeljeno. Šumovi mogu imati različite izvore kao na primjer fluktuacija fotona u polju zračenja ili raspršivanje zračenja [17].

Artefakti parcijalnog volumena (engl. Partial volume effect) pojavljuju se na mjestima s velikom razlikom u gustoći objekta. Navedeni artefakti se očituju unutar istog voxela na mjestima gdje imamo različite vrijednosti gustoća, te se stoga mora primijeniti osrednjavanje vrijednosti sive skale za taj voxel. Ova vrsta artefakata može se smanjiti povećanjem rezolucije tj. korištenjem tanjih slojeva tijekom skeniranja [17].

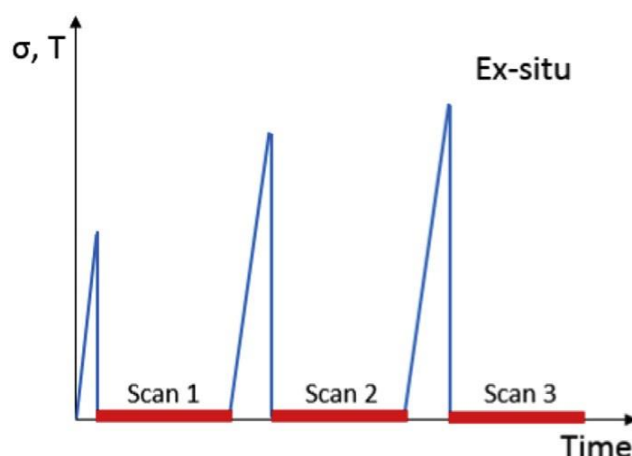
Jedan od važnijih artefakata temeljenog na fizikalnim osnovama je beam hardening efekt. Zrake koje prolaze sredinom skeniranog objekta obuhvaćaju veći dio objekta od zraka koje prolaze rubovima objekta, pa je na zrake koje prolaze sredinom objekta jači utjecaj *beam hardening* efekta. Zbog toga je atenuacija koju očitava detektor različita od idealne koju bi očitao da nema beam hardening efekta [18]. Posljedica tog efekta je stvaranje svijetlih i tamnih pruga između dvaju objekata koji imaju visok stupanj atenuacije (npr. kost i metal). Ova vrsta artefakata može se smanjiti određenim softverima ili primjenom određenih filtera [17].

#### **4.4. Mehanička ispitivanja**

Mehaničkim ispitivanjima na kompozitnim materijalima određuju se osnovna mehanička svojstva kao što su čvrstoća i krutost. Pošto su kompozitni materijali heterogeni vrlo je važno određivanje njihove strukture i promatranje različitih fenomena koji se pojavljuju unutar samog kompozita kod mehaničkih ispitivanja. Ako uzorak nakon opterećivanja moramo rasteretiti i zatim provesti skeniranje tada se govori o *ex-situ* mehaničkim ispitivanjima. Kada se uzorak koji se opterećuje istovremeno i skenira, tada se govori o *in-situ* mehaničkim ispitivanjima. Mehanička ispitivanja još možemo podijeliti i na kontinuirana i isprekidana. U nastavku su opisane karakteristike *in-situ*, *ex-situ* ispitivanja te razlike između isprekidanih i kontinuiranih ispitivanja.

#### 4.4.1. Ex-situ

Ex-situ mehaničkih ispitivanja primjenom CT uređaja su najprirodniji i najlakši način ispitivanja nekog objekta. Predložena metoda zahtjeva da skeniranje bude provedeno tako da je ispitni uzorak opterećen različitim razinama opterećenja. Određivanje 3D volumena promatrane zone interesa dobiva se skeniranjem kada je ispitni uzorak u rasterećenoj konfiguraciji (Slika 19). Kod ovog tipa mehaničkog ispitivanja potrebno je rasteretiti objekt što može utjecati na fenomen kojeg promatramo (npr. pukotine se mogu zatvoriti kod rasterećenja). Nasuprot tome, promjene kao što je nelinearni odziv materijala (tj. plastičnost) ne mijenja se usred rasterećenja objekta. Osim toga, važno je napomenuti da kod ex-situ ispitivanja opterećenje ne mora nužno biti mehaničkog karaktera. Na primjer, može se proučavati lom (tj. pojava mikropukotina ) uslijed ubrzanog isušivanja različitih betonskih uzoraka [21].



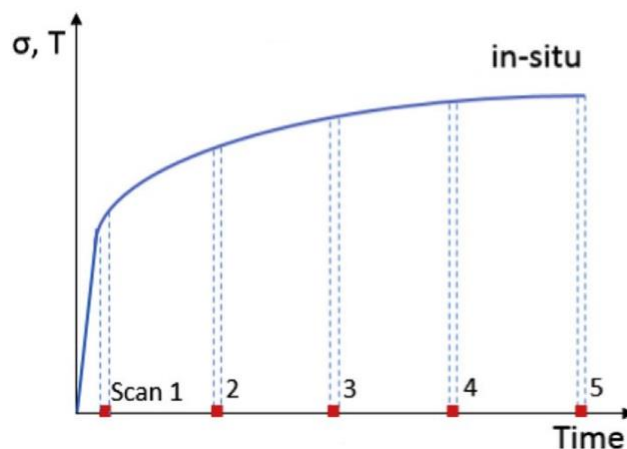
Slika 19. Zabilježavanje 3D volumena kod ex-situ mehaničkih ispitivanja primjenom računalne tomografije.[22].

#### 4.4.2. In-situ

Kod in-situ mehaničkih ispitivanja promatrana zona ispitnog uzorka skenira se tijekom opterećivanja (Slika 20). Ovaj tip eksperimentalnog istraživanja zahtjeva specijalne uređaje za opterećivanje (tj. kidalice za laboratorijski tomograf). Ključni dio in-situ ispitivanja je da uređaj kojim opterećujemo uzorak ne zaklanja ni jednu projekciju X-zraka, budući da su navedene kidalice uobičajeno pozicionirane na rotacijskim stolovima. Posljednja istraživanja u ovom području primjenjuju uređaje koji omogućuju da uzorak bude opterećen, a istovremeno da rotira bez upotrebe rotacijskog stola CT uređaja [21]. Osim toga, danas se razvija sve više uređaja koji mogu na uzorak narinuti opterećenje na vlak, tlak, savijanje te na kratkotrajni zamor. Iako in-situ mehanička ispitivanja imaju mnoge prednosti, kada se radi o



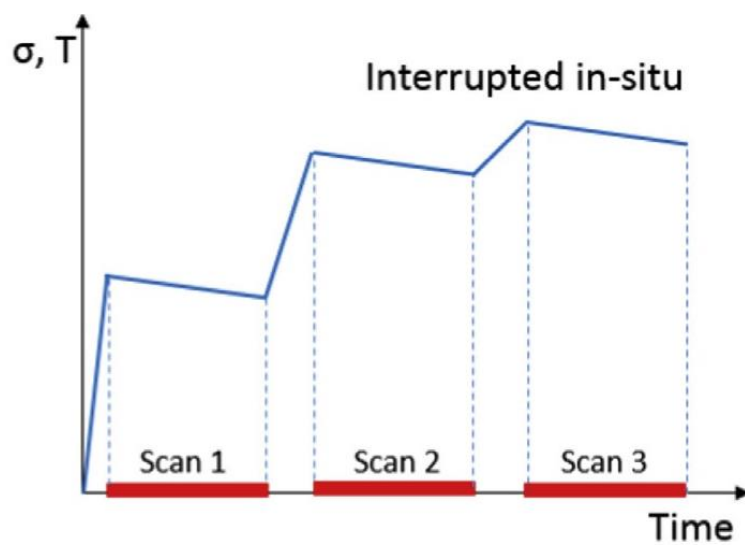
kompleksnijim režimima opterećivanja ili ako ispitivanje traje predugo, ex-situ ispitivanja imaju prednost [22] te se češće provode.



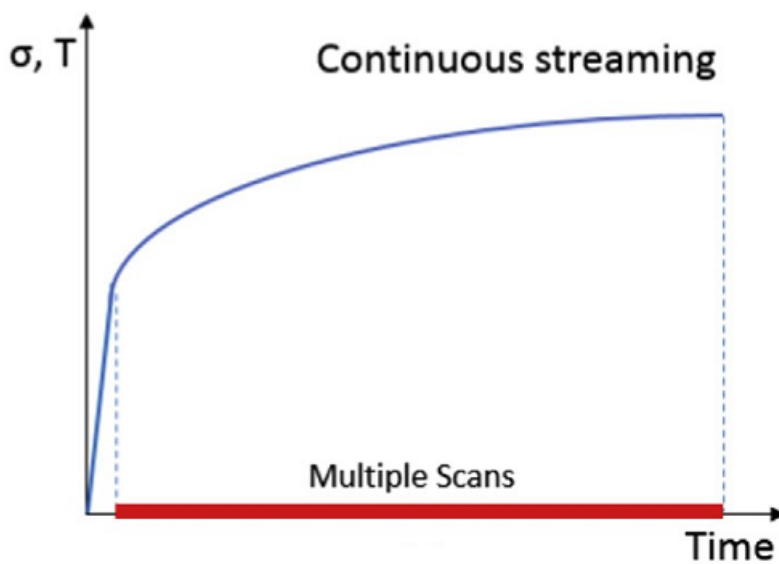
Slika 20. Zabilježavanje 3D volumena kod in-situ mehaničkih ispitivanja primjenom računalne tomografije [22].

#### 4.4.3. Usporedba kontinuiranog i isprekidanog ispitivanja

S obzirom na to da mehanička ispitivanja ne možemo provesti dovoljno brzo ili objekt ispitujemo izvan tomografa kod in-situ i ex-situ ispitivanja najčešće govorimo o isprekidanim ispitivanjima. Opterećenje tijekom jednog skeniranja moramo držati konstantnim, a s obzirom na to da je vrijeme skeniranja relativno dugo, dolazi do relaksacije materijala. Pojava relaksacije može se izbjeći korištenjem kidalice koja ima jako veliku krutost [22]. Ako se promatraju neki fenomeni unutar strukture materijala koji su ovisni o vremenu tada također moramo primijeniti isprekidano ispitivanje kako bi u potpunosti mogli opisati taj fenomen i izbjeći pojavu artefakata. Prikaz isprekidanog ex-situ možemo vidjeti na slika 19, a prikaz isprekidanog in-situ ispitivanja na slika 21. Kod kontinuiranih ispitivanja (Slika 22) ne dolazi do prekidanja mehaničkog testa zbog skeniranja, već se objekt skenira tijekom cijelog mehaničkog ispitivanja. Zbog toga se skraćuje vrijeme skeniranja. Prema vremenu skeniranja računalu tomografiju dijelimo na klasičnu, kod koje skeniranje traje više od 600 sekundi, brzu tomografiju (trajanje skeniranja od 10 do 600 sekundi) i ultra-brzu tomografiju (trajanje skeniranja ispod 10 sekundi). Ultra-brza tomografija najčešće se koristi kod lomljivih objekta koji vrlo brzo pucaju. U tom slučaju skeniranje se mora obaviti u vremenskom periodu od 0.01 do 10 sekundi kako bi limitirali pomake na manje od 1 voxel tijekom skeniranja [23].



Slika 21. Zabilježavanje 3D volumena kod isprekidanog in-situ mehaničkih ispitivanja primjenom računalne tomografije [22].



Slika 22. Zabilježavanje 3D volumena kod kontinuiranog mehaničkog ispitivanja primjenom računalne tomografije [22].

## 5. OPIS DVC ALGORITMA

Jedna od najčešće korištenih tehnika rekonstrukcije slike u eksperimentalnoj mehanici je Digitalna Korelacija Slike. Mjerenje kinematike na cijelom području interesa (ROI) tijekom mehaničkih ispitivanja daje značajne informacije o ponašanju materijala. Nadalje, predložena metoda omogućuje detekciju oštećenja i njegovog rasta tijekom različitih mehaničkih pokusa i povijesti opterećenja. Digitalna Korelacija Volumena odnosno engl. Digital Volume Correlation (DVC) koristi se za rekonstruiranje volumena skeniranog objekta. Nadovezuje se na globalnu 2D Digitalnu Korelaciju Slike (engl. DIC). Globalni pristup temelji se na diskretizaciji volumena podskupovima voxela. Mjerne točke se kod globalnog pristupa nalaze u vrhovima elemenata. Najčešće se koriste tetraedarski i prizmatični elementi. Volumen skeniranog objekta predstavljen je s diskretnom skalarnom matricom prostornih koordinata  $\mathbf{x}$ . Raspodjela vrijednosti sive skale na referentnom i deformiranom volumenu označava se s  $f$  i  $g$ . Vrijednosti sive skale dobivene su na temelju jačine X-zraka koje stižu do detektora zračenja. Princip DVC-a temelji se na očuvanju intenziteta sive skale na oba volumena u ovisnosti o poziciji voxela  $\mathbf{x}$ :

$$f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})) . \quad (4)$$

U jednadžbi (4)  $\mathbf{u}$  predstavlja traženo polje pomaka. Budući da se u stvarnosti nikad ne dobiva potpuno poklapanje između referentnog i deformiranog volumena, kod globalnog pristupa potrebno je minimizirati reziduale, definirane jednadžbom (5), između referentnog i deformiranog volumena čime se smanjuje pogreška rezultata:

$$\rho(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})) . \quad (5)$$

Minimizacija sume kvadrata razlike reziduala provodi se nad cijelim područjem interesa i zapisuje se na sljedeći način:

$$\phi_c^2 = \sum_{ROI} \rho^2(\mathbf{x}) = \int_{ROI} (f(\mathbf{x}) - g[\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})])^2 dV. \quad (6)$$

Polje pomaka interpolira se pomoću kinematičkih osnova koje se sastoje od funkcija oblika  $\boldsymbol{\psi}_n(\mathbf{x})$  i pripadajućih stupnjeva slobode  $u_n$ :

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_n u_n \cdot \boldsymbol{\psi}_n(\mathbf{x}). \quad (7)$$

Nad cijelim područjem dostupnih polja, posebno su zanimljive funkcije oblika konačnih elemenata zbog toga što povezuju mjerenje pomaka i numeričke modele. Za eksperiment u ovom radu odabrana je formulacija bazirana na C8 konačnim elementima s prostornim funkcijama oblika. Interpolacijom polja pomaka, problem minimiziranja reziduala sveo se na minimiziranje u odnosu na stupnjeve slobode gibanja čvorova  $u_p$ . Čvorovi kojima su pridruženi stupnjevi slobode gibanja nalaze se u vrhovima elemenata. Newtonovom metodom izbjegava se nelinearnost problema, a pretpostavkom o malim prirastima pomaka i određenim korekcijama dobiva se sustav čijim se iterativnim rješavanjem dobije traženo polje pomaka:

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

Matrica  $[\mathbf{M}]$  predstavlja DVC matricu koja sadržava gradijente sive skale i funkcije oblika koje interpoliraju polje pomaka te se definira kao:

$$M_{ij} = \sum_{ROI} (\nabla f \cdot \boldsymbol{\psi}_i)(\mathbf{x})(\nabla f \cdot \boldsymbol{\psi}_j)(\mathbf{x}). \quad (9)$$

Vektor  $\{\mathbf{b}\}$  definira se kao:

$$b_i = \sum_{ROI} (f(\mathbf{x}) - \tilde{g}(\mathbf{x}))(\nabla f \cdot \boldsymbol{\psi}_i)(\mathbf{x}). \quad (10)$$

U izrazu (10) može se vidjeti da vektor  $\{\mathbf{b}\}$  sadrži razliku između vrijednosti sivih skala referentnog volumena  $f$  i deformiranog volumena nad kojim je izvršena korekcija ( $\tilde{g}$ ). Polje  $\tilde{g}$  se tijekom svake iteracije mijenja u ovisnosti o iznosu pomaka  $\mathbf{u}$ :

$$\tilde{g} = g(\mathbf{x} + \tilde{u}(\mathbf{x})). \quad (11)$$

Matrica  $[\mathbf{M}]$  tijekom svih iteracija je konstantna, dok se u svakoj iteraciji mijenja samo vektor  $\{\mathbf{b}\}$ . Iterativni postupak će trajati sve dok se ne postigne konvergencija, odnosno dok korekcija pomaka  $\{\mathbf{du}\}$  ne dostigne dovoljnu malu vrijednost. U ovom obliku polje pomaka se nadalje regularizira u smislu zahtjeva na kontinuitet koji je prethodno pretpostavljen na temelju kinematičkih rješenja. Osim toga dodatno mehaničko znanje može biti dodano kako bi se poboljšala konvergencija [24]. Ova vrsta regularizacije naziva se mehanička regularizacija, međutim nije primijenjena u slučaju ispitivanja u ovom radu.

Izraz (8) koji se dobiva minimizacijom reziduala analogan je jednadžbi konačnog elementa:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{b}, \quad (12)$$

jedino se razlikuje sadržaj matrice krutosti  $\mathbf{K}$  i vektora sila  $\mathbf{b}$ . Matrica krutosti konačnog elementa zamijenjena je matricom koja sadrži gradijente sive skale i funkcije oblika koje opisuju polje pomaka. Vektor sila iz metode konačnih elemenata sada je vektor koji sadrži razliku između vrijednosti sive skale referentnog volumena  $f$  i deformiranog volumena nad kojim je izvršena korekcija. Matrica  $\mathbf{M}$  je simetrična, pojasna i pozitivno definitna matrica kao i matrica krutosti osnovnog pravokutnog konačnog elementa. Vektor  $\mathbf{du}$  sadrži pripadajuće stupnjeve slobode gibanja polja pomaka kao i u metodi konačnih elemenata.

Nadalje se na implementaciju konačnim elementima primjenjuje analiza rezolucije. Prema definiciji rezolucija je mogućnost razdvajanja/opisivanja najmanjih promjena veličine koja se mjeri, a koje uređaj kojim se mjeri može registrirati [25]. Svakom unutarnjem čvoru pripada 8 elemenata tako da funkcija oblika za zadani unutarnji čvor obuhvaća 8 elemenata. U tom slučaju je prostorna rezolucija jednaka u svakom smjeru i iznosi  $2l$ . Stoga je varijacija podijeljena s 8, a standardna rezolucija pomaka s  $2\sqrt{2}$ , kada se uspoređuje s vrijednošću jednog C8 elementa. Međutim, ovaj rezultat ne uzima u obzir dodatni zahtjev za

kontinuitetom polja pomaka. Za svaki unutarnji i vanjski čvor utvrđeno je da, uz zahtjev za kontinuitetom polja pomaka, standardna rezolucija pomaka glasi:

$$\sigma_{u_i} \approx 2.28 \frac{\sqrt{2}\sigma p}{\Gamma_f l^{3/2}}, \quad (13)$$

gdje možemo vidjeti da je član  $\sigma^2$  varijacija bijelog Gaussovog šuma,  $p$  je fizička veličina jednog voxela, a  $\Gamma_f^2$  srednji kvadratni gradijent slike. S obzirom na to da je broj poveznica svakog čvora mreže različit i također odgovarajuća prostorna rezolucija, standardna rezolucija pomaka  $\sigma_{u_i}$  nije uniformna na cijelom promatranom području [26]. Zato se za srednju standardnu rezoluciju pomaka uzima relacija:

$$\sigma_{\bar{u}} \approx 0.50 \frac{\sqrt{2}\sigma p}{\Gamma_f l^{3/2}}. \quad (14)$$

Kada se dobije standardna rezolucija pomaka, iz nje se dalje dobiva i standardna rezolucija deformacija:

$$\sigma_\varepsilon = B \cdot \frac{\sigma_{\bar{u}}}{l}, \quad (15)$$

gdje je  $B$  bezdimenzijska konstanta, koja ovisi o načinu dobivanja polja deformacija iz polja pomaka, a  $\sigma_{\bar{u}}$  standardna rezolucija deformacija.

## 6. OPIS EKSPERIMENTA

Eksperiment proveden u ovom radu sastoji se od skeniranja uzorka za statičko vlačno ispitivanje izrađenog od kompozitne ploče prikazane na slika 7. Kompozit od kojeg je izrađena kvadratna ploča je epoksidna smola s mat staklenim vlaknima. Postupak izrade kompozitne ploče nalazi se u poglavlju 2.2. Uzorak za vlačno ispitivanje ima radijus 48 mm i ligament širine 6 mm (vidi Slika 23). Eksperiment je izveden na industrijskom  $\mu$ -tomografu (NIKON XT H 225), prikazanom na slika 24, sa sljedećim parametrima:

- jakost struje= 100  $\mu$ A i
- napon zračenja= 120 kV.



Slika 23. Uzorak za vlačno ispitivanje.

Skeniranje uzorka za vlačno ispitivanje provedeno je uzastopno dva puta kada na odabrani objekt nije narinuto opterećenje. Tijekom obrade uslikanih 3D volumena odabrana je promatrana zona na sredini (tj. najtanji dio) vlačnog uzorka. Zbog ograničenja prizmatičnih konačnih elemenata (C8 elemenata) nisu obuhvaćeni rubovi uzorka. Cilj je bio odrediti podatke o standardnoj rezoluciji pomaka i deformacija, koje su vrlo bitne za procjenu odziva materijala uslijed mehaničkog opterećenja.

Osim toga, 3D sken zabilježen laboratorijskim tomografom vrlo je važan i za dobivanje prikaza same strukture materijala od kojeg je uzorak izrađen te uvida u polja pomaka i deformacija.



Slika 24. Industrijski CT uređaj korišten za eksperiment [27].

Fizička veličina voxela iznosila je  $5.5 \mu\text{m}$ . Početna veličina voxela ovisi o pojačanju  $M$ , koje se definira kao:

$$M = \frac{FDD}{FOD}, \quad (16)$$

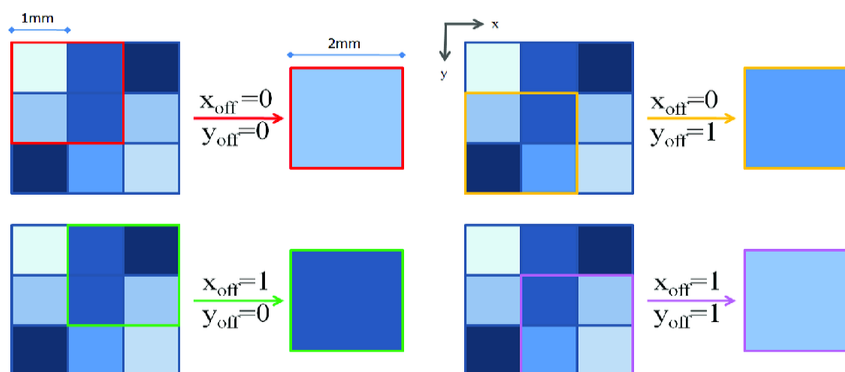
gdje je FDD udaljenost između fokusa i detektora, a FOD udaljenost između fokusa i objekta. Također ovisi i o udaljenosti pixela na detektoru  $d_{\text{det}}$ . Jednadžba (15) prikazuje kako se određuje početna vrijednost voxela uz pomoć prethodno opisanih veličina  $M$  i  $d_{\text{det}}$  [1].

$$VS = \frac{d_{\text{det}}}{M}. \quad (17)$$

Za svaki sken rotacijom od  $360^\circ$  zabilježeno je 800 radiografa, a ukupno trajanje skeniranja jednog 3D volumena iznosilo je 40 min. Kako bi se smanjio šum koji se javlja uslijed zabilježavanja projekcija promatranog volumena, provedeno je grupiranje voxela (tj. grupa od  $2 \times 2 \times 2$  voxela zamijenjena je jednim *super* voxelom s vrijednošću sive skale koja odgovara interpoliranoj vrijednosti odgovarajuće grupe voxela - *agregacija voxela*). Predloženim



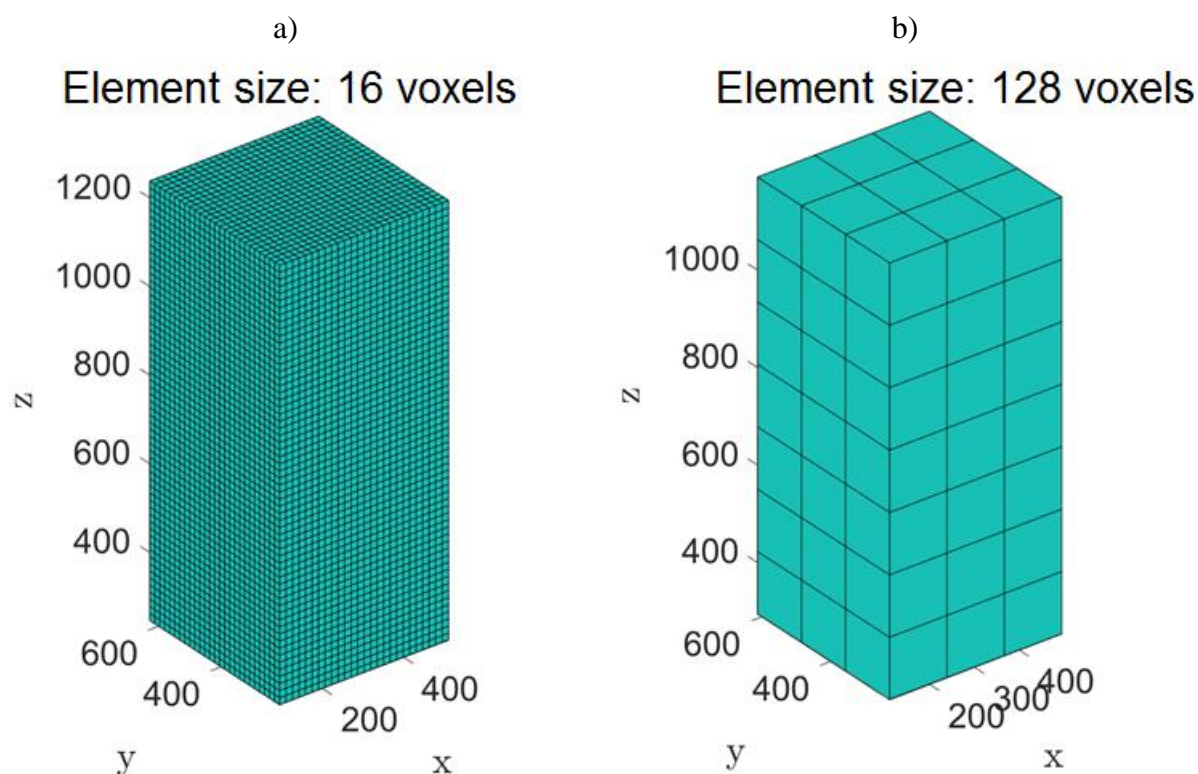
postupkom dobivena je fizikalna veličina voxela od  $10.9 \mu\text{m}$  i promatrani volumen od  $1447 \times 1446 \times 1789$  voxela. Vrijednost sive skale je u rasponu od  $0-2^8$ . Primjer grupiranja pixela/voxela u jedan *super pixel/voxel* prikazan je na slika 25.



Slika 25. Grupiranje pixela kojim se iz veličine  $1 \times 1 \text{ mm}$  dobiva veličina  $2 \times 2 \text{ mm}$  [28].

## 7. REZULTATI CT SKENIRANJA

Provedenim skeniranjem uzorka za statičko vlačno ispitivanje dobiveni su 3D volumeni promatrane zone interesa koji su zatim obrađeni globalnim DVC algoritmom C8 Correli. Na zabilježenim zonama interesa izmjerena su polja pomaka i deformacija. Osim toga, omogućen je uvid u mikrostrukturu odabranog kompozita izrađenog od epoksidne smole ojačane mat staklenim vlaknima. Pomoću izmjerenih polja pomaka i deformacija određene su standardne rezolucije pomaka i deformacija. Registrirani 3D volumeni obrađeni su predloženim C8 Correli algoritmom primjenom različitih veličina prizmatičnih konačnih elemenata. Veličine su redom iznosile: 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128 voxela. Primjenom različitih veličina elemenata omogućena je analiza osjetljivosti standardne rezolucije pomaka i deformacija ovisno o diskretizaciji promatranog volumena (Slika 26). U nastavku ovog rada bit će prikazana polja pomaka i deformacija za mjerenja provedena s C8 elementima veličine 16 i 128 voxela, budući da su to dva najekstremnija slučaja kod kojih je će razlika izmjerenih polja biti najveća.



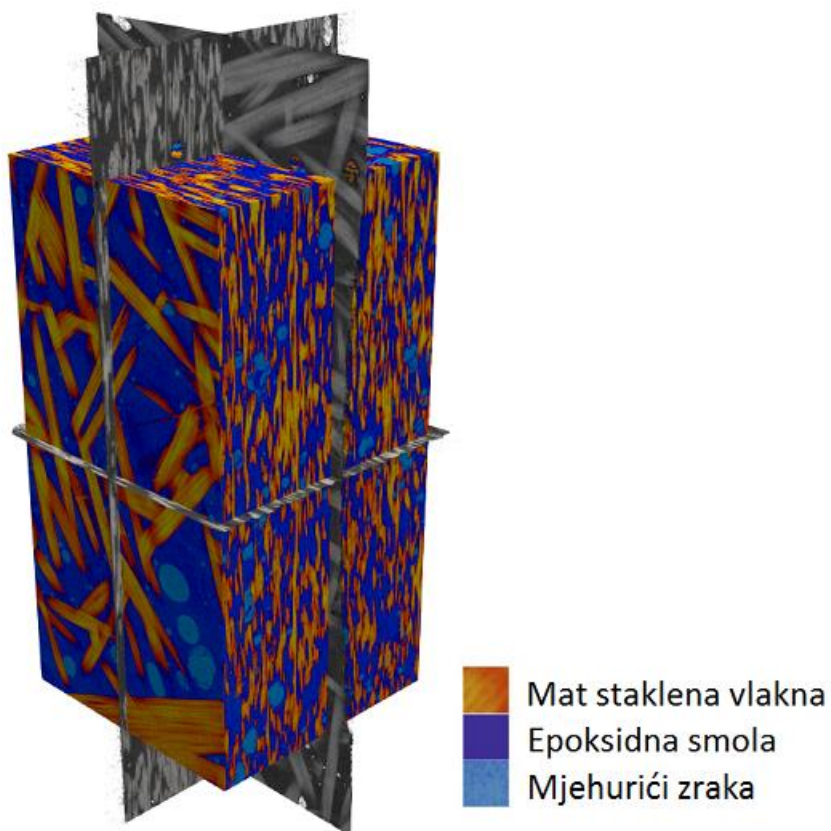
Slika 26. Usporedba diskretizacije s veličinom elementa od a) 16 voxela i b) 128 voxela.

## 7.1. Mikrostruktura

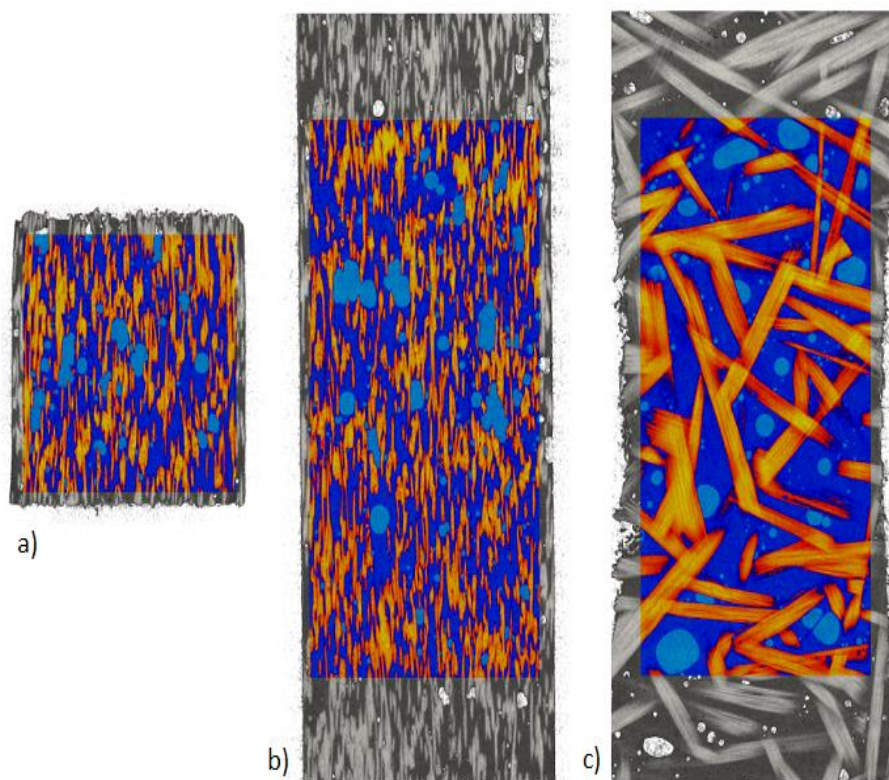
Nakon skeniranja odabranog ispitnog uzorka laboratorijskim tomografom, provedena je rekonstrukcija registriranih projekcija s čime je definiran 3D volumen na kojem će biti primijenjena DVC tehnika s ciljem određivanja polja pomaka i deformacija. Rekonstruirani 3D volumeni mogu se smatrati prvim rezultatom tomografskog ispitivanja budući da je dobiven uvid u geometriju ispitivanog uzorka kao i prikaz mikrostrukture ispitnog uzorka. S obzirom na to da su kod obrade podataka bili korišteni prizmatični konačni elementi, a ispitivani uzorak (Slika 23) ima zaobljenu geometriju rubova koju takvi elementi ne mogu opisati, promatran je samo unutrašnji dio ispitivanog uzorka pravokutnog oblika koji nazivamo zonom interesa (ROI).

Na slika 27 prikazana je mikrostruktura područja interesa koja je odabrana s obzirom na prethodno navedena ograničenja. Zaobljena geometrija vlačnog ispitnog uzorka definirana je s tri ravnine koje se smatraju glavnim osima ispitnog uzorka. Mikrostruktura promatrane zone interesa sastoji se od stohastički raspoređenih mat staklenih vlakana koja se nalaze u epoksidnoj smoli. Osim toga, iz 3D volumena mikrostrukture otkrivena je poroznost unutar ispitnog uzorka. Nepoželjni zračni mjehurići, različitih veličina, nepravilno su raspodijeljeni unutar osnovnog materijala, a nastali su uslijed izrade kompozita, budući da je proizvodni postupak izveden bez vakuuma.

Uz rekonstruirani 3D volumen i uvid u raspodjelu konstituenata po volumenu, radi zornijeg prikaza na slika 28 može se vidjeti mikrostruktura u ravninama  $x$ - $y$ ,  $x$ - $z$  i  $y$ - $z$ . U svim ravninama vidljivo je da odabrana zona interesa ne obuhvaća zaobljene rubove ispitnog uzorka, već je odabrana zona odmaknuta od samog ruba. Razlog tome je što odabrani konačni elementi, kao što je već ranije spomenuto, ne mogu opisati predloženu geometriju. Kada bi kod primjene DVC algoritma bili odabrani neki drugi konačni elementi koji mogu opisati zaobljenu geometriju (npr. tetraedarski), tada bi zona interesa bila odabrana tako da obuhvaća i rubove ispitnog uzorka. Osim granica zone interesa, prikazana je i raspodjela pojedinih konstituenata. Kao i kod 3D prikaza mikrostrukture odabrane zone interesa definirana je sa stohastički raspoređenim mat staklenim vlaknima koja se nalaze u matrici od epoksidne smole. Također je zabilježena i poroznost nastala uslijed proizvodnog postupka.






Slika 27. 3D mikrostruktura ispitivanog uzorka.

Slika 28. Prikaz mikrostrukture u ravninama a)  $x$ - $y$ , b)  $x$ - $z$  i c)  $y$ - $z$ .

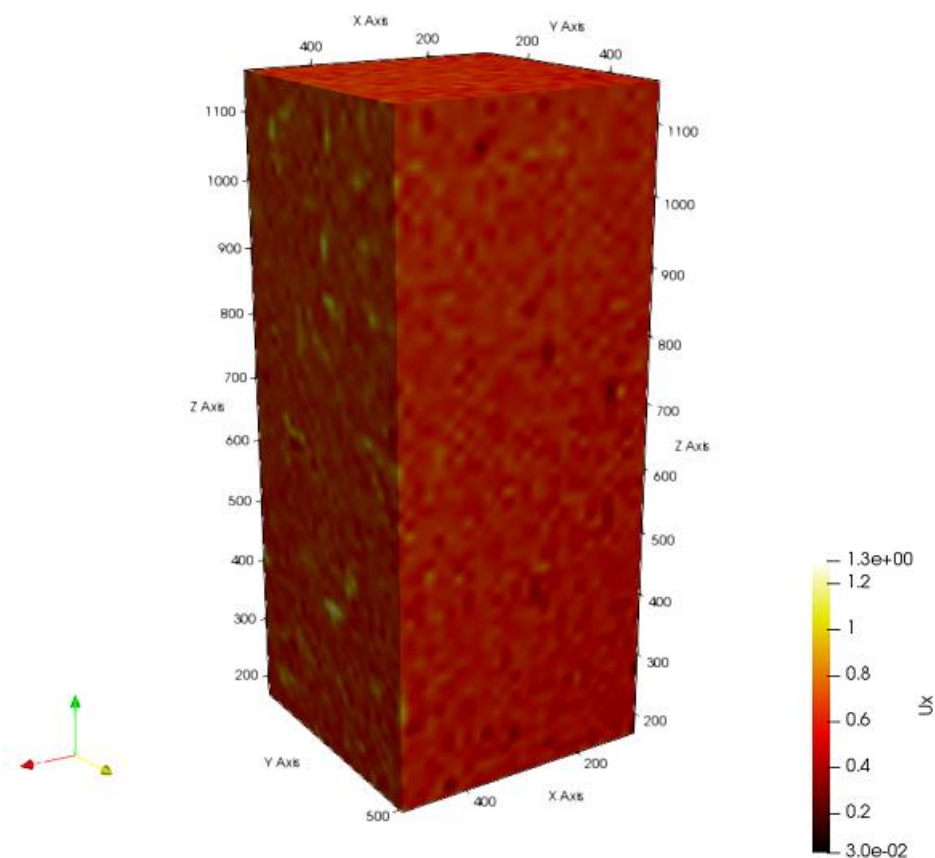
Rekonstrukcijom 3D volumena osim raspodjele pojedinih konstituenata i prikaza mikrostrukture, dobiveni su i volumni udjeli pojedinih konstituenata u odabranoj zoni interesa pravokutnog oblika (vidi Tablica 5) primjenom *ImageJ* programskog paketa za analizu slika. Zabilježeno je da najveći volumni udio ima epoksidna smola koja služi kao matrica i ona zauzima 51,03% volumena. Mat staklena vlakna koja su raspršena unutar matrice od epoksidne smole zauzimaju 41,77% promatranog volumena. Mjehurići zraka, koje se u pravilu želi izbjeći, zauzimaju ostatak volumena od 7,2%.

Tablica 5. Udio konstituenata u promatranom području

| KONSTITUENT   | UDIO (%) |
|---|----------|
|  MAT STAKLENA VLAKNA | 41,77    |
|  EPOKSIDNA SMOLA     | 51,03    |
|  MJEHURIĆI ZRAKA     | 7,2      |

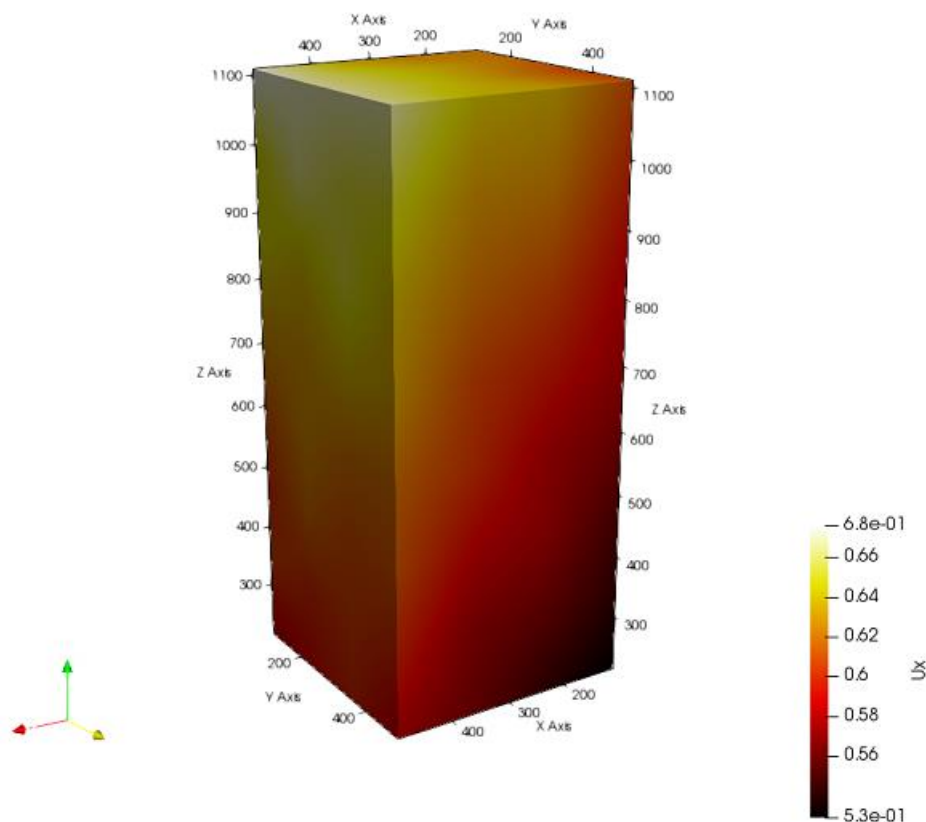
## 7.2. Izmjerena polja pomaka

Slika 29 prikazuje polje pomaka u  $x$  smjeru promatranog područja interesa koje se nalazi na sredini vlačnog ispitnog uzorka (tj. najtanji dio ispitnog uzorka). U ovom slučaju polje pomaka izračunato je mrežom prizmatičnih konačnih elemenata veličine 16 voxela. Iako ispitni uzorak nije bio opterećen može se vidjeti kako polje pomaka nije uniformno te nije jednako nuli u svim mjerenim čvorovima. Na izmjerenom 3D polju pomaka zabilježeni su stohastički lokalizacijski efekti uslijed različitih šumova tijekom registriranja projekcija mjerenog područja. Iz izmjerene polje pomaka vidljivo je kako većina promatranog volumena registrira pomake od 0.6 voxela, dok maksimalni raspon vrijednosti pomaka iznosi od 0.03 do 1.3 voxela. Osim toga, može se primijetiti da za najmanju veličinu elemenata (tj. veličinu elementa od 16 voxela) u promatranom području imamo velike razlike između izmjerenih lokalnih fluktuacija.



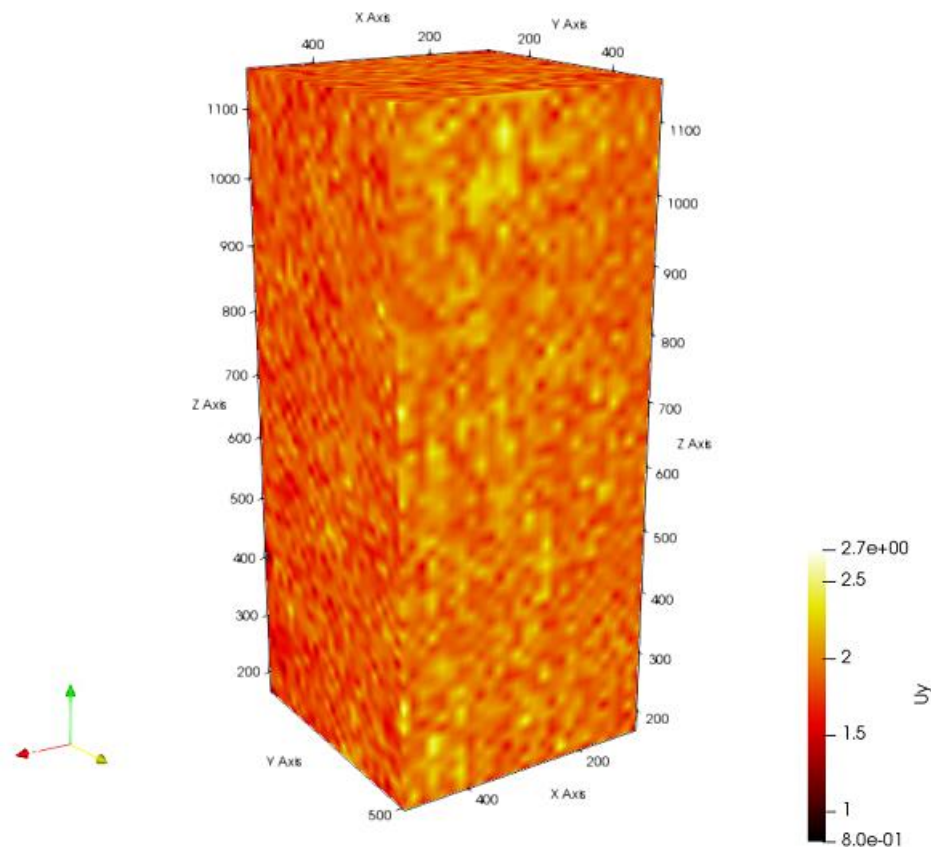
Slika 29. Polje pomaka u  $x$  smjeru za elemente veličine 16 voxela.

Polje pomaka u  $x$  smjeru promatranog područja interesa prikazano na slika 30 izračunato je mrežom prizmatičnih konačnih elemenata veličine 128 voxela. Kao i kod polja pomaka dobivenog na mreži konačnih elemenata veličine 16 voxela dobiva se neuniformno polje pomaka kod kojeg su registrirane vrijednosti veće od nule iako je uzorak neopterećen. Na izmjerenom polju pomaka kao i u prethodnom slučaju zabilježeni su lokalizacijski efekti uslijed različitih šumova tijekom registriranja projekcija mjenog područja, a raspon vrijednosti pomaka u ovom slučaju iznosi od 0.53 do 0.68 voxela. U usporedbi s poljem pomaka u  $x$  smjeru dobivenim mrežom s manjim konačnim elementima može se vidjeti da su puno manje razlike između izmjerenih lokalnih fluktuacija, odnosno polje pomaka na mreži s većim elementima izgleda kao da je interpolirano (blaži su prijelazi između izmjerenih vrijednosti polja pomaka). Može se zaključiti da je kod korištenja mreže s većim konačnim elementima puno manji utjecaj šumova i dobivaju se puno manje razlike između lokalnih fluktuacija.



Slika 30. Polje pomaka u  $x$  smjeru za elemente veličine 128 voxela.

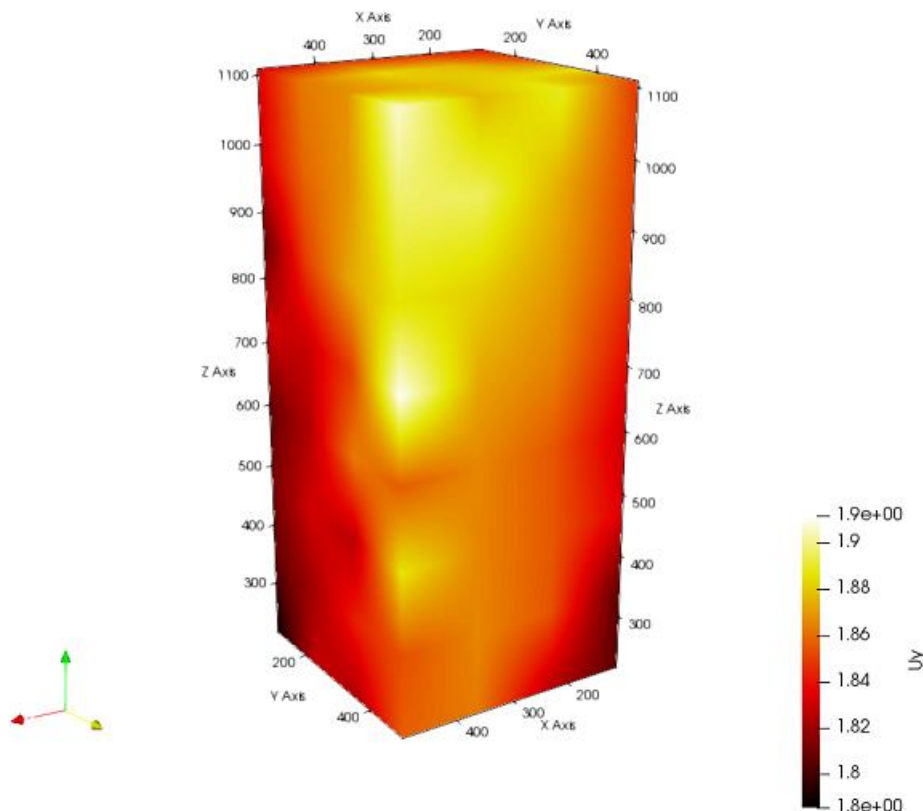
Mjerenje polja pomaka također je provedeno u  $y$  smjeru. Na slika 31 prikazano je polje pomaka u  $y$  smjeru promatranog područja interesa dobiveno mrežom prizmatičnih konačnih elemenata veličine 16 voxela. Vidljivo je da nije dobiveno uniformno polje pomaka i vrijednosti nisu jednake nuli kao ni u prethodnim slučajevima kada su izmjerena polja pomaka u  $x$  smjeru na mreži konačnih elemenata veličine 16 i 128 voxela. Uslijed šumova tijekom registriranja projekcija promatranog volumena zabilježeni su lokalizacijski efekti. Vrijednosti pomaka su u rasponu od 0.8 do 2.7 što je značajno više u usporedbi s pomakom u  $x$  smjeru na sitnoj mreži konačnih elemenata (veličina elementa 16 voxela). Većina promatranog područja bilježi pomake od 2 voxela, međutim vidljive su velike razlike između izmjerenih lokalnih fluktuacija. S obzirom na to da su izmjerena polja pomaka u  $x$  smjeru puno manja nego ona izmjerena u  $y$  smjeru te da je puno manja razlika između lokalnih fluktuacija, može se zaključiti da je u  $y$  smjeru puno veći utjecaj šumova koji utječu na kvalitetu dobivenih rezultata.



Slika 31. Polje pomaka u y smjeru za elemente veličine 16 voxela.

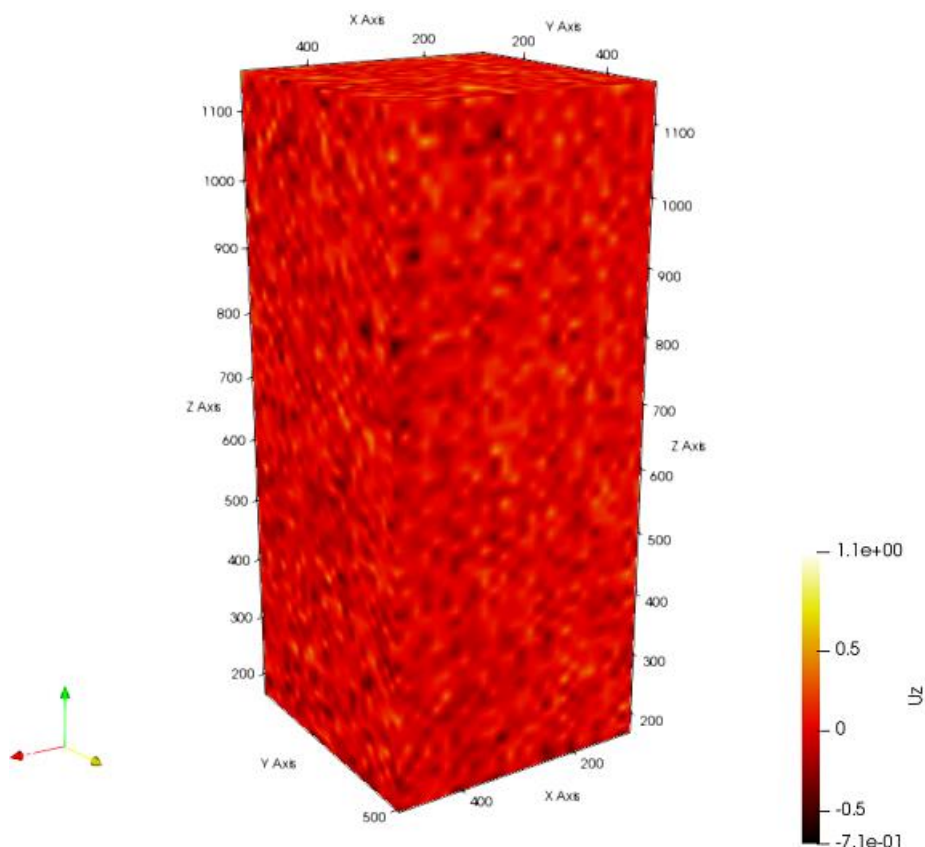
Kako bi se pokazao utjecaj veličine elementa na izmjerena polja pomaka u y smjeru, osim mreže s veličinom prizmatičnih konačnih elemenata od 16 voxela, korišteni su i elementi veličine 128 voxela (Slika 32). Iz dobivenih rezultata vidljivo je da su izmjereni manji pomaci nego na mreži s konačnim elementima 16 voxela. Raspon vrijednosti izmjerenih pomaka kod analize s elementima veličine 128 voxela je od 1.8 do 1.9 voxela. U usporedbi s izmjerenim poljem pomaka na finijoj mreži, u ovom slučaju dobivene su i puno manje razlike u lokalnim fluktuacijama zbog čega polje pomaka izgleda kao da je interpolirano. Može se zaključiti da je, kao i kod mjerenja pomaka u x smjeru, za veću veličinu konačnih elemenata manji utjecaj šumova nastalih uslijed skeniranja ispitnog uzorka. Izmjereni pomaci na grubljoj mreži (veličina elementa 128 voxela) manji su nego pomaci izmjereni na finijoj mreži, ali su puno veći od vrijednosti pomaka dobivenih u x smjeru. Iz toga se može zaključiti da je općenito u y smjeru puno veći utjecaj šumova na kvalitetu dobivenih rezultata što je već spomenuto i kod objašnjenja prethodne slike (Slika 31).





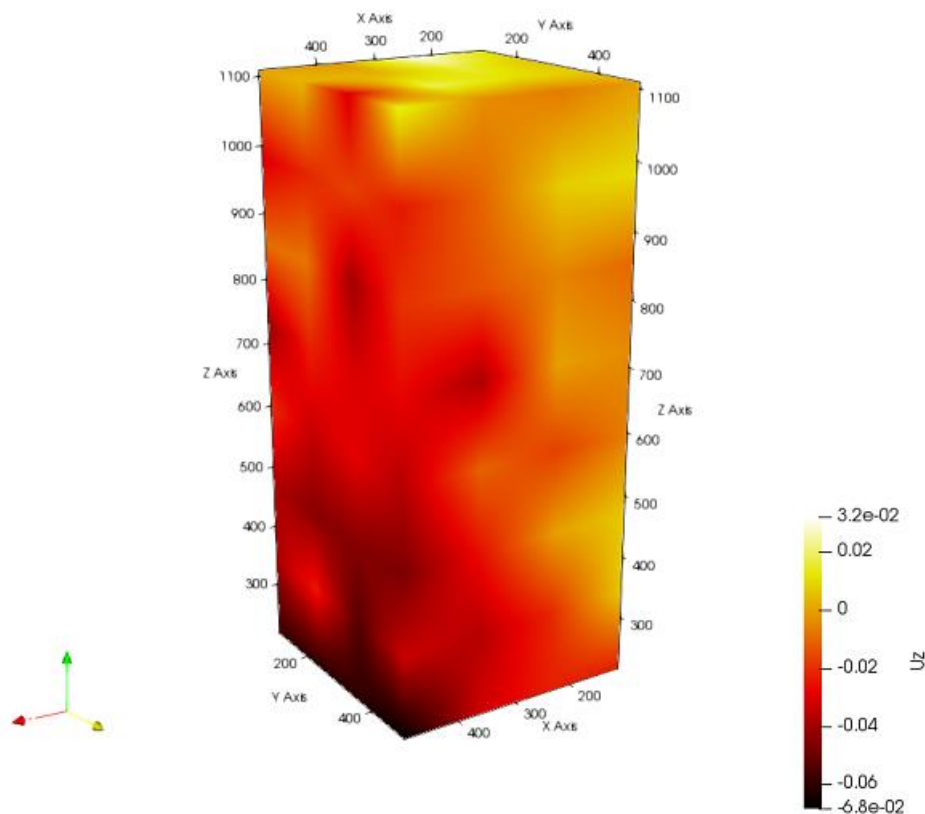
Slika 32. Polje pomaka u y smjeru za elemente veličine 128 voxela.

Osim polja pomaka u  $x$  i  $y$  smjeru, izmjerena su i polja pomaka promatranog područja interesa u  $z$  smjeru. Prvo su korišteni prizmatični konačni elementi veličine 16 voxela (Slika 33). Dobiveno polje pomaka nije uniformno te iako je uzorak tijekom skeniranja bio neopterećen u pojedinim mjerenim čvorovima dobivaju se pomaci različiti od nule. Kao i u prethodnim slučajevima na 3D polju pomaka zabilježeni su stohastički lokalizacijski efekti koje uzrokuju različiti šumovi tijekom skeniranja samog objekta (uzorak za vlačno ispitivanje). Maksimalni raspon vrijednosti izmjerenih pomaka je od  $-0.71$  do  $1.1$  voxel. Može se primijetiti da su kod korištenja elementa veličine 16 voxela dobivene velike razlike između izmjerenih lokalnih fluktuacija na temelju čega se može zaključiti da je velik utjecaj šumova na manju veličinu elementa.



Slika 33. Polje pomaka u  $z$  smjeru za elemente veličine 16 voxela.

Nadalje, polje pomaka u  $z$  smjeru promatranog područja interesa izračunato je i mrežom prizmatičnih konačnih elemenata veličine 128 voxela (Slika 34). Iako ispitni uzorak nije bio opterećen i kod ove veličine elemenata može se vidjeti kako polje pomaka nije uniformno te nije jednako nuli u svim mjerenim čvorovima. Na promatranom području zabilježeni su lokalizacijski efekti uslijed različitih šumova tijekom registriranja projekcija mjerenog područja. Vidljivo je kako većina promatranog volumena registrira pomake od 0.02 voxela, dok maksimalni raspon vrijednosti pomaka iznosi od -0.068 do 0.032 voxela. Osim toga, može se primijetiti da za najveću veličinu elemenata (tj. veličinu elementa od 128 voxela) u promatranom području imamo male razlike između izmjerenih lokalnih fluktuacija pa tako su blaži prijelazi u vrijednostima polja pomaka u  $z$  smjeru. Korištenjem većih elemenata u  $z$  smjeru dobivaju se manji pomaci. Registrirano je da se isto kao i kod  $x$  i  $y$  smjera bolji rezultati dobivaju na mrežama s većim konačnim elementima pa se može zaključiti da je i u ovom slučaju manji utjecaj šumova na veće konačne elemente.



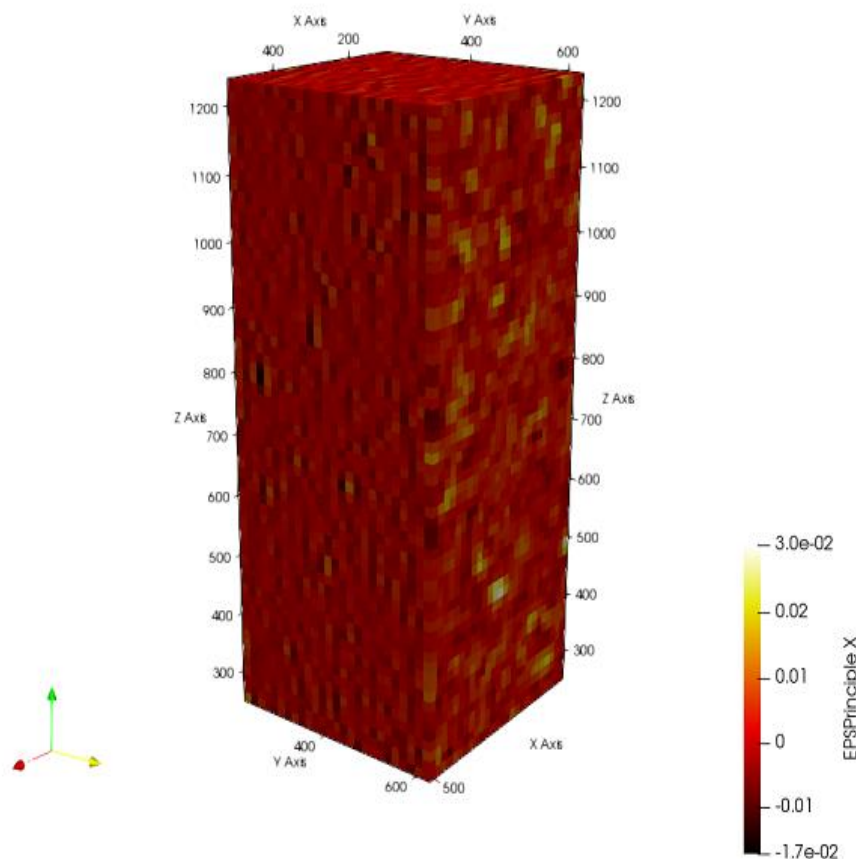
Slika 34. Polje pomaka u z smjeru za elemente veličine 128 voxela.

### 7.3. Izmjerena polja deformacija

Polja deformacija dobivaju se iz izmjerenih polja pomaka. S obzirom na to da je ispitni uzorak skeniran u neopterećenom stanju, deformacije bi trebale biti uniformne, odnosno iznos deformacija u svakom mjerenom čvoru promatranog volumena bi trebao biti jednak nuli. Određivanje polja deformacije neopterećenog ispitnog uzorka vrlo je bitno za daljnja mehanička ispitivanja kako bi mogli odrediti koje deformacije su uzrokovane šumovima tj. mjernim nesigurnostima uslijed registriranja projekcija mjerenog područja, a koje deformacije se javljaju uslijed mehaničkog opterećenja, tj. deformacije koje su mehaničke prirode.

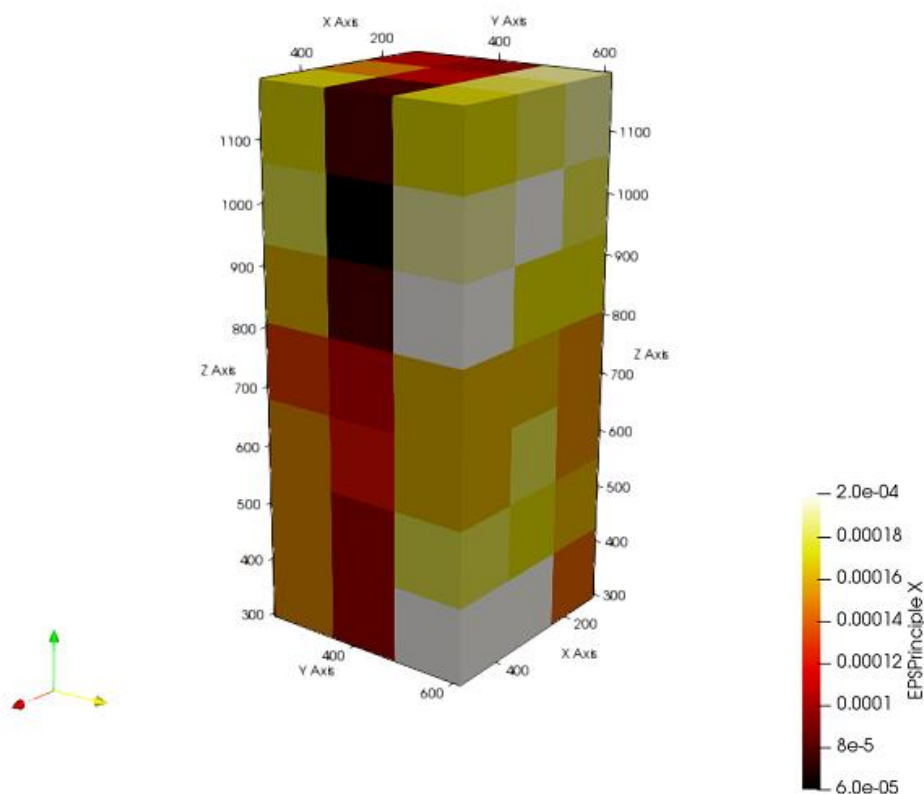
Polje deformacija u smjeru osi  $x$  na mreži konačnih elemenata veličine 16 voxela prikazano je na slika 35. Može se vidjeti da kao i kod prethodno izmjerenih polja pomaka, polje deformacija također nije jednako nuli po cijelom području interesa iako je ispitivanje provedeno u neopterećenom stanju. U promatranom volumenu zabilježene su lokalne fluktuacije, nastale uslijed različitih šumova kod skeniranja, među kojima je velika razlika u vrijednostima pa polje deformacija nema blage prijelaze između zabilježenih vrijednosti.

Maksimalni raspon vrijednosti deformacija za ove parametre DVC analize iznosi od -0.017 do 0.03.



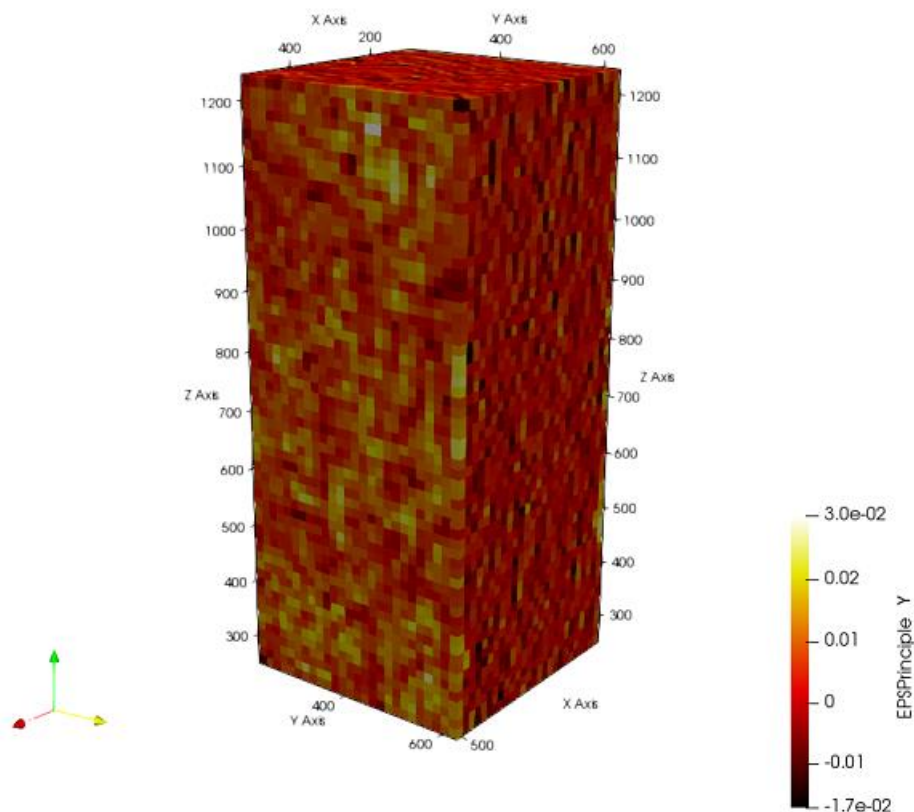
Slika 35. Polje deformacija u  $x$  smjeru za elemente veličine 16 voxela.

Deformacije u  $x$  smjeru također su izračunate korištenjem prizmatičnih konačnih elemenata veličine 128 voxela (Slika 36). Izračunate vrijednosti u ovom slučaju prikazane su po konačnom elementu tako da je svakom elementu dodijeljena uniformna vrijednost deformacije. Vidljivo je da su zabilježene znatno manje vrijednosti deformacija nego u prethodnom slučaju s veličinom elementa od 16 voxela. Maksimalni raspon vrijednosti deformacija je od 0.00006 do 0.0002. Kod većih konačnih elemenata tj. na grubljoj mreži puno su manje razlike između lokalnih fluktuacija i zbog toga je puno blaži prijelaz nego kod finije mreže. Uzrok tome je manji utjecaj šumova na veće konačne elemente kao što je pokazano i na izmjeranim poljima pomaka u  $x$  smjeru.



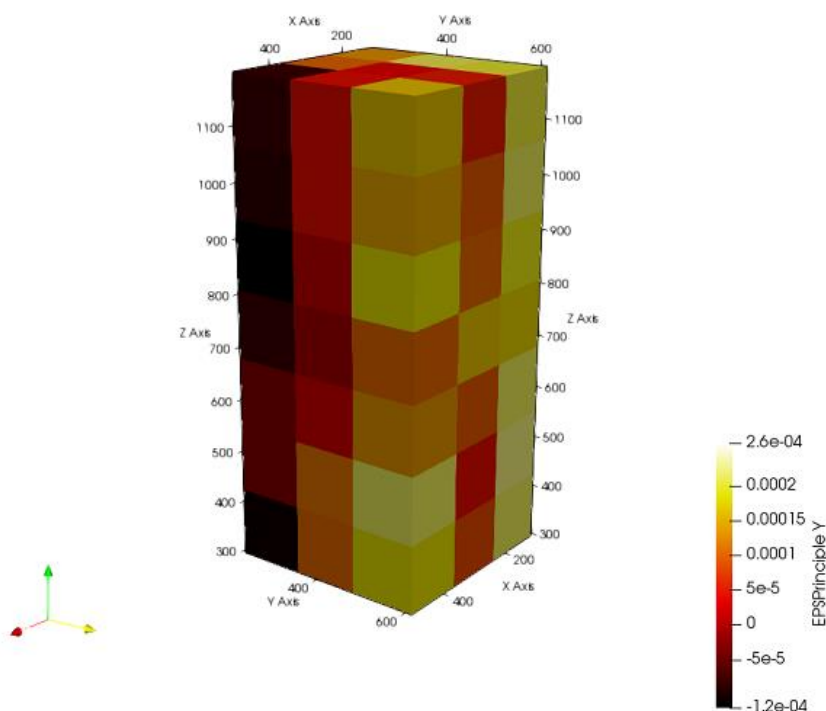
Slika 36. Polje deformacija u  $x$  smjeru za elemente veličine 128 voxela.

Slika 37 prikazuje polje deformacija u  $y$  smjeru promatranog volumena dobiveno na mreži prizmatičnih konačnih elemenata veličine 16 voxela. Kao i kod prethodno dobivenih polja deformacija odnosno pomaka i u ovom slučaju polje deformacija bilježi vrijednosti koje su u većini čvorova različite od nule. Registrirane su velike razlike između izmjerenih lokalnih fluktuacija kao i kod deformacija izmjerenih na finijoj mreži u  $x$  smjeru. Maksimalni raspon vrijednosti deformacija u  $y$  smjeru iznosi isto kao i u  $x$  smjeru od  $-0.017$  do  $0.03$ , ali lokalne fluktuacije imaju drugačiju raspodjelu po promatranom volumenu. Velike razlike izmjerenih lokalnih fluktuacija posljedica su djelovanja raznih šumova tijekom zabilježavanja projekcija potrebnih za rekonstrukciju promatranog volumena.



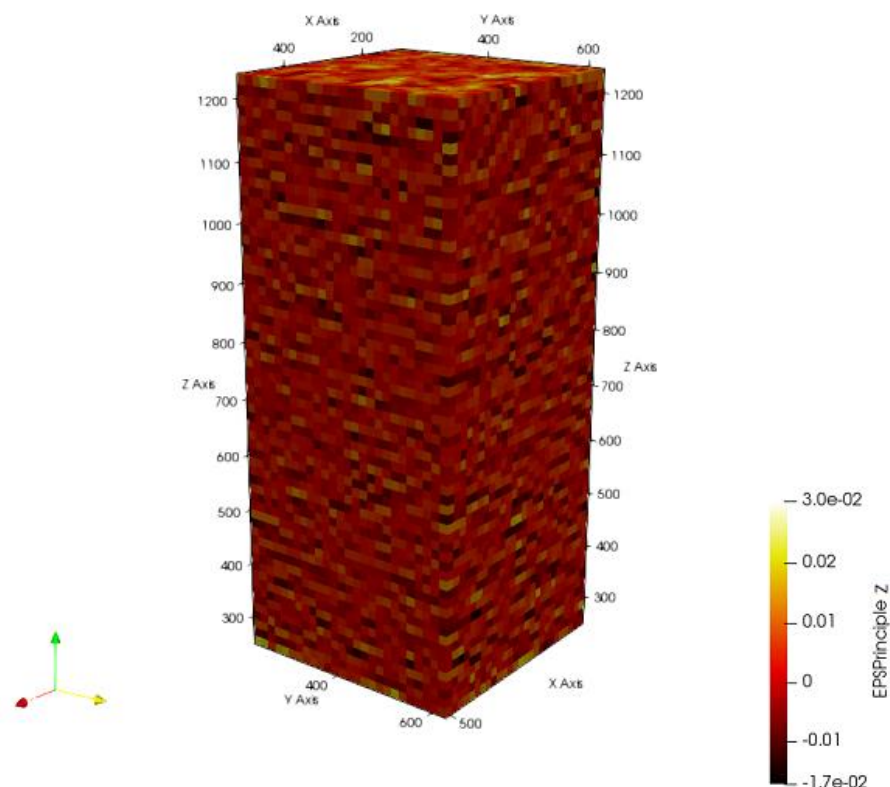
Slika 37. Polje deformacija u y smjeru za elemente veličine 16 voxela.

Isto kao i kod mjerenja deformacija tj. pomaka u x smjeru i deformacije u y smjeru mjerene su i na mreži prizmatičnih konačnih elemenata veličine 128 voxela (Slika 38). Deformacije u y smjeru na grubljor mreži prikazane su po konačnom elementu tako da je svakom elementu dodijeljena uniformna vrijednost deformacije. Dobivene su znatno manje vrijednosti deformacija nego u prethodnom slučaju s manjim konačnim elementima. Maksimalni raspon vrijednosti deformacija je od -0.00012 do 0.00026. Kod većih konačnih elemenata tj. na grubljor mreži puno su manje razlike među lokalnim fluktuacijama i zbog toga je puno blaži prijelaz nego kod finije mreže. U usporedbi s deformacijama u x smjeru dobivenim na istoj mreži konačnih elemenata vidi se da su za ovaj smjer dobivene veće vrijednosti na temelju čega se može zaključiti da je veći utjecaj šumova u y smjeru nego što je bio za zabilježen kod primjene globalnog DVC algoritma u x smjeru.



Slika 38. Polje deformacija u y smjeru za elemente veličine 128 voxela.

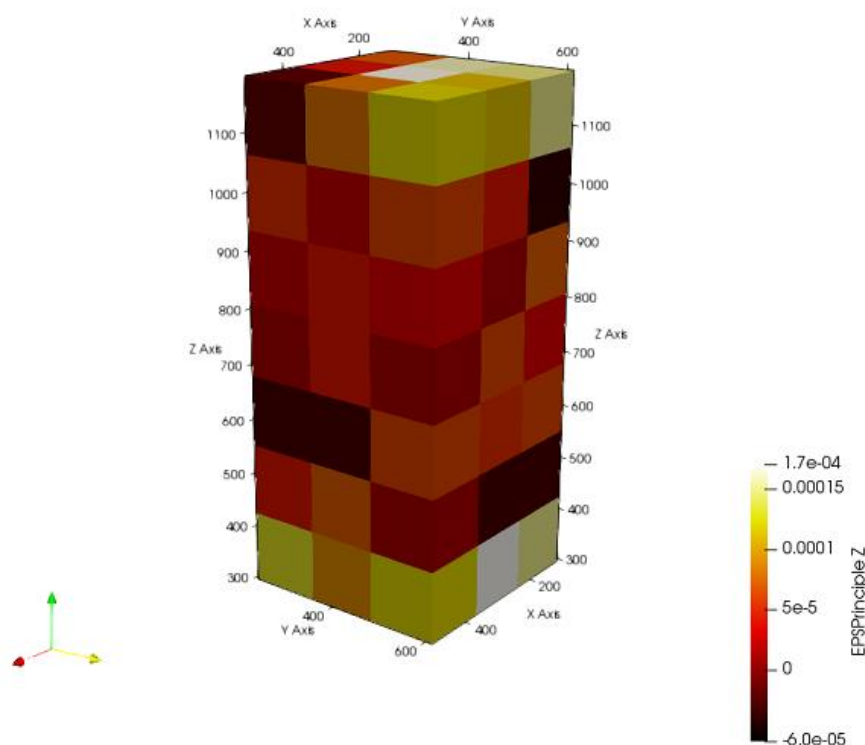
Pošto se ovdje radi o trodimenzionalnom mjerenom području, polje deformacija izmjereno je i u z smjeru promatranog volumena. Prvo su korišteni manji prizmatični konačni elementi veličine 16 voxela (Slika 39). Izračunato polje deformacija pokazuje vrijednosti koje nisu uniformne u svim čvorovima te odstupaju od nulte vrijednosti. Izmjeren je jednak maksimalni raspon kao i u x i y smjeru s istom veličinom elementa (-0.017 do 0.03), ali je drugačija raspodjela lokalnih fluktuacija. Registrirane vrijednosti pokazuju da se ponovo s manjom veličinom elementa dobivaju velike razlike između lokalnih fluktuacija što ukazuje na to da je na manje elemente veći utjecaj šumova koji se pojavljuju kod skeniranja ispitnog uzorka.



Slika 39. Polje deformacija u z smjeru za elemente veličine 16 voxela.

Deformacije u z smjeru također su mjerene i na grubljoj mreži s veličinom elemenata 128 voxela (Slika 40). Analogno deformacijama u x i y smjeru dobivenim na mreži s elementima veličine 128 voxela i ovdje su deformacije prikazane po konačnom elementu tako da je svakom elementu dodijeljena uniformna vrijednost deformacije. Izračunate vrijednosti deformacija manje su nego u prethodnom slučaju kada su korišteni manjim konačni elementi što je već prethodno pokazano i za x i y smjer. Maksimalni raspon vrijednosti deformacija je od -0.00006 do 0.00017. Kod većih konačnih elemenata tj. na grubljoj mreži puno su manje razlike među lokalnim fluktuacijama i zbog toga i ovdje imamo puno blaži prijelaz nego kod finije mreže. U usporedbi s deformacijama u y smjeru dobivenim na istoj mreži konačnih elemenata vidi se da su za ovaj smjer dobivene manje vrijednosti na temelju čega se može zaključiti da je veći utjecaj šumova u y smjeru nego što za mjerenje u z smjeru.

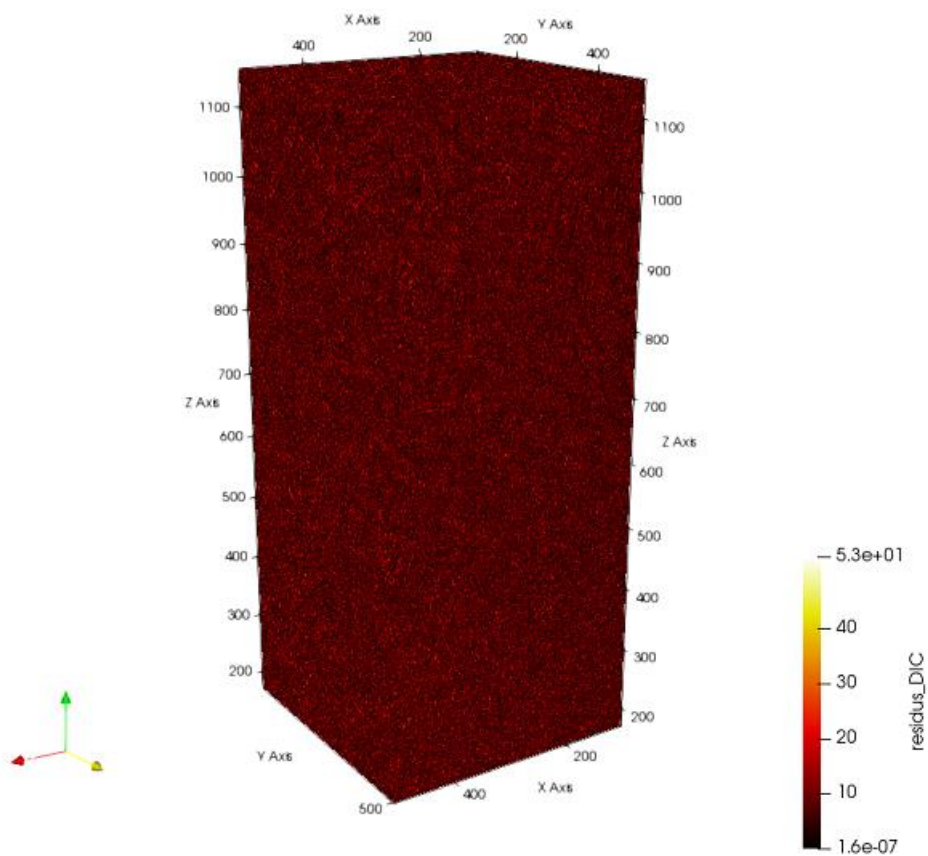




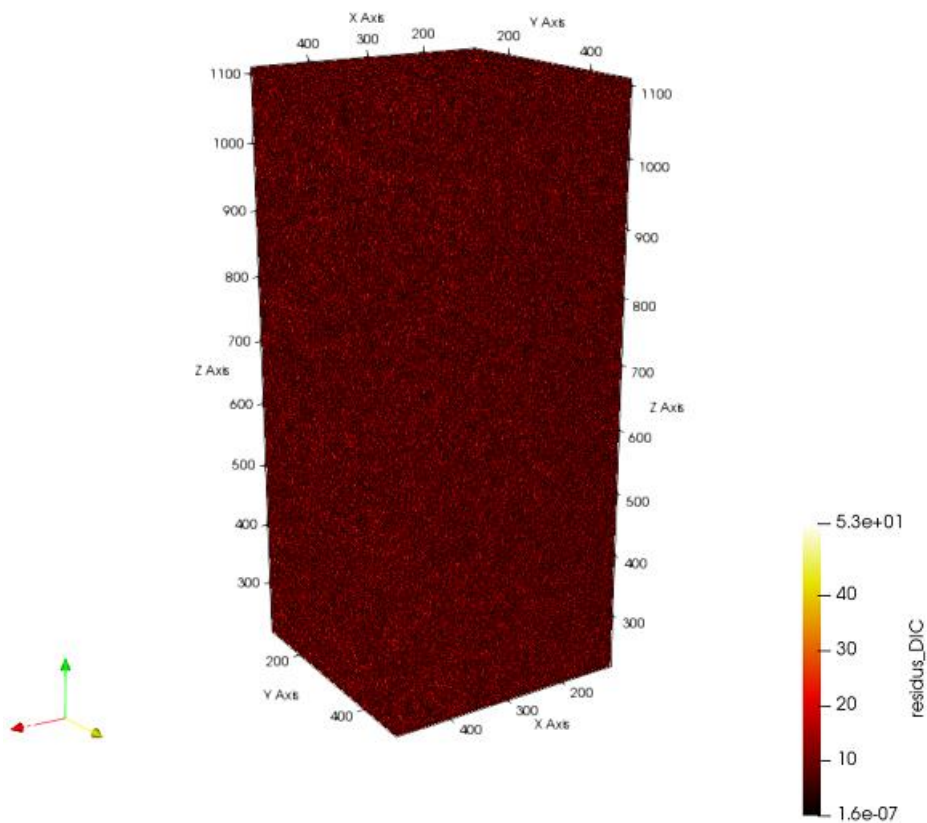
Slika 40. Polje deformacija u z smjeru za elemente veličine 128 voxela.

#### 7.4. Mape korelacijskih reziduala

Polja reziduala dobivaju se sukladno formulacijama opisanim u poglavlju 5. Jednadžba (5) prikazuje kako se od razlike referentne i korigirane deformirane slike definira polje/mapa reziduala koje je zatim potrebno sukcesivno minimizirati. Polja reziduala prikazana na slika 41 i slika 42 su gotovo identična čime se pokazuje da je rješenje kojeg smo tražili konvergiralo te da smo se dovoljno približili točnom rješenju s predloženim konačnim elementima. Iz polja reziduala također je moguće u slučajevima kada se ispitni uzorci opterećuju pratiti pojavu pukotine. Oštećenje materijala u vidu pukotina rezultirat će povišenim vrijednostima reziduala na razini voxela. Osim toga, povišene vrijednosti reziduala pratit će putanju pukotine. Velika prednost mjerenja na 3D volumenima je što se primjenom DVC tehnike dovodi u korelaciju izmjereno polje pomaka/deformacija/reziduala s pripadajućom mikrostrukturom. Predloženom metodologijom moguće je pouzdanije opisati ponašanje materijala uslijed narinutog opterećenja.



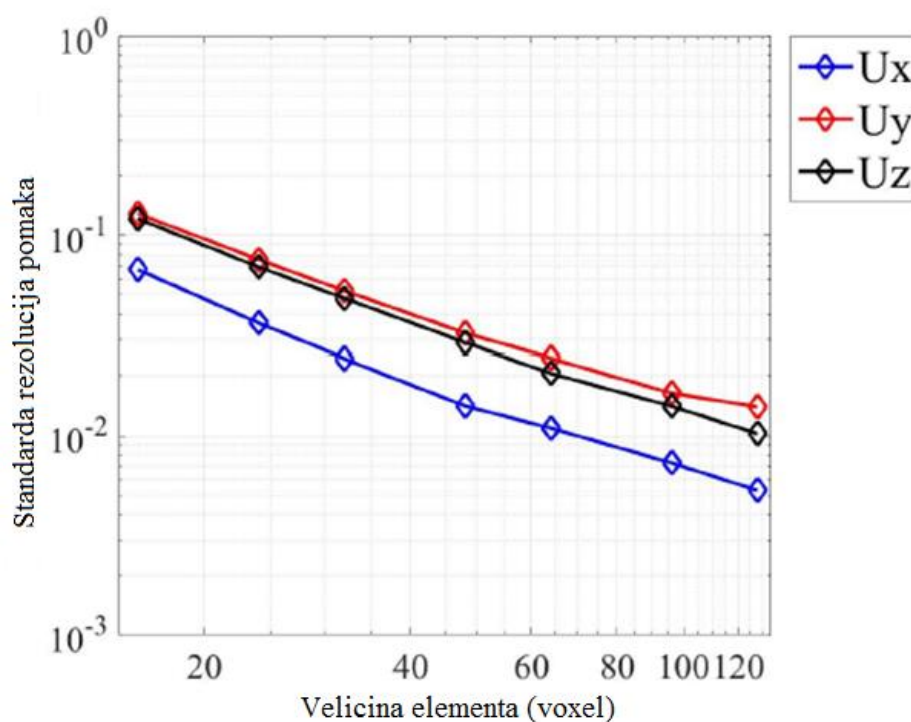
Slika 41. Prikaz reziduala na mreži elemenata veličine 16 voxela.



Slika 42. Prikaz reziduala na mreži elemenata veličine 128 voxela.

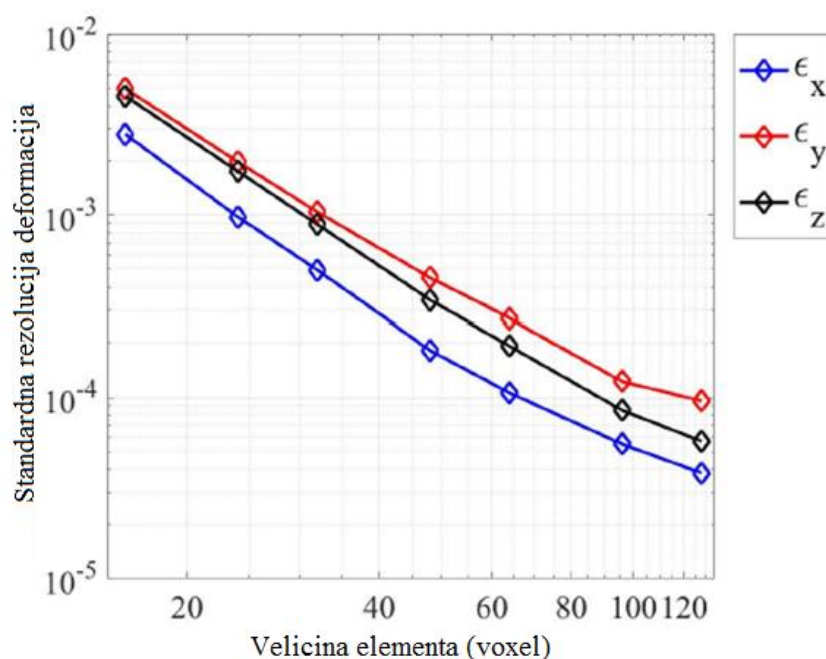
## 7.5. Standardna rezolucija pomaka i deformacija

Dijagrami prikazani na slika 43 prikazuju standardne rezolucije pomaka u  $x$ ,  $y$  i  $z$  smjeru promatranog volumena odnosno zone interesa. Standardna rezolucija pomaka prikazana je u ovisnosti o veličini konačnog elementa. Najmanja standardna rezolucija pomaka registrira se u smjeru  $x$  osi kada su korišteni elementi veličine 128 voxela i iznosi 0.05 voxela. U smjeru  $z$  osi za istu veličinu elementa (128 voxela) vrijednost je dva puta veća i iznosi 0.1 voxel. Za  $y$  smjer s veličinom elementa od 128 voxela izračunata je najveća vrijednost standardne rezolucije pomaka koja iznosi 0.15 voxela. Korištenjem manjih konačnih elemenata dobivene su znatno veće vrijednosti standardne rezolucije pomaka. Pa tako u  $x$  smjeru korištenjem konačnih elemenata veličine 16 voxela izračunava se standardna rezolucija pomaka od 0.65 voxela, u  $y$  smjeru oko 1.1 voxel, dok je u  $z$  smjeru zabilježena vrijednost približno jednaka kao i u  $y$  smjeru. Izračunate vrijednosti pokazuju kako je kod većih elemenata puno manji utjecaj šumova i mjernih nesigurnosti. S obzirom na to da se većim elementima dobiva manja standardna rezolucija pomaka može se zaključiti kako je većim elementima moguće mjeriti manje priraste pomaka te ako se želi postići što manja standardna rezolucija pomaka koriste se što veći konačni elementi.



Slika 43. Standardna rezolucija pomaka u  $x$ ,  $y$  i  $z$  smjeru.

Analogno prethodnim grafovima standardne rezolucije pomaka, dobiveni su i grafovi standardne rezolucije deformacija, također prikazani u ovisnosti o veličini konačnog elementa (Slika 44). Standardne rezolucije deformacija izračunate su za  $x$ ,  $y$  i  $z$  smjer promatranog volumena. Najmanja standardna rezolucija deformacija dobiva se u smjeru  $x$  osi kada su korišteni elementi veličine 128 voxela i iznosi 0.0003. U smjeru  $y$  osi za istu veličinu elementa vrijednost standardne rezolucije deformacija iznosi 0.001. Za  $z$  smjer s veličinom elementa od 128 voxela vrijednost standardne rezolucije pomaka iznosi 0.0005. Za manju veličinu konačnog elementa dobivene su veće vrijednosti standardne rezolucije pomaka. U  $x$  smjeru korištenjem konačnih elemenata veličine 16 voxela izračunava se standardna rezolucija deformacija od 0.03, u  $y$  smjeru oko 0.06, a u  $z$  smjeru 0.05. U usporedbi sa standardnom rezolucijom pomaka može se primijetiti da se za sve veličine elementa dobivaju manje vrijednosti standardnih rezolucija deformacija. Izmjerene vrijednosti standardnih rezolucija deformacija pokazuju da je kao i kod standardne rezolucije pomaka kod većih elemenata puno manji utjecaj šumova i mjernih nesigurnosti. S obzirom na to da se većim elementima dobiva manja standardna rezolucija deformacija može se zaključiti kako je većim elementima moguće mjeriti manje priraste deformacija te ako se želi postići što manja standardna rezolucija deformacija koriste se što veći konačni elementi. Međutim, ako se odaberu preveliki konačni elementi ne mogu se registrirati lokalizacijski fenomeni (npr. mikropukotine).



Slika 44. Standardna rezolucija deformacija u  $x, y$  i  $z$  smjeru.

## 8. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedeno je skeniranje ispitnog uzorka za vlačno ispitivanje na industrijskom  $\mu$ -tomografu NIKON XT H 225. Uzorak za vlačno ispitivanje izrađen je od mat staklenih vlakana koja se nalaze u matrici epoksidne smole. Skeniranje je provedeno uzastopno dva puta kada na ispitivani uzorak nije narinuto opterećenje. Za svaki sken rotacijom od  $360^\circ$  zabilježeno je 800 radiografa, a ukupno trajanje skeniranja iznosilo je 40 min. Tijekom obrade podataka odabrana je promatrana zona na sredini vlačnog uzorka, koja je ujedno i najkritičniji dio uzorka uslijed mehaničkog ispitivanja. Provedenom rekonstrukcijom registriranih projekcija definiran je 3D volumen na kojem je zatim primijenjen globalni DVC pristup koji se temelji na metodi konačnih elemenata. U ovom radu korišten je *C8 Correlli* s kojim su određena polja pomaka, odnosno deformacija. Iz izmjerenih polja pomaka i deformacija izračunate su standardna rezolucija pomaka i deformacija s obzirom na primijenjenu veličinu konačnog elementa. Rekonstrukcijom 3D volumena dobiven je uvid u geometriju ispitnog uzorka i prikaz mikrostrukture promatrane zone ispitnog uzorka. U rekonstruiranoj zoni interesa može se uočiti stohastički raspored mat staklenih vlakana u epoksidnoj smoli. Uvidom u mikrostrukturu također je otkrivena poroznost koja je nastala uslijed izrade kompozitnog materijala budući da kompozitna kvadratna ploča nije podvrgnuta vakuum. Primjenom programa *ImageJ* segmentirana je slika s obzirom na vrijednost sive skale boja te je određeno da se promatrana zona interesa sastoji od 51,03 % epoksidne smole, 41,77 % mat staklenih vlakana, a ostalih 7,2 % zauzimaju nepoželjni mjehurići zraka. Izmjerena polja pomaka i deformacija u  $x$ ,  $y$  i  $z$  smjeru pokazuju da iako uzorak nije bio opterećen prilikom skeniranja, polja pomaka i deformacija nisu uniformna te odstupaju od nulte vrijednosti zbog različitih šumova i mjernih nesigurnosti koji se javljaju tijekom skeniranja i obrade digitalnih podataka DVC algoritmom. Dobiveni rezultati pokazuju kako šumovi i mjernih nesigurnosti puno manje utječu kada su primijenjeni veći konačni elementi, odnosno da se kod manjih C8 elemenata pojavljuju puno veće razlike između izmjerenih lokalnih fluktuacija. Također se može primijetiti kako je najmanji raspon vrijednosti pomaka i deformacija dobiven u  $x$  smjeru što pokazuje da je u tom smjeru najmanji utjecaj šumova i mjernih nesigurnosti. Glavni cilj ovog rada bio je određivanje standardnih rezolucija pomaka i deformacija. Navedene vrijednosti definiraju koliki se najmanji prirast pomaka odnosno deformacija može izmjeriti s obzirom na veličinu elementa korištenog tijekom mjerenja na rekonstruiranim 3D volumenima. Izračunate vrijednosti

pokazuju kako se najmanja standardna rezolucija pomaka odnosno deformacija postiže za elemente veličine 128 voxela. Općenito za sve veličine konačnih elemenata standardne rezolucije deformacija manje su nego vrijednosti standardnih rezolucija pomaka. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti kako je za postizanje nižih vrijednosti standardne rezolucije pomaka i/ili deformacija potrebno koristiti velike konačne elemente. Međutim, odabirom grube mreže konačnih elemenata ne može se vjerodostojno opisati kinematika uslijed mehaničkog opterećenja te je nemoguće detektirati lokalizacijske fenomene plastifikacije i oštećenja materijala. Stoga je kod primjene metode korelacije digitalnih volumena potrebno napraviti kompromis između standardne rezolucije pomaka i/ili deformacija i detekcije lokalnih promjena unutar materijala.

## 9. BIBLIOGRAFIJA

1. Cantatore, A., & Müller, P. (2011). Introduction to computed tomography. Kgs.Lyngby: DTU Mechanical Engineering.
2. T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof. Svojstva i primjena materijala. Fakultet Strojarsva i Brodogradnje; Zagreb, 2002.
3. <https://www.1001crash.com/index-page-composite-1g-2.html> [1.12.2018.]
4. Cranfield Aerospace Composite Repair - Group Project Thesis - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/1-Material-usage-in-a-B787-Dreamliner-11\\_fig6\\_317167462](https://www.researchgate.net/figure/1-Material-usage-in-a-B787-Dreamliner-11_fig6_317167462) [ 9.12.2018]
5. Mandić D. Utjecaj Uvjeta Priprave Kompozita na Svojstva. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Strojarsva i Brodogradnje. Zagreb, 2009.
6. <https://www.fsb.unizg.hr/kmb/200/230/kmb234.htm> [18.12.2018.]
7. <https://es.aliexpress.com/item/1x1m-150gsm-Glass-Fiber-Cloth-Alkali-free-Fiberglass-Chopped-Strand-Mat-Reinforcements-High-Temperature-Resistance-Strength/32807716462.html> [20.12.2018.]
8. S.Gholizadeh. A review of non-destructive testing methods of composite materials. Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor Darul Ehsan, Malaysia.
9. I.Boras; S.Švaić. kolegij: Laboratorijski rad. Laboratorijska vježba: Infracrvena Termografija. Fakultet Strojarsva i Brodogradnje u Zagrebu.
10. <https://www.qualitymag.com/articles/91207-active-thermography-for-nondestructive-composites-testing> [10.1.2019.]
11. General Electric Corporation, Industrial Radiography - Image Forming Techniques.
12. <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/digital-radiography> [9.1.2019.]
13. [https://ndt.hamamatsu.com/eu/en/app-industrial/industrial\\_ct.html](https://ndt.hamamatsu.com/eu/en/app-industrial/industrial_ct.html)
14. [https://de.wikipedia.org/wiki/Industrielle\\_Computertomographie#/media/File:2D\\_Computed\\_Tomography.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Industrielle_Computertomographie#/media/File:2D_Computed_Tomography.png) [8.1.2019.]
15. Lakshminarayana Yenumula, Umesh Kumar, and Ashutosh Dash. X-ray Industrial Computed Laminography (ICL) Simulation Study of Planar Objects: Optimization of Laminographic Angle; Industrial Tomography and Instrumentation Section, Isotope Production and Applications Division, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai – 400085, India.

16. Kruth, J.P.; Bartscher, M.; Caramignato, S.; Schmitt, R.; De Chiffre, L.; Weckenmann, A.: Computed tomography for dimensional metrology, 2011.
17. Surjak M. Validacija Numeričkih Modela Mehaničkog Ponašanja Životinjskih i Ljudskih Kostiju. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje; Zagreb, 2015.
18. Prashant P. Jaju et al.. Artefacts in cone beam CT. Open Journal of Stomatology, 2013, 3, 292-297.
19. <https://4nsi.com/blog/2018/01/09/an-introduction-to-ct-scan-image-artifacts/> [15.1.2019.]
20. Jan Sijbers, Andrei Postnov. Reduction of ring artifacts in high resolution micro-CT reconstructions. University of Antwerp, Belgium Groenenborgerlaan 171, U316, B-2020 Antwerpen, Belgium.
21. Ante Buljac, Clément Jailin, Arturo Mendoza, J Neggers, T. Taillandier-Thomas, et al.. Digital Volume Correlation: Review of Progress and Challenges. Experimental Mechanics, Society for Experimental Mechanics, 2018, 58 (5), pp.661-708. <10.1007/s11340-018-0390-7>. <hal-01744752>
22. S.C. Garcea, Y. Wang, P.J. Withers; X-ray computed tomography of polymer composites; Composites Science and Technology 156 (2018) 305-319; Science Direct.
23. Pierre Lhuissier et al.. Ultra Fast Tomography: New Developments for 4D Studies in Material Science. 1st International Conference on 3D Materials Science, 2012.
24. Ante Buljac, et al.. Evaluation of measurement uncertainties of digital volume correlation applied to laminography data. Journal of Strain Analysis.
25. F. Hild, S. Roux. Comparison of Local and Global Approaches to Digital Image Correlation. Experimental Mechanics (2012) 52:1503–1519.
26. Hugo Leclerc, Jean-Noël Périé, François Hild, Stéphane Roux. Digital volume correlation: what are the limits to the spatial resolution?. Mechanics. Industry, EDP Sciences, 2012, 13, pp.361-371. <10.1051/meca/2012025>. <hal-00848721>.
27. <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/xt-h-225> [8.1.2019.]
28. Optimized 3D co-registration of ultra-low-field and high-field magnetic resonance images-Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-illustrating-the-grouping-procedure-The-figure-shows-an-example-of-the\\_fig1\\_323594032](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-illustrating-the-grouping-procedure-The-figure-shows-an-example-of-the_fig1_323594032) [8.1.2019.]



## **PRILOZI**

### I. CD-R disc