

Uspostavljanje sljedivosti kod računalne tomografije u dimenzionalnom mjeriteljstvu

Horvatić Novak, Amalija

Doctoral thesis / Disertacija

2018

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:235:867253>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Amalija Horvatić Novak

**USPOSTAVLJANJE SLJEDIVOSTI KOD
RAČUNALNE TOMOGRAFIJE U
DIMENZIONALNOM MJERITELJSTVU**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
AND NAVAL ARCHITECTURE

Amalija Horvatić Novak

**ACHIEVING TRACEABILITY OF
COMPUTED TOMOGRAPHY IN
DIMENSIONAL METROLOGY**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2018



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Amalija Horvatić Novak

USPOSTAVLJANJE SLJEDIVOSTI KOD RAČUNALNE TOMOGRAFIJE U DIMENZIONALNOM MJERITELJSTVU

DOKTORSKI RAD

Mentorica:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

Zagreb, 2018.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
AND NAVAL ARCHITECTURE

Amalija Horvatić Novak

**ACHIEVING TRACEABILITY OF
COMPUTED TOMOGRAPHY IN
DIMENSIONAL METROLOGY**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
Prof. Biserka Runje, PhD

Zagreb, 2018

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK: 620.17

Ključne riječi: dimenzionalno mjeriteljstvo, računalna tomografija, mjerna nesigurnost, mjeriteljska sljedivost

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: STROJARSTVO

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje

Mentorica rada: Prof. dr. sc. Biserka Runje

Broj stranica: 157

Broj slika: 98

Broj tablica: 34

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 108

Datum obrane: 2. srpnja 2018.

Povjerenstvo: Prof. dr. sc. Damir Markučić, predsjednik
Prof. dr. sc. Josip Stepanić
Prof. dr. sc. Duško Pavletić
Izv. prof. dr. sc. Leon Maglić
Dr. sc. Srđan Medić

Institucija na kojoj je rad pohranjen: Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici profesorici Biserki Runje na poticajima, korisnim savjetima, pomoći i pruženoj podršci u svakom trenutku.

Najljepše zahvaljujem članovima Povjerenstva prof. dr. sc. Damiru Markučiću, prof. dr. sc. Josipu Stepaniću, prof. dr. sc. Dušku Pavletiću, izv. prof. dr. sc. Leonu Magliću i dr. sc. Srđanu Mediću na konstruktivnim savjetima i pomoći kod izrade ove disertacije.

Zahvaljujem se dragom kolegi Josipu Smoljiću na pomoći pri mjerenju.

Zahvaljujem se djelatnicima poduzeća P.P.C. Buzet na ustupljenoj mjernoj opremi, gostoprimstvu i susretljivosti.

Želim se zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima koji su strpljivošću i razumijevanjem pomogli u mojim nastojanjima.

Veliko hvala Igoru.

SAŽETAK

Primjena računalne tomografije (CT) u dimenzionalnom mjeriteljstvu metoda je kojom je omogućeno mjerenje vanjskih i unutarnjih geometrija predmeta mjerenja skeniranjem predmeta rendgenskim zračenjem. Riječ je o nerazornoj metodi ispitivanja koja omogućava trodimenzionalno mjerenje unutarnje geometrije predmeta što je čini interesantnom u širokoj primjeni. Jedan od preduvjeta za implementaciju metode računalne tomografije u području dimenzionalnog mjeriteljstva jest osiguravanje sljedivosti rezultata mjerenja. Kako se radi o izrazito složenom mjernom sustavu s velikim brojem utjecajnih parametara, mjerna nesigurnost rezultata mjerenja često nije procijenjena, a mjeriteljska sljedivost u općem slučaju nije osigurana.

U cilju uspostavljanja sljedivosti kod računalne tomografije u dimenzionalnom mjeriteljstvu u radu su provedena teorijska i eksperimentalna istraživanja utjecajnih parametara procesa mjerenja računalnom tomografijom na rezultate dimenzionalnih i geometrijskih značajki na predmetima jednostavne i složenije geometrije. U teorijskom dijelu rada objašnjeni su parametri koji nastaju kao rezultat nesavršenosti mjernog sustava i njegovih komponenata. Predložena je klasifikacija utjecajnih parametara s obzirom na tijek procesa provedbe dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom. S obzirom na nedostatnosti postojećih referentnih predmeta, a na osnovu rezultata istraživanja značajki postojećih referentnih predmeta predložen je model novog referentnog predmeta kod primjene računalne tomografije u području dimenzionalnog mjeriteljstva.

Zbog velikog broja parametara koji utječu na rezultat mjerenja, eksperimentalna istraživanja započeta su provedbom djelomičnog faktorskog plana pokusa pri čemu je izdvojen manji broj značajnijih parametara. Daljnja istraživanja provedena su mjerenjima računalnom tomografijom te provedbom simulacija procesa skeniranja. U cilju praćenja i eliminacije sustavnih pogrešaka koje nastaju kao rezultat djelovanja ulaznih parametara, istražen je utjecaj pogrešaka nastalih u procesu skeniranja predmeta rendgenskim zračenjem, pogrešaka nastalih u procesu rekonstrukcije poprečnih presjeka i 3D modela te utjecaj predmeta mjerenja.

U radu je procijenjena mjerna nesigurnost rezultata mjerenja sukladno normi ISO 15530-3:2011, odnosno smjernicama *VDI/VDE 2630 Part 2.1*, te kombinacijom metode Monte Carlo sukladno normi JCGM 101:2008 i virtualnog CT sustava korištenjem softverskog paketa *aRTist*. Usporedba dobivenih rezultata mjerenja s referentnim vrijednostima provedena je izračunom faktora slaganja En .

EXTENDED SUMMARY

Application of Computed Tomography (CT) in dimensional metrology is a method which enables measurement of both external and internal geometry of measured objects, by scanning objects using X-ray. It is a non-destructive measuring method that allows three-dimensional measurement of the internal geometry of an object. This feature makes the method interesting for a wide range of applications. A prerequisite for implementation of computed tomography in dimensional measurement is assuring metrological traceability of the measurement results. Considering the fact that computed tomography is a very complex system with a large number of influence parameters, neither measurement uncertainty nor measurement traceability can generally be assured. With the goal of establishing traceability of computed tomography in dimensional measurements, theoretical and experimental research was carried out on objects of simple and complex geometries.

The research was carried out in several phases, which are summarized in the following chapters.

Chapter 1 *Introduction*

The first chapter elaborates on the need for conducting research in the field of traceability assurance. Additionally, through a review of the existing literature the current state of this scientific field is found to be encountering difficulties, primarily in the area of conducting assurance of measurement results traceability through the application of the CT measurement system. The current state of the field, ascertained by the review of the existing literature motivated this doctoral thesis which explores the possibilities of conducting dimensional metrology using the method of computed tomography. Further, the hypothesis and the main aim of this research are presented, followed by the research plan and expected scientific contribution.

Chapter 2 *Computed tomography in dimensional metrology*

In the second chapter of the thesis, parameters influencing measurement system are classified and explained. At the beginning of the second chapter application of industrial computed tomography in the field of dimensional measurements is described. This is followed by a schematic display of the process through which the measurement is conducted. The resulting 2D data is described mathematically using the Radon transform, which represents the mathematical background for connecting Cartesian and projection coordinates. In this part of the thesis, a detailed description of the filtration process of raw CT data is given. The

artefacts analyzed are beam hardening artefacts, scatter artefacts, ring artefacts, metal artefacts, motion artefacts and partial volume artefacts. They appear in the process of scanning with cone beam x-ray, as a consequence of the imperfections in measurement system.

Chapter 3 *Traceability assurance of computed tomography in dimensional metrology*

In third chapter the existing reference objects used for systematic error correction are summarized. This is conducted according to the purpose of the reference object in terms of correcting different kinds of errors as well as according to the geometry of the object. Due to the insufficiency of the existing reference objects and based on the results of the research where the features and geometry of existing reference objects was taken into account, a new reference object for dimensional measurements with computed tomography is proposed. The proposal of the new reference object follows guidelines given in *VDI/VDE 2630 - Part 1.3*. This part of the paper also develops methods for assessing measurement uncertainty of measurement results as well as provides an analysis of the results of interlaboratory comparisons in the area of using CT for dimensional measurement. A description of the model for assessing measurement uncertainty in accordance with the Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008) is provided. Furthermore, the model is described in accordance with the ISO 15530-3:2011 as well as the guidelines given in *VDI/VDE 2630 Part 2.1*. Finally, the description of the model which includes the use of the Monte Carlo simulation (MCS) method according to JCGM 101:2008 and the implementation of the virtual CT system through the use of the software package *aRTist* is given.

Chapter 4 *Experimental research*

In the fourth chapter experimental research on influence parameters in the overall measurement process are conducted. In the first phase of experimental research preliminary research using the partial design of experiment was conducted. In further research, the preliminary research results were used to analyse the influence of number of projections, the influence of geometrical magnification and the influence of beam hardening corrections. Additionally, the research also includes investigation on the influence of the positioning of the measurement object in relation to rotation axis as well as the influence of noise reduction and object surface roughness. The research was conducted on homogeneous objects of both simple and complex geometry as well as objects with different material density. Results obtained with CT are compared to results obtained using a tactile CMM.

Chapter 5 *Evaluation of measurement uncertainty*

In the fifth chapter measurement uncertainty of results obtained from measuring an aluminium and polymer cylinder with complex geometry was estimated using a combination of virtual computed tomography and Monte Carlo simulations according to the JCGM 101:2008 standard. The values of extended measurement uncertainties, given with the coverage factor $k = 2$ and probability $P = 95 \%$, are in range from $16 \mu\text{m}$ to $52 \mu\text{m}$, depending on the measured dimensional characteristic. The results were validated through the comparison between measured results and reference values which was achieved by calculating the En number. Furthermore, a substitution measurement method in accordance with the ISO 15530-3:2011 and the *VDI/VDE 2630 Part 2.1* guidelines was conducted. The values of extended measurement uncertainties, given with the coverage factor $k = 2$ and probability $P = 95 \%$, are in range from $6 \mu\text{m}$ to $34 \mu\text{m}$, depending on the measured dimensional characteristic.

Chapter 6 *Conclusion*

In the sixth chapter of the doctoral thesis, an overview of the complete conducted research is provided, final conclusions are drawn and guidelines for further research are provided.

KLJUČNE RIJEČI:

Dimenzionalno mjeriteljstvo, računalna tomografija, mjerna nesigurnost, mjeriteljska sljedivost.

KEYWORDS:

Dimensional metrology, computed tomography, measurement uncertainty, metrological traceability.

SADRŽAJ

SAŽETAK	III
EXTENDED SUMMARY	IV
POPIS SLIKA	X
POPIS TABLICA	XIV
POPIS OZNAKA	XVI
POPIS KRATICA	XXII
1. UVOD	1
1.1 Motivacija	1
1.2 Cilj i hipoteza istraživanja	3
1.3 Metode i plan istraživanja	4
1.4 Znanstveni doprinos	5
2. RAČUNALNA TOMOGRAFIJA U DIMENZIONALNOM MJERITELJSTVU	6
2.1 Primjena CT dimenzionalnih mjerenja	6
2.2 Postupak provedbe dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom	7
2.2.1 Skeniranje predmeta	8
2.2.2 Rekonstrukcija 3D modela	20
2.2.3 Analiza 3D modela	34
3. OSIGURAVANJE MJERITELJSKE SLJEDIVOSTI KOD PRIMJENE RAČUNALNE TOMOGRAFIJE	39
3.1 Referentni predmeti	41
3.1.1 Referentni predmeti za korekciju veličine vokseli	42
3.1.2 Referentni predmeti za određivanje granične vrijednosti sive skale	44
3.1.3 Ostali referentni predmeti	46
3.1.4 Prijedlog novog referentnog predmeta	47
3.1.5 Utjecajni parametri kod industrijske računalne tomografije	52
3.2 Procjena mjerne nesigurnosti kod industrijske računalne tomografije	54
3.2.1 Procjena mjerne nesigurnosti sukladno Vodiču za procjenu mjerne nesigurnosti	56
3.2.2 Procjena mjerne nesigurnosti metodom Monte Carlo sukladno normi JCGM 101:2008	58
3.2.3 Supstitucijska metoda	59
3.3 Međulaboratorijska usporedbena mjerenja	63
3.3.1 CT Audit	63
3.3.2 CIA - CT	65
3.3.3 InteraqCT	66

4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	69
4.1 Preliminarna istraživanja.....	72
4.2 Utjecaj broja projekcija na rezultate mjerenja.....	74
4.2.1 Utjecaj broja projekcija kod aluminijskog cilindra jednostavne geometrije	76
4.2.2 Utjecaj broja projekcija kod polimernog cilindra složene geometrije	77
4.3 Utjecaj orijentacije predmeta na rezultate mjerenja.....	84
4.3.1 Analiza rezultata dimenzionalnih značajki s obzirom na odabranu orijentaciju.....	87
4.3.2 Analiza rezultata geometrijskih značajki s obzirom na odabranu orijentaciju ..	93
4.4 Utjecaj hrapavosti predmeta.....	95
4.5 Utjecaj skaliranja i geometrijskog povećanja.....	102
4.5.1 Veličina vokseli i utjecajne veličine.....	102
4.6 Utjecaj korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja prilagodbom koeficijenta prigušenja.....	111
4.7 Utjecaj primjene filtera za uklanjanje šumova neobrađenih CT podataka.....	113
5. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI	117
5.1 Procjena mjerne nesigurnosti kombinacijom metode Monte Carlo i virtualnog CT sustava.....	117
5.1.1 Procjena mjerne nesigurnosti MCS metodom za aluminijski cilindar.....	119
5.1.2 Procjena mjerne nesigurnosti MCS metodom za polimerni cilindar	126
5.1.3 Izračun faktora slaganja En	134
5.2 Procjena mjerne nesigurnosti kod provedbe supstitucijske metode.....	136
6. ZAKLJUČAK.....	144
7. LITERATURA	149
ŽIVOTOPIS	156
BIOGRAPHY	157

POPIS SLIKA

Slika 2-1.	Primjena industrijske računalne tomografije.....	7
Slika 2-2.	Proces provedbe dimenzionalnog mjerenja računalnom tomografijom.	8
Slika 2-3.	Prikaz provedbe skeniranja predmeta računalnom tomografijom u jednom zakretu rotacijskog stola.	9
Slika 2-4.	Industrijski CT skener Nikon XT H 225.	9
Slika 2-5.	Konfiguracija CT skenera s obzirom na oblik rendgenskog zračenja.	10
Slika 2-6.	Spektar elektromagnetskog zračenja	10
Slika 2-7.	Rendgenska cijev	11
Slika 2-8.	Nastajanje spektra rendgenskog zračenja	12
Slika 2-9.	Proces i spektar zračenja karakterističnog za materijal anode	14
Slika 2-10.	Spektar rendgenskog zračenja za različite materijale anode.	14
Slika 2-11.	Utjecaj kuta i veličine poprečnog presjeka elektronskog snopa na veličinu snopa rendgenskog zračenja.	15
Slika 2-12.	Promjena intenziteta monokromatskog zračenja prolaskom zraka kroz homogeni materijal.	16
Slika 2-13.	Koeficijenti prigušenja monokromatskog rendgenskog zračenja za aluminij... ..	17
Slika 2-14.	Broj različitih vrijednosti tonova sive skale za različite brojeve bitova detektora ..	20
Slika 2-15.	Formiranje sinograma.....	22
Slika 2-16.	Inverzna Radonova transformacija	23
Slika 2-17.	Grafički prikaz otvrdnjavanja snopa.....	25
Slika 2-18.	Artefakti otvrdnjavanja zračenja:	26
Slika 2-19.	Artefakti otvrdnjavanja zračenja u obliku crta.	27
Slika 2-20.	Utjecaj fizikalnih bakrenih filtera različitih debljina na spektar rendgenskog zračenja.	28
Slika 2-21.	Nekoherentno zračenje	30
Slika 2-22.	Učinak некоherentnog zračenja.....	31
Slika 2-23.	Rekonstruirani modeli s vidljivim utjecajem sekundarnog zračenja.	31
Slika 2-24.	Cirkularni artefakti.	32
Slika 2-25.	Artefakti metalnih predmeta	33
Slika 2-26.	Histogram skale sivih tonova svih voksela - metoda ISO 50 %.....	35
Slika 2-27.	Lokalna metoda određivanja granice površina	36
Slika 2-28.	Stvarni i idealni prikaz 2D zapisa.....	36
Slika 2-29.	Dodjeljivanje oblika jednostavne geometrije	37

Slika 2-30.	Usporedba CT modela s CAD modelom	38
Slika 3-1.	Lanac sljedivosti kod industrijske računalne tomografije.	39
Slika 3-2.	Referentni predmeti s rubinskim kuglicama za korekciju veličine vokselu	43
Slika 3-3.	Korekcija granične vrijednosti sive skale	44
Slika 3-4.	Prikaz udaljenosti l za slučaj odabira dviju različitih graničnih vrijednosti sive skale.	45
Slika 3-5.	Referentni predmeti za određivanje granične vrijednosti sive skale	45
Slika 3-6.	Ostali referentni predmeti	46
Slika 3-7.	Prijedlog referentnog predmeta.	49
Slika 3-8.	Crtež referentnog predmeta s definiranim dimenzijama.	51
Slika 3-9.	Prijedlog prihvata referentnog predmeta.	51
Slika 3-10.	Podjela utjecajnih parametara kod dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom	54
Slika 3-11.	Simulacija mjernog sustava metodom Monte Carlo.....	59
Slika 3-12.	Postupak provedbe dimenzionalnih mjerenja sukladno ISO 15530-3.....	60
Slika 3-13.	Referentni predmeti korišteni u interkomparaciji CT audit.....	64
Slika 3-14.	Referentni predmeti korišteni u interkomparaciji CIA-CT	65
Slika 3-15.	Industrijski predmeti korišteni u interkomparaciji InteraqCT	67
Slika 4-1.	Grafički prikaz provedbe procesa dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom.	69
Slika 4-2.	Predmeti korišteni u eksperimentalnim istraživanjima	69
Slika 4-3.	CAD model cilindra složene geometrije	70
Slika 4-4.	Crtež cilindra složene geometrije.	71
Slika 4-5.	Odstupanje rezultata mjerenja u ovisnosti o broju projekcija prema teorijski pretpostavljenoj funkciji.	75
Slika 4-6.	Odstupanje rezultata mjerenja dimenzionalnih značajki cilindra jednostavne geometrije s povećanjem broja projekcija.	77
Slika 4-7.	Rekonstruirani modeli za različit broj 2D projekcija	78
Slika 4-8.	Odstupanje rezultata mjerenja ravnosti s povećanjem broja projekcija.	78
Slika 4-9.	Odstupanje rezultata mjerenja okomitosti s povećanjem broja projekcija.	79
Slika 4-10.	Odstupanje rezultata mjerenja paralelnosti s povećanjem broja projekcija.	80
Slika 4-11.	Odstupanje rezultata mjerenja cilindričnosti s povećanjem broja projekcija.	81
Slika 4-12.	Odstupanje rezultata mjerenja koaksijalnosti s povećanjem broja projekcija.	81
Slika 4-13.	Odstupanje rezultata mjerenja vanjskog i unutarnjih promjera s povećanjem broja projekcija.	82

Slika 4-14.	Odstupanje rezultata mjerenja udaljenosti L , l_1 , l_2 , l_3 i l_4 s povećanjem broja projekcija.	83
Slika 4-15.	Prikaz različitih orijentacija predmeta mjerenja tijekom procesa skeniranja	86
Slika 4-16.	Odstupanja rezultata mjerenja duljine L kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra.	88
Slika 4-17.	Odstupanja rezultata mjerenja udaljenosti kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra	89
Slika 4-18.	Odstupanja rezultata mjerenja udaljenosti l_2 kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra.....	90
Slika 4-19.	Odstupanja rezultata mjerenja udaljenosti l_4 kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra.....	90
Slika 4-20.	Odstupanja rezultata mjerenja vanjskog promjera D kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra.....	91
Slika 4-21.	Odstupanja rezultata mjerenja unutarnjih promjera kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra.....	91
Slika 4-22.	Odstupanja rezultata mjerenja unutarnjih promjera kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra.....	92
Slika 4-23.	3D modeli aluminijskog cilindra dobiveni rekonstrukcijom 2D zapisa skeniranja u različitim orijentacijama.	93
Slika 4-24.	Prikaz četiri aluminijska cilindra različite površinske hrapavosti.	96
Slika 4-25.	Rezultati dimenzionalnih mjerenja 4 cilindra u odnosu na izmjerenu hrapavost R_z	99
Slika 4-26.	Rezultati dimenzionalnih mjerenja vanjskog promjera 4 cilindra u odnosu na izmjerenu hrapavost R_z nakon izvršene korekcije rezultata.	99
Slika 4-27.	Osam aluminijskih cilindra različitih površinskih hrapavosti.	100
Slika 4-28.	Rezultati dimenzionalnih mjerenja promjera vanjskog cilindra 8 cilindra u odnosu na izmjerenu hrapavost R_z	101
Slika 4-29.	Utjecaj parametra hrapavosti R_z na rezultate mjerenja vanjskog promjera cilindra.	101
Slika 4-30.	Relacija veličine žarišta i snage izvora zračenja.	103
Slika 4-31.	Utjecaj veličine žarišta i odabranog geometrijskog povećanja na pojavu efekta polusjene.....	104
Slika 4-32.	Efekt polusjene.	104
Slika 4-33.	Ovisnost veličine vokseli i geometrijskog povećanja o udaljenosti predmeta od izvora zračenja.	106

Slika 4-34.	Odstupanja rezultata mjerenja u ovisnosti o geometrijskom povećanju.	107
Slika 4-35.	Promjena faktora korekcije skaliranja u razdoblju od 5 mjeseci.....	109
Slika 4-36.	Primjer utjecaja visoko i niskopropusnih filtera na kvalitetu slike kod rekonstrukcije poliamidnog cilindra složene geometrije.....	114
Slika 4-37.	Primjer utjecaja visokopropusnog i niskopropusnih filtera na izgled 3D modela poliamidnog cilindra složene geometrije.....	114
Slika 5-1.	Simulacija procesa skeniranja virtualnim CT sustavom.....	117
Slika 5-2.	Postavke virtualnog CT sustava.	118
Slika 5-3.	Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(D)$ vanjskog promjera aluminijskog cilindra složene geometrije.	120
Slika 5-4.	Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(d_3)$ unutarnjeg promjera aluminijskog cilindra složene geometrije.	121
Slika 5-5.	Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L)$ duljine aluminijskog cilindra složene geometrije.	123
Slika 5-6.	Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(l_3)$ duljine l_3 aluminijskog cilindra složene geometrije.	124
Slika 5-7.	Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(l_2)$ osnovnog razmaka aluminijskog cilindra složene geometrije.	126
Slika 5-8.	Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(D)$ vanjskog promjera polimernog cilindra složene geometrije.	127
Slika 5-9.	Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(d_3)$ unutarnjeg promjera polimernog cilindra složene geometrije.	129
Slika 5-10.	Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L)$ duljine polimernog cilindra složene geometrije.	130
Slika 5-11.	Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(l_3)$ duljine l_3 polimernog cilindra složene geometrije.	132
Slika 5-12.	Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(l_2)$ osnovnog razmaka polimernog cilindra složene geometrije.	133
Slika 5-13.	Odstupanja dimenzionalnih karakteristika aluminijskog cilindra od referentnih vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima.	135
Slika 5-14.	Odstupanja dimenzionalnih karakteristika polimernog cilindra od referentnih vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima.	135
Slika 5-15.	Radni etalon za osni razmak.....	139
Slika 5-16.	Osiguravanje sljedivosti kod supstitucijske metode mjerenja cilindra složene geometrije.	142

POPIS TABLICA

Tablica 3-1.	Svojstva materijala novog referentnog predmeta.....	50
Tablica 4-1.	Referentne vrijednosti promatranih veličina aluminijskog cilindra složene geometrije.....	71
Tablica 4-2.	Referentne vrijednosti promatranih veličina aluminijskog cilindra složene geometrije.....	72
Tablica 4-3.	Odabrani parametri kod polovičnog djelomičnog plana pokusa.....	73
Tablica 4-4.	Stanje pokusa za odabrani djelomični plan pokusa.....	73
Tablica 4-5.	Prikaz mjernih strategija za odabrane veličine.....	87
Tablica 4-6.	Parametri skeniranja aluminijskih cilindara.....	96
Tablica 4-7.	Postavke parametara mjerenja hrapavosti cilindara.....	97
Tablica 4-8.	Izmjerene vrijednosti površinske hrapavosti cilindara.....	98
Tablica 4-9.	Iznosi referentnih vrijednosti cilindara različitih površinskih hrapavosti.....	98
Tablica 4-10.	Iznosi referentnih vrijednosti.....	100
Tablica 4-11.	Izmjerene vrijednosti površinske hrapavosti svih cilindara.....	100
Tablica 4-12.	Iznosi geometrijskih povećanja.....	105
Tablica 4-13.	Analiza izračunatih rezultata uslijed različitih iznosa faktora skaliranja.....	110
Tablica 4-14.	Odabrani parametri polinomne funkcije kod prilagodbe koeficijenata prigušenja.	111
Tablica 4-15.	Analiza varijance utjecaja korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja prilagodbom koeficijenta prigušenja kod aluminijskog cilindra složene geometrije.....	112
Tablica 4-16.	Analiza varijance utjecaja korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja prilagodbom koeficijenta prigušenja kod polimernog cilindra složene geometrije.....	113
Tablica 4-17.	Parametri filtera korišteni kod rekonstrukcije modela polimernog i aluminijskog cilindra složene geometrije.....	115
Tablica 4-18.	Rezultati analize varijance utjecaja Hannova i medijan filtera za uklanjanje statističkih šumova kod aluminijskog cilindra.....	116
Tablica 5-1.	Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine D aluminijskog cilindra složene geometrije.....	119
Tablica 5-2.	Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine d_3 aluminijskog cilindra složene geometrije.....	121

Tablica 5-3.	Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine L aluminijskog cilindra složene geometrije.	122
Tablica 5-4.	Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine l_3 aluminijskog cilindra složene geometrije.	124
Tablica 5-5.	Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine l_2 aluminijskog cilindra složene geometrije.	125
Tablica 5-6.	Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine D polimernog cilindra složene geometrije.	127
Tablica 5-7.	Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine d_3 polimernog cilindra složene geometrije.	128
Tablica 5-8.	Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine L polimernog cilindra složene geometrije.	130
Tablica 5-9.	Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine l_3 polimernog cilindra složene geometrije.	131
Tablica 5-10.	Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine l_2 polimernog cilindra složene geometrije.	133
Tablica 5-11.	Rezultati mjerenja dimenzionalnih karakteristika aluminijskog cilindra s pripadnim mjernim nesigurnostima i faktorom slaganja En	134
Tablica 5-12.	Rezultati mjerenja dimenzionalnih karakteristika polimernog cilindra s pripadnim mjernim nesigurnostima i faktorom slaganja En	135
Tablica 5-13.	Supstitucijska metoda na primjeru aluminijskog cilindra složene geometrije.	138
Tablica 5-14.	Rezultati CMM i CT mjerenja različitih veličina reprezentativnog aluminijskog uzorka s procjenom mjerne nesigurnosti sukladno ISO 15530-3:2011.	140
Tablica 5-15.	Rezultati CMM i CT mjerenja različitih veličina reprezentativnog polimernog uzorka s procjenom mjerne nesigurnosti sukladno ISO 15530-3:2011.	140

POPIS OZNAKA

Poglavlje 2.

I_z	W/sr	intenzitet elektromagnetskog zračenja
Z		atomski broj kemijskog elementa
f_j	Hz	frekvencija emitiranog fotona
E_n	eV	energija vezanja elektrona ljuske elektronskog omotača n
E_m	eV	energija vezanja elektrona niže ljuske elektronskog omotača
h	Js	Planckova konstanta iznosa $6,626 \times 10^{-34}$ J·s
f_α	Hz	frekvencija fotona emitiranog iz prve susjedne ljuske
f_β	Hz	frekvencija fotona emitiranog iz druge susjedne ljuske
K, L, M		ljuska elektronskog omotača
K_α, K_β		karakteristične rendgenske zrake
I	W/sr	intenzitet monokromatskog zračenja
I_0	W/sr	početni intenzitet
d	mm	debljina predmeta, put kojim prolazi zračenje
I_{poli}	W/sr	intenzitet polikromatskog zračenja
E_{max}	eV	najveća energija u spektru zračenja
μ	m^{-1}	ukupan koeficijent prigušenja rendgenskog zračenja
μ_{fe}	m^{-1}	koeficijent prigušenja rendgenskog zračenja uslijed fotoelektričnog efekta
μ_{koh}	m^{-1}	koeficijent prigušenja rendgenskog zračenja uslijed koherentnog raspršenja
μ_{necoh}	m^{-1}	koeficijent prigušenja rendgenskog zračenja uslijed nekoherentnog raspršenja
$g(s, \theta)$		jednodimenzionalna projekcija funkcije pod kutem θ
θ	rad	kut projiciranja
$\delta(x)$		Diracova distribucija
x, y		kartezijeve koordinate
s, u		kartezijeve koordinate u koordinatnom sustavu zarotiranom za kut θ
$\tilde{f}$		funkcija dobivena inverznom Radonovom transformacijom
$\mathbf{B}$		operator povratne projekcije
$\mathbf{R}$		operator Radonove transformacije
f	Hz	prostorna frekvencija slike (engl. <i>spatial frequency</i>)
f_m	Hz	granična frekvencija niskopropusnog filtera
H_n		Hannov filter

H_m		Hammov filter
Y	m^{-1}	polinomna funkcija metode prilagodbe koeficijenata prigušenja
X	m^{-1}	izmjerena vrijednost prigušenja
a, b, c, d, e, f		parametri kod korekcije otvrdnjavanja snopa prilagodbom koeficijenata prigušenja
E_f	eV	energija ulaznog fotona
E_e	eV	kinetička energija izbačenog elektrona
E_f	eV	energija otklonjenog fotona
c	ms^{-1}	brzina svjetlosti
m_e	kg	masa elektrona, $9,1 \times 10^{-31}$ kg
p_e		količina gibanja elektrona

Poglavlje 3.

gv1		vrijednost 1 na sivoj skali
gv2		vrijednost 2 na sivoj skali
l_1	mm	udaljenost ploha za iznos sive skale gv1
l_2	mm	udaljenost ploha za iznos sive skale gv2
MPE_E	mm	granična pogreška mjerenja duljine
R	mm	promjer kuglice referentnog predmeta
U	μm	mjerna nesigurnost
k		faktor proširenja
P		vjerojatnost događaja
$u(\bar{x}_i)$	mm	standardno odstupanje
$\bar{x}_i$	mm	aritmetička sredina
U_{CT}	μm	proširena mjerna nesigurnosti rezultata mjerenja industrijskom računalnom tomografijom
u_{ref}	μm	standardna mjerna nesigurnost referentne metode mjerenja
u_p	μm	standardna mjerna nesigurnost mjerne procedure
u_e	μm	standardna mjerna nesigurnost uslijed utjecaja okoliša
U_{ref}	μm	proširena mjerna nesigurnosti referentne metode mjerenja
h		faktor sigurnosti
n		broj ponovljenih mjerenja
s	μm	standardna devijacija

u_{inst}	μm	mjerna nesigurnost korištenog uređaja
MPE	μm	granična pogreška uređaja
M		broj simulacija Monte Carlo
$g(x)$		funkcija gustoće
b	mm	sustavni pomak
Y_{CT}	mm	potpuni rezultat mjerenja industrijskom računalnom tomografijom
$\bar{y}_{\text{CT}}$	mm	srednja vrijednost rezultata ponovljenih mjerenja
U_{CT^*}	μm	proširena mjerna nesigurnosti rezultata mjerenja industrijskom računalnom tomografijom sukladno ISO 15530-3:2011
u_b	μm	standardna mjerna nesigurnost uslijed korekcije sustavnog pomaka
En		faktor slaganja

Poglavlje 4.

A, B, C, D, E		oznake ploha na cilindru složene geometrije
D	mm	vanjski promjer cilindra složene geometrije
d_1	mm	unutarnji promjer 1 cilindra složene geometrije
d_2	mm	unutarnji promjer 2 cilindra složene geometrije
d_3	mm	unutarnji promjer 3 cilindra složene geometrije
d_4	mm	unutarnji promjer 4 cilindra složene geometrije
L	mm	duljina cilindra složene geometrije
l_1	mm	udaljenost između plohe A i cilindra d_1
l_2	mm	osni razmak cilindara d_1 i d_2
l_3	mm	udaljenost između plohe B i cilindra d_2
l_4	mm	udaljenost između ploha C i E
A		ulazni parametar plana pokusa – geometrijsko povećanje
B	μA	ulazni parametar plana pokusa – jakost struje rendgenske cijevi
C	kV	ulazni parametar plana pokusa – napon rendgenske cijevi
D		ulazni parametar plana pokusa – broj projekcija
E		ulazni parametar plana pokusa – metoda definiranja granične vrijednosti sive skale
F		ulazni parametar plana pokusa – korekcija artefakata otvrdnjavanja zračenja
G	bit	ulazni parametar plana pokusa – format podataka
n		broj projekcija

$\varphi_{\text{rot.}}$	$^{\circ}$	kut zakreta rotacijskog stola
n_{min}		minimalan broj projekcija
r	mm	maksimalna udaljenost predmeta od osi rotacije
v_0	mm	veličina voksel
ΔL	μm	odstupanje duljine cilindra od referentne vrijednosti
Δl_1	μm	odstupanje duljine l_1 od referentne vrijednosti
Δl_2	μm	odstupanje duljine l_2 od referentne vrijednosti
Δl_3	μm	odstupanje duljine l_3 od referentne vrijednosti
Δl_4	μm	odstupanje duljine l_4 od referentne vrijednosti
ΔD	μm	odstupanje iznosa promjera D od referentne vrijednosti
Δd_1	μm	odstupanje iznosa promjera d_1 od referentne vrijednosti
Δd_2	μm	odstupanje iznosa promjera d_2 od referentne vrijednosti
Δd_3	μm	odstupanje iznosa promjera d_3 od referentne vrijednosti
Δd_4	μm	odstupanje iznosa promjera d_4 od referentne vrijednosti
n_{krit}		kritični broj projekcija
u_w	μm	kombinirana sastavnica mjerne nesigurnosti utjecaja predmeta mjerenja
ΔL_t	μm	promjena duljine predmeta uslijed promjene temperature
β		koeficijent pravokutne raspodjele
Rz_{mean}	μm	srednja vrijednost parametra Rz ispitivane površine
Rp	μm	Parametar hrapavosti – najveća visina vrha profila
Rz	μm	Parametar hrapavosti – najveća visina profila na referentnoj duljini
λ_c	mm	granična vrijednost filtera
l_n	mm	duljina vrednovanja hrapavosti
RSm	mm	Parametar hrapavosti – srednji korak elemenata profila
k		faktor proširenja
P	%	vjerojatnost događaja
U	μm	proširena mjerna nesigurnost
a	mm	veličina senzora na detektoru
GP		geometrijsko povećanje
UIP	mm	udaljenost od izvora zračenja do predmeta mjerenja
UID	mm	udaljenost od izvora zračenja do detektora
GP_{max}		najveća dopuštena vrijednost geometrijskog povećanja
$\check{S}_D$	mm	širina slike predmeta projiciranog na detektoru

$\check{S}_P$	mm	najveća horizontalna dimenzija predmeta mjerenja
f	μm	veličina žarišta
p	μm	polusjena
U_{izv}	kV	napon izvora rendgenskog zračenja
I_{izv}	μA	jakost struje izvora rendgenskog zračenja
v	μm	korigirana veličina voksel
C_s		faktor korekcije skaliranja
l_{CT}	mm	duljina izmjerena CT sustavom, nekorrigirana
$l_{\text{referentno}}$	mm	referentna duljina
$GP_{\min}$		izračunata minimalna vrijednost geometrijskog povećanja
$GP_{\max}$		izračunata maksimalna vrijednost geometrijskog povećanja
GP_{softver}		vrijednost geometrijskog povećanja definirana u softveru
L_{CT}	mm	duljina referentnog štapića izmjerena CT-om
$L_{CT\min}$	mm	izračunata minimalna duljina referentnog štapića
$L_{CT\max}$	mm	izračunata maksimalna duljina referentnog štapića
$C_{s\min}$		izračunati minimalan faktor korekcije skaliranja
$C_{s\max}$		izračunati maksimalan faktor korekcije skaliranja
a, b, c, d, e, f		parametri kod korekcije otvrdnjavanja snopa prilagodbom koeficijenata prigušenja
H_0		nulta hipoteza
H_1		alternativna hipoteza
α_{rizik}		prag signifikantnosti
$\bar{x}_i$	mm	aritmetička sredina rezultata mjerenja
σ_i^2	mm	varijanca rezultata mjerenja

Poglavlje 5.

L_{sref}	mm	referentna udaljenost osnovnog razmaka predmeta za skaliranje
L_{sCT}	mm	udaljenost osnovnog razmaka predmeta za skaliranje mjerena računalnom tomografijom
x_{tresh}		utjecaj odabira granične vrijednosti sive skale
α_p	K^{-1}	koeficijent temperaturnog rastezanja predmeta mjerenja
t_p	$^{\circ}\text{C}$	razlika temperature predmeta mjerenja u odnosu na 20°C
Rz_p	μm	parametar hrapavosti predmeta mjerenja

x_i		ulazne veličine
$g(x_i)$		funkcija gustoće vjerojatnosti ulazne veličine x_i
$Y_{0,025}$	mm	donja granica izlazne veličine
$Y_{0,975}$	mm	gornja granica izlazne veličine
En		faktor slaganja
$\bar{x}_{\text{ref}}$	mm	aritmetička sredina rezultata mjerenja referentnom CMM metodom
$\bar{x}_{\text{CT}}$	mm	aritmetička sredina rezultata mjerenja računalnom tomografijom
U_{ref}	μm	proširena mjerna nesigurnost rezultata mjerenja referentnom CMM metodom
U_{CT}	μm	proširena mjerna nesigurnost rezultata mjerenja računalnom tomografijom
$u_{p_{Y_{\text{ICT}}}}$	μm	sastavnica standardne mjerne nesigurnosti mjerne procedure
n		broj mjerenja
u_w	μm	sastavnica standardne mjerne nesigurnosti predmeta mjerenja
u_α	μm	nesigurnost temperaturnog koeficijenta rastezanja ispitnog predmeta
u_{ab}	μm	nesigurnost temperaturnog koeficijenta rastezanja reprezentativnog predmeta

POPIS KRATICA

Poglavlje 1.

<i>aRTist</i>	<i>Analytical RT Inspection Simulation Tool</i> – Alat za simuliranje radiografskih analitičkih ispitivanja
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – računalom potpomognuto oblikovanje
CT	<i>Computed Tomography</i> – računalna tomografija
ISO	<i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i> – Zajednički odbor za upute u mjeriteljstvu
MCS	<i>Monte Carlo Simulation</i> – Monte Carlo simulacija
VDE	<i>Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik</i> – Udruga za elektrotehniku, elektroniku i informatičku tehnologiju
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> – Društvo njemačkih inženjera

Poglavlje 2.

FPD	<i>Flat Panel Detector</i> – pločasti detektor
ISO 50 %	Metoda određivanja granične vrijednosti sivila
ROI	<i>Region of interest</i> – regija od interesa

Poglavlje 3.

CFPR	<i>Carbon fiber reinforced polymer</i> - polimerni kompozit ojačan ugljičnim vlaknima
CIA-CT	<i>Centre for Industrial Application of CT Scanning</i> – Centar za industrijsku primjenu CT skeniranja
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i> – trokoordinatni mjerni uređaj
CT audit	<i>Computed tomography audit</i> - naziv interkomparacije
DTU	<i>Danmarks Tekniske Universitet</i> – Tehničko sveučilište u Danskoj
GUM	<i>Guide to the expression of Uncertainty in Measurement</i> – Vodič za procjenu mjerne nesigurnosti
InteraqCT	Naziv međunarodne interkomparacije

JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i> – Zajednički odbor za upute u mjeriteljstvu
MPE_E	<i>Maximum permissible error</i> - granična pogreška mjerenja duljine
PUMA	<i>Procedure for Uncertainty Management</i> – Procedura za upravljanje nesigurnostima
PTB	<i>Physikalisch-Technische Bundesanstalt</i> – Državni fizikalno-tehnički institut
QFM cilindar	<i>Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik</i> cilindar

Poglavlje 4.

ANOVA	Analiza varijance
CT-Pro	Naziv softvera za provedbu rekonstrukcije 3D modela
PA 6	Poliamid 6 – vrsta materijala
VGStudio MAX	<i>Volume Graphics Studio</i> MAX– naziv softvera za analizu 3D modela

Poglavlje 5.

CMM	<i>Coordinate measuring machine</i> – koordinatni mjerni uređaj
VCMM	<i>Virtual coordinate measuring machine</i> – virtualni koordinatni mjerni uređaj

1. UVOD

Računalna tomografija (engl. *computed tomography* - CT) je jedna od metoda u dimenzionalnom mjeriteljstvu kojom je omogućeno mjerenje vanjskih i unutarnjih geometrija i struktura predmeta mjerenja skeniranjem predmeta rendgenskim zračenjem. Naziv dolazi od grč. riječi *tomos* što znači isječak i *graphein* što znači pisati te bi doslovan prijevod glasio *zapis o isječku*. Riječ je o trodimenzionalnoj metodi mjerenja dimenzija s mnogobrojnim prednostima. Ono što ovu metodu čini interesantnom u području dimenzionalnog mjeriteljstva jest činjenica da se radi o nerazornoj metodi mjerenja kojom je omogućeno mjerenje unutarnjih dimenzionalnih i geometrijskih značajki predmeta. Metoda je pogodna za analizu dijelova u sklopu bez potrebe za njegovim rastavljanjem što je od velikog značaja u slučajevima kad bi rastavljanje sklopa dovelo do mogućih dodatnih modifikacija, ili bi predugo trajalo. Još jedna od prednosti jest i mogućnost istovremene provedbe analize pora i pukotina, ili uključaka na istom modelu na kojem se radi i dimenzionalna analiza. Metoda računalne tomografije je pogodna za mjerenje složenih geometrija, a kako je riječ o beskontaktnoj metodi ispitivanja, pogodna je i kod mjerenja deformabilnih predmeta. Iz navedenog je razvidan značaj daljnjeg razvoja računalne tomografije u području dimenzionalnog mjeriteljstva.

Jedan od preduvjeta za širu implementaciju metode računalne tomografije u području dimenzionalnog mjeriteljstva u granama industrije jest osiguravanje sljedivosti dobivenih rezultata mjerenja. Međutim, s obzirom na to da je područje dimenzionalnog mjeriteljstva računalnom tomografijom novo područje istraživanja, te s obzirom na to da se radi o izuzetno složenom sustavu mjerenja s velikim brojem utjecajnih parametara, mjerna nesigurnost rezultata mjerenja, kao ni mjeriteljska sljedivost, u općem slučaju nisu osigurane. Postoji potreba za daljnjim istraživanjem metode i njenom implementacijom u šire industrijsko područje, što znači daljnja istraživanja u pogledu utvrđivanja mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja, kao i osiguravanja sljedivosti rezultata mjerenja.

1.1 Motivacija

Istraživanje u području primjene računalne tomografije u dimenzionalnom mjeriteljstvu u temelju ima potrebu za rješavanjem jednog od znanstvenih pitanja; pitanje osiguravanja sljedivosti.

Zahtjevi za sve sofisticiranijim CT uređajima javljaju se u područjima molekularnih karakterizacija supstanci, u prehrambenoj industriji kao alat za detekciju kontaminata (stakla, papira, plastike) u hrani, u sigurnosnim sustavima koji se koriste u zrakoplovnim lukama, u automobilske industriji, u industriji goriva, elektroničkih komponenata, kod povratnog inženjerstva i sl. [1, 2]. Preduvjet za implementaciju metode računalne tomografije u području dimenzionalnog mjerenja u spomenutim granama jest osiguravanje sljedivosti dobivenih rezultata mjerenja. S obzirom da je područje dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom novo područje istraživanja, trenutno ne postoje rezultati teorijskih ili eksperimentalnih istraživanja koji bi egzaktno propisali načine utvrđivanja mjernih mogućnosti ove vrste uređaja.

Metoda dimenzionalnog mjerenja računalnom tomografijom pripada grupi metoda trokoordinatnog mjerenja te su istraživanja usmjerena na primjenu postojećih normi za mjerenje trokoordinatnim mjernim uređajima. Kako je riječ o složenim sustavima s velikim brojem utjecajnih parametara, utvrđeno je kako postojeće norme za mjerenje trokoordinatnim mjernim uređajima nisu primjenjive te je stoga potrebno uvesti nove norme za CT mjerne uređaje. U polju normizacije najveći doprinos dan je od strane Njemačkog udruženja inženjera (VDI) koje je razvilo nacrt norme *VDI/VDE 2630 Part 1.3. Computed tomography in dimensional measurements*. Norma opisuje upotrebu referentnih etalona osnovnih geometrijskih oblika. S obzirom da je metoda računalne tomografije prvenstveno namijenjena mjerenju složenih geometrijskih oblika, kao i mjerenju dimenzija elemenata nedostupnih kontaktnim mjernim uređajima, problem osiguravanja sljedivosti rezultata mjerenja značajki predmeta složene geometrije ostaje otvoren za daljnja istraživanja [2-5]. Pristup usporedbe rezultata mjerenja dobivenih mjerenjima trokoordinatnim kontaktnim, optičkim i CT uređajima pokazao je kako su rezultati dobiveni računalnom tomografijom usporedivi s rezultatima dobivenim optičkim i kontaktnim uređajima [6-8]. Time se otvaraju mogućnosti korištenja usporedbenih metoda u osiguravanju sljedivosti metode računalne tomografije.

Nadalje, točnost i preciznost mjerenja ovise o poznavanju i mogućnosti kvantificiranja utjecajnih veličina koje se javljaju kod mjerenja [9, 10]. Iz tog razloga provodi se usporedba 3D modela dobivenog CT skeniranjem i modela dobivenog 3D kontaktnom metodom mjerenja. Analogno tome moguće je usporediti CAD model s 3D modelom rekonstruiranih 2D zapisa nastalih skeniranjem predmeta. Problem kod ovakve usporedbe jest taj što nije poznato jesu li odstupanja rezultata povezana s varijacijama unutar proizvodnog procesa, odnosno jesu li ona prikaz stvarnog stanja proizvoda ili su dobivena odstupanja povezana s

netočnošću procesa CT mjerenja i pogrešaka koje se javljaju kod rekonstrukcije 3D modela na temelju skeniranih slika [11].

Kako je CT mjerni sustav složen, a kompleksnost mjerenja se očituje velikim brojem parametara koji utječu na cjelokupan proces, identifikacija i korekcija tih parametara predstavlja pravi izazov u području dimenzionalnog mjerenja. Do danas još nije poznat konačan broj parametara koji utječu na rezultate mjerenja dobivene metodom računalne tomografije na području dimenzionalnog mjeriteljstva, kao ni udio njihova utjecaja na rezultat mjerenja. Stoga za primjenu računalne tomografije u dimenzionalnom mjeriteljstvu u općem slučaju nije moguće procijeniti nesigurnost rezultata mjerenja niti osigurati sljedivost rezultata do definicije metra.

Opći zaključak, iz kojeg proizlazi motivacija ovog doktorskog rada u području istraživanja mogućnosti dimenzionalnog mjerenja metodom računalne tomografije, jest postojanje potrebe za daljnjim istraživanjem metode i njenom što skorijom implementacijom u industrijsko područje, što znači daljnja istraživanja u pogledu utvrđivanja metode umjeravanja sustava, kao i osiguravanja sljedivosti rezultata mjerenja.

1.2 Cilj i hipoteza istraživanja

Cilj istraživanja:

Cilj istraživanja jest doprinijeti razvoju metode umjeravanja CT mjernog sustava te procijeniti mjernu nesigurnost rezultata mjerenja na području dimenzionalnog mjeriteljstva kojom bi se osigurala sljedivost rezultata mjerenja do definicije SI jedinice. Za ostvarenje cilja potrebno je istražiti, opisati i optimirati značajke elemenata mjernog sustava.

Hipoteza istraživanja:

Izborom optimalnih vrijednosti ulaznih parametara CT mjernog sustava, korekcijom sustavnih pogrešaka, modeliranjem referentnog etalona, kvantificiranjem utjecaja stanja površine i gustoće materijala predmeta mjerenja te njihovih interakcija moguće je osigurati sljedivost rezultata mjerenja do definicije SI jedinice.

1.3 Metode i plan istraživanja

Predložena istraživanja odnose se na uspostavljanje sljedivosti rezultata mjerenja računalnom tomografijom do definicije metra pri čemu je potrebno identificirati, opisati i istražiti značajke elemenata mjernog sustava. U cilju potvrđivanja postavljene znanstvene hipoteze provedena su teorijska i eksperimentalna istraživanja kako je dano u nastavku.

U teorijskom dijelu rada opisan je proces provedbe dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom pri čemu je proces provedbe mjerenja podijeljen i razmatran u tri odvojena potprocesa: provedba CT skeniranja, rekonstrukcija slika te provedba dimenzionalne analize dobivenog modela predmeta. Identificirani su utjecajni parametri u svakom od potprocesa te je utvrđen njihov utjecaj na pojavu pogrešaka kod mjerenja.

Temeljem istaknute potrebe osiguravanja mjeriteljske sljedivosti kao glavnog preduvjeta za potpunu implementaciju računalne tomografije u dimenzionalno mjeriteljstvo, provedena su eksperimentalna istraživanja utjecajnih parametara na cjelokupan proces mjerenja te je predložen novi referentni predmet.

Kako se radi o izrazito složenom mjernom sustavu kod kojeg je broj utjecajnih parametara velik, u prvom dijelu istraživanja proveden je plan pokusa. Odabran je djelomični faktorski plan pokusa koji se koristi kod verifikacijskih analiza u ranoj fazi istraživanja kada se uzima u obzir velik broj utjecajnih parametara na izlaznu varijablu te se postupno odvajaju oni parametri koji nemaju značajan utjecaj na izlaznu varijablu. Djelomičnim planom pokusa istražen je utjecaj sedam ulaznih parametara na rezultate mjerenja računalnom tomografijom. Odabrani su parametri iz svakog od prethodno definiranih potprocesa čime je obuhvaćen cijeli proces provedbe dimenzionalnih CT mjerenja. Analizom rezultata utvrđeni su značajni utjecajni parametri na rezultate mjerenja računalnom tomografijom.

U radu su provedena eksperimentalna istraživanja parametara postavljanja predmeta u potprocesu CT skeniranja u odnosu na os rotacije te udaljenosti od izvora zračenja. Analiziran je parametar odabira broja projekcija značajan za kvalitetu modela i trajanje procesa dimenzionalnih mjerenja. Istraženi su utjecaji provedbe softverske korekcije te kombinacije softverske i fizičke korekcije artefakata otvrdnjavanja rendgenskog zračenja u slučaju mjerenja dvaju predmeta značajno različitih gustoća materijala. Na istim predmetima promatran je utjecaj primjene filtera za uklanjanje statističkih šumova neobrađenih CT podataka na rezultate mjerenja.

U radu je postavljen matematički model za procjenu mjerne nesigurnosti na području dimenzionalnog mjeriteljstva. Mjerna nesigurnost rezultata mjerenja je procijenjena sukladno

normi ISO 15530-3:2011 odnosno smjernicama *VDI/VDE 2630 Part 2.1*, te kombinacijom Monte Carlo simulacija (MCS) sukladno normi JCGM 101:2008 i virtualnog CT sustava korištenjem softverskog paketa *aRTist*. MCS metoda se temelji na generiranju slučajnih brojeva iz funkcija gustoće vjerojatnosti za svaku ulaznu veličinu i stvaranju odgovarajuće vrijednosti izlazne veličine. Procjena izlazne veličine, procijenjeno standardno odstupanje te procjena intervala za zadanu vjerojatnost dobiveni su iz eksperimentalne funkcije gustoće vjerojatnosti. Usporedba rezultata mjerenja s referentnim vrijednostima, dobivenim mjerenjima na kontaktnom trokoordinatnom mjernom uređaju, provedena je izračunom faktora slaganja *En*.

Upotreba referentnog predmeta u svrhu identifikacije i kompenzacije sustavnih pogrešaka prepoznat je pristup osiguravanja sljedivosti kod kontaktnih trokoordinatnih mjernih uređaja. U nastojanjima osiguravanja sljedivosti kod dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom do danas je, od strane većeg broja autora, predložen velik broj referentnih predmeta s namjenom korekcije sustavnih pogrešaka mjernog sustava. Međutim, još uvijek ne postoji jedan referentni predmet kojim je moguće provesti korekciju većeg broja sustavnih pogrešaka. Slijedom navedenog, u radu je, u okviru istraživanja na području modeliranja referentnog predmeta provedena sistematizacija referentnih predmeta koji se danas koriste kod primjene računalne tomografije u području dimenzionalnog mjeriteljstva. Sistematizacija je provedena prema namjeni referentnog predmeta za korekciju različitih vrsta pogrešaka kao i prema geometriji predmeta. Na osnovu istraživanja njihovih značajki te sukladno smjernicama *VDI/VDE 2630 - Part 1.3*, predložen je model referentnog predmeta kod primjene računalne tomografije u području dimenzionalnog mjeriteljstva.

Za potrebe provođenja eksperimenata korištena je mjerna oprema Laboratorija za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu te mjerna oprema poduzeća P.P.C. Buzet i poduzeća Oprema-strojevi d.d.. Dio istraživanja proveden je simulacijom procesa CT skeniranja u softverskom paketu *aRTist*.

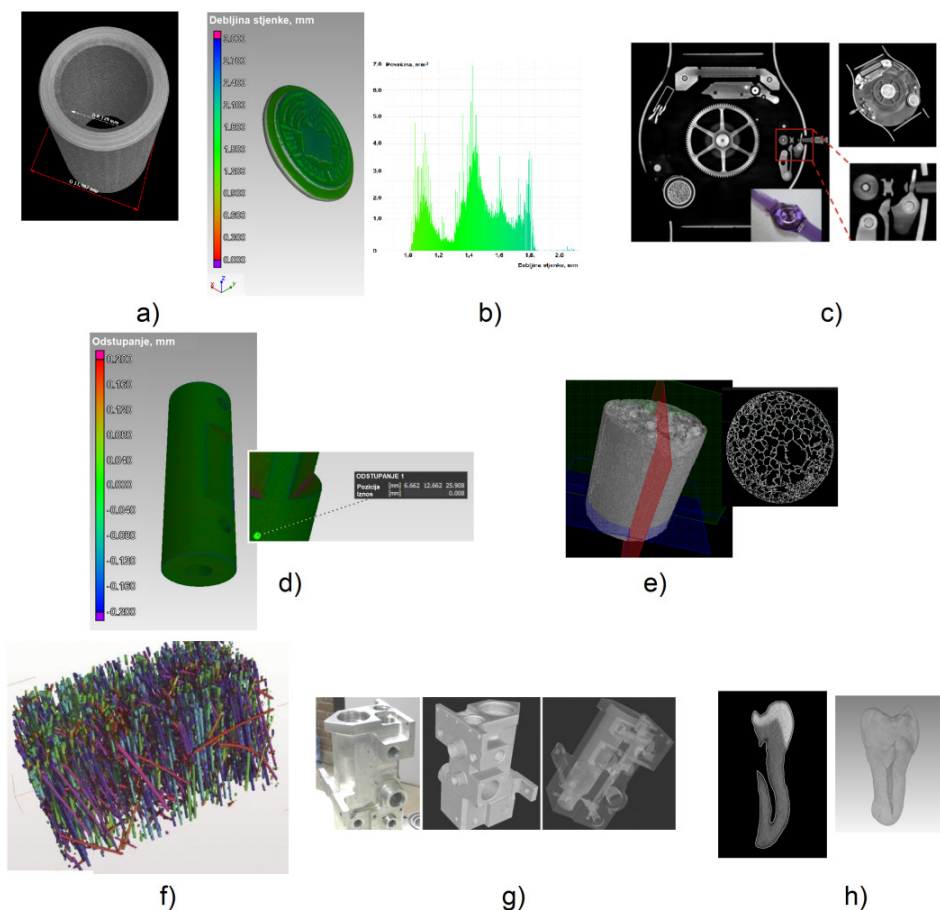
1.4 Znanstveni doprinos

Istraživanjima provedenim u ovom radu dan je znanstveni doprinos utvrđivanju, kvantifikaciji te minimizaciji utjecaja parametara CT mjernog sustava na točnost i preciznost rezultata mjerenja. Obuhvaćeni su doprinosi umjeravanja CT mjernog sustava te je procijenjena mjerna nesigurnost rezultata mjerenja u cilju osiguravanja sljedivosti rezultata mjerenja do definicije SI jedinice dužine.

2. RAČUNALNA TOMOGRAFIJA U DIMENZIONALNOM MJERITELJSTVU

2.1 Primjena CT dimenzionalnih mjerenja

Računalna tomografija (CT) u dimenzionalnom mjeriteljstvu je metoda kojom je omogućeno mjerenje vanjskih i unutarnjih geometrija predmeta mjerenja skeniranjem predmeta rendgenskim zračenjem. Riječ je o nerazornoj metodi ispitivanja koja omogućava mjerenje unutarnje, drugim metodama nedostupne, geometrije predmeta što je čini interesantnom u širokoj primjeni. Kao takva, metoda ima velik potencijal s obzirom na pojavu novih metoda proizvodnje, kao što su metode aditivnih tehnologija ili metode injekcijskog prešanja, kojima je omogućena izrada predmeta složenih unutarnjih, fizički nedostupnih, geometrija. Upravo u ovim proizvodnim procesima, metoda računalne tomografije omogućuje nerazorno 3D mjerenje dimenzija, i kao takva ima velik značaj. Nadalje, metoda je pogodna i kod analize sklopova, bez potrebe za njihovim rastavljanjem. Često kod sklapanja dijelova nastaje neispravan predmet, iako je svaka od zasebnih komponenata koje čine sklop izrađena prema zahtijevanim dimenzijama i unutar zahtijevanih tolerancija. Međutim, uslijed nekih propusta, moguće je da sastavljen predmet neće funkcionirati. Rastavljanjem sklopa te ponovnom analizom svakog pojedinog dijela u nekim slučajevima nije moguće identificirati razlog neispravnosti ukupnog sklopa, ili pak rastavljanjem sastavljenog dijela moguće je prouzročiti naknadne deformacije pojedinih dijelova te se konačno ne može znati je li rezultat nastale deformacije posljedica rastavljanja sklopa ili je ona nastala tijekom sastavljanja sklopa. Činjenica kako se radi o trenutno jedinoj metodi koja omogućuje istovremenu provedbu dimenzionalnog mjerenja i nerazornog ispitivanja kvalitete materijala čini je interesantnom za primjenu u širokom spektru industrijske proizvodnje [12]. Slika 2-1 prikazuje primjere primjene industrijske računalne tomografije.

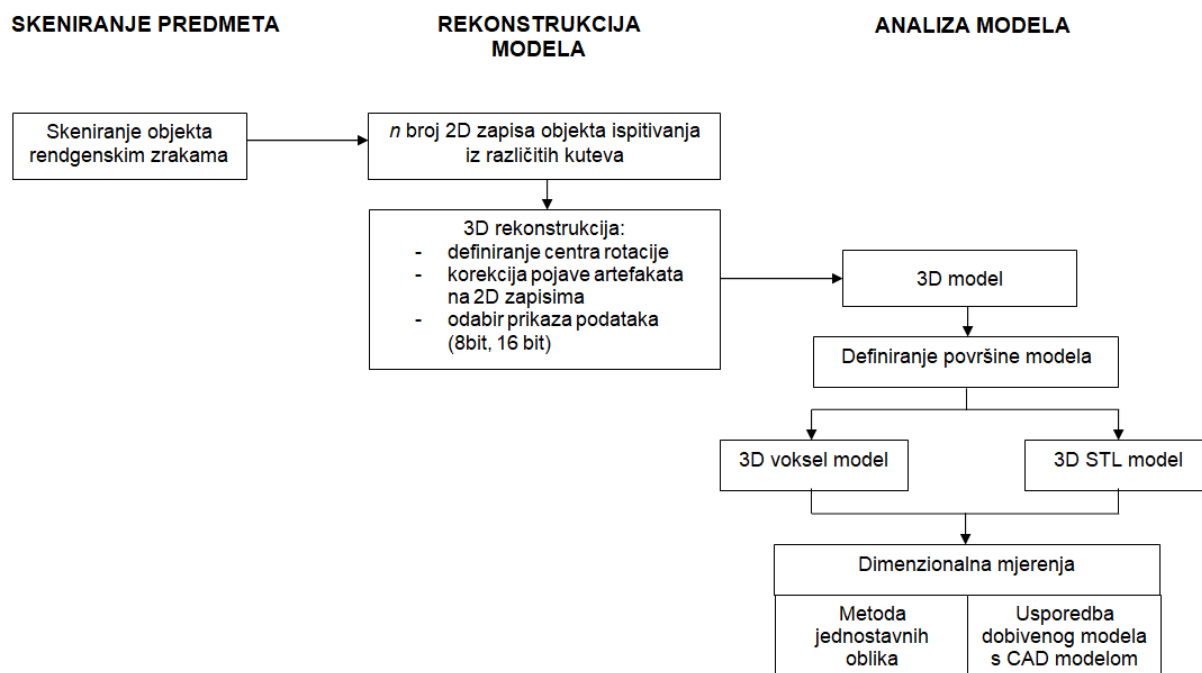


Slika 2-1. Primjena industrijske računalne tomografije.

a) dimenzionalna mjerenja, b) analiza debljine stijenke, c) prikaz mehanizma ručnog sata [13], d) usporedba snimljene geometrije s CAD modelom, e) analiza strukture aluminijske pjene, f) analiza orijentacije polimernih vlakana [13], g) dimenzionalna mjerenja unutarnje geometrije predmeta [13], h) analiza zuba.

2.2 Postupak provedbe dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom

Uslijed složenosti procesa provedbe dimenzionalnog mjerenja računalnom tomografijom, proces je moguće podijeliti u tri veća potprocesa: potproces CT skeniranja, potproces rekonstrukcije modela te potproces provedbe analize dobivenog 3D modela tj. provedba dimenzionalnog mjerenja (slika 2-2).

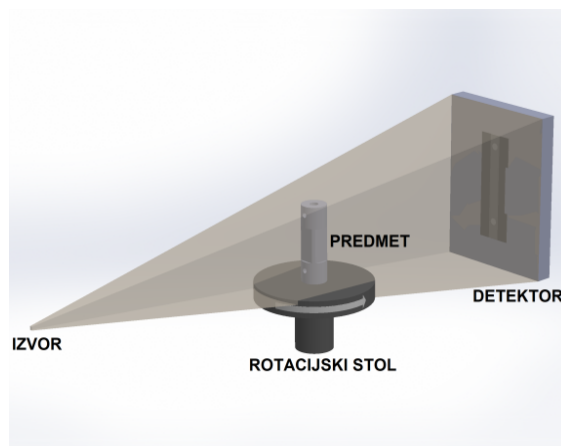


Slika 2-2. Proces provedbe dimenzionalnog mjerenja računalnom tomografijom.

U provedbi mjerenja računalnom tomografijom može sudjelovati jedna ili više osoba. Postupak pripreme skeniranja predmeta može provoditi jedna osoba, dok postupak obrade 2D zapisa i rekonstrukcije modela te analize modela može provoditi druga osoba. U tom slučaju osobu koja provodi skeniranje predmeta nazivamo operaterom, dok osobu koja provodi rekonstrukciju i analizu modela nazivamo mjeriteljem. Operater najčešće ne provodi daljnju obradu podataka dobivenih skeniranjem, dok mjeritelj može provesti cijeli postupak dimenzionalnog mjerenja računalnom tomografijom. U okviru ovog doktorskog rada neće se razdvajati poslovi operatera i mjeritelja, već će se cijeli postupak mjerenja razmatrati kao proces proveden od strane jedne osobe, mjeritelja.

2.2.1 Skeniranje predmeta

Prvi korak, skeniranje predmeta, provodi se u uređaju, CT skeneru, a podrazumijeva prikupljanje podataka nastalih prolaskom rendgenskog zračenja kroz predmet za vrijeme rotacije na rotacijskom stolu za puni krug. U tom procesu detektor zaprima prigušeno zračenje nastalo uslijed prolaska zračenja kroz predmet ispitivanja te ih bilježi u obliku velikog broj 2D zapisa (slika 2-3). Svaki 2D zapis odgovara prikazu predmeta svojstvenog za jedan zakret rotacijskog stola tijekom rotacije za puni krug.



Slika 2-3. Prikaz provedbe skeniranja predmeta računalnom tomografijom u jednom zakretu rotacijskog stola.

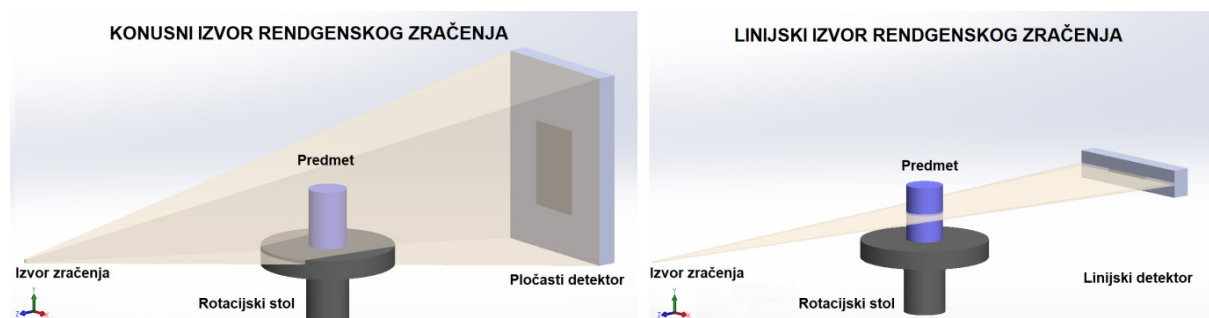
Slika 2-4 prikazuje CT skener koji se nalazi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina. Riječ je o modelu XT H 225, proizvođača Nikon.



Slika 2-4. Industrijski CT skener Nikon XT H 225.

Postoji više vrsta industrijskih CT skenera, međutim svaki se sastoji od izvora rendgenskog zračenja, rotacijskog stola na kojem se nalazi predmet ispitivanja te detektora koji prikuplja zapise predmeta snimljene pod različitim kutovima. Osnovna podjela industrijskih CT skenera provodi se prema poprečnom presjeku snopa rendgenskog zračenja na linijske ili 2D-CT skenere i konusne ili 3D-CT skenere. Konusni CT skeneri ponekad se u literaturi nazivaju i piramidalni. CT skeneri se razlikuju i po provedbi procesa skeniranja. Detektori također moraju biti prilagođeni geometriji snopa rendgenskog zračenja. Kod linijskih CT skenera u sustav su implementirani linijski ili 1D detektori koji se zajedno s izvorom zračenja translacijski za vrijeme skeniranja pomiču po vertikalnoj osi. Kod konusnih CT skenera koristi se detektor u obliku pravokutnika (engl. *flat panel*) tj. 2D detektor koji

zajedno s izvorom zračenja za vrijeme skeniranja miruje, dok predmet mjerenja rotira. Slika 2-5 prikazuje konfiguraciju linijskog i konusnog industrijskog CT uređaja.

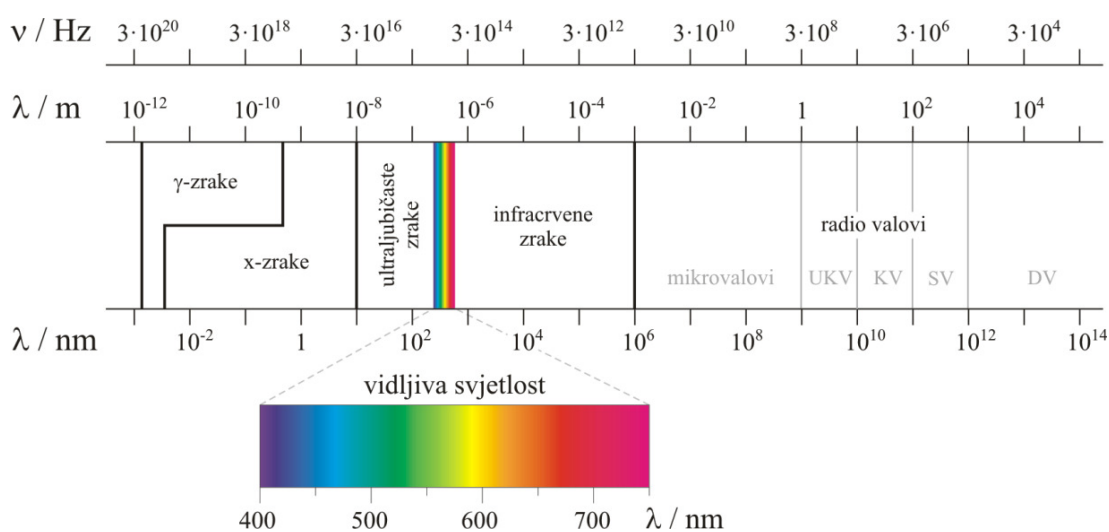


Slika 2-5. Konfiguracija CT skenera s obzirom na oblik rendgenskog zračenja.

S obzirom na to da je kod linijskih CT skenera snop zračenja kolimiran duž vertikale, pogreške 2D zapisa koje nastaju uslijed raspršenja zraka su znatnijim dijelom eliminirane te se postiže veća točnost krajnjih rezultata mjerenja u odnosu na zapise dobivene 3D CT skenerom. Međutim, skeniranje predmeta linijskim CT skenerom jest vremenski dugotrajnije u odnosu na skeniranje konusnim CT skenerom jer se svaki presjek prozračuje tijekom rotacije predmeta za jedan puni krug [14]. Uzevši u obzir zahtjeve za sve bržom proizvodnjom 3D CT skeneri su zastupljeniji u industriji. Slijedom navedenog u ovom radu sva eksperimentalna istraživanja odnosit će se na konusne CT skenere.

2.2.1.1 Dobivanje, apsorpcija i detekcija rendgenskih zraka

Rendgenske zrake su elektromagnetski valovi valnih duljina u rasponu od 0,01 nm do 10 nm (slika 2-6).

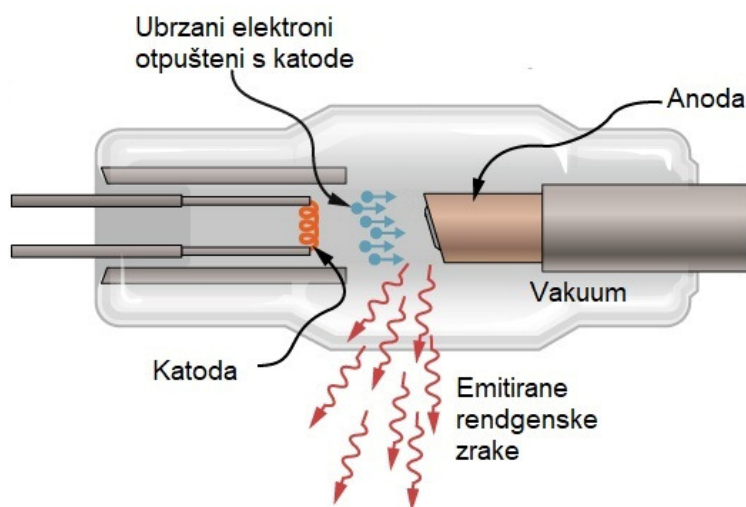


Slika 2-6. Spektar elektromagnetskog zračenja [15].

Dobivanje rendgenskog zračenja

Rendgensko zračenje u industrijskim CT skenerima generira se u rendgenskim cijevima (engl. *X-ray tube*) (slika 2-7). Rendgensku cijev čine dvije elektrode, katoda i anoda. Prilikom rada, kroz katodu prolazi struja žarenja, ili katodna struja. Zbog omskog otpora katode na njoj se razvija toplina uslijed koje se temperatura katode povećava do radnih temperatura iznad 2000 K pri čemu dolazi do pojave termičke emisije elektrona. Ako se uspostavi napon pravilnog polariteta između katode i anode, na elektrone koji su emitirani iz katode djelovat će sila koja ih ubrzava prema anodi. Do dolaska na anodu elektroni će imati relativno velike kinetičke energije. Međudjelovanjem ubrzanih elektrona i atoma mete dolazi do emisije rendgenskog zračenja uslijed djelovanja tri odvojena procesa [10]:

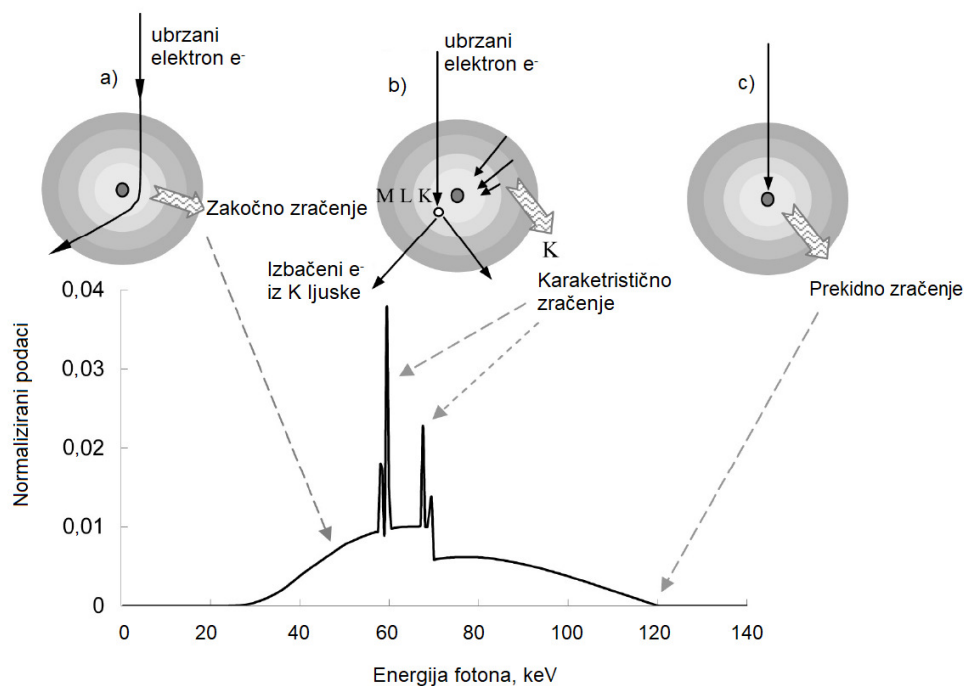
- usporavanja elektrona u procesu približavanja jezgri atoma mete,
- izbacivanja elektrona s elektronskog omotača atoma mete te popunjavanja ispražnjenog mjesta u ljusci elektronskog omotača,
- interakcije elektrona s jezgrom atoma mete.



Slika 2-7. Rendgenska cijev [16].

Elektroni udaraju u anodu načinjenu od materijala otpornog na visoke temperature pri čemu se oko 99 % energije elektrona pretvara u toplinu, dok se tek oko 1 % energije pretvara u rendgensko zračenje [10]. Generiranje topline ima negativan učinak na stabilnost žarišta (engl. *focal spot*) stoga su CT skeneri opremljeni sustavom za hlađenje rendgenske cijevi.

Spektar rendgenskog zračenja sastoji se od kontinuiranog (zakočnog) i linijskog (karakterističnog) zračenja (slika 2-8).



Slika 2-8. Nastajanje spektra rendgenskog zračenja [10].

Zakočno zračenje (njem. *Bremsstrahlung*) nastaje kada elektron dolazi u blizinu jezgre atoma mete, ali je ne dotiče [17]. U tom procesu elektron se nalazi pod utjecajem jakih nuklearnih sila pri čemu pozitivno nabijena jezgra atoma privlači negativno nabijeni elektron te on uslijed privlačnih sila mijenja svoj smjer kretanja i bude usporen (zakočen) [10]. Smanjenje brzine elektrona dovodi do smanjenja energije, pri čemu se razlika energije pretvara u foton, energetski paket elektromagnetskog zračenja. Iznos razlike energija obrnuto je proporcionalan udaljenosti elektrona od jezgre atoma, a s obzirom na prostornu razdiobu elektronskog snopa postiže se kontinuirani spektar zračenja (slika 2-8).

Intenzitet zakočnog zračenja povećava se s povećanjem atomskog broja atoma anode kao što je vidljivo iz izraza [18]:

$$I_z \propto Z^2. \quad (2-1)$$

Pri čemu su:

I_z W/sr intenzitet zakočnog zračenja

Z atomski broj kemijskog elementa anode.

Zbog generiranja topline u procesu nastajanja rendgenskog zračenja, kao i većoj učinkovitosti prozračivanja predmeta, za materijal mete najčešće se odabire volfram, iznosa atomskog broja 74, otporan na visoke temperature.

Negativna posljedica kontinuiranog spektra rendgenskog zračenja je pojava otvrdnjavanja snopa rendgenskog zračenja pri čemu nastaju artefakti otvrdnjavanja zračenja [5]. Pojava i utjecaj otvrdnjavanja snopa rendgenskog zračenja na mjerenja računalnom tomografijom detaljnije su razrađeni u poglavlju 2.2.2 *Rekonstrukcija 3D modela*.

Krajnji slučaj zakočnog zračenja (prekidno zračenje) je onaj u kojem je pri interakciji s jezgrom izgubljena sva kinetička energija elektrona te je jednokratno emitirana kao jedna zraka. U tom slučaju sva energija elektrona pretvara se u energiju fotona i predstavlja maksimalni iznos energije rendgenskog zračenja (slika 2-8 c).

Rendgensko zračenje koje je na slici 2-8 prikazano vrhovima naziva se karakteristično zračenje, a svojstvo je materijala anode. Karakteristično zračenje nastaje izbacivanjem elektrona iz K ili L ljuske elektronskog omotača atoma anode tj. mete (slika 2-8). Nastala prazna mjesta popunjavaju se elektronima iz viših ljuski elektronskog omotača, a razlika energije emitira se u obliku fotona. Frekvencija fotona emitiranog uslijed prelaska elektrona s više energetske ljuske na nižu energetska ljusku elektronskog omotača atoma, iznosi:

$$f_j = \frac{E_n - E_m}{h} . \quad (2-2)$$

f_j Hz Frekvencija emitiranog fotona

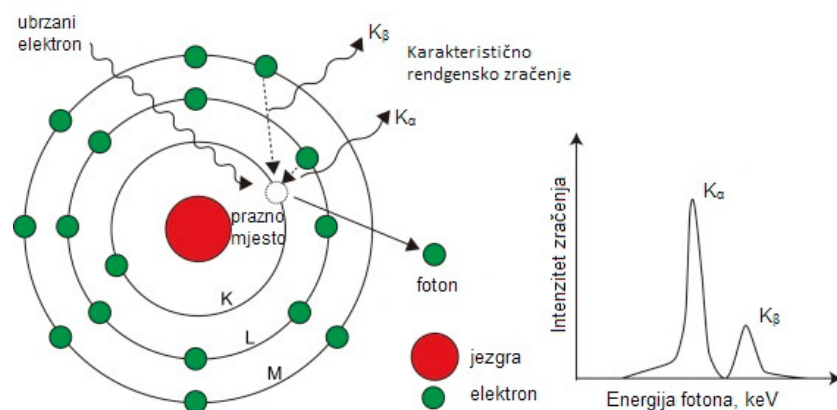
E_n eV energija vezanja elektrona ljuske elektronskog omotača n

E_m eV energija vezanja elektrona niže ljuske elektronskog omotača

h Js Planckova konstanta iznosa $6,626 \times 10^{-34}$ J·s.

Kod karakterističnog zračenja u najvećem broju slučajeva prazno mjesto popunjava se elektronom iz prve sljedeće ljuske više energije, pri čemu se emitira foton frekvencije f_α , dok se u određenom broju slučajeva praznina popunjava elektronom iz druge po redu susjedne ljuske, pri čemu se emitira foton frekvencije f_β [19].

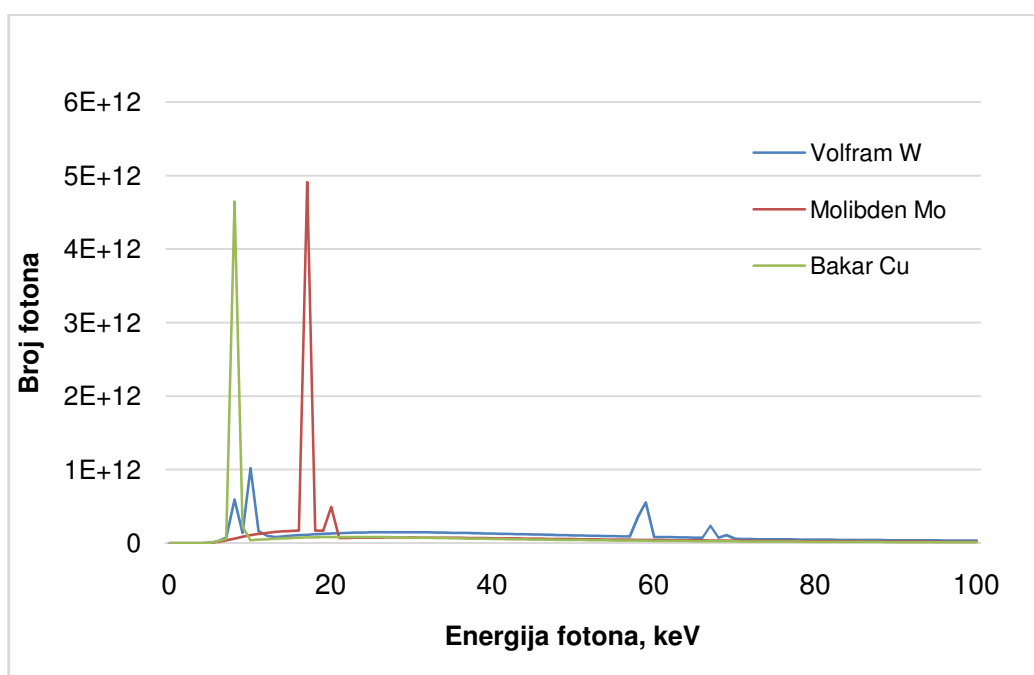
Slika 2-9 prikazuje nastajanje karakterističnih rendgenskih zraka K_α i K_β gdje u prvom slučaju dolazi do popunjavanja praznog mjesta u ljusci K elektronom iz ljuske prve više energetske razine (L ljuske), odnosno u drugom slučaju prazno mjesto bit će popunjeno elektronom iz ljuske M elektronskog omotača.



Slika 2-9. Proces i spektar zračenja karakterističnog za materijal anode [20].

Razlike energije su diskretne, što znači da ne mogu poprimiti kontinuirane vrijednosti i predstavljaju skokove na grafikonu energetskog spektra zračenja pa se pripadni dio spektra naziva linijskim spektrom. Dano tumačenje predstavlja pojednostavljeni opis, dok je detaljna struktura linijskog spektra izvan domene ovog rada.

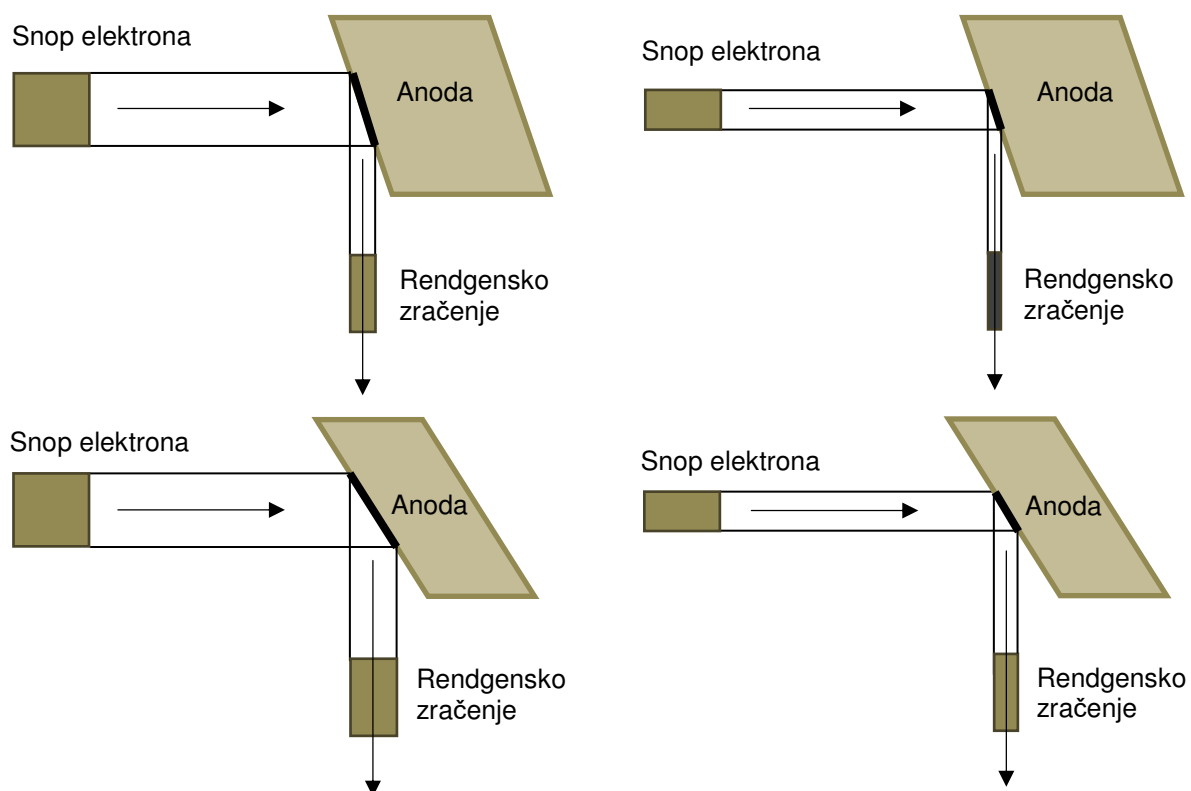
Vrijednosti energija karakterističnog zračenja posljedica su odabranog materijala mete. Najčešće korišteni materijali mete su: volfram, krom, željezo, kobalt, bakar, molibden te srebro [21]. Odabirom i promjenom materijala mete moguće je mijenjati spektar rendgenskog zračenja ovisno o potrebama skeniranja. Slika 2-10 prikazuje spektre rendgenskog zračenja različitih materijala mete, kod napona katodne cijevi 200 kV, bez primjene filtera, simuliranih korištenjem softverskog paketa *aRTist*.



Slika 2-10. Spektar rendgenskog zračenja za različite materijale anode.

Emisija rendgenskog zračenja

Nastalo rendgensko zračenje usmjerava se prema izlazu rendgenske cijevi, tj. prema žarištu. Veličina i oblik žarišta značajno utječu na kvalitetu 2D zapisa, odnosno kasnije na 3D model, pri čemu se oštiri rubovi te bolja razlučivost detalja postižu kod manjih žarišta. Veličina žarišta ovisi o većem broju parametara pri čemu je najznačajniji snaga izvora zračenja. Povećanjem snage izvora zračenja povećava se energija rendgenskog zračenja čime je omogućeno prozračivanje predmeta iste debljine izrađenih iz materijala većih gustoća. Međutim, povećanje snage dovodi do povećanja generirane topline što dovodi do promjene oblika i veličine žarišta. Nadalje, na efektivnu veličinu žarišta može se utjecati promjenom kuta anode pri čemu će odabir većeg kuta anode s obzirom na smjer upadnog snopa elektrona rezultirati manjom efektivnom veličinom žarišta, ali i manjom pokrivenošću vidnog polja snopom rendgenskog zračenja. Utjecaj kuta anode na efektivnu veličinu žarišta i veličinu vidnog polja vidljiv je iz slike 2-11.



Slika 2-11. Utjecaj kuta i veličine poprečnog presjeka elektronskog snopa na veličinu snopa rendgenskog zračenja.

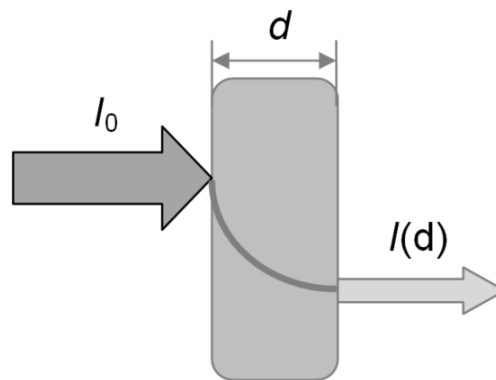
Apsorpcija rendgenskog zračenja

Emitirano rendgensko zračenje prolazi kroz predmet ispitivanja pri čemu se dio zračenja apsorbira, dio prolazi kroz predmet, a dio se raspršuje. Proces u kojem je rendgensko zračenje apsorbirano u predmetu ili raspršeno naziva se prigušenje zračenja ili atenuacija. Zračenje koje prolazi kroz predmet se uslijed apsorpcije i raspršenja oslabljuje zbog interakcije fotona s materijalom predmeta. Intenzitet preostalog zračenja koje prolazi kroz predmet opisan je Beer-Lambertovim pravilom za monokromatsko zračenje (2-3) te prikazan slikom 2-12.

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d} . \quad (2-3)$$

Gdje je:

$I(d)$	W/sr	Intenzitet preostalog zračenja koje je prošlo kroz predmet
I_0	W/sr	intenzitet početnog (emitiranog) zračenja
μ	m ⁻¹	koeficijent prigušenja prozračenog materijala
d	m	debljina predmeta, put kojim prolazi zračenje.



Slika 2-12. Promjena intenziteta monokromatskog zračenja prolaskom zraka kroz homogeni materijal.

S obzirom da se Beer-Lambertovo pravilo odnosi na apsorpciju monokromatskog zračenja u homogenom materijalu, ono nije primjenjivo u slučaju polikromatskog zračenja korištenog u industrijskim CT skenerima. Također, koeficijent prigušenja prozračenog materijala, uslijed nehomogenosti materijala, mijenja se duž puta prolaska rendgenskog zračenja. Iz tog razloga intenzitet zračenja kod primjene industrijskog CT uređaja bit će jednak:

$$I_{\text{poli}} = \int_0^{E_{\text{max}}} I_0(E) \cdot e^{-\int_0^d \mu(E,x) dx} dE . \quad (2-4)$$

Gdje je:

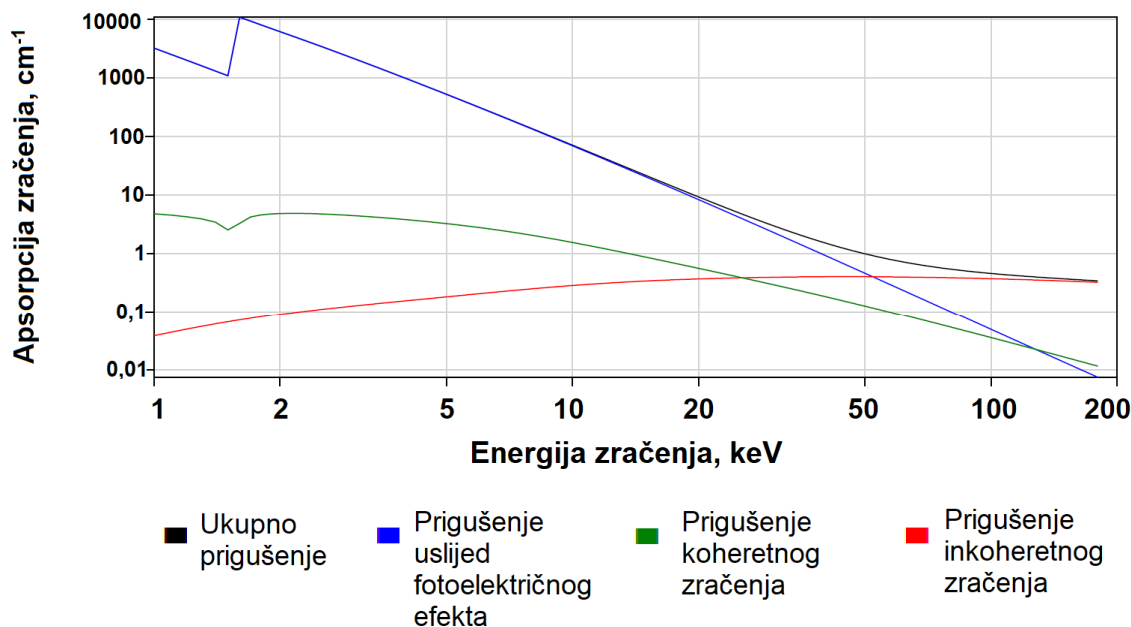
I_{poli}	W/sr	Intenzitet polikromatskog zračenja
E_{max}	eV	najveća energija u spektru zračenja.

Izraz (2-4) se zbog praktične potrebe pojednostavljuje u izraz (2-5).

$$I_{\text{poli}}(d) = I_0 \cdot e^{-\int_0^d \mu(x) dx} . \quad (2-5)$$

Uvođenje izraza (2-5) ima za posljedicu pojavu sustavne pogreške artefakata otvrdnjavanja zračenja koji znatno utječu na kvalitetu zapisa te konačno na rezultate dimenzionalnih mjerenja. Pogreška artefakata otvrdnjavanja zračenja bit će razjašnjena kasnije u radu.

Intenzitet preostalog zračenja ovisi o materijalu predmeta te energiji upadnog zračenja. Koeficijent prigušenja definiran je interakcijom fotona rendgenskog zračenja s elektronima prozračivanog materijala. Kod industrijskih CT skenera, koji generiraju napon izvora do 450 kV, moguća su tri različita slučaja interakcije fotona s elektronima prozračivanog materijala; fotoelektrični efekt, koherentno (ili Rayleighovo) i nekoherentno (ili Comptonovo) raspršenje fotona [10]. Primjer prolaska rendgenskog zračenja dan je za aluminij slikom 2-13. Prolaskom rendgenskog zračenja kroz materijal, kod nižih energija zračenja će ukupan koeficijent prigušenja u najvećoj mjeri biti posljedica fotoelektričnog efekta, dok je kod viših energija fotona ukupno prigušenje rendgenskog zračenja u većem postotku posljedica nekoherentnog zračenja.



Slika 2-13. Koeficijenti prigušenja monokromatskog rendgenskog zračenja za aluminij.

Slika je generirana korištenjem softverskog paketa *aRTist*.

Slijedom navedenog ukupan koeficijent prigušenja rendgenskog zračenja iznosi:

$$\mu = \mu_{fe} + \mu_{koh} + \mu_{nekoh} \quad (2-6)$$

pri čemu su:

μ	m^{-1}	ukupan koeficijent prigušenja rendgenskog zračenja
μ_{fe}	m^{-1}	koeficijent prigušenja rendgenskog zračenja uslijed fotoelektričnog efekta
μ_{koh}	m^{-1}	koeficijent prigušenja rendgenskog zračenja uslijed koherentnog raspršenja zračenja
μ_{nekoh}	m^{-1}	koeficijent prigušenja rendgenskog zračenja uslijed nekoherentnog raspršenja zračenja.

Detekcija rendgenskog zračenja

Detekcija rendgenskog zračenja tj. intenziteta oslabljenog zračenja odvija se pomoću detektora u kojima dolazi do pretvorbe rendgenskog zračenja u električne signale. Konusni CT skeneri opremljeni su pravokutnim detektorima (engl. FPD - *flat panel detector*) sastavljenim od mreže senzora, gdje svaki zasebni senzor svojom pozicijom i veličinom odgovara pikselu u pripadajućem slikovnom zapisu, pri čemu su najčešće dvije izvedbe detektora [22]:

- detektori ionizacije plinova
- scintilacijski detektori.

Industrijski CT uređaji isključivo su opremljeni ravnim pločastim scintilacijskim detektorima. Princip rada scintilacijskih detektora temelji se na procesu scintilacije tj. svojstva fluorescirajućih i fosforescirajućih tvari da nakon prolaska ionizirajućeg zračenja emitiraju elektromagnetske valove u području vidljivog i ultraljubičastog spektra [23]. Dobiveni elektromagnetski valovi vidljivog spektra detektiraju se pomoću fotodioda ili fotomultiplikatora [5]. Opušteni elektroni prolaskom kroz niz dioda u kaskadno povećavajućem procesu dovode do izlaznog signala, električne struje od dovoljnog broja elektrona čime je omogućeno njezino daljnje elektroničko obrađivanje.

Izvedba i karakteristike detektora utječu na kvalitetu detekcije apsorbiranog zračenja tj. na kvalitetu 2D zapisa, a kasnije i na kvalitetu rezultata dimenzionalnih mjerenja. Neke od najznačajnijih karakteristika detektora su: pokrivenost polja, broj senzora, veličina senzora, stopa osvježavanja, vrijeme ekspozicije, kvantna učinkovitost, stabilnost detektora [5, 24].

2.2.1.2 Kinematski sustav

Hardver CT skenera, osim izvora i detektora zračenja čini i kinematski sustav uređaja s rotacijskim stolom. U industrijskim CT uređajima izvor i detektor zračenja su u pravilu fiksni dok se predmet mjerenja u procesu skeniranja rotira. Osim rotacije predmeta, sustav omogućava i njegovu translaciju u postupku pripreme koja prethodi procesu skeniranja. Translacija predmeta moguća je u svim osima pri čemu je najznačajnija os kojom se definira udaljenost predmeta od izvora odnosno od detektora (z-os). Pozicioniranjem predmeta bliže ili dalje od izvora zračenja direktno se utječe na faktor geometrijskog povećanja o kojem ovisi efektivna veličina piksela, kasnije voksel, pri čemu se voksel definira kao 3D piksel. Pogreške pozicioniranja predmeta mogu uvelike narušiti kvalitetu zapisa i kasniju rekonstrukciju 3D modela. Iz tog razloga jedan od glavnih preuvjeta za postizanje kvalitetnih podataka CT skeniranja jest visoka preciznost komponenata kinematskog sustava CT skenera kao i geometrijska stabilnost cijelog sustava.

2.2.1.3 Provedba skeniranja

Proces skeniranja provodi se u CT skeneru, pri čemu izvedbe industrijskih CT skenera podrazumijevaju najčešće izvedbu CT skenera sa zatvorenim kućištem. U procesu skeniranja predmet rotira na rotacijskom stolu za jedan puni krug pri čemu se kut zakreta rotacijskog stola definira odabirom broja projekcija. Provedba skeniranja predmeta podrazumijeva odabir optimalnih parametara skeniranja u cilju dobivanja kvalitetnih 2D zapisa kasnije korištenih za rekonstrukciju 3D modela. Optimalna provedba skeniranja odnosi se na:

- optimalan odabir snage izvora zračenja
- odabir i postavljanje filtera u cilju dobivanja boljeg spektra rendgenskog zračenja i umanjenja utjecaja artefakata otvrdnjavanja zračenja
- pozicioniranje predmeta prije provedbe skeniranja u odnosu na izvor zračenja
- odabir optimalne orijentacije predmeta
- odabir odgovarajućeg broja projekcija
- odabir broja uprosječenih slika itd.

Kako je riječ o izuzetno složenom sustavu kojim je moguće ispitivati i analizirati velik broj predmeta različitih dimenzija, oblika i kemijskih sastava, s višeznačno definiranim zahtjevima za mjerenjima, danas još uvijek ne postoji međunarodni standard koji bi definirao način provedbe CT skeniranja. Odabir parametara, kao i provedba skeniranja provodi se od strane iskusnog mjeritelja. Ipak, Njemačko udruženje inženjera izradilo je smjernice za

korištenje računalne tomografije za potrebe dimenzionalnih mjerenja. Riječ je o grupi smjernica za korištenje trokoordinatnih mjernih uređaja iz obitelji smjernica 2630 i 2617, prilagođenih za potrebe mjerenja metodom računalne tomografije. Osim spomenutih smjernica, ne postoje norme niti prijedlozi normi s uputama za provedbu pouzdanih dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom.

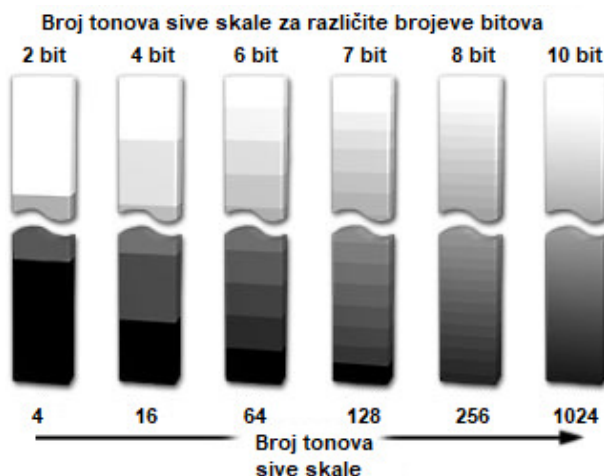
S obzirom da svaka daljnja analiza ovisi o podacima dobivenim skeniranjem, može se reći kako kvaliteta rezultata skeniranja uvelike ovisi o mjeritelju. Slijedom navedenog utjecaj mjeritelja na konačne rezultate mjerenja od iznimnog je značaja.

2.2.2 Rekonstrukcija 3D modela

Nakon skeniranja predmeta, idući korak uključuje rekonstrukciju 3D modela iz prethodno prikupljenih 2D zapisa. Proces rekonstrukcije temelji se na filtriranoj inverznoj projekciji (engl. *filtered back projection*) te zahtijeva računalnu konfiguraciju zadovoljavajućih performansi te odgovarajuću softversku podršku. Rezultat rekonstrukcije 2D slika jest 3D voksel model u različitim vrijednostima skale sivih tonova.

Svaka točka, piksel, na 2D zapisu opisana je iznosom intenziteta detektiranog zračenja koja ovisi o ukupnom prigušenju upadnog rendgenskog zračenja i duljini puta koji je zračenje prošlo kroz predmet [5].

Ovisno o gustoći materijala kroz koji prolazi rendgensko zračenje, svaki piksel, za različiti iznos detektiranog zračenja sadrži različite vrijednosti skale sivih tonova. Tako će kod 8 bitnih detektora pikseli moći poprimiti 2^8 tj. 256 tonova sive boje, dok će 16 bitni detektori omogućiti raspoznavanje 65536 tonova sive skale (slika 2-14).



Slika 2-14. Broj različitih vrijednosti tonova sive skale za različite brojeve bitova detektora [25].

Rezultirajuće 2D zapise tj. projekcije matematički je moguće opisati transformacijom definiranom 1917. godine, od strane austrijskog matematičara Johanna Karla Augusta Radona, po kojem nosi ime Radonova transformacija. Radonova transformacija predstavlja matematičku podlogu za povezivanje koordinata (x, y) i projekcijskih koordinata (s, θ) gdje je $\delta(x)$ Diracova distribucija [26]:

$$g(s, \theta) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s) dx dy \quad (2-7)$$

za sve:

$$-\infty < s < \infty, 0 \leq \theta < \pi. \quad (2-8)$$

Pri čemu je funkcija $g(s, \theta)$ Radonova transformacija projekcije funkcije $f(x, y)$ pod kutom θ [26].

U koordinatnom sustavu (s, u) zarotiranom za kut θ gdje je:

$$\begin{aligned} s &= x \cos \theta - y \sin \theta, & x &= u \sin \theta + s \cos \theta, \\ u &= x \sin \theta + y \cos \theta, & y &= u \cos \theta - s \sin \theta, \end{aligned} \quad (2-9)$$

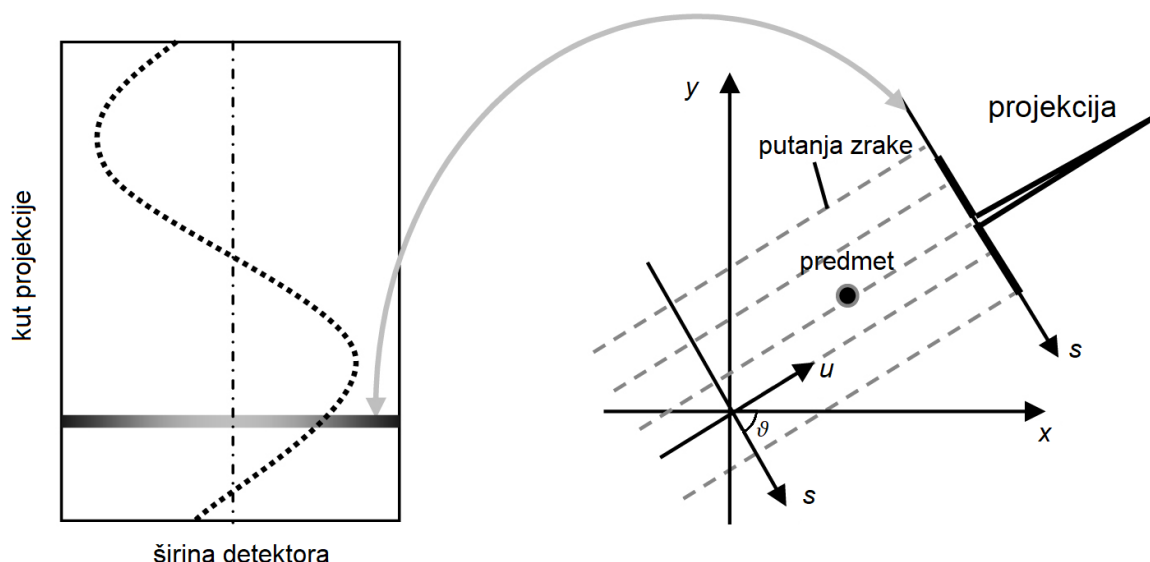
Radonova transformacija može se zapisati kao:

$$g(s, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u \sin \theta + s \cos \theta, u \cos \theta - s \sin \theta) du \quad (2-10)$$

za sve:

$$-\infty < s < \infty, 0 \leq \theta < \pi. \quad (2-11)$$

Radonova transformacija preslikava pravac u prostornoj domeni (na udaljenosti od ishodišta s i pod kutom θ) u točku na koordinati (s, θ) u projekcijskoj domeni. S obzirom na to da točka u prostornoj domeni (x, y) odgovara sinusoidi u projekcijskoj domeni (s, θ) , rezultat Radonove transformacije naziva se sinogram. Sinogram predstavlja 2D zapis odabranog poprečnog presjeka (engl. *cross-section*) pri čemu ordinata predstavlja kut projekcije, a apscisa linijsku projekciju po širini detektora. Sinogram se sastoji od naslaganih projekcija iz različitih kutova tako da svaka horizontalna linija u sinogramu prikazuje jednu projekciju. Projekcija točke preslikava se u sinusoidnu krivulju (slika 2-15).



Slika 2-15. Formiranje sinograma [10].

Radon je pokazao da se na temelju konačnog broja projekcija može dobiti oblik izvorne funkcije. Taj je proces nazvan inverzna Radonova transformacija i predstavlja temelj za rekonstrukciju 3D modela iz snimljenih projekcija. Za svaki poprečni presjek uzimaju se svi dostupni podaci o projekcijama, zapisani u sinogramu, te se iz tih projekcija na temelju inverzne Radonove transformacije određuje stvarni izgled odabranog presjeka. Međusobnim povezivanjem izračunatih presjeka dobiva se 3D model.

Inverzna Radonova transformacija se provodi u nekoliko koraka. Inverzna projekcija Radonove transformacije ima oblik:

$$\tilde{f}(x, y) = \mathbf{B} g = \mathbf{B} \mathbf{R} f \quad (2-12)$$

iz čega je moguće dokazati da dobivena slika odgovara konvoluciji originalne slike i cirkularnog zamućenja oko ishodišta.

Iz navedenog razloga je potrebno provesti filtriranje projekcija. Proces filtriranja projekcija moguće je primijeniti prije ili poslije procesa inverzne projekcije, međutim točnijim su se pokazali algoritmi koji provode filtriranje prije samog procesa inverzne projekcije tzv. algoritmi filtrirane povratne projekcije (engl. *filtered back-projection*) [28]. Slika 2-16 prikazuje razliku između nefiltrirane i filtrirane povratne projekcije.



Slika 2-16. Inverzna Radonova transformacija [5].

Filtrirana povratna projekcija uključuje primjenu povratne projekcije i ramp filtera. Ramp filter je filter kojim se eliminiraju pogreške nastale uslijed procesa provedbe povratne projekcije tzv. zvjezdaste pogreške, čime se postižu oštriji rubovi na slici [27]. Međutim, korištenjem visokopropusnih filtera do izražaja više dolaze statistički šumovi prisutni na slici koji smanjuju kontrast [27]. S obzirom na to da su šumovi visokih frekvencija, eliminacija statističkih šumova postiže se primjenom niskopropusnih filtera odabranih od strane mjeritelja. Najčešće korišteni niskopropusni filteri su: Hann filter, Hamm filter, medijan filter, Shepp-Logan filter, Ramachandran filter, filter vođen slikom te *neighbourhood sliding* filter [5, 28]. U nastavku su dani opisi nekih od niskopropusnih filtera.

Hann ili Hannov filter je niskopropusni filter opisan samo jednim parametrom, graničnom vrijednošću filtera f_m . Riječ je o visokoučinkovitom filteru smanjenja šumova slike koji u kratkom vremenu doseže vrijednost nule, međutim upotreba Hann filtera može uzrokovati gubitak informacije o rubovima [28]. Hann filter definiran je izrazom:

$$H_n(f) = \begin{cases} 0,50 + 0,50 \cos\left(\frac{\pi f}{f_m}\right), & 0 \leq |f| \leq f_m \\ 0, & |f| > f_m \end{cases} \quad (2-13)$$

gdje su:

f	Hz	prostorna frekvencija slike (engl. <i>spatial frequency</i>)
f_m	Hz	granična frekvencija niskopropusnog filtera.

Hamm je također niskopropusni filter opisan jednim parametrom, graničnom vrijednošću filtera, f_m , koji se od Hannova filtera razlikuje jedino u amplitudi granične frekvencije [28].

Matematički izraz Hamm filtera glasi:

$$H_m(f) = \begin{cases} 0,54 + 0,46 \cos\left(\frac{\pi f}{f_m}\right), & 0 \leq |f| \leq f_m \\ 0, & |f| > f_m \end{cases}. \quad (2-14)$$

Medijan filter koristi se za eliminaciju tzv. “sol i papar“ degradacija nastalih zbog pogrešaka na pojedinim pikselima [28]. U tom slučaju pikseli poprimaju bijelu (sol) ili crnu (papar) boju te umanjuju kvalitetu slike. Ovu vrstu šumova relativno je jednostavno ukloniti korištenjem medijan filtera gdje oštećeni piksel poprima ton sive skale koji matematički odgovara medijanu tonova sive skale njemu susjednih piksela [29].

Niskopropusni filteri učinkovito eliminiraju šumove na slici, međutim kao posljedica tog procesa na slici se javljaju obrisi većih neoštrina. Iz tog razloga važno je pronaći kompromis kod primjene visokopropusnih i niskopropusnih filtera.

Važno je napomenuti kako opisana rekonstrukcija predmeta inverznom Radonovom transformacijom pretpostavlja snop međusobno paralelnih rendgenskih zraka. S obzirom na to da su industrijski CT skeneri uglavnom konusni, rekonstrukcija slike ne može se provesti korištenjem isključivo opisane Radonove transformacije. Rješenje za rekonstrukciju modela kod CT skenera konusnog zračenja u kombinaciji s pločastim detektorima ponudili su Feldkamp, Davis i Kress [30] čiji algoritam uzima u obzir kut konusa svake pojedine rendgenske zrake te provodi korekciju duljine rendgenske zrake.

2.2.2.1 Artefakti slika

Tijekom provedbe CT skeniranja predmeta mjerenja, javljaju se različite pojave kao posljedica fizikalne prirode rendgenskog zračenja, međudjelovanja fotona zračenja s predmetom mjerenja, ili kao rezultat izvedbe i nesavršenosti dijelova CT skenera (rendgenske cijevi, sustava za manipulaciju predmetom, detektora, ...) rezultat kojih jesu slučajne i sustavne pogreške. Najčešće pogreške koje nastaju jesu veće neoštrine rubova te pojava šumova koji otežavaju provedbu pravilne rekonstrukcije modela te naknadnih dimenzionalnih mjerenja. Nadalje, s obzirom da rekonstrukcijski algoritmi pretpostavljaju stanje u kojem prigušenje rendgenskog zračenja ne ovisi o duljini puta rendgenskog zračenja, kao ni o kutu projekcije [31], rezultat ove pogrešne pretpostavke dovodi do pojave artefakata slike u rekonstruiranim skupovima podataka [2]. Artefaktima se smatraju sve nepodudarnosti između stvarnog stanja ispitivanog predmeta i očitavanja na zapisima dobivenim procesom CT rekonstrukcije [22]. Pojava artefakata slike koji nastaju kao posljedica otvrdnjavanja rendgenskog zračenja ili sekundarnog zračenja u velikoj mjeri otežava pravilno određivanje rubova između predmeta i okoline što je glavni preduvjet provedbe točnih mjerenja [9].

Artefakti slike najčešće se očituju kao prividni gradijenti gustoće u homogenim materijalima ili u obliku tamnih i svijetlih crta između materijala različitih gustoća. Pojave artefakata imaju značajan utjecaj na profil sivih tonova čime se otežava optimalan odabir granične vrijednosti sive skale, što dalje dovodi do značajnih pogrešaka i odstupanja u rezultatima mjerenja [32].

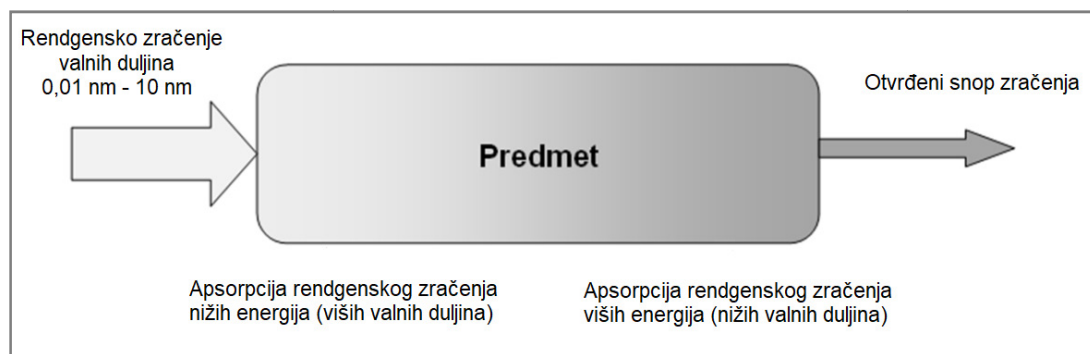
Artefakti koji nastaju kao posljedica nesavršenosti mjernog sustava su:

1. artefakti otvrdnjavanja zračenja
2. artefakti sekundarnog zračenja
3. cirkularni artefakti
4. artefakti metalnih predmeta
5. artefakti pokreta
6. artefakti djelomičnog volumena.

Najčešći artefakti koji nastaju u procesu skeniranja konusnim rendgenskim zračenjem su artefakti otvrdnjavanja zračenja, artefakti sekundarnog zračenja i cirkularni artefakti [9].

1. Artefakti otvrdnjavanja zračenja

Artefakti otvrdnjavanja zračenja nastaju kao posljedica procesa otvrdnjavanja rendgenskog zračenja. Otvrdnjavanje snopa (engl. *beam hardening*) fizikalna je pojava koja nastaje uslijed polikromatske prirode rendgenskog zračenja pri čemu kod prolaska zračenja kroz predmet mjerenja u većoj mjeri dolazi do apsorpcije fotona nižih energija (mekše rendgensko zračenje), a u manjoj mjeri do apsorpcije fotona viših energija (tvrđe rendgensko zračenje) [33]. Odnosno, nakon prolaska određenog puta rendgenskog zračenja kroz materijal, mekše rendgensko zračenje biva potpuno apsorbirano (eliminirano iz spektra) pri čemu dolazi do pozitivne promjene distribucije energije rendgenskog zračenja tj. rasta prosječne energije rendgenskog zračenja gdje u snopu ostaje zračenje viših energija (tvrđe zračenje) iz čega proizlazi naziv ove fizikalne pojave; otvrdnjavanje snopa. Slika 2-17 prikazuje proces apsorpcije rendgenskog zračenja - otvrdnjavanje snopa.

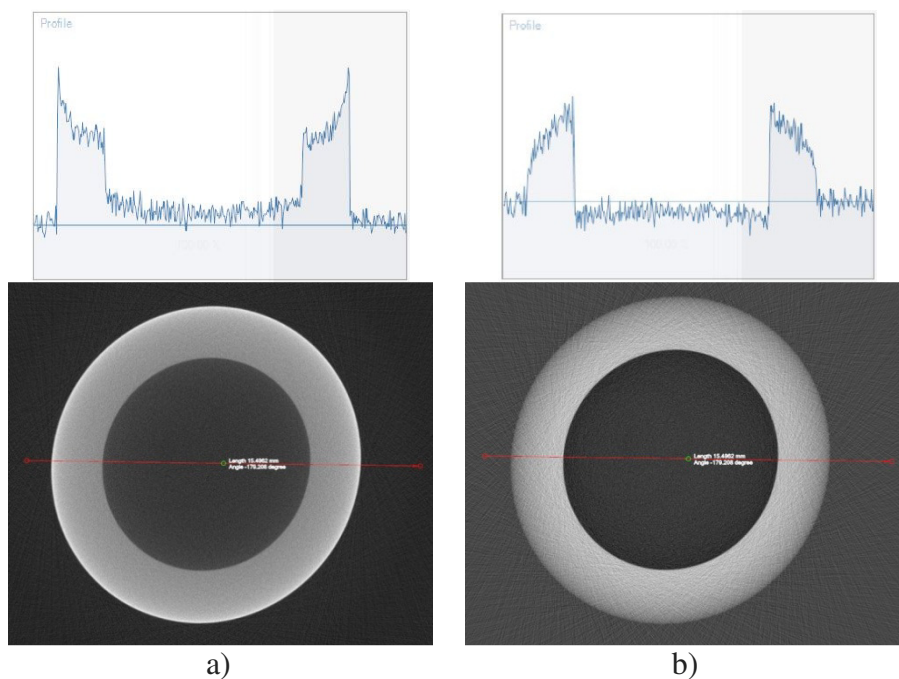


Slika 2-17. Grafički prikaz otvrdnjavanja snopa [34].

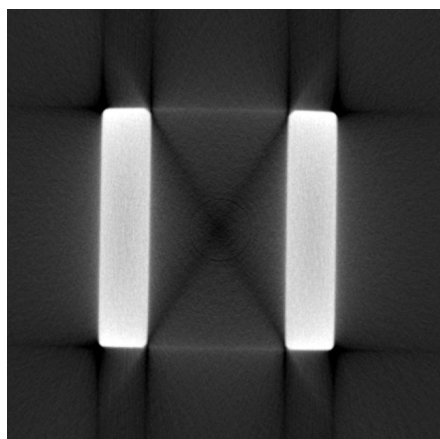
U procesu apsorpcije polikromatskog zračenja događa se nelinearna promjena ukupnog koeficijenta prigušenja uzduž puta propagacije rendgenskog zračenja kroz materijal. Međutim kako većina algoritama korištenih u rekonstrukciji 2D zapisa pretpostavlja linearni odnos rendgenskog zračenja i duljine prijeđenog puta, kao rezultat na 2D zapisima nastaju tzv. artefakti otvrdnjavanja zračenja u obliku crta (engl. *streaks*) te svjetlijih (engl. *cupping*) ili tamnijih (engl. *capping*) rubova materijala u odnosu na središnji dio predmeta [32].

Prisutnost artefakata otvrdnjavanja zračenja značajno utječe na kvalitetu 2D zapisa te otežava pravilno određivanje rubova predmeta (engl. *edge detection*) čime se direktno utječe na rezultate dimenzionalnih mjerenja [35]. S obzirom na to da se artefakti otvrdnjavanja zračenja smatraju jednim od značajnijih parametara kod dimenzionalnih mjerenja metodom računalne tomografije, njihov utjecaj na kvalitetu 2D zapisa je potrebno kompenzirati.

Slike 2-18 i 2-19 prikazuju najznačajnije pogreške 2D zapisa nastale uslijed otvrdnjavanja zračenja. Slika 2-18 *a* prikazuje pogrešku svjetlijih rubova (engl. *cupping*), slika 2-18 *b* prikazuje pogrešku tamnijih rubova (engl. *capping*) u poprečnom presjeku aluminijskog cilindra, dok slika 2-19 prikazuje pogreške u obliku crta (engl. *streaking artefacts*) nastalih u procesu rekonstrukcije aluminijskog cilindra jednostavne geometrije.



Slika 2-18. Artefakti otvrdnjavanja zračenja: a) pogreška svjetlijih rubova, b) pogreška tamnijih rubova.



Slika 2-19. Artefakti otvrdnjavanja zračenja u obliku crta.

Problematika otvrdnjavanja rendgenskog zračenja prisutna je od samih početaka primjene tomografije, najprije u medicini, a kasnije i kod analize materijala. Međutim, provedba korekcije i eliminacije utjecaja pogrešaka otvrdnjavanja zračenja od izuzetne je važnosti kod primjene računalne tomografije u svrhu dimenzionalnog mjerenja. Postoji nekoliko metoda korištenih kod korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja, a njihov pregled dan je u nastavku:

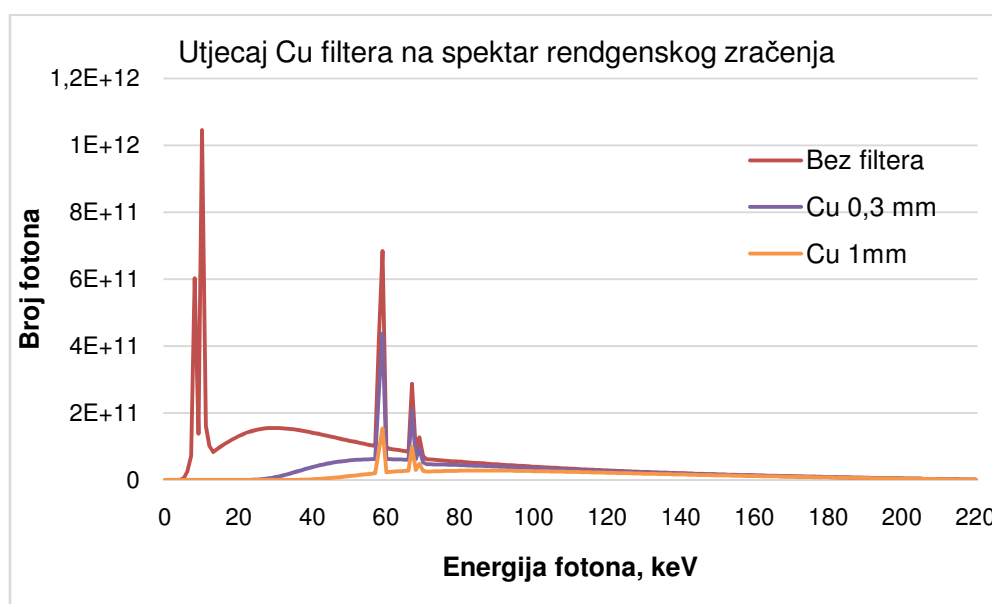
a) Skeniranje monokromatskim rendgenskim zračenjem

Kako je proces otvrdnjavanja snopa rendgenskog zračenja upravo posljedica polikromatske prirode zračenja, jedina metoda kojom se utjecaj otvrdnjavanja zračenja potpuno izbjegava jest skeniranje predmeta monokromatskim zračenjem. Međutim, kod monokromatskih izvora rendgenskog zračenja broj emitiranih fotona značajno je manji nego kod polikromatskog izvora zračenja iste snage čime se proces skeniranja znatno produljuje [22]. Iz navedenih razloga većina industrijskih skenera opremljena je polikromatskim izvorima zračenja te zahtijeva korekciju utjecaja otvrdnjavanja snopa rendgenskog zračenja na rezultate dimenzionalnih mjerenja.

b) Filtriranje rendgenskog zračenja

Kako bi se umanjili negativni efekti polikromatskog zračenja, provodi se filtriranje rendgenskog zračenja. Filtriranje rendgenskog zračenja provodi se korištenjem pločica stalne debljine i jednolikog sastava, najčešće izrađenih od materijala većeg atomskog broja od atomskog broja skeniranog materijala, smještenih između izvora zračenja i predmeta ispitivanja s ciljem apsorpcije fotona nižih energija [22, 23]. Izbor filtrirajućeg materijala i njegova debljina značajno utječu na to koji dio spektra i u kojoj mjeri će biti prigušen.

Slika 2-20 prikazuje utjecaj bakrenih filtera različitih debljina na izgled polikromatskog rendgenskog spektra zračenja za metu od volframa. Prigušenjem se širina spektra sužava i u graničnom slučaju teži monokromatskom zračenju kod kojeg je utjecaj otvrdnjavanja zračenja sveden na nulu. Ova metoda je zbog svoje jednostavnosti najčešće primjenjivana metoda minimizacije utjecaja otvrdnjavanja zračenja na rezultate mjerenja, međutim primjena ove metode umanjuje omjer signal-šum (engl. *signal-to-noise ratio*) [5].



Slika 2-20. Utjecaj fizikalnih bakrenih filtera različitih debljina na spektar rendgenskog zračenja. Podaci su dobiveni simulacijom pomoću softverskog paketa *aRTist*.

c) Skeniranje zračenjima dviju energija

Jedna od metoda koja se koristi kod korekcije utjecaja otvrdnjavanja zračenja jest skeniranje predmeta dva puta pri čemu je iznos energije izvora različit. Skeniranje predmeta zračenjima dviju energija temelji se na pretpostavci da se linearni koeficijent apsorpcije može, ovisno o razini energije fotona, razdvojiti na linearnu kombinaciju dviju funkcija od kojih jedna predstavlja apsorpciju uslijed fotoelektričnog efekta, a druga uslijed Comptonova efekta [33, 36]. Pod danim pretpostavkama moguće je kompenzirati efekt otvrdnjavanja zračenja matematičkim algoritmima detaljnije opisanim u [37]. Za provedbu ove metode korekcije potrebna su dva izvora zračenja kojima je omogućeno istovremeno skeniranje predmeta različitim energijama zračenja ili je potrebno raditi dvostruko skeniranje čime se značajno produljuje vrijeme snimanja.

d) Prilagodba koeficijenata prigušenja

Zbog već spomenutog nerazmjera između fizikalnog ponašanja rendgenskog zračenja u procesu propagacije kroz materijal te pretpostavke linearnog odnosa vrijednosti prigušenja zračenja i puta penetracije rendgenskog zračenja u procesu rekonstrukcije modela, dolazi do pojave artefakata otvrdnjavanja zračenja koji otežavaju određivanje površine materijala te znatno utječu na rezultate mjerenja. Jedan od načina minimizacije utjecaja spomenutih artefakata jest softverska korekcija vrijednosti prigušenja rendgenskog zračenja pri čemu se povoljnom pokazala matematička metoda prilagodbe koeficijenata prigušenja korištenjem polinomnih funkcija do četvrte razine:

$$Y = a(b + cX + dX^2 + eX^3 + fX^4) . \quad (2-15)$$

Dani polinom opisuje odnos između idealne vrijednosti prigušenja bez utjecaja fizikalnog procesa otvrdnjavanja zračenja Y i izmjerene vrijednosti prigušenja X pri čemu se koeficijenti od a do f koriste za podešavanje odnosa idealne i izmjerene vrijednosti prigušenja, ovisno o jačini utjecaja procesa otvrdnjavanja zračenja [36]. Prilagodbom koeficijenata prigušenja se umanjuju nejednakosti iznosa vrijednosti tonova sive skale čime se postiže ujednačenija slika veće kvalitete, što će kasnije rezultirati kvalitetnijim i ujednačenijim (u smislu vrijednosti tonova sive skale) 3D modelom [38].

Obzirom na financijski i vremenski aspekt, preferirane metode minimizacije i korekcije utjecaja artefakata otvrdnjavanja zračenja jesu preventivna metoda filtriranja rendgenskog zračenja te korektivna metoda prilagodbe koeficijenata prigušenja, kao i njihova kombinacija.

2. Artefakti sekundarnog zračenja

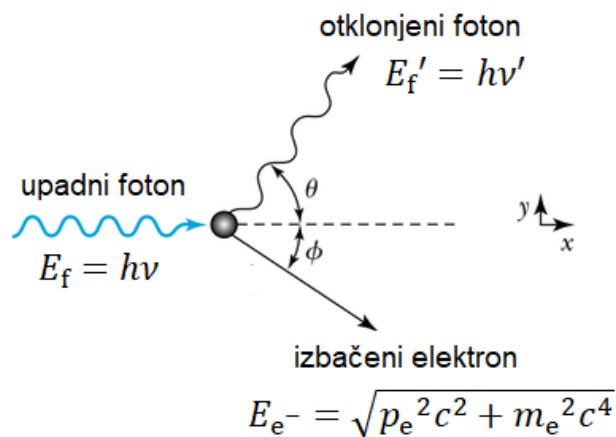
Artefakti sekundarnog zračenja posljedica su sekundarnog tj. raspršenog zračenja. Jedna od mogućih interakcija fotona s elektronima prozračivanog materijala jest nekoherentno raspršenje, poznato i pod nazivom Comptonovo raspršenje. Raspršenje se definira kao preusmjereni snop fotona koji nastaje kao posljedica interakcije fotona s atomima [22]. Kod nekoherentnog raspršenja ulazni foton dio energije troši na raskidanje energije vezivanja elektrona iz elektronskog omotača atoma na koje nailazi, dio prenosi tom elektronu u obliku njegove kinetičke energije, a preostali dio energije emitira se pri skretanju fotona i naziva se sekundarno zračenje [10]. Skretanje fotona posljedica je zakona očuvanja količine gibanja. S obzirom da je energija vezivanja elektrona, u odnosu na energiju ulaznog fotona zanemariva, energija nakon sudara fotona s elektronom bit će jednaka izrazu (2-16).

$$E_f = E_e + E_f' . \quad (2-16)$$

Pri čemu su:

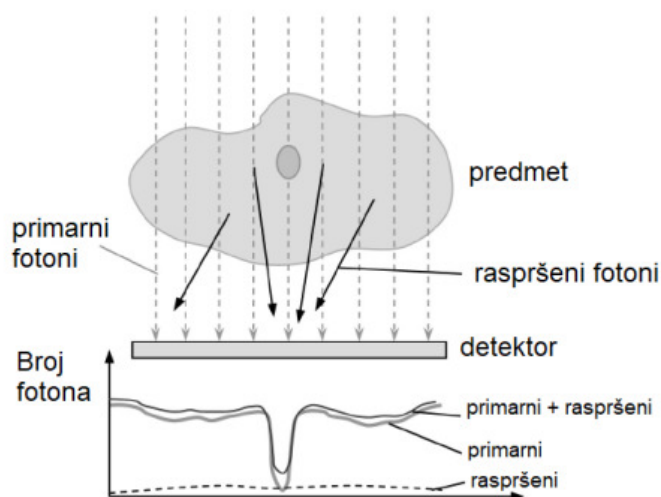
- E_f eV energija ulaznog fotona
 E_e eV kinetička energija izbačenog elektrona
 E_f' eV energija otklonjenog fotona.

Na slici 2-21 je dan grafički prikaz nastanka nekoherentnog zračenja Comptonovim raspršenjem.



Slika 2-21. Nekoherentno zračenje [39].

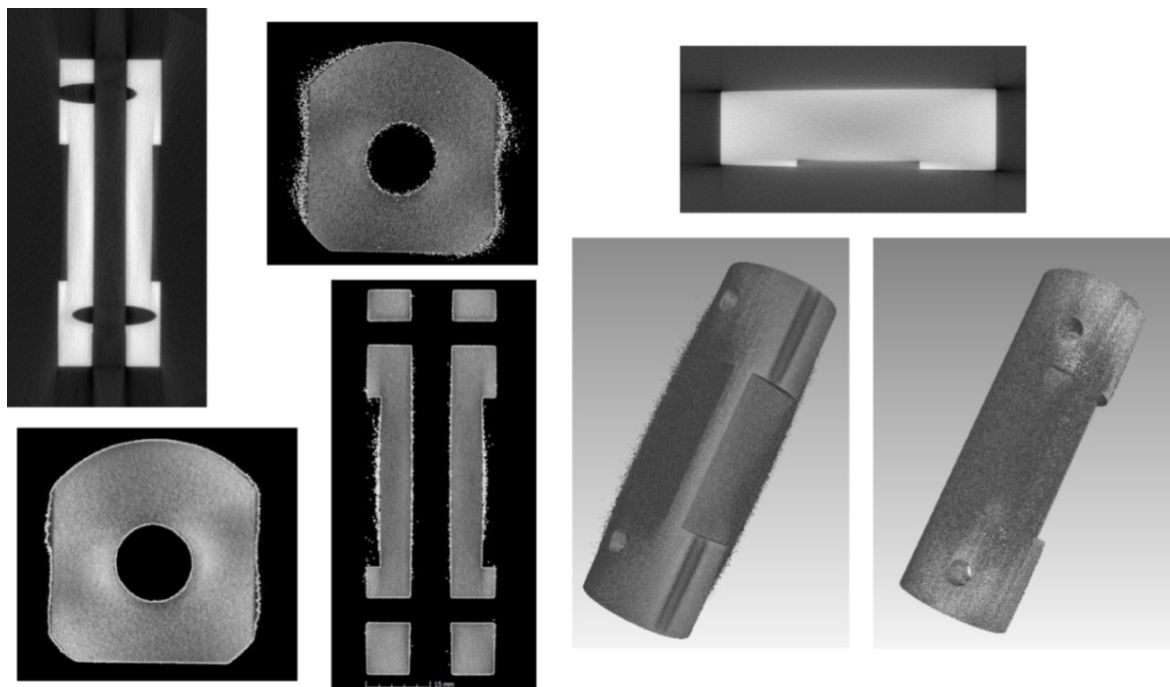
Uslijed pojave nekoherentnog zračenja, dio detektiranih fotona na detektoru bit će sekundarni fotoni. Sekundarni fotoni uzrokuju odstupanja detektiranog signala u odnosu na stvarne vrijednosti intenziteta zračenja što kasnije rezultira pojavom sjene ili pogreške u obliku crta u rekonstruiranim slikama [10]. Slika 2-22 grafički prikazuje učinak nekoherentnog zračenja. Skenirani predmet sastoji se od osnovnog materijala te manjeg, umetnutog predmeta veće gustoće kod kojeg će broj apsorbiranih i raspršenih fotona biti veći, nego u slučaju prozračivanja osnovnog materijala, kao što je vidljivo iz grafa na slici. S obzirom na to da je kut otklona sekundarnog fotona proizvoljan, raspodjela intenziteta sekundarnih fotona bit će pozadinski signal nižih frekvencija. Kombinacija primarnog i raspršenog signala rezultirat će signalom koji uzrokuje smanjenje kontrasta na slici te smanjenje omjera signal-šum [10].



Slika 2-22. Učinak nekoherentnog zračenja [10].

Primjena pojednostavljenog matematičkog algoritma rekonstrukcije 3D modela također znatno doprinosi pojavi artefakata. Radi olakšane rekonstrukcije zapisa pretpostavljeni iznos detektiranog signala odgovara iznosu signala linearno prigušenog primarnog zračenja [40].

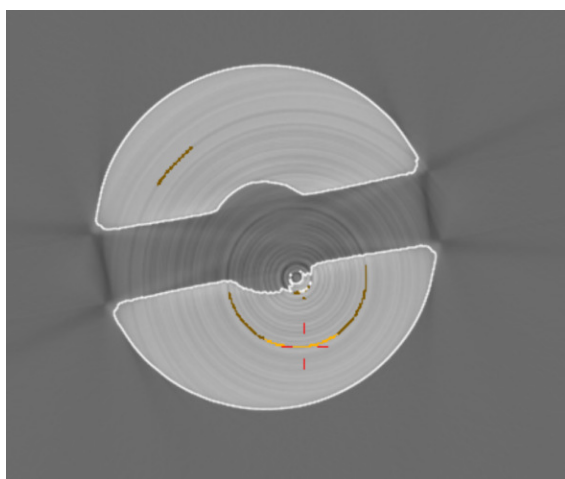
Slika 2-23 prikazuje pogreške sekundarnog zračenja u presjecima predmeta i na 3D modelima. Pogreške prikazane slikom 2-23 se očituju pojavom tamnih crta na rubovima materijala te nepravilnim granicama na površini predmeta.



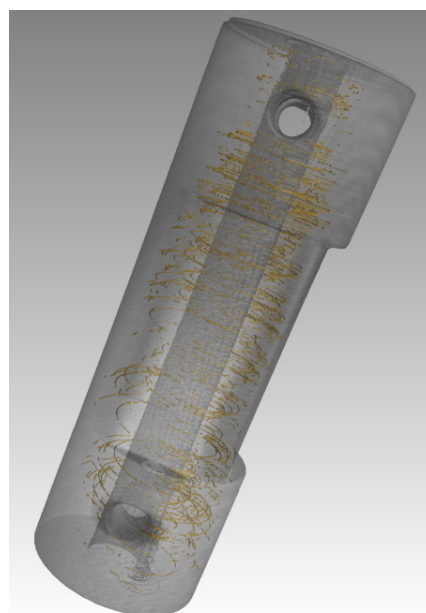
Slika 2-23. Rekonstruirani modeli s vidljivim utjecajem sekundarnog zračenja.

3. Cirkularni artefakti

Pogreške cirkularnih artefakata posljedica su pogrešno kalibriranog ili neispravnog detektora rendgenskog zračenja [41]. Pogreške cirkularnih artefakata se očituju u obliku kružnica ili kružnih lukova koncentričnih na os oko koje predmet rotira prilikom skeniranja. Pogreške su lako uočljive i prepoznatljive te ih je u pravilu teško zamijeniti s geometrijom ispitivanog predmeta. Međutim, prisutnost cirkularnih artefakata može bitno narušiti provedbu nekih od analiza, kao naprimjer, analizu pora u materijalu pri čemu softver cirkularne artefakte zamjenjuje s porama u materijalu, kao što je prikazano na slici 2-24. Rješenje problema nalazi se u kalibraciji detektora čime se postiže konstantna osjetljivost duž cijelog detektora.



Prikaz artefakta u poprečnom presjeku



Analiza pora - cirkularni artefakti

Slika 2-24. Cirkularni artefakti.

4. Artefakti metalnih predmeta

Artefakti metalnih predmeta nastaju kod skeniranja predmeta sastavljenog ili izrađenog od različitih vrsta materijala značajno različitih koeficijenata apsorpcije, pri čemu je barem jedan od materijala metal. U industrijskoj primjeni računalne tomografije artefakti se javljaju kod skeniranja polimernih predmeta s umetnutim metalnim dijelovima najčešće proizvedenih injekcijskim prešanjem. Pogreške ovog tipa učestale su i kod primjene medicinske računalne tomografije kada pacijenti ne skinu metalne ukrase prije CT snimanja ili u slučaju ugrađenih metalnih proteza ili zubnih implantata [42]. Zračenje u metalnim dijelovima predmeta je apsorbirano u velikoj mjeri te je stoga i detektirana apsorpcija u dijelovima predmeta iza

metala neispravno visoka [43]. Rezultat ove pojave jest pogrešna interpretacija koeficijenta prigušenja predmeta manje gustoće u procesu rekonstrukcije 2D zapisa, pri čemu dolazi do pojave artefakata metalnih predmeta manifestiranih u obliku svijetlih i tamnih, različito orijentiranih, crta na 2D zapisima, koje značajno umanjuju kvalitetu slike [44]. Veća odstupanja u rezultatima mjerenja očekuju se upravo kod mjerenja dimenzija metalnih predmeta, kao i kod mjerenja dimenzionalnih značajki u područjima blizu metalnih komponenata [14]. Primjer artefakata metalnih predmeta kod primjene industrijskih CT uređaja dan je slikom 2-25.



Postoji nekoliko različitih pristupa u korekciji artefakata metalnih predmeta, pri čemu su najzastupljenije metode softverske korekcije tzv. *post-processing* metode. Detaljan prikaz dostupnih metoda korekcije dan je u radu [46].

Moguće su pojave još nekih artefakata 2D zapisa kao posljedice nesavršenosti mjernog sustava, kao naprimjer artefakti pokreta i artefakti djelomičnog volumena. Ipak, pojava ovih artefakata češća je kod primjene računalne tomografije u medicini.

5. Artefakti pokreta

Artefakti pokreta učestaliji su kod primjene računalne tomografije u medicini gdje je teško u procesu CT skeniranja osigurati potpuno mirovanje pacijenta. Osim kontroliranih pokreta dijelova tijela, artefakte pokreta uzrokuju disanje i rad srca. U industrijskoj računalnoj tomografiji artefakti pokreta posljedica su loše učvršćenih predmeta mjerenja gdje u procesu skeniranja tijekom rotacije predmeta može doći do njegova pomicanja na postolju [7].

6. Artefakti djelomičnog volumena

Artefakti djelomičnog volumena nastaju kada predmet mjerenja nije u cijelosti projiciran na detektor. Razlog tome može biti pogrešno odabrano geometrijsko povećanje ili veličina predmeta koja premašuje veličinu detektora dostupnog CT skenera. S obzirom da rekonstrukcijski algoritmi pretpostavljaju da je predmet mjerenja u cijelosti vidljiv na detektoru u svim kutovima gledanja, u slučaju kada to nije tako, rekonstruirane slike sadrže okrnjene artefakte tj. artefakte djelomičnog volumena [44]. Kako bi se izbjegla pojava artefakata djelomičnog volumena, mjeritelj u procesu podešavanja postavki CT skeniranja prilikom postavljanja predmeta i odabira geometrijskog povećanja mora provjeriti nalazi li se predmet mjerenja u vidnom polju detektora u cijelom ciklusu rotacije od 360 °. Pojava ovih artefakata nije čest slučaj u primjeni industrijskih CT skenera [47]. Artefakte djelomičnog volumena ne treba miješati s regijama od interesa ROI (engl. *region of interest*), koje nastaju kao rezultat ciljane provedbe skeniranja određenog dijela predmeta i/ili obrade podataka određenog dijela 3D modela.

2.2.3 Analiza 3D modela

Zadnji korak u procesu CT dimenzionalnog mjerenja podrazumijeva analizu i mjerenja na dobivenom 3D prikazu snimljenog stanja predmeta. Analiza 3D modela može biti raznovrsna; od nerazorne analize materijala s ciljem detekcije i mjerenja veličina pora i uključaka, analize nesukladnosti predmeta usporedbom s CAD modelom (engl. *nominal/actual comparison*), mjerenja debljine stijenki, analize struktura pjenastih materijala, određivanja orijentacije vlakana u materijalu, pa sve do provedbe dimenzionalnih mjerenja značajki predmeta.

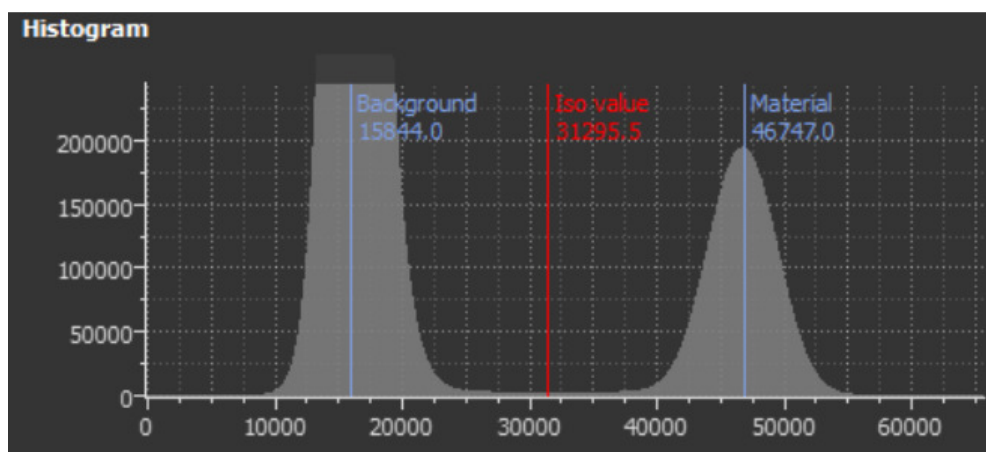
2.2.3.1 Definiranje površine modela

Nužan preduvjet u analizi modela jest potproces određivanja površina materijala predmeta tj. razgraničavanje vokselu s različitim vrijednostima skale sivih tonova u voksele koji pripadaju materijalu i one koji pripadaju zraku (engl. *background*) određivanjem granične vrijednosti sive skale (engl. *threshold value*). U idealnom slučaju prozračivanja predmeta homogene strukture histogram skale sivih tonova rekonstruiranog 3D modela sadrži dvije vrijednosti sivih tonova, jednu za zrak, drugu za materijal predmeta. Međutim, uslijed djelovanja utjecajnih parametara u procesu skeniranja i kasnije 3D rekonstrukcije modela, na granicama između predmeta i zraka javljaju se različiti iznosi tonova sive skale koji otežavaju

određivanje granice. Pogrešan odabir granične vrijednosti sive skale rezultirat će pogreškom pomaka rezultata u odnosu na stvarnu vrijednost (engl. *offset error*).

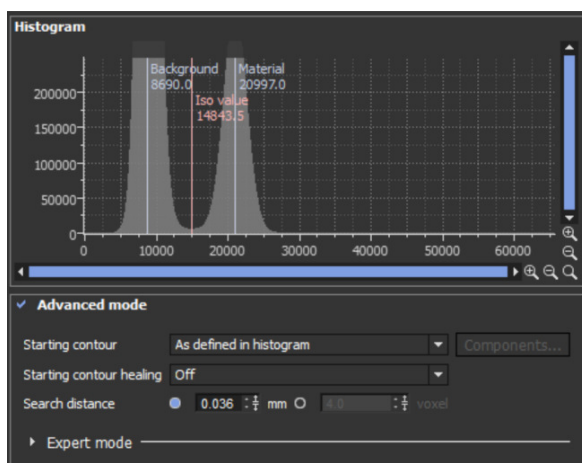
Do danas su razvijene dvije grupe metoda određivanja površina predmeta, globalna i lokalna (engl. *global and local surface determination*).

Globalna metoda određivanja površine između predmeta i zraka koristi se kod određivanja površine predmeta izrađenih iz jedne vrste materijala pri čemu se na histogramu broja voksela i tonova sive skale izdvajaju dva vrha od kojih jedan predstavlja skupinu voksela zraka, a drugi skupinu voksela materijala predmeta. Najčešće korištena globalna metoda jest ISO 50 % koja definira graničnu vrijednost sive skale kao prosjek između vrhova zraka i vrhova materijala predmeta u histogramu skale sivih tonova svih voksela (slika 2-26).

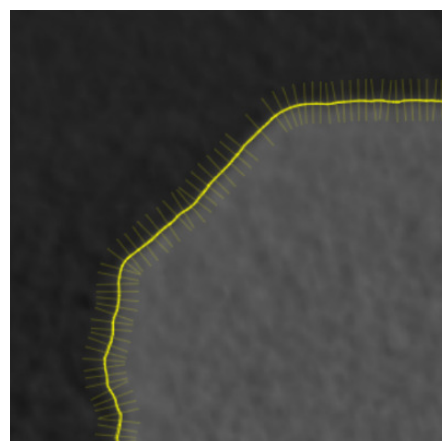


Slika 2-26. Histogram skale sivih tonova svih voksela - metoda ISO 50 %.

Lokalna metoda određivanja površina radi na principu variranja prethodno određene granične vrijednosti sive skale lokalno, a s ciljem smanjenja utjecaja sustavnih pogrešaka nastalih kao rezultat otvrdnjavanja zračenja, sekundarnog zračenja i utjecaja šumova [48]. Površina zrak-materijal definirat će se lokalno u usporedbi s okolnim vokselima pri čemu se ista vrijednost skale sivih tonova, u zavisnosti od okolnih voksela, može drugačije tumačiti [49]. Lokalno određivanje površina provodi se na prethodno definiranoj udaljenosti od granične vrijednosti sive skale izraženoj ili brojem voksela ili duljinom. Slika 2-27 prikazuje primjenu lokalne metode određivanja površina za udaljenost iznosa 0,036 mm sa svake strane granične vrijednosti sive skale.



a)

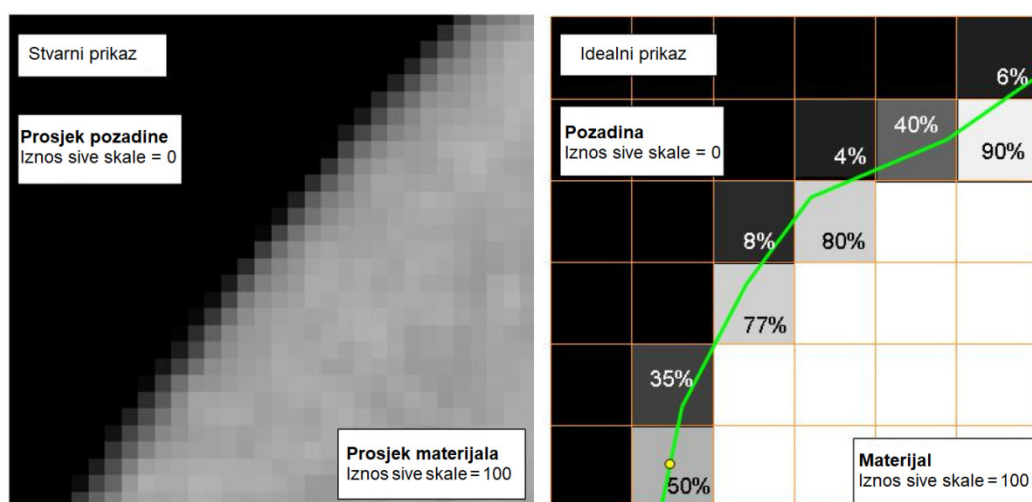


b)

Slika 2-27. Lokalna metoda određivanja granice površina: a) histogram, b) granica određena lokalnom metodom.

Definiranjem površine zrak-materijal lokalnom metodom određivanja površine značajno se umanjuje utjecaj sustavne pogreške (pogreške *offset-a*) te omogućuje provedba točnijih mjerenja. Lokalnom metodom određivanje granice provodi se s točnošću manjom od veličine vokselu (engl. *sub-voxel accuracy*). U optimalnim uvjetima definiranje granice lokalnom metodom moguće je odrediti s nesigurnošću manjom od 1/10 iznosa vokselu [50].

Slika 2-28 prikazuje provedbu određivanja granice lokalnom metodom. Na desnoj slici zelena linija predstavlja površinu između zraka i materijala predmeta određenu lokalnom metodom određivanja granice s točnošću manjom od veličine vokselu.



Slika 2-28. Stvarni i idealni prikaz 2D zapisa [50].

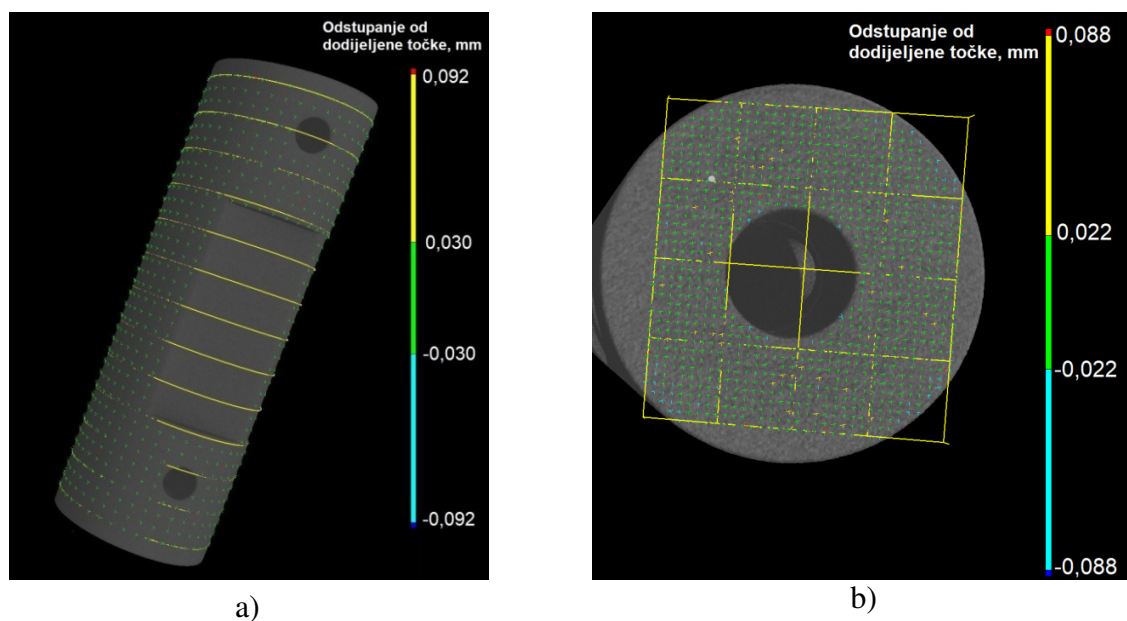
Tek nakon određivanja površine između materijala predmeta i zraka, bilo lokalnom ili globalnom metodom, moguća je provedba analize predmeta. Određivanjem površine između

materijala predmeta i zraka omogućena je ekstrakcija površine predmeta što je nužan preduvjet za kasniju provedbu dimenzionalne analize modela.

Rezultati mjerenja značajno ovise o procesu razgraničavanja između vokseli različitih vrijednosti sivih tonova materijala i pozadine, odnosno o procesu određivanja površine predmeta.

2.2.3.2 Dimenzionalna mjerenja

Nakon definirane površine modela moguće je provesti dimenzionalna mjerenja. Mjerenja je moguće provesti metodom dodjeljivanja oblika jednostavne geometrije 3D modelu kao što su cilindri, sfere, konusi te promatranjem iznosa veličine od interesa (npr. promjera) ili definiranjem udaljenosti između oblika jednostavne geometrije gdje će duljina nekog predmeta biti definirana udaljenošću između dviju ravnina dok će osni razmak biti definiran udaljenošću između centara dvaju cilindra. Ovom metodom moguće je izdvojiti veličine od interesa (slika 2-29).

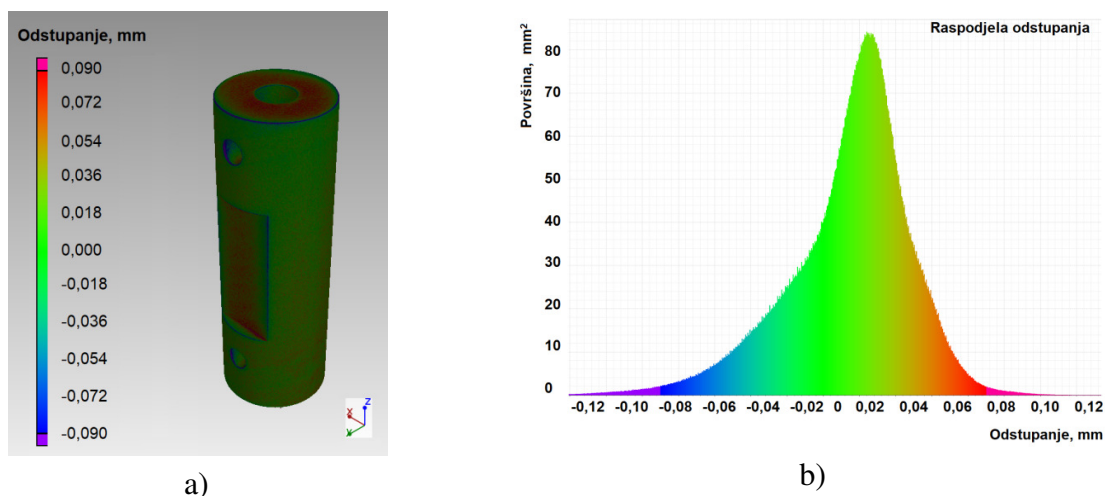


Slika 2-29. Dodjeljivanje oblika jednostavne geometrije: a) cilindar, b) ravnina.

Utjecajni parametri kod metode mjerenja dodjeljivanjem oblika jednostavne geometrije su broj točaka kojima će se opisati odabrani jednostavni oblik (najčešće 1000 točaka) i matematički algoritmi dodjele točaka površini, od kojih se najviše koristi Gaussov algoritam.

Druga metoda dimenzionalnog mjerenja jest metoda usporedbe 3D modela predmeta dobivenog računalnom tomografijom s CAD modelom. Metoda usporedbe rezultirat će

mapom boja odstupanja modela dobivenog računalnom tomografijom od referentnih vrijednosti definiranih CAD modelom (Slika 2-30).

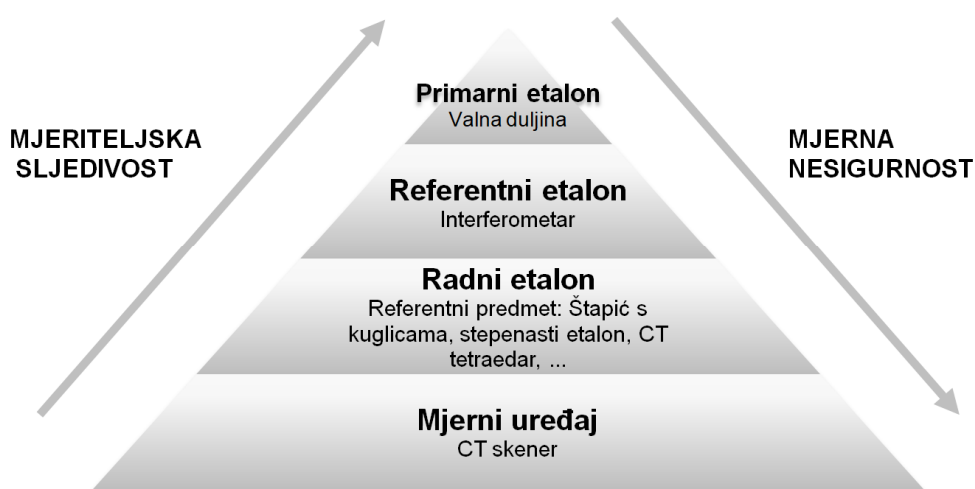


Slika 2-30. Usporedba CT modela s CAD modelom: a) preklopljeni modeli, b) graf raspodjele odstupanja.

Metoda je relativno jednostavna i brza te se uvelike primjenjuje kod mjerenja optičkim 3D sustavima. Međutim, problem kod ovakve usporedbe jest taj što nije poznato jesu li odstupanja rezultata povezana s netočnošću proizvodnog procesa, odnosno jesu li ona prikaz stvarnog stanja proizvoda ili su dobivena odstupanja povezana s netočnošću procesa CT mjerenja i pogrešaka koje se javljaju kod rekonstrukcije 3D modela na temelju skeniranih slika. U ovom radu sva će se mjerenja provesti metodom dodjele oblika jednostavne geometrije 3D modelu.

3. OSIGURAVANJE MJERITELJSKE SLJEDIVOSTI KOD PRIMJENE RAČUNALNE TOMOGRAFIJE

„Mjeriteljska sljedivost definira se kao svojstvo mjernog rezultata kojim se taj rezultat dovodi u vezu s navedenom referencijom dokumentiranim neprekinutim lancem umjeravanja (slika 3-1), od kojih svako doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnost, pri čemu referencija može biti definicija mjerne jedinice preko njezina praktičnog ostvarenja, u ovom slučaju, jedinica duljine metar, ili pak mjerni postupak ili mjerni etalon.“ [51].



Slika 3-1. Lanac sljedivosti kod industrijske računalne tomografije.

„Umjeravanje se definira kao radnja kojom se pod određenim uvjetima u prvome koraku uspostavlja odnos između vrijednosti veličine s mjernim nesigurnostima koje daju mjerni etaloni i odgovarajućih pokazivanja kojima su pridružene mjerne nesigurnosti, a u drugome koraku ti se podatci upotrebljavaju za uspostavljanje odnosa za dobivanje mjernog rezultata iz pokazivanja“ [51].

Za provedbu umjeravanja mjernog sustava prema definiciji danoj u Mjeriteljskom rječniku potrebno je identificirati i kvantificirati sve utjecajne parametre na mjerni sustav te procijeniti mjernu nesigurnost rezultata mjerenja. Korekcija pogrešaka utjecajnih parametara te verifikacija mjernog sustava od strane proizvođača također pridonose osiguravanju mjeriteljske sljedivosti. Uobičajeno, verifikacija mjernog sustava definira se graničnom pogreškom uređaja (*MPE*). Za industrijski CT skener korišten u istraživanjima, Nikon XT H 225, nije poznata granična pogreška uređaja (*MPE*).

S obzirom na to da je CT mjerni sustav veoma složen, postupak umjeravanja treba uzeti u obzir geometriju CT skenera i rekonstrukciju modela. Umjeravanje geometrije CT skenera obuhvaća definiranje odnosa između sastavnih komponenata CT skenera: izvora rendgenskog zračenja, rotacijskog stola te detektora zračenja. Umjeravanje izvora rendgenskog zračenja podrazumijeva definiranje geometrije, veličine i položaja žarišta u odnosu na rotacijsku os te normalu detektora. Prijedlog za umjeravanje rotacijske osi uključuje određivanje položaja rotacijske osi u koordinatnom sustavu, nagib rotacijske osi te utvrđivanje odstupanja koraka zakreta rotacijskog stola. Umjeravanje detektora odnosi se na definiranje položaja detektora u odnosu na izvor zračenja te orijentaciju detektora oko osi x , y i z . S obzirom da veličina vokseli ovisi o iznosu geometrijskog povećanja, u postupak umjeravanja CT skenera svakako treba uključiti umjeravanje osi z duž cijelog puta te umjeravanje udaljenosti između izvora i detektora. Umjeravanje u potprocesu rekonstrukcije modela provodi se kroz umjeravanje 2D zapisa. Kvaliteta 2D zapisa uvelike ovisi o geometriji CT skenera i stanju detektora, što u konačnici značajno utječe na kvalitetu 3D modela. U cilju osiguravanja mjeriteljske sljedivosti predlaže se provedba umjeravanja detektora. S obzirom na to da je iznos signala na svakom senzoru na detektoru polazna točka za rekonstrukciju vokseli korištenjem povratnog projiciranja, proces umjeravanja detektora trebao bi predvidjeti umjeravanje detektora utvrđivanjem varijacije intenziteta na detektoru. Za provjeru utjecajnih parametara na mjerni sustav potrebna je često nedostupna sofisticirana, umjerena i veoma skupa mjerna oprema.

Prateći definiciju mjeriteljske sljedivosti, u postupku osiguravanja sljedivosti potrebno je provesti procjenu mjerne nesigurnosti.

„Mjerna nesigurnost ili nesigurnost mjerenja jest nenegativni parametar koji opisuje rasipanje vrijednosti veličine koje se na temelju upotrijebljenih podataka pridružuju mjerenoj veličini.“ [51]. Kako je računalna tomografija nova metoda korištena u dimenzionalnom mjeriteljstvu te iz razloga što postoji velik broj utjecajnih parametara prisutnih u cjelokupnom procesu mjerenja, mjerna nesigurnost rezultata mjerenja u velikom broju slučajeva nije procijenjena.

Područje uspostave mjeriteljske sljedivosti kod primjene računalne tomografije je aktualno te se istraživanja provode u sklopu međulaboratorijskih usporedbenih mjerenja, međunarodnih projekata te izrada doktorskih disertacija. Rezultati dosadašnjih istraživanja upućuju na poteškoće u provedbi umjeravanja CT sustava [1, 5, 7, 58, 63, 77]. Iz tog razloga, a sukladno napomeni danoj uz definiciju umjeravanja, „umjeravanje se katkada definira

uspostavljanjem odnosa između vrijednosti veličine s mjernim nesigurnostima koje daju mjerni etaloni i odgovarajućih pokazivanja kojima su pridružene mjerne nesigurnosti“ [51].

Slijedom navedenog, provedbom supstitucijske metode mjerenja te procjenom mjerne nesigurnosti može se osigurati sljedivost rezultata mjerenja za konkretan predmet [78].

Doprinos uspostavljanju sljedivosti rezultata mjerenja moguće je ostvariti identifikacijom utjecajnih parametara na mjerni sustav, razvojem referentnog predmeta u svrhu kompenzacije sustavnih pogrešaka te procjenom mjerne nesigurnosti.

U cilju uspostavljanja sljedivosti rezultata mjerenja u radu je predložen referentni predmet, identificirani su utjecajni parametri u korištenom mjernom sustavu te je procijenjena mjerna nesigurnost rezultata mjerenja dimenzionalnih značajki predmeta složene geometrije istraživanih u radu. Mjerna nesigurnost rezultata mjerenja cilindra složene geometrije je procijenjena kombinacijom metode Monte Carlo (MCS) i virtualnog CT sustava korištenjem softverskog paketa *aRTist*. U radu je također provedena procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja značajki cilindra složene geometrije kod primjene supstitucijske metode mjerenja.

3.1 Referentni predmeti

Upotreba referentnog predmeta u svrhu identifikacije i kompenzacije sustavnih pogrešaka je općeprihvaćen pristup osiguravanja sljedivosti kod kontaktnih trokoordinatnih mjernih uređaja. Kako se metoda računalne tomografije ubraja u trokoordinatne metode mjerenja, upotreba referentnog predmeta logično je polazište pri razvijanju postupka osiguravanja mjeriteljske sljedivosti.

U nastojanju osiguravanja sljedivosti do danas je predložen i istraživan velik broj predmeta kao mogućih referentnih predmeta. Sam proces skeniranja ovisi o velikom broju ulaznih parametara tj. postavki skeniranja koje su u direktnoj vezi s karakteristikama predmeta mjerenja (veličinom predmeta i gustoćom materijala) što rezultira pojavom velikog broja sustavnih i slučajnih pogrešaka. Korištenje referentnog predmeta omogućava korekciju sustavnog pomaka te približavanje rezultata stvarnom iznosu.

S obzirom na prepoznato korištenje referentnih predmeta kod kontaktnih i optičkih trokoordinatnih metoda, prvotna ideja odnosila se na primjenu već postojećih referentnih predmeta kod mjerenja industrijskim CT skenerima [14]. Međutim, problem na koji se naišlo jest prevelika apsorpcija zračenja, zbog toga što su takvi predmeti najčešće izrađeni od čelika.

Iz tog razloga neki od postojećih predmeta su svojom izvedbom prilagođeni za korištenje kod računalne tomografije te su također, s obzirom na nove potrebe koje su rezultat nove tehnike mjerenja, predloženi novi referentni predmeti. Zahtjevi na referentne predmete postavljeni su smjernicama *VDI/VDE 2630 Part 1.3*. [52].

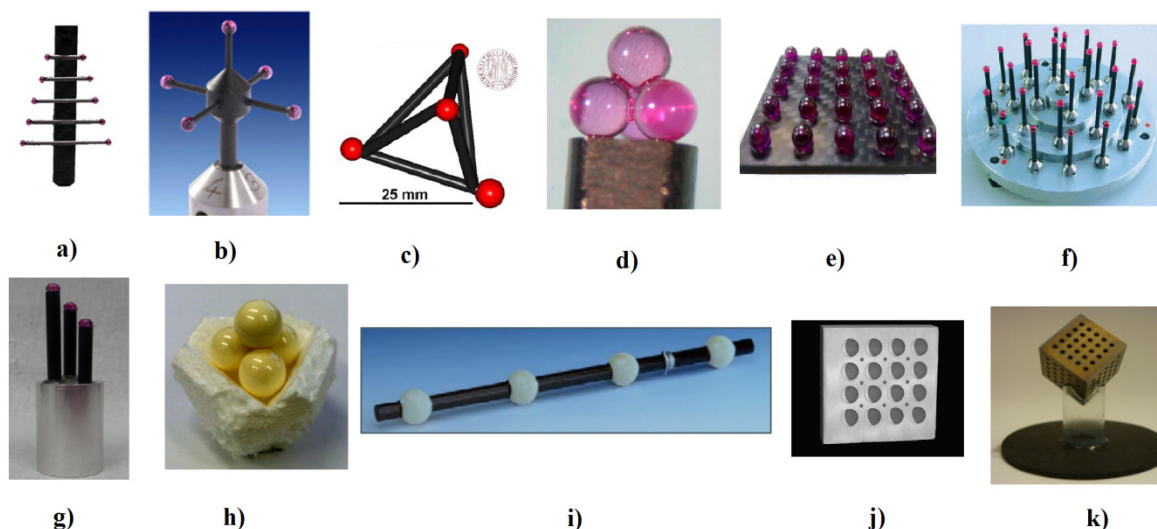
S obzirom na namjenu, referentne predmete moguće je podijeliti u nekoliko grupa:

- a) Referentni predmeti za korekciju veličine voksel (engl. *scale correction*).
- b) Referentni predmeti vanjskih i unutarnjih mjernih karakteristika za određivanje granične vrijednosti sive skale (engl. *threshold determination*).
- c) Ostali.

Pregled referentnih predmeta dan je u nastavku.

3.1.1 Referentni predmeti za korekciju veličine voksel

Referentni predmeti s kuglicama koriste se za korekciju veličine voksel. Pogreška veličine voksel može nastati uslijed geometrijskih promjena žarišta. Još jedan od uzroka pogreške veličine voksel su geometrijske pogreške translacijskog i rotacijskog sustava CT skenera. Pogreška veličine voksel uzrokuje značajan sustavni pomak rezultata dimenzionalnih mjerenja te se nužno mora korigirati. Referentni predmeti koji sadrže rubinske kuglice, izvedeni u obliku štapića kružnog poprečnog presjeka, ploča, tetraedra ili heksaedra pričvršćenih na lakoprozračivi materijal, pokazali su se pogodnima za provedbu korekcije veličine voksel. Za korekciju se koriste značajke udaljenosti između dviju ili više kuglica iz razloga što takve dimenzije ne ovise o odabiru granične vrijednosti sive skale, tj. o određivanju rubova kuglice u odnosu na okolišni prostor. Neovisno o definiranoj graničnoj vrijednosti sive skale, udaljenost između središta dviju kuglica ostaje nepromijenjena. Također, upotrebom lakoprozračivog materijala male gustoće, industrijskog rubina, izbjegava se pojava artefakata otvrdnjavanja zračenja. Slikom 3-2 prikazani su referentni predmeti koji se koriste za korekciju veličine voksel.



Slika 3-2. Referentni predmeti s rubinskim kuglicama za korekciju veličine vokselâ:

a) *CT tree* [53], b) zvjezdasti predmet [14], c) *CT tetrahedron* [54], d) tetraedar od naslaganih rubinskih kuglica [5], e) *CT ball plate* [53], f) *Zeiss sphere gauge* [55], g) referentni predmet s tri rubinske kuglice [56], h) tetraedar od naslaganih aluminijskih kuglica [57], i) štâp s keramičkim kuglicama [58], j) ploča s kalotama [58], k) kocka s kalotama [59].

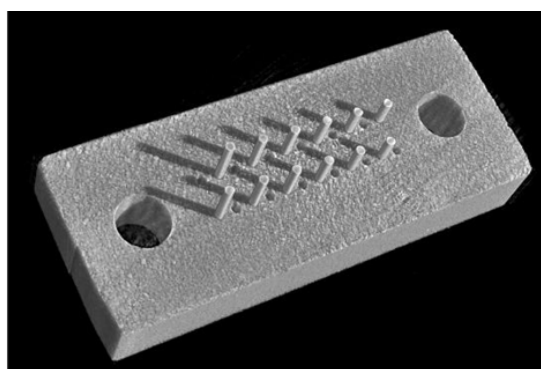
Osim predmeta izrađenih od industrijskog rubina, za korekciju veličine vokselâ koriste se i predmeti istih ili sličnih geometrija, izrađeni od drugih materijala. Jedan takav je i rastavljiv tetraedar, oblik dobiven postavljanjem četiri identične aluminijske kuglice na odgovarajuću podlogu (slika 3-2 h) [57], tetraedar formiran korištenjem keramičkih kuglica kao i predmet većih dimenzija; štâp s keramičkim kuglicama promjera 30 mm (slika 3-2 i) [58]. Također, bilo je pokušaja i korištenja referentnih predmeta većih gustoća: čeličnih kuglica, međutim ovaj pristup nije se pokazao pouzdanim zbog utjecaja artefakata otvrdnjavanja zračenja [4].

Preporučeni postupak provedbe korekcije veličine vokselâ zahtijeva skeniranje referentnog predmeta prije i nakon skeniranja predmeta od interesa. Međutim, ukoliko je konkretan mjerni postav takav da je omogućeno postavljanje predmeta za korekciju veličine vokselâ u neposrednu blizinu predmeta od interesa, uz uvjet da se u jednom procesu skeniranja na 2D zapisima obuhvaćaju oba predmeta, tada nije potrebno provoditi zasebna skeniranja predmeta za korekciju veličine vokselâ. Takav pristup značajno smanjuje potrebno vrijeme za provedbu preporučenog postupka. S obzirom na nestabilnost izvora zračenja u dužem vremenskom periodu, korekcija veličine vokselâ nužna je kod svakog mjerenja. Postupak korekcije veličine vokselâ zasigurno će biti uključen u standard primjene

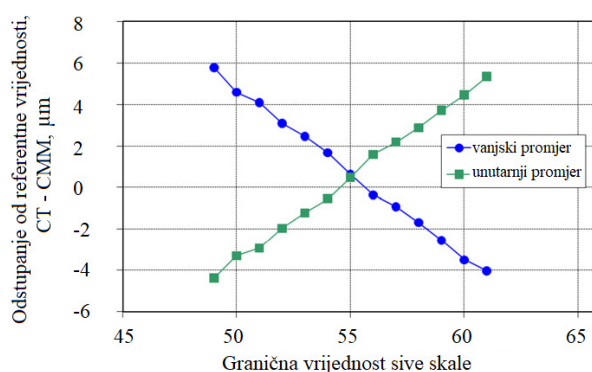
industrijske računalne tomografije za potrebe dimenzionalnih mjerenja kao jedan od nužnih koraka.

3.1.2 Referentni predmeti za određivanje granične vrijednosti sive skale

Drugu grupu referentnih predmeta čine predmeti s definiranim vanjskim i unutarnjim karakteristikama koji služe za korekciju odabrane granične vrijednosti sive skale. Postupak odabira odgovarajuće granične vrijednosti sive skale moguće je postići paralelnim praćenjem iznosa rezultata dimenzionalnih mjerenja karakteristika vanjskih i unutarnjih geometrija promatranog predmeta. Ponavljanjem mjerenja vanjskih i unutarnjih mjernih veličina za odabrane različite granične vrijednosti sive skale moguće je utvrditi optimalan iznos granične vrijednosti kod kojeg su odstupanja izmjerених vrijednosti dimenzionalnih mjerenja i vanjske i unutarnje geometrije u odnosu na referentnu vrijednost minimalne. Proceduru odabira granične vrijednosti sive skale na opisani način predložili su Carmignato i suradnici [60] koji za korekciju sustavne pogreške uslijed pogrešno odabrane granične vrijednosti sive skale koriste referentni predmet naziva *fibre gauge* prikazan slikom 3-3 a. Slika 3-3 b prikazuje utjecaj različitog odabira granične vrijednosti sive skale na rezultate mjerenja [60].



a)

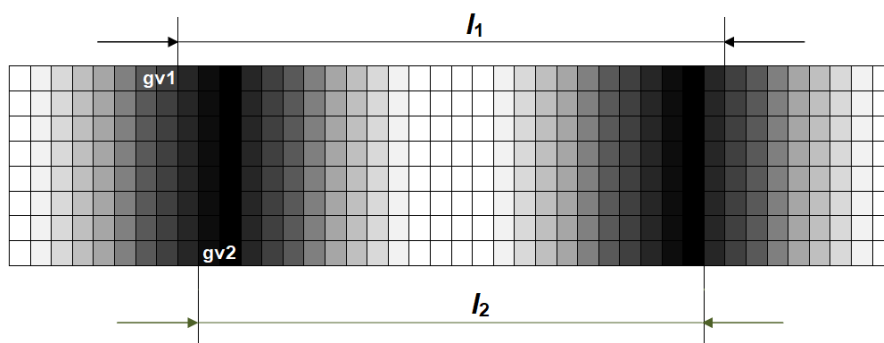


b)

Slika 3-3. Korekcija granične vrijednosti sive skale: a) *fibre gauge*, b) utjecaj granične vrijednosti sive skale na rezultate mjerenja [60].

Utjecaj granične vrijednosti sive skale na odstupanja od referentnih vrijednosti dimenzija vanjskih i unutarnjih karakteristika prikazan je slikom 3-3 b. Definiranjem iznosa granične vrijednosti sive skale manjeg od optimalne vrijednosti, dimenzije unutarnjih karakteristika bit će manje od referentnih vrijednosti, dok će dimenzije vanjskih karakteristika u tom slučaju biti veće od referentnih vrijednosti. Vrijedi i suprotno.

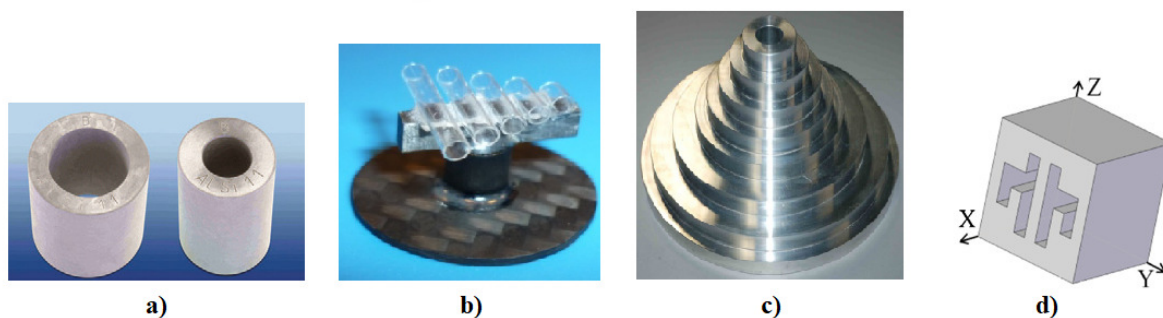
Pravilan odabir granične vrijednosti sive skale od iznimnog je značaja kod kasnijeg određivanja granice između predmeta i okoline (engl. *edge detection*), tj. odabir granične vrijednosti sive skale od iznimnog je utjecaja na točnost rezultata, posebice kod dvosmjernih dimenzionalnih mjerenja (engl. *bidirectional measurements*) kao što je prikazano slikom 3-4.



Slika 3-4. Prikaz udaljenosti l za slučaj odabira dviju različitih graničnih vrijednosti sive skale.

Kod odabira granične vrijednosti sive skale iznosa $gv1$, dimenzija definirana udaljenošću dviju vanjskih ploha predmeta od interesa iznosit će l_1 , dok će kod odabira granične vrijednosti sive skale iznosa $gv2$, promatrana udaljenost rezultirati manjim iznosom, l_2 .

Za potrebe korekcije granične vrijednosti sive skale predloženi su referentni predmeti različitih izvedbi prikazani slikom 3-5.

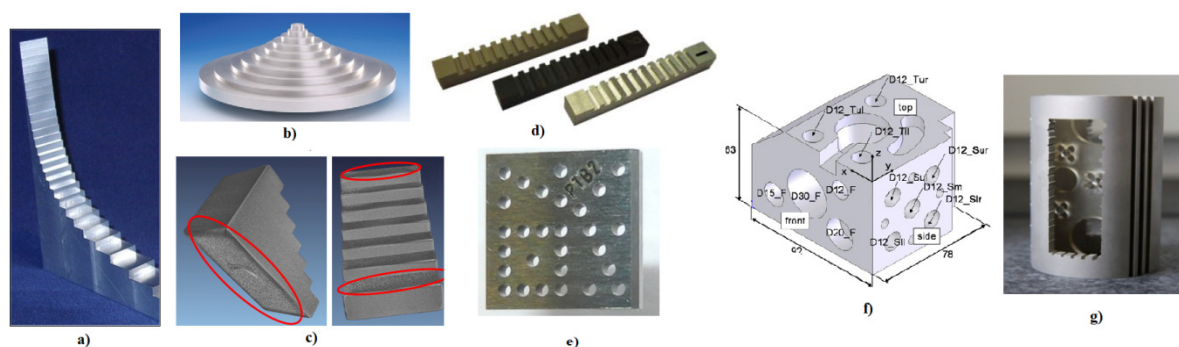


Slika 3-5. Referentni predmeti za određivanje granične vrijednosti sive skale: a) šuplji cilindar [58], b) *pan flute gauge* [59], c) stepenasti cilindar [58], d) *cactus gauge* [61].

Poželjno je da referentni predmet za određivanje granične vrijednosti sive skale bude istog ili sličnog materijala te približnih dimenzija kao što je predmet od interesa. U tom slučaju granična vrijednost sive skale definirana korištenjem referentnog predmeta može se pouzdano primijeniti i na predmet od interesa [60].

3.1.3 Ostali referentni predmeti

Osim spomenutih, razvijeni su i istraživani i referentni predmeti različitih geometrija i namjena. Tako je moguće izdvojiti referentne predmete stepenastih oblika, bilo da se radi o kvadratnim (slika 3-6 *a, c, d*) ili cilindričnim predmetima (slika 3-6 *b*). Stepenastim referentnim predmetima ispituju se mogućnosti izvora CT skenera u vidu maksimalne debljine predmeta koju je moguće prozračiti dostupnom konfiguracijom izvora rendgenskog zračenja. Stepenasti predmeti mogu se koristiti za ispitivanje utjecaja orijentacije predmeta u procesu skeniranja [62], te se koriste i kod utvrđivanja utjecaja softverske korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja na rezultate dimenzionalnih mjerenja. Primjeri nekih od stepenastih izvedbi referentnih predmeta prikazani su slikom 3-6 *a-d*. Nadalje, sposobnost CT mjernog sustava u konkretnim slučajevima ispitivana je korištenjem aluminijskog heksaedra složene geometrije [63], kao i korištenjem ploče s provrtima [64] dostupne u dvije veličine, manje čelične i veće aluminijske, za ispitivanje mogućnosti skeniranja kod odabira većih i manjih geometrijskih povećanja. Predmet QFM cilindar (slika 3-6 *g*) složene geometrije korišten je kod validacije CT sustava u postupku provedbe interkomparacije CT audit [54]. Slikom 3-6 prikazani su spomenuti referentni predmeti.



Slika 3-6. Ostali referentni predmeti: a) stepenasti luk [65], b) stepenasti stožac [58], c) stepenasti blok [62], d) zupčasti predmeti [53], e) ploča s provrtima [66], f) aluminijski blok složene geometrije [63], g) QFM cilindar [59].

Proizvođači uređaja navode kako se sljedivost do jedinice metra može osigurati korištenjem referentnih predmeta. Najčešće spominjana jest upotreba tzv. kalibracijskih štapića, kojima se, uz određenu nesigurnost, provodi korekcija veličine voksel. Međutim, provedba korekcije veličine voksel samo je jedan od doprinosa kod uspostavljanja mjeriteljske sljedivosti kod računalne tomografije. Pojedini proizvođači definiraju graničnu pogrešku mjerenja duljine (MPE_E) korištenjem referentnih predmeta s većim brojem kuglica,

provedbom većeg broja mjerenja različitih udaljenosti između kuglica. Međutim, deklarirana vrijednosti MPE_E ne predstavlja graničnu pogrešku mjerenja uređaja u općenitom slučaju.

S obzirom na nedostatak procedura te uslijed činjenice kako postoji velik broj parametara koji utječu na pojavu bilo sustavnih, bilo slučajnih pogrešaka, primjena referentnih predmeta s ciljem eliminacije što većeg broja sustavnih pogrešaka je nužno potrebna. Pregledom literature vidljivo je kako postoji velik broj patentiranih i primjenjivanih predmeta u cilju eliminacije sustavnih pogrešaka ili samo za ispitivanje mogućnosti mjernog sustava kod primjene industrijske računalne tomografije, međutim još uvijek ne postoji jedan univerzalan referentni predmet koji bi omogućavao kvalifikaciju mjernog sustava, podešavanje mjernog sustava i konačno eliminaciju sustavnih pogrešaka u općenitom slučaju. Slijedom navedenog u radu je predložen novi referentni predmet.

3.1.4 Prijedlog novog referentnog predmeta

Proces dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom izrazito je kompleksan uslijed djelovanja velikog broja utjecajnih parametara na cjelokupan proces mjerenja, rezultat kojih su sustavne pogreške. Sustavne pogreške dimenzionalnih mjerenja kao posljedica pogrešne veličine vokseli nastaju uslijed dimenzijske i geometrijske nestabilnosti procesa skeniranja. Nestabilnost procesa skeniranja može uključivati pozicioniranje predmeta u odnosu na izvor zračenja, rotaciju predmeta u procesu skeniranja, geometrijski odnos detektora i izvora rendgenskog zračenja kao i bilo koje geometrijske promjene žarišta. Moguća rješenja u cilju smanjenja sustavnih pogrešaka uključuju: povećanje geometrijske i dimenzijske stabilnosti komponenata CT skenera, poboljšavanje rekonstrukcijskih algoritama te primjenu referentnih predmeta [58]. S obzirom na to da krajnji korisnici računalne tomografije koriste gotove CT skenere definiranih geometrija i karakteristika, kao i gotove matematičke algoritme za rekonstrukciju i daljnju analizu setova podataka, jedino moguće rješenje krajnjem korisniku uređaja, a u cilju smanjenja sustavnih pogrešaka, jest primjena referentnih predmeta.

U prethodnom dijelu rada dan je pregled dostupnih referentnih predmeta. Vidljivo je kako nijedan od predloženih predmeta ne omogućava eliminaciju svih sustavnih pogrešaka u općenitom, proizvoljnom slučaju. Razlog tome leži u izrazito širokoj namjeni i mogućnostima CT skenera koji omogućavaju analizu predmeta različitih materijala, veličina i složenosti geometrije.

Uzevši u obzir trenutnu primjenu industrijske računalne tomografije te mogućnosti standardnih komercijalnih industrijskih CT uređaja maksimalne snage izvora zračenja od

225 W te preporuku smjernica *VDI/VDE 2630 Part 1.3* [52] predložen je novi referentni predmet.

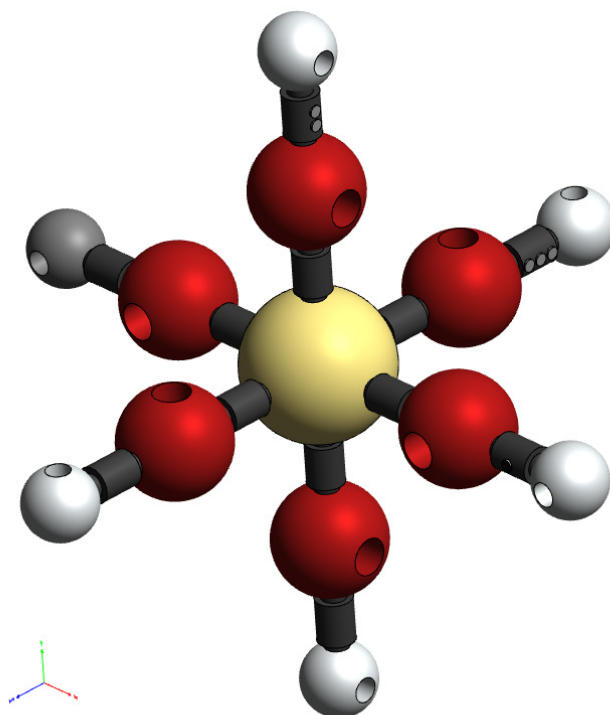
Sukladno preporuci danoj u [52], referentni predmet trebao bi imati sljedeća svojstva:

- Referentni predmet mora biti primjenjiv za potrebe dimenzionalnih mjerenja.
- Oblik i veličina referentnog predmeta trebale bi što više odgovarati obliku i veličini stvarnog predmeta mjerenja.
- Materijal referentnog predmeta trebao bi biti istih ili sličnih svojstava kao i predmet koji se ispituje.
- Svojstva materijala korištenog za izvedbu referentnog predmeta moraju biti precizno propisana.
- Površinska hrapavost predmeta trebala bi biti zanemarivo mala.
- Odstupanja od oblika i položaja značajki trebala bi biti zanemarivo mala.
- Mjerna nesigurnost izmjerenih (referentnih) značajki referentnog predmeta treba biti manja od granične pogreške mjerenja duljine referentnim uređajem, specificirane od strane proizvođača uređaja, na kojem su provedena mjerenja.

Osim preporuka danih smjernicama *VDI/VDE 2630 Part 1.3*, s obzirom na dosadašnje izvedbe referentnih predmeta, kao i poznata ograničenja CT skenera predložene su još neke preporuke:

- Prijedlog izvedbe predmeta uključuje oblikovanje predmeta sa značajkama kod kojih su rezultati dimenzionalnih mjerenja nezavisni od odabrane granične vrijednosti sive skale [65].
- Odabrani materijal mora se moći prozračiti s dostupnom snagom rendgenskog izvora [58].
- Korišteni materijal tokom vremena ne smije mijenjati svojstva koja utječu na dimenzije [58].
- Referentni predmet mora biti vidljiv na detektoru u cijelosti i kod većih geometrijskih povećanja [65].
- Eventualna pričvršćenja referentnih predmeta trebaju biti izrađena od lako prozračivih materijala koji ne utječu na histogram skale sivih tonova [67].

Smjernica *VDI/VDE 2630 Part 1.3* [52] opisuje zahtjeve za izvedbu referentnog predmeta u obliku stepenastog cilindra pri čemu su postavljeni zahtjevi na iznose dimenzija referentnih predmeta. Uvažavajući smjernice predložen je predmet prikazan slikom 3-7.



Slika 3-7. Prijedlog referentnog predmeta.

Predloženi referentni predmet sastoji se od po tri grupe kuglica različitih promjera i materijala, pričvršćenih na lakoprozračive štapiće izrađene od ugljičnih vlakana. Kako bi se pokrio raspon najčešće korištenih materijala kod primjene industrijske računalne tomografije, u predloženoj izvedbi referentnog predmeta odabrani su materijali kuglica značajno različitih karakteristika: aluminij, rubin i keramika.

Ukupan broj kuglica na predloženom predmetu iznosi trinaest, od toga je središnja kuglica izrađena od keramike, prvu razinu udaljenosti od središnje kuglice čine rubinske kuglice, po dvije u svakoj od koordinatnih osi, dok se na drugoj razini udaljenosti od središnje keramičke kuglice nalaze aluminijske kuglice najmanjih promjera, također postavljene duž sve tri koordinatne osi. Aluminijske i rubinske kuglice na sebi sadrže provrte.

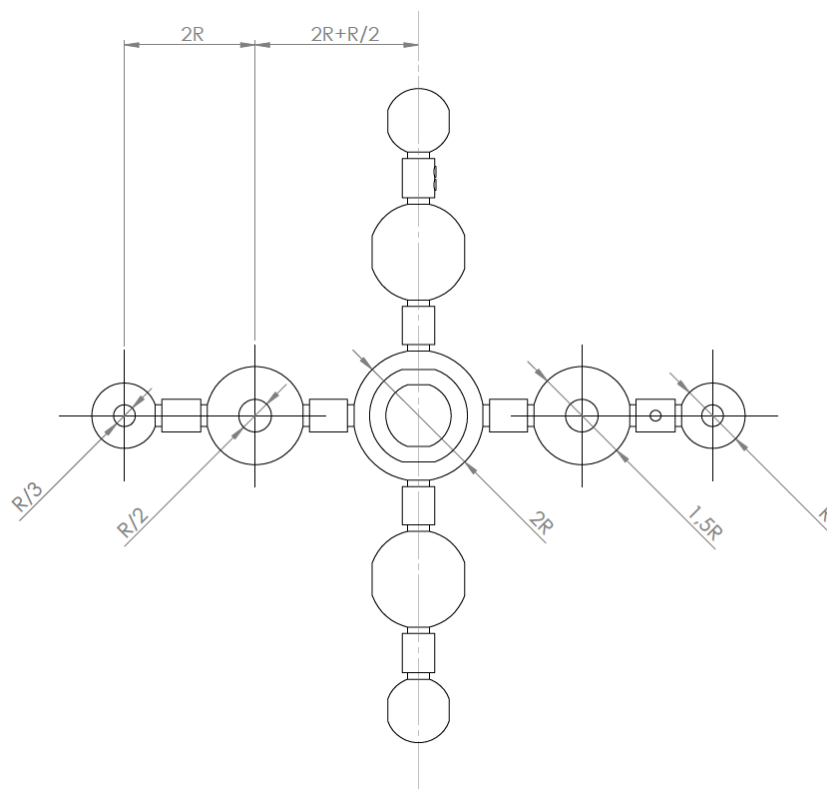
S obzirom na preporuke smjernica *VDI/VDE 2630 Part 1.3* [52] u tablici 3-1 navedena su svojstva predloženih materijala za izvedbu referentnog predmeta. Tablica sadrži okvirne vrijednosti za odabranu grupu materijala. Podaci su preuzeti iz online dostupne baze podataka [68].

Tablica 3-1. Svojstva materijala novog referentnog predmeta [68].

		Kuglice			Štapić
		<i>Aluminijska legura</i>	<i>Industrijski rubin</i>	<i>Cirkonij oksidna keramika</i>	<i>Polimerni kompozit ojačan ugljičnim vlaknima CFRP</i>
Gustoća materijala	g/cm ³	2,70 - 2,84	3,92 – 4,00	6,00 - 6,13	1,55 - 1,58
Youngov modul elastičnosti	GPa	~ 70	390 - 410	195 - 205	129 - 154
Koeficijent temperaturnog rastezanja	10 ⁻⁶ K ⁻¹	21,8 - 26,1	8,7 - 9,1	9,8 - 10,2	- (0,4) - 0,2
Talište	° C	568 - 657	2000 - 2100	2550 - 2700	3652 - 3697
Tvrdoća	HV	35 - 150	1830 - 2030	1330 - 1470	10,8 - 21,5

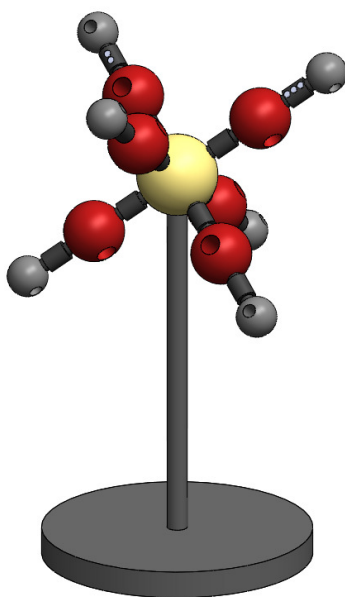
Prema slici 3-8, udaljenost između aluminijskih i rubinskih kuglica jednaka je iznosu dva promjera najmanje kuglice, dok je udaljenost između rubinskih kuglica i keramičke kuglice uvećana za iznos polumjera najmanje kuglice čime je postignuta jednaka duljina svih štapića od ugljičnih vlakana. Najmanji promjer imaju aluminijske kuglice, dok je promjer rubinskih kuglica iznosom uvećan 1,5 puta u odnosu na promjer aluminijskih kuglica, a promjer centralne, keramičke kuglice uvećan je 2 puta u odnosu na promjer aluminijskih kuglica. Spomenutim pristupom postignuto je, smjernicama [52] preporučeno, linearno povećanje iznosa karakterističnih oblika, u ovom slučaju kuglica. Štapići izrađeni od ugljičnih vlakana, svaki s po jednom rubinskom i jednom aluminijskom kuglicom, pričvršćeni su na keramičku kuglicu te su u međusobno okomitom položaju. Keramička kuglica punog je volumena, dok aluminijske i rubinske kuglice sadrže provrte kojima su promjeri 3 puta manji od vanjskih promjera pripadajućih kuglica (slika 3-8).

S obzirom na to da je predmet simetričan po svim osima te su nominalne vrijednosti definiranih promjera jednake, u cilju razlikovanja kuglica predloženo je označavanje štapića izrađenih od ugljičnih vlakana. Na predloženom referentnom predmetu, po jedan štapić u svakoj osi označen je s jednom, dvije ili tri točke. Označavanje štapića ne utječe na rezultate mjerenja.



Slika 3-8. Crtež referentnog predmeta s definiranim dimenzijama.

Sukladno zahtjevu za lakoprozračivim materijalom eventualnih pričvršćenja i prihvata referentnih predmeta, predlaže se prihvata prikazan slikom 3-9. Predloženi prihvata izveden je tako da osigurava nagnut položaj osi na kojima se nalaze kuglice u odnosu na izvor rendgenskog zračenja.



Slika 3-9. Prijedlog prihvata referentnog predmeta.

S obzirom na dosadašnja istraživanja provedena u okviru ovog rada te s obzirom na velik broj objavljenih radova iz predmetnog područja, može se konstatirati da su najznačajnije pogreške koje se javljaju kod mjerenja računalnom tomografijom rezultat pogrešno odabrane granične vrijednosti sive skale te pogrešno odabrane veličine voksel. U cilju minimizacije spomenutih sustavnih pogrešaka predložen je referentni predmet kojim će se moći osigurati pravilan odabir faktora skaliranja praćenjem dimenzionalne značajke udaljenosti između centara dviju kuglica, kao i definiranje granične vrijednosti sive skale materijala različitih koeficijenata apsorpcije.

S obzirom na to da su kuglice postavljene u tri međusobno okomita smjera, korekcija veličine voksel moći će se provesti kombiniranjem triju udaljenosti između centara kuglica na istoj osi: udaljenosti po osi x , udaljenosti po osi y te udaljenosti po osi z . Odabir različitih materijala kuglica omogućuje lakše i pravilnije definiranje granične vrijednosti sive skale praćenjem dimenzija vanjskog promjera kuglice od interesa i unutarnjeg promjera provrta kod iste kuglice. Jednim referentnim predmetom moguće je pokriti veći raspon različitih materijala bilo da se radi o mjerenju predmeta izrađenog od jedne vrste materijala ili od više vrsta. Odabrani materijali kuglica u predloženoj izvedbi referentnog predmeta su aluminij, rubin i keramika, međutim odabir materijala ostavljen je na izbor svakom pojedinom korisniku s obzirom na njegove potrebe. Pri tome valja poštivati smjernice dane dokumentom *VDI/VDE 2630 Part 1.3* [52].

Kako bi se pokrila geometrijska povećanja različitih iznosa, preporuča se izvedba predloženog referentnog predmeta u dvije ili više veličina pri čemu će predmet manjih dimenzija služiti za korekciju sustavnih pogrešaka kod većih geometrijskih povećanja, dok će se predmet većih dimenzija koristiti za korekciju sustavnih pogrešaka kod manjih geometrijskih povećanja.

3.1.5 Utjecajni parametri kod industrijske računalne tomografije

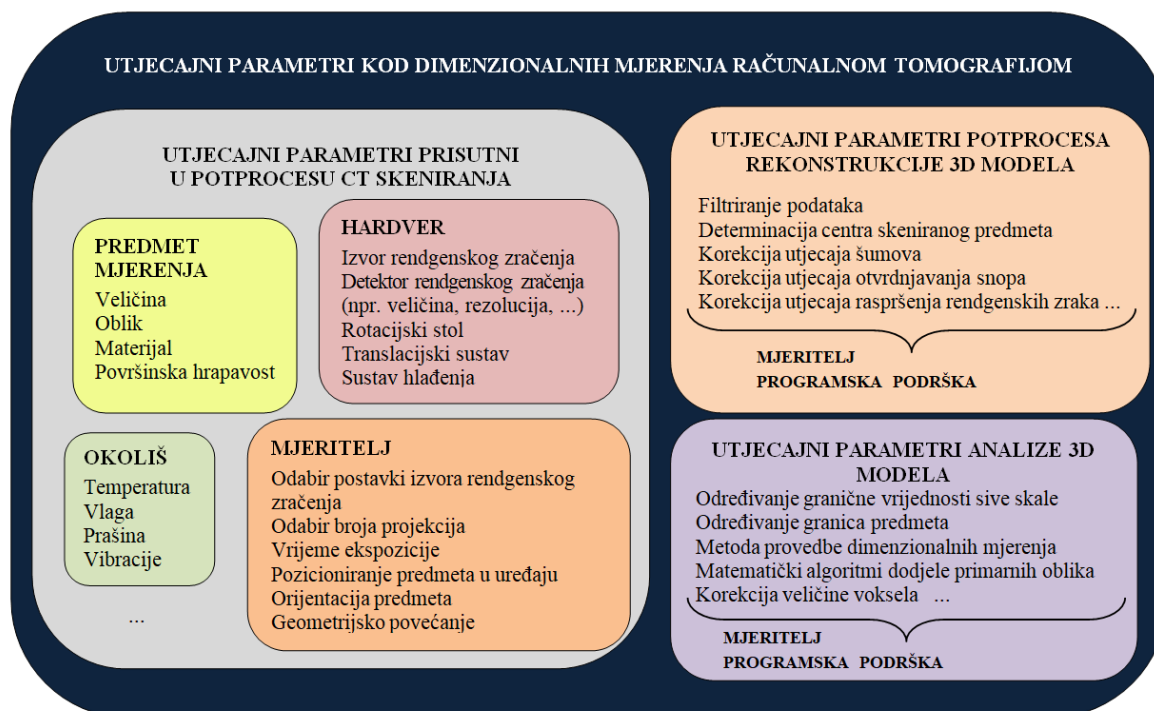
Najveći problem kod industrijske računalne tomografije, iz aspekta procjene mjerne nesigurnosti rezultata, jest postojanje velikog broja utjecajnih parametara. Procjena mjerne nesigurnosti sukladno *Vodiču za procjenu mjerne nesigurnosti – GUM* [69] zahtijeva poznavanje svih utjecajnih parametara na proces mjerenja te njihov doprinos mjernoj nesigurnosti. S obzirom da se radi o izrazito složenom sustavu, različitih mogućnosti i upotreba, koje uključuju provedbu različitih analiza na predmetima značajno različitih geometrija, materijala i namjena, procjena mjerne nesigurnosti kod industrijske računalne

tomografije sukladno GUM-u je vrlo složena. Prvi korak kod procjene mjerne nesigurnosti uključuje identifikaciju i klasifikaciju utjecajnih parametara. Klasifikacija parametara u grupe utjecajnih parametara često se koristi radi okrupnjavanja većeg broja utjecaja, a s ciljem smanjenja broja sastavnica mjerne nesigurnosti. Do danas je predložen veći broj klasifikacija parametara. Welkenhuyzen i suradnici u radu [62] dijele utjecajne parametre u četiri kategorije: parametre izvora rendgenskog zračenja, parametre utjecaja rotacijskog stola i predmeta mjerenja, parametre vezane uz utjecaj detektora te utjecajne parametre obrade podataka. Nadalje, Hiller i Reindel [70] dijele utjecajne faktore u pet većih kategorija: utjecaj CT skenera, utjecaj odabrane metode mjerenja, utjecaj predmeta mjerenja, utjecaj okoliša i utjecaj mjeritelja. Istu podjelu utjecajnih parametara zastupaju Weckenmann i Krämer [71]. Slična podjela dostupna je u [61], gdje autori ne izdvajaju posebno utjecaj mjeritelja, već se parametri dijele u četiri kategorije: utjecaj predmeta mjerenja, utjecaj postavki skeniranja, utjecaj okoliša te utjecaj obrade podataka. Autorice u radu [7] dijele utjecajne parametre u četiri kategorije, s obzirom na tijek procesa mjerenja, na utjecajne parametre procesa skeniranja, utjecajne parametre u rekonstrukcijskom procesu, utjecajne parametre procesa odabira granične vrijednosti sive skale te utjecajne parametre odabrane strategije dimenzionalnih mjerenja. Autori u radu [14] spominju važnost mjeritelja te jednu veću grupu parametara svrstavaju u kategoriju utjecajnih parametara odabranih od strane mjeritelja.

Uzevši u obzir korake u postupku provedbe dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom, dane slikom 2-2, u ovom radu predlaže se podjela utjecajnih parametara s obzirom na potproces CT mjerenja u kojem je pojedini parametar prisutan. Predložena podjela svrstava utjecajne parametre u tri kategorije:

1. Utjecajni parametri prisutni u potprocesu CT skeniranja.
2. Utjecajni parametri potprocesa rekonstrukcije 3D modela.
3. Utjecajni parametri analize 3D modela.

Slika 3-10 prikazuje neke od utjecajnih parametara klasificiranih u tri razreda s obzirom na tijek provedbe CT mjerenja.



Slika 3-10. Podjela utjecajnih parametara kod dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom [72].

Kako su dimenzionalna mjerenja industrijskom računalnom tomografijom ograničena mogućnostima CT skenera, kao i softverskim alatima korištenim u rekonstrukciji 3D modela i kasnijoj analizi dobivenog modela, može se zaključiti kako u velikoj mjeri dobiveni rezultati ovise o iskustvu i kompetencijama mjeritelja. Iz slike 3-10 vidljivo je kako je utjecaj mjeritelja prisutan u svakom od potprocesa bilo da se radi o namještanju postavki skeniranja, filtraciji podataka ili odabiru metode mjerenja.

3.2 Procjena mjerne nesigurnosti kod industrijske računalne tomografije

„Mjerna nesigurnost definira se kao parametar na temelju kojeg se određuje pouzdanost mjernog procesa te kao parametar korišten za usporedbu i prihvaćanje korištenog sustava u svojstvu mjernog uređaja.“ [69]. Potpuna mjeriteljska informacija uključuje iznos mjerenja te podatak o mjernoj nesigurnosti rezultata mjerenja čime se, između ostalog, osigurava mjeriteljska sljedivost.

Kako industrijski CT skeneri namijenjeni dimenzionalnim mjerenjima, zajedno s kontaktnim CMM uređajima i optičkim 3D skenerima spadaju u trokoordinatne mjerne uređaje, istraživanja u području procjene mjerne nesigurnosti prvenstveno su bila usmjerena

na implementaciju postojećih normi i procedura trokoordinatnih mjerenja na metodu mjerenja računalnom tomografijom [14].

Općeprihvaćena metoda procjene mjerne nesigurnosti je dana Vodičem za procjenu mjerne nesigurnosti (engl. *Guide to the expression of uncertainty in measurement*) ili skraćeno GUM metoda. Procjena mjerne nesigurnosti sukladno GUM-u podrazumijeva poznavanje svih utjecajnih parametara na proces mjerenja te procjenu pojedine sastavnice svakog od utjecajnih parametara na rezultat mjerenja. Uslijed velikog broja utjecajnih parametara na cjelokupni sustav dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom, procjena nesigurnosti sukladno GUM-u je kompleksna. Alternativa GUM-u u procjeni mjerne nesigurnosti je primjena pojednostavljenog GUM-a, norme ISO 14253-2 tzv. PUMA metode namijenjene procjeni mjerne nesigurnosti kod mjerenja u industrijskim uvjetima.

Jedan od pristupa procjene mjerne nesigurnosti jest primjena simulacija sukladno međunarodnoj normi ISO/TS 15530-4 te smjernicama danim u dokumentu VDI/VDE 2617-7. Obje metode primjenjuju se kod procjena mjernih nesigurnosti kontaktnih trokoordinatnih uređaja. Dodatak Vodiču za procjenu mjerne nesigurnosti - JCGM 101:2008 baziran je na primjeni Monte Carlo simulacija kod procjene sastavnica mjerne nesigurnosti utjecajnih faktora. To je i najčešće primjenjivana metoda simulacija kod procjena mjernih nesigurnosti.

Primjena umjerenih reprezentativnih predmeta jedan je od često korištenih pristupa procjene mjerne nesigurnosti kod kontaktnih trokoordinatnih mjerenja. Metoda se temelji na ISO 15530-3 normi te se pokazala obećavajućim pristupom kod procjene mjerne nesigurnosti mjerenja računalnom tomografijom. Metoda je pogodna kod mjerenja serija proizvoda, ali ne i kod definiranja mjerne nesigurnosti za slučaj mjerenja jednog predmeta mjerenja.

Konačno, dosadašnjim istraživanjima je utvrđeno da se postojeće metode u izvornom obliku ne mogu primijeniti i kod dimenzionalnih mjerenja CT-om te nijedna od usvojenih metoda kod procjene mjerne nesigurnosti rezultata dobivenih trokoordinatnim mjerenjima ne omogućuje procjenu mjerne nesigurnosti u općenitom slučaju kod dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom.

Razlog tome leži i u činjenici kako ne postoji međunarodno usvojena norma koja bi propisivala proces provedbe dimenzionalnih mjerenja metodom računalne tomografije, već se provedba CT dimenzionalnog mjerenja većim dijelom temelji na kompetencijama i iskustvu mjeritelja. Slijedom navedenog područje procjene mjerene nesigurnosti kod industrijske računalne tomografije još uvijek je otvoreno za daljnja istraživanja.

3.2.1 Procjena mjerne nesigurnosti sukladno Vodiču za procjenu mjerne nesigurnosti

Postupak proračunavanja mjerne nesigurnosti GUM metodom sukladno normi JCGM 100:2008 opće je prihvaćen i vrlo zastupljen na području mjeriteljstva. Mjerna nesigurnost sastoji se općenito od više sastavnica. Procedura podrazumijeva procjene svih sastavnica nesigurnosti koje potječu od sustavnih i slučajnih djelovanja. Neke od tih sastavnica mogu se odrediti na temelju statističke razdiobe niza mjerenja i opisati eksperimentalnim standardnim odstupanjima [69]. Druge sastavnice, koje se također mogu opisati standardnim odstupanjima, određuju se iz pretpostavljenih razdioba vjerojatnosti na temelju iskustva ili drugih podataka [69]. Sustavne pogreške potječu od utvrđenih djelovanja utjecajnih veličina na mjerni rezultat koje se mogu količinski izraziti. Procjena mjerne nesigurnosti sukladno GUM metodi zahtjeva provedbu ispravka mjernog rezultata za iznos sustavne pogreške te uključivanje nesigurnosti tog ispravka u procjenu mjerne nesigurnosti.

Kako se u procesu provedbe dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom javlja velik broj utjecajnih faktora, koji se mijenjaju u procesu mjerenja ovisno o zahtjevima mjerenja, predmetu mjerenja, mjernoj strategiji, mjeritelju itd., procjena mjerne nesigurnosti GUM metodom je kompleksna. Nadalje, u slučajevima mjerenja složenih trodimenzionalnih oblika, pri izračunu mjerne nesigurnosti, funkcijski odnosi su vrlo složeni ili nelinearni, a ulazne veličine o kojima ovisi izlazna veličina i same ovise o drugim veličinama što dovodi do kompleksnog funkcijskog odnosa koji se ne može uvijek eksplicitno iskazati. U takvim slučajevima primjena GUM metode može dovesti do neprihvatljivih rezultata te se stoga zahtijevaju druge analitičke ili numeričke metode kao npr. upotreba računalnih simulacija sukladno metodi JCGM 101:2008. Također je važno reći da se proračun mjerne nesigurnosti GUM metodom temelji na centralnom graničnom teoremu čiji uvjeti u praksi ne moraju uvijek biti zadovoljeni. Izlazne veličine kod primjene GUM metode su najbolja procjena mjerene veličine y dane uz proširenu nesigurnost U uz faktor proširenja k i vjerojatnost P . Pri tome se mogu javiti problemi pri određivanju faktora proširenja koji se, uz primjenu centralnog graničnog teorema, direktno veže na normalnu razdiobu vjerojatnosti mjerene veličine [73].

Uz podršku računalnih programa GUM metoda pokriva brojne aspekte mjerne nesigurnosti u svim granama mjeriteljstva.

Osnovne značajke GUM metode su:

- linearizacija matematičkog modela mjerene veličine $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
- ulazne veličine procjenjuju se iz pridruženih funkcija gustoće vjerojatnosti sljedećim parametrima: srednja vrijednosti $\bar{x}_i$ i standardno odstupanje $u(\bar{x}_i)$
- primjena centralnog graničnog teorema
- izlazne veličine: y ; $U = k \cdot u_c(y)$; P .

Procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja industrijskom računalnom tomografijom sukladno GUM metodi i pojednostavljenoj GUM metodi, ISO 14253-2:2011, provedena je u radovima [6, 67, 71, 74]. Weckenmann i Krämer u radovima [6, 71] procjenjuju mjernu nesigurnost rezultata mjerenja GUM-om gdje su ulazne veličine matematičkog modela kako slijedi: orijentacija, broj projekcija, geometrijsko povećanje i metoda određivanja granica materijala. Autori u radovima [67, 74] procjenjuju mjernu nesigurnost pojednostavljenom GUM metodom sukladno izrazu:

$$U_{CT} = k \cdot \sqrt{u_{\text{ref}}^2 + u_p^2 + u_e^2} \quad (3-1)$$

pri čemu su:

U_{CT}	μm	proširena mjerna nesigurnosti rezultata mjerenja industrijskom računalnom tomografijom
k		faktor proširenja ($k = 2$, uz vjerojatnost $P = 95 \%$)
u_{ref}	μm	standardna mjerna nesigurnost referentne metode mjerenja
u_p	μm	standardna mjerna nesigurnost mjerne procedure
u_e	μm	standardna mjerna nesigurnost uslijed utjecaja okoliša.

Sastavnicu mjerne nesigurnosti referentne metode mjerenja autori u [67, 74] procjenjuju dijeljenjem poznate proširene mjerne nesigurnosti referentne metode mjerenja, U_{ref} , s faktorom proširenja, k , prema izrazu:

$$u_{\text{ref}} = \frac{U_{\text{ref}}}{k}, \quad (3-2)$$

sastavnicu mjerne nesigurnosti procedure procjenjuju izrazom (3-3), pri čemu je h faktor sigurnosti, s standardna devijacija rezultata ponovljenih ili obnovljenih mjerenja, a n broj ponovljenih ili obnovljenih mjerenja:

$$u_p = h \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (3-3)$$

dok se sastavnica mjerne nesigurnosti uslijed utjecaja okoliša odnosi na utjecaj promjene temperature.

Autori u [75] i [76] mjernu nesigurnost rezultata računaju uzimajući u obzir sastavnice mjerne nesigurnosti mjerne procedure u_p prema izrazu (3-3), te sastavnicu mjerne nesigurnost uslijed utjecaja okoliša u_e . Međutim, umjesto sastavnice mjerne nesigurnosti referentne metode, autori izračunavaju sastavnicu mjerne nesigurnosti korištenog uređaja, u_{inst} (CT skenera) izrazom (3-4) gdje se *MPE* definira kao granična pogreška uređaja i dana je u specifikacijama proizvođača:

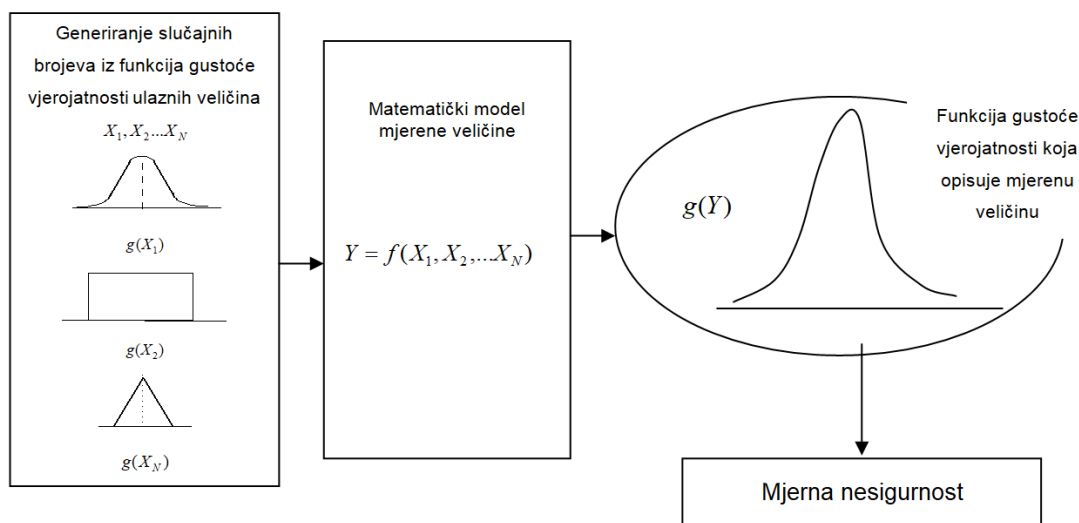
$$u_{\text{inst}} = \frac{MPE}{k} . \quad (3-4)$$

Konačno, proširena mjerna nesigurnost rezultata mjerenja u radovima [75] i [76] definirana je izrazom:

$$U_{\text{CT}} = k \cdot \sqrt{u_{\text{inst}}^2 + u_p^2 + u_e^2} . \quad (3-5)$$

3.2.2 Procjena mjerne nesigurnosti metodom Monte Carlo sukladno normi JCGM 101:2008

Metoda Monte Carlo (engl. *Monte Carlo Simulation – MCS*) u postupku procjenjivanja mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja temelji se na generiranju slučajnih brojeva iz funkcija gustoće vjerojatnosti za svaku ulaznu veličinu i stvaranju odgovarajuće vrijednosti izlazne veličine, kombinirajući različite razdiobe kojima su definirane ulazne veličine [73]. Postupak se ponavlja M puta te se na taj način tvori eksperimentalna funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine. Iz eksperimentalne funkcije gustoće vjerojatnosti slijedi procjena izlazne veličine, procijenjeno standardno odstupanje, te procjena intervala za zadanu vjerojatnost [73]. Ideja o primjeni Monte Carlo simulacije na mjerni sustav prikazana je slikom 3-11.



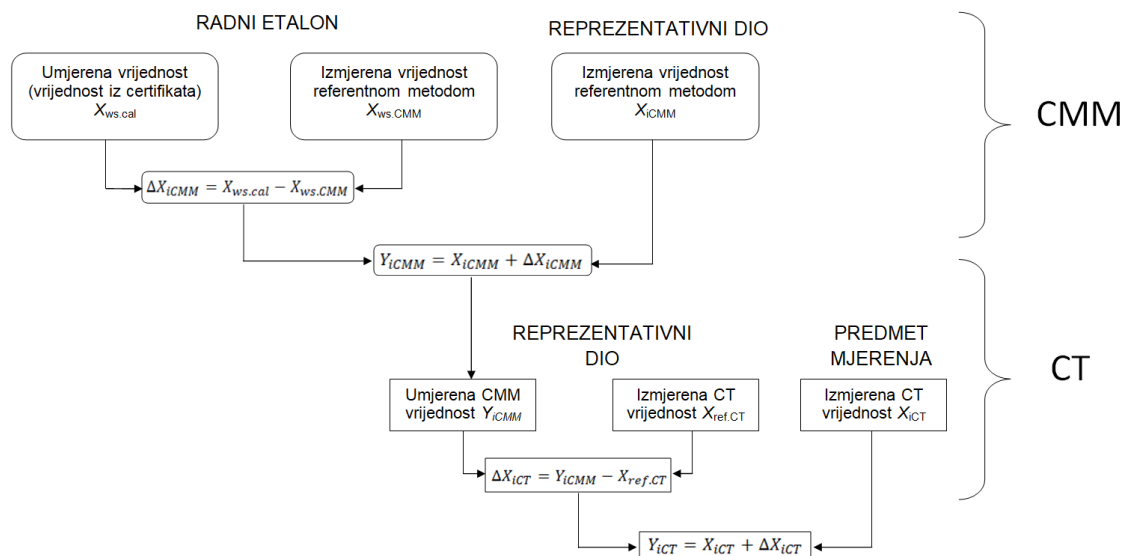
Slika 3-11. Simulacija mjernog sustava metodom Monte Carlo [73].

Osnovne značajke MCS metode mogu se navesti kako slijedi [73]:

- ulazne veličine definirane su različitim funkcijama gustoće vjerojatnosti
- funkcije gustoće vjerojatnosti ulaznih veličina međusobno se kombiniraju i čine eksperimentalnu funkciju gustoće vjerojatnosti mjerene veličine
- uključenost viših redova razvoja funkcije u Taylorov red u proračun
- procjena izlazne veličine Y te interval za određenu vjerojatnost procjenjuju se iz eksperimentalne funkciju gustoće vjerojatnosti izlazne veličine.

3.2.3 Supstitucijska metoda

Dosadašnja istraživanja pokazala su kako empirijski pristup korištenjem umjerenih reprezentativnih predmeta ima veliki potencijal u rješavanju problema kod određivanja sljedivosti CT uređaja te se upravo ovaj pristup, baziran na ISO 15530-3 smatra obećavajućim i izglednim u postupku osiguravanja sljedivosti. Međutim, eksperimentalni pristup utvrđivanja mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja korištenjem umjerenih reprezentativnih predmeta vremenski je dugotrajan te postavlja određene zahtjeve na karakteristike reprezentativnog predmeta s obzirom na predmet mjerenja. Također proces zahtijeva provedbu mjerenja referentnom metodom (u slučaju utvrđivanja mjerne nesigurnosti CT-a, referentne metode su kontaktna trokoordinatna mjerenja), kao i određeni broj ponavljanja procesa mjerenja, što osim samih vremenskih, predstavlja i financijska opterećenja. Tijek provedbe mjerenja s ciljem procjene mjerne nesigurnosti rezultata primjenom prilagođene norme ISO 15530-3 mjerenjima industrijskom računalnom tomografijom dan je slikom 3-12.



Slika 3-12. Postupak provedbe dimenzionalnih mjerenja sukladno ISO 15530-3 [77].

Zahtjevi ISO norme 15530-3 odnose se na korištenje identičnih mjernih strategija kod mjerenja umjerenog reprezentativnog predmeta i predmeta od interesa, provedbu mjerenja u istim ili sličnim okolišnim uvjetima te zahtjeve na karakteristike predmeta od interesa u odnosu na umjereni reprezentativni predmet u vidu zahtjeva za istom ili sličnom [78]:

- geometrijom predmeta
- veličinom, dimenzijama predmeta koje ne smiju iznosom odstupati više od 10 % iznosa dimenzije referentnog predmeta
- skošenjima koja ne smiju iznosom odstupati više od $\pm 5 \%$ iznosa skošenja ili kutova referentnog predmeta
- materijalom predmeta (sličnih koeficijenata toplinske rastezljivosti i tvrdoće...) te
- površinskom hrapavošću.

Pregled literature, gdje se primjenjuje spomenuti pristup procjene mjerne nesigurnosti s istaknutim prednostima i nedostacima metode, dan je u nastavku.

Autori u [9] procjenjuju mjernu nesigurnost rezultata sukladno ISO 15530-3:2009 kod mjerenja dvaju industrijskih predmeta značajno različitih karakteristika, veličina i materijala. Radi se o mjerenju aluminijskog cijevnog priključka te polimernog dijela sklopa slušnog aparata, pri čemu je proces skeniranja proveden korištenjem istog CT skenera, dok se analiza 3D modela provodila korištenjem triju različitih softverskih paketa. Usporedbom dobivenih rezultata mjerenja aluminijskog priključka utvrđena je značajna razlika između dobivenih

rezultata kod primjene različitih softvera. Iz rezultata se može utvrditi značajna razlika između mjerenja dobivenih softverima označenim brojevima 1 ili 2 u radu [9] u odnosu na rezultate analize provedene softverom 3. Veća odstupanja od referentnih vrijednosti zabilježena su kod analize modela softverom 3 kod mjerenja dimenzionalnih, jednako kao i kod mjerenja geometrijskih veličina. Procijenjeni iznosi mjerne nesigurnosti promatranih dimenzionalnih značajki kreću se u rasponu od 5 μm do 65 μm , dok se procijenjeni iznosi mjernih nesigurnosti kod mjerenja geometrijskih značajki nalaze u rasponu od 50 μm do 180 μm [9]. Suprotno navedenom, analiza rezultata mjerenja polimernog predmeta manjih dimenzija nije utvrdila postojanje značajnih razlika između rezultata mjerenja dobivenih korištenjem različitih softvera, a iznosi procijenjenih mjernih nesigurnosti dimenzionalnih značajki kreću se u rasponu od 7 μm do 65 μm [9]. Schmitt i Niggemann u radu [63] također procjenjuju mjernu nesigurnost rezultata sukladno ISO 15530-3:2009 na aluminijskoj kocki složene geometrije. Autori odabiru ukupno dvanaest unutarnjih promjera provrta različitih veličina na različitim pozicijama kocke te promatraju ponašanje rezultata promjenom ulaznih parametara skeniranja. Analiza rezultata ukazuje na postojanje sustavnog pomaka kod pojedinih promjera u apsolutnom iznosu do 35 μm , dok se iznosi procijenjene mjerne nesigurnosti rezultata dimenzionalnih mjerenja kreću u rasponu od 7 μm do 70 μm [63].

Kako se mjerna nesigurnost rezultata mjerenja sukladno ISO 15530-3:2009 procjenjuje izrazom:

$$U_{CT} = k \cdot \sqrt{u_{\text{ref}}^2 + u_p^2 + u_e^2 + b^2} \quad (3-6)$$

pri čemu su:

U_{CT}	μm	proširena mjerna nesigurnosti rezultata mjerenja industrijskom računalnom tomografijom sukladno ISO 15530-3:2009
k		faktor proširenja
u_{ref}	μm	standardna mjerna nesigurnost referentne metode mjerenja
u_p	μm	standardna mjerna nesigurnost mjerne procedure
u_e	μm	standardna mjerna nesigurnost uslijed temperaturne korekcije
b	μm	sustavni pomak,

moгуće je utvrditi da najveći doprinos mjernoj nesigurnosti ima upravo sustavni pomak b .

Rezultat će u slučaju procjene mjerne nesigurnosti prema izrazu (3-6) iznositi:

$$Y_{CT} = \bar{y}_{CT} \pm U_{CT} \quad (3-7)$$

pri čemu su:

Y_{CT} mm potpuni rezultat mjerenja industrijskom računalnom tomografijom

$\bar{y}_{CT}$ mm srednja vrijednost rezultata ponovljenih mjerenja.

S obzirom na to da procedura procjene mjerne nesigurnosti GUM-om zahtijeva korekciju sustavnih pogrešaka te zbog činjenice kako je utjecaj sustavnih pogrešaka kritičan kod provedbe dimenzionalnih mjerenja, nova inačica norme ISO 15530-3 iz 2011. godine preuzima smjernice dane GUM-om te uvodi novi izraz za procjenu mjerne nesigurnosti:

$$U_{CT*} = k \cdot \sqrt{u_{ref}^2 + u_p^2 + u_e^2 + u_b^2} \quad (3-8)$$

gdje je:

U_{CT*} μm proširena mjerna nesigurnosti rezultata mjerenja industrijskom računalnom tomografijom sukladno ISO 15530-3:2011

u_b μm standardna mjerna nesigurnost uslijed korekcije sustavnog pomaka.

Kod procjene mjerne nesigurnosti rezultata prema izrazu (3-8), rezultat mjerenja iznositi će:

$$Y_{CT} = \bar{y}_{CT} - b \pm U_{CT*}. \quad (3-9)$$

Procjenu mjerne nesigurnosti kod provedbe mjerenja supstitucijskom metodom sukladno izrazu (3-8) provode autori u [77] pri čemu se provode i dimenzionalna mjerenja veličina, kao i mjerenja odstupanja od oblika i položaja jedne od sastavnih komponenata inzulinske injekcije. Postupak provedbe mjerenja dan je slikom 3-12. Analiza rezultata pokazala je, da je čak i nakon provedbe korekcije sustavne pogreške skaliranja, sustavni pomak pojedinih promatranih rezultata značajan. Postojanje značajne razlike kod mjerenja unutarnjih dimenzija, u odnosu na mjerenja vanjskih dimenzija, može se pripisati pogrešno odabranim postavkama korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja metodom linearizacije. Kod mjerenja odstupanja od kružnosti unutarnjeg promjera, zabilježena su odstupanja u iznosu od 55 μm . Zabilježena odstupanja posljedica su otvrdnjavanja rendgenskog zračenja te pojave šumova na slici uslijed raspršenog rendgenskog zračenja. Procjenom mjerne nesigurnosti kod provedbe mjerenja supstitucijskom metodom, dobiveni iznosi proširenih mjernih nesigurnosti promatranih veličina nalaze se u rasponu od 1,5 μm do 13,2 μm , što je značajno smanjenje u odnosu na rezultate iz [9] i [63]. Zaključak autora jest kako su procijenjene mjerne nesigurnosti rezultata veće pri većim nazivnim debljinama stijenki prozračivanih predmeta uslijed utjecaja artefakata otvrdnjavanja zračenja i raspršenja zračenja [77].

Velik broj autora smatra postupak procjene mjerne nesigurnosti dan normom ISO 15530-3:2011 obećavajućim pristupom kod procjene mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja dobivenih računalnom tomografijom. Takav pristup zahtjeva procjenu nesigurnosti za svaku dimenzionalnu i geometrijsku značajku specifičnog predmeta.

Procjena mjerne nesigurnosti kod mjerenja supstitucijskom metodom iziskuje veći broj ponovljenih mjerenja što dovodi do dugotrajnih mjerenja. Ovaj problem posebice dolazi do izražaja kod računalne tomografije gdje samo proces skeniranja predmeta može trajati i preko sat vremena. Upravo iz tog razloga neki od autora [9, 63, 67, 77] prilagođavaju metodu smanjujući broj ponovljenih mjerenja te nadoknađuju to korištenjem faktora sigurnosti h temeljenog na Studentovoj t -raspodjeli uz pretpostavku da slučajne pogreške slijede normalnu raspodjelu. U tom slučaju broj ponovljenih mjerenja od zahtijevanih minimalnih 20, mjeritelji često smanjuju na samo tri. Procjena mjerne nesigurnosti kod mjerenja supstitucijskom metodom primjenjiva je kod mjerenja velikih serija, ali nikako i kod mjerenja pojedinačnih primjeraka.

3.3 Međulaboratorijska usporedbena mjerenja

Iskazivanju mjerne nesigurnosti prethodi postavljanje matematičkog modela koji najbolje opisuje mjerenu veličinu te istraživanje svakog pojedinog utjecaja. Opisuje li model dovoljno dobro mjerenu veličinu i jesu li uključeni svi značajni utjecaji u postupku proračuna mjerne nesigurnosti ne može se naprosto saznati ponavljanjem i obnavljanjem mjerenja unutar laboratorija. Jedini način da se provjere i potvrde iskazane mjerne nesigurnosti, kao i potvrdi učinkovitost i usporedivost mjernih metoda moguć je kroz usporedbena mjerenja s drugim laboratorijima. Do danas su provedene tri interkomparacije: CT Audit, CIA-CT te InteraqCT. Sadržaji i zaključci provedenih interkomparacija dani su u nastavku.

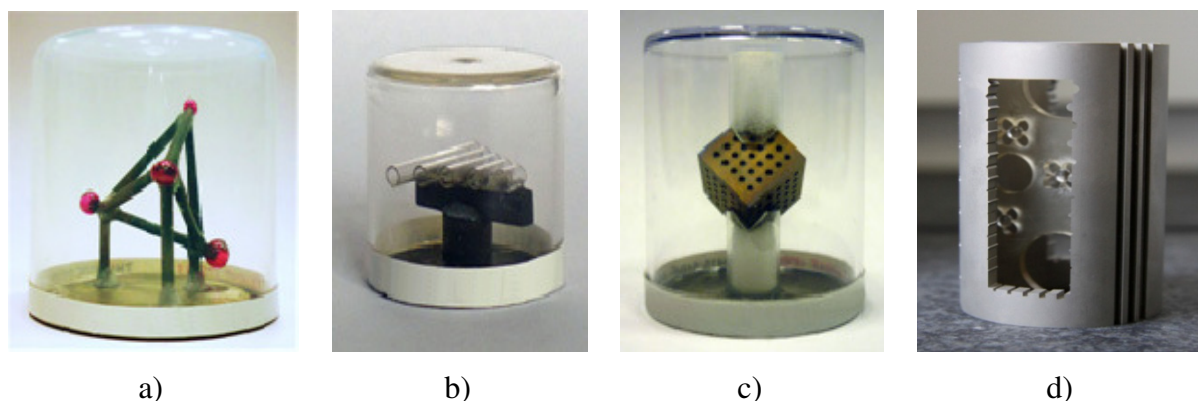
3.3.1 CT Audit

U području osiguravanja mjeriteljske sljedivosti kod primjene računalne tomografije velik doprinos dan je od strane organizatora prvog međulaboratorijskog usporedbenog mjerenja, Laboratorija za industrijsko i geometrijsko mjeriteljstvo (*Laboratory of Industrial and Geometrical Metrology*), Sveučilišta u Padovi. Ova interkomparacija provedena je u razdoblju od rujna 2009. do lipnja 2011. godine te je uključivala ukupno 15 sudionika iz područja znanstvenog i industrijskog mjeriteljstva iz osam zemalja diljem svijeta [80]. Provedba CT audita uključivala je mjerenja dimenzionalnih i geometrijskih karakteristika na

četiri značajno različita referentna predmeta prema točno propisanim procedurama s ciljevima [81]:

- procjene mjerne nesigurnosti dobivenih rezultata
- utvrđivanja sustavnih pogrešaka te
- produbljivanja i širenja znanja vezanih uz dimenzionalna mjerenja računalnom tomografijom.

Predmeti mjereni u sklopu provedbe CT audita dani su slikom 3-13, a detalji o izvedbi i karakteristikama prikazanih predmeta dostupni su u [54].



Slika 3-13. Referentni predmeti korišteni u interkomparaciji CT audit: a) *CT Tetrahedron*, b) *Pan Flute Gauge*, c) *PTB Calotte Cube*, d) *QFM cilindar* [54].

Svaki od referentnih predmeta izmjeren je kontaktnom trokoordinatnom metodom prije i nakon cirkulacije predmeta čime se provjerila i potvrdila dimenzijska stabilnost predmeta te su dobiveni rezultati referentnih mjerenja kasnije korišteni u usporedbi rezultata dobivenih računalnom tomografijom.

Konačno, provedbom CT audita formirani su sljedeći zaključci u području dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom [54]:

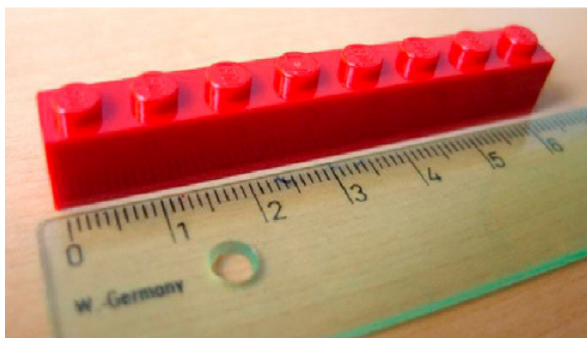
- Mjerenja predmeta složenih geometrija izrađenih iz više vrsta materijala predstavljaju velik problem kod većine sudionika CT audit interkomparacije.
- Analizom izračunatih faktora slaganja *En* utvrđeno je kako su mjerenja tolerancija oblika i položaja zahtjevnija i složenija od mjerenja dimenzijskih veličina (duljine, promjera, ...).
- Sudionici CT audit interkomparacije imali su poteškoće kod procjene mjerne nesigurnosti. Sudionici su kod procjene mjerne nesigurnosti koristili različite pristupe i metode koji su uključivali procjenu mjerne nesigurnosti GUM

metodom, procjenu sukladno ISO 15530-3, procjenu temeljem specifikacija proizvođača o graničnoj pogrešci uređaja (*MPE*), procjenu mjerne nesigurnosti na temelju prethodnih iskustava te korištenjem drugih metoda.

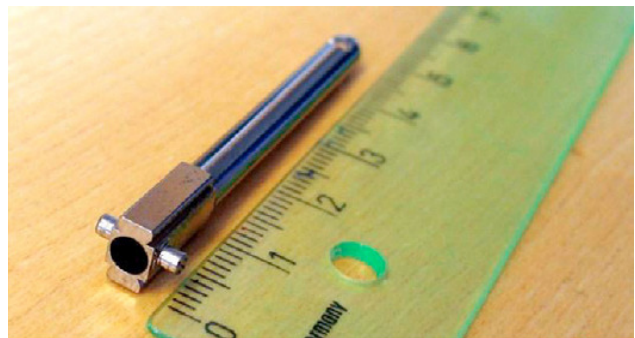
- Rezultati mjerenja pokazuju značajan utjecaj sustavnih pogrešaka uslijed određivanja granične vrijednosti sive skale te uslijed provedbe korekcije veličine voksel.
- Provedba CT audita rezultirala je uspostavljanjem međunarodne mreže korisnika računalne tomografije u području dimenzionalnih mjerenja.

3.3.2 CIA - CT

Druga provedena interkomparacija u području dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom, provedena je unutar projekta *CIA-CT – Centre for Industrial Application of CT Scanning* pod vodstvom Centra za geometrijska mjerenja, Tehničkog sveučilišta u Danskoj (DTU) [53]. U međulaboratorijskim usporedbenim mjerenjima sudjelovalo je 27 laboratorija iz osam zemalja u razdoblju od svibnja 2012. do listopada 2013. godine. Jedan od ciljeva projekta uključivao je prikupljanje informacija o postupcima provedbe industrijskih CT mjerenja te su iz tog razloga u interkomparaciji korišteni industrijski predmeti, za koje se smatra da su manjih dimenzijskih stabilnosti uslijed korištene kvalitete materijala te industrijskog okoliša. Takvi uvjeti dovode do poteškoća kod procjene mjerne nesigurnosti, kao i do povećanja iznosa mjerne nesigurnosti rezultata te je primarni zadatak ove interkomparacije uključivao procjenu mjerne nesigurnosti izmjerenih rezultata. Jednako kao i kod CT audita, i ovdje su provedena mjerenja dimenzionalnih i geometrijskih karakteristika. Za provedbu interkomparacije odabrana su dva uzorka iz industrije; polimerna LEGO kocka te metalna komponenta inzulinske olovke [82]. Slika 3-14 prikazuje predmete korištene u interkomparaciji.



a)



b)

Slika 3-14. Referentni predmeti korišteni u interkomparaciji CIA-CT: a) LEGO kocka, b) komponenta inzulinske olovke [82].

Konačni rezultati usporedbenih mjerenja pokazali su poteškoće kod procjene mjerne nesigurnosti. Od ukupno 27 sudionika, njih devet ni na koji način nije pokušalo procijeniti mjernu nesigurnost, dok su ostali sudionici koristili različite metode i pristupe. Najzastupljeniji pristup u procjeni mjerne nesigurnosti bazirao se na primjeni postojećih normi: norme ISO 14253-2, GUM, ISO 23165 te ISO 15530-3. Iznosi mjernih nesigurnosti, ovisno o predmetu mjerenja i mjerenoj veličini kretali su se u rasponu od 6 μm do 51 μm . Najvažniji zaključci CIA-CT interkomparacije su [53]:

- Veća odstupanja od referentnih vrijednosti utvrđena su kod mjerenja geometrijskih karakteristika, u odnosu na dimenzionalne karakteristike, zbog utjecaja raspršenja rendgenskog zračenja i prisutnosti statističkih šumova u podacima.
- Problem procjene mjerne nesigurnosti i dalje je otvoren; mjeriteljska sljedivost kod industrijske računalne tomografije nije osigurana.

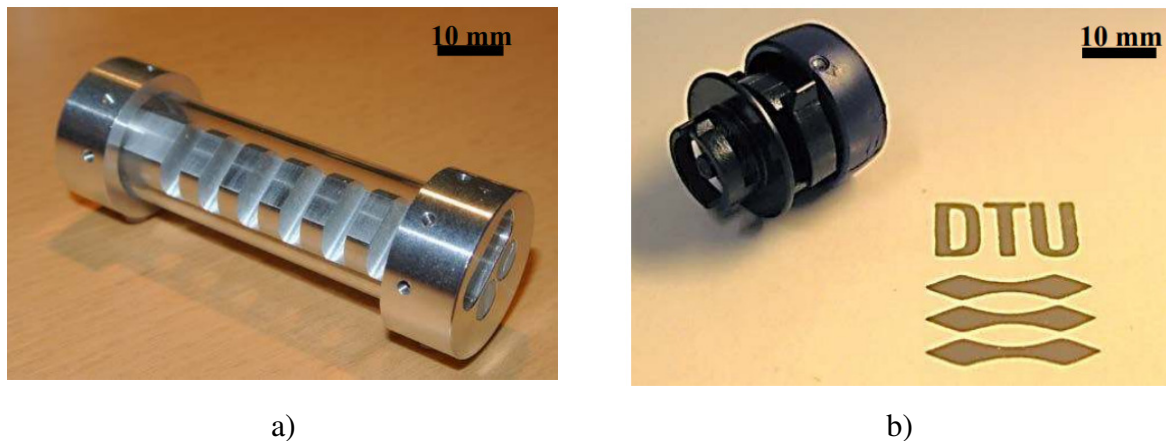
Iako nijedna metoda nije rezultirala univerzalnim matematičkim modelom procjene mjerne nesigurnosti kod primjene računalne tomografije, CIA-CT interkomparacijom pokazana je i dokazana stabilnost industrijskih uzoraka što omogućava njihovo korištenje kod pouzdane procjene mjerne nesigurnosti [82].

3.3.3 InteraqCT

U organizaciji Centra za geometrijska mjerenja, Tehničkog sveučilišta u Danskoj (DTU) provedena je još jedna interkomparacija naziva InteraqCT [83]. U interkomparaciji su sudjelovala 22 laboratorija iz šest zemalja [84]. S obzirom na prepoznate poteškoće primjene industrijske računalne tomografije kod analize sklopova te poteškoće kod analiza predmeta različitih materijala, nit vodilja InteraqCT interkomparacije jest fokus na istraživanja u području dimenzionalnih mjerenja pojedinačnih dijelova u sklopovima. Interkomparacija je provedena u razdoblju od svibnja 2015. do rujna 2016., pri čemu su analizirana dva predmeta prikazana slikom 3-15. Sklop 1 izrađen je u 22 primjerka te je istovremeno svakom sudioniku interkomparacije poslan po jedan uzorak sklopa 1. Referentna mjerenja svakog od uzoraka sklopa 1 provedena su prije i nakon provedbe interkomparacije kontaktnim trokoordinatnim mjernim uređajem Zeiss UPMC 850. Referentna mjerenja provedena su na Tehničkom sveučilištu u Danskoj. Sklop 2 je poslan svim sudionicima interkomparacije u obliku seta podataka dobivenih CT skeniranjem. CT skeniranje sklopa 2 provedeno je u organizaciji

Centra za geometrijska mjerenja na Tehničkom sveučilištu u Danskoj. Referentna mjerenja sklopa 2 također su provedena prije i nakon provedbe interkomparacije.

InteraqCT interkomparacija je prva interkomparacija kod koje su međulaboratorijska usporedbena mjerenja provedena na prethodno skeniranom setu podataka. Ovakvim pristupom eliminiran je utjecaj skeniranja predmeta te su dobiveni rezultati mjerenja sklopa 2 posljedica potprocesa CT mjerenja koji slijedi procesu skeniranja.



Slika 3-15. Industrijski predmeti korišteni u interkomparaciji InteraqCT:

a) Sklop 1, b) Sklop 2 [84].

Postavljeni ciljevi interkomparacije su [84]:

- Ispitati primjenjivost računalne tomografije za mjerenja i analize sklopova s naglaskom na primjenu računalne tomografije u industriji.
- Procijeniti utjecaj mjeritelja u cjelokupnom procesu provedbe mjerenja.
- Procijeniti utjecaj provedbe rekonstrukcije i kasnije analize 3D modela na točnost rezultata mjerenja.
- Prikupiti i proširiti znanja vezana uz osiguravanje mjeriteljske sljedivosti kod primjene industrijske računalne tomografije.
- Poduprijeti daljnji razvoj i implementaciju metode u šira industrijska područja.

Zahtjevi međulaboratorijskih usporedbenih mjerenja rezultata mjerenja sklopa 1 uključivala su dva pristupa kod provedbe mjerenja; vlastiti, proizvoljan pristup skeniranja te skeniranje sklopa 1 prema unaprijed specificiranim uvjetima organizatora interkomparacije. Dobiveni rezultati ukazuju na veća odstupanja rezultata mjerenja od referentnih vrijednosti kod primjene proizvoljnog pristupa skeniranja [84].

Nadalje, veća odstupanja rezultata mjerenja zabilježena su kod mjerenja geometrijskih značajki kružnosti i koncentričnosti sklopa 1 u odnosu na mjerenja dimenzionalnih značajki duljina te unutarnjeg i vanjskog promjera. Usporedbom rezultata ostvarenih jednosmjernim i dvosmjernim mjerenjima utvrđena su manja odstupanja rezultata značajki kod jednosmjernih mjerenja. Kod provedbe dvosmjernih mjerenja definiranih na predmetu izrađenom od jedne vrste materijala utvrđena su manja odstupanja nego kod provedbe dvosmjerne značajke mjerenja definirane između dva različita materijala. Dobiveni rezultati ukazuju na prisutne poteškoće mjerenja predmeta izrađenih od više različitih vrsta materijala [84].

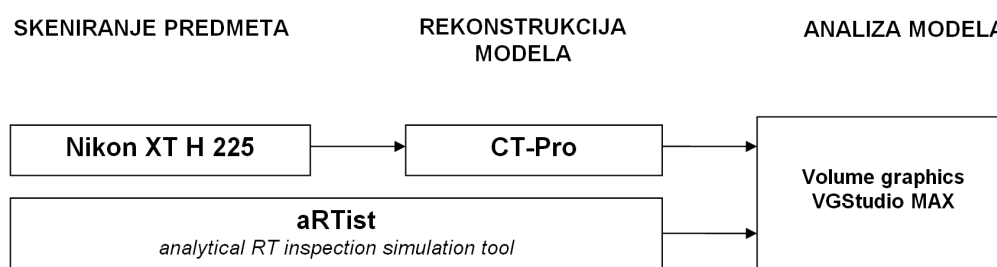
Provedbom dimenzionalnih mjerenja na predmetu složenije geometrije, sklopu 2, utvrđene su poteškoće mjerenja predmeta u odnosu na mjerenja predmeta jednostavnije geometrije [84].

4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Istraživanja utjecaja različitih parametara na proces skeniranja provedena su:

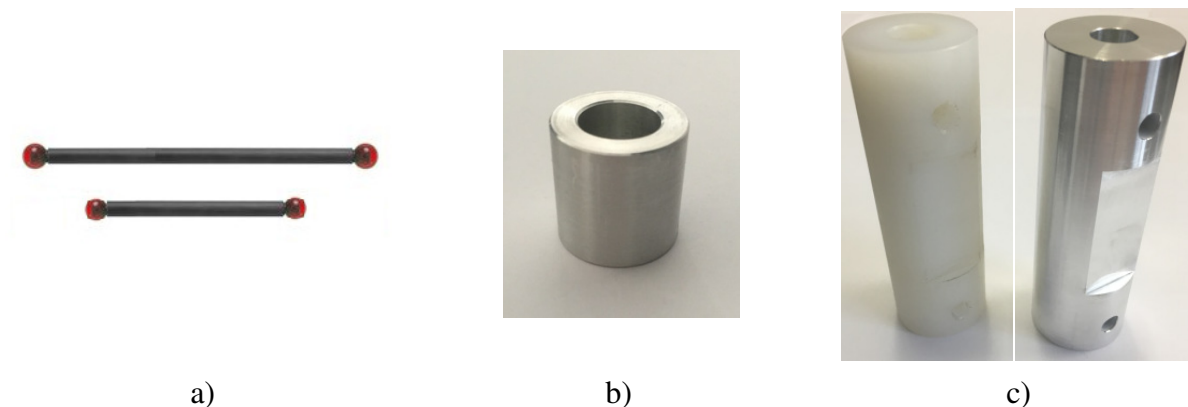
- a) eksperimentalno
- b) numeričkim simulacijama procesa skeniranja.

Tijek procesa dimenzionalnih mjerenja u slučaju provedbe eksperimentalnog skeniranja, i u slučaju simulacija procesa skeniranja dan je slikom 4-1. U slučaju provedbe eksperimentalnog CT skeniranja, korišten je CT skener proizvođača Nikon, oznake XT H 225, a proces rekonstrukcije proveden je korištenjem softvera CT-Pro. Kod provedbe numeričkih simulacija procesa skeniranja korišten je softver *aRTist*. U slučaju provedbe simulacija procesa skeniranja, rekonstrukcija 3D modela također je provedena korištenjem softvera *aRTist* (slika 4-1.). Konačno, dimenzionalna analiza u svim slučajevima provodila se korištenjem softverskog paketa VGStudio MAX.



Slika 4-1. Grafički prikaz provedbe procesa dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom.

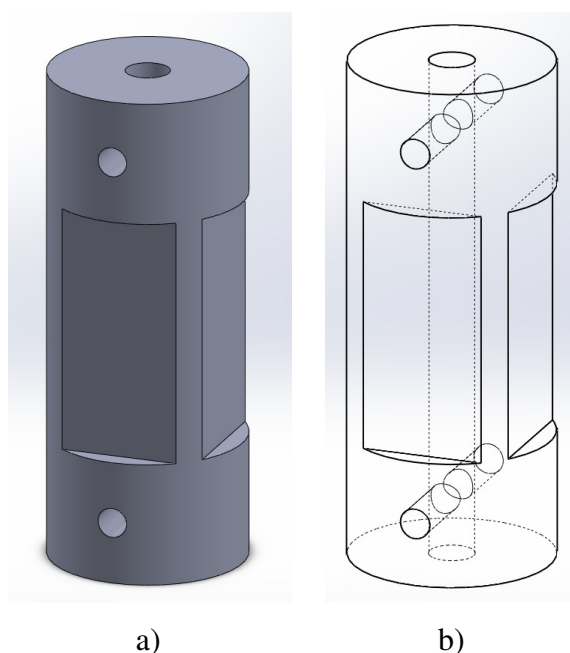
Tijekom istraživanja ispitivani su utjecaji različitih procesa na više predmeta od interesa. Ispitivani predmeti dani su slikom 4-2, a u nastavku teksta dano je objašnjenje vezano uz korištenje cilindara složene geometrije.



Slika 4-2. Predmeti korišteni u eksperimentalnim istraživanjima: a) umjerni štapići, b) cilindar jednostavne geometrije, c) cilindri složene geometrije.

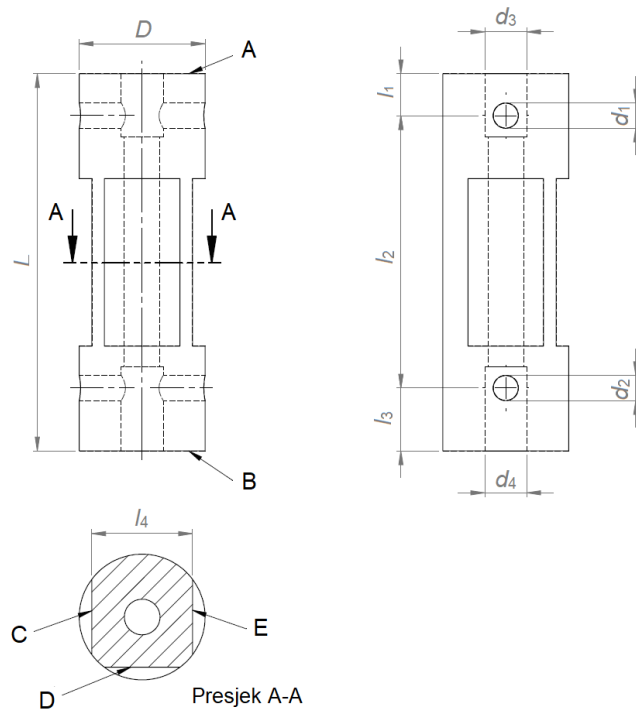
Cilindar složene geometrije

Pregledom literature te utvrđivanjem problematike osiguravanja sljedivosti računalne tomografije predložen je predmet cilindričnog oblika, složene geometrije koji će se koristiti u većem dijelu eksperimentalnih istraživanja utjecajnih parametara. S obzirom na značajan utjecaj materijala u procesu provedbe CT skeniranja, za izradu cilindara odabrana su dva materijala često korištena u industrijskoj proizvodnji: aluminij gustoće $2,7 \text{ g/cm}^3$ te poliamid PA 6 gustoće $1,13 \text{ g/cm}^3$. Slika 4-3 prikazuje CAD model cilindra složene geometrije.



Slika 4-3. CAD model cilindra složene geometrije: a) vanjski izgled, b) presjek.

Odabirom predložene geometrije omogućena su mjerenja različitih veličina, mjerenja dimenzija kao i definiranje odstupanja od oblika i položaja. S obzirom na to da se mjerne veličine definiraju različitim odnosima između oblika jednostavne geometrije (ploha, cilindara, sfera itd.) dodijeljenih 3D modelu, odabrana izvedba cilindra složene geometrije omogućava praćenje većeg broja različitih mjernih veličina. Mjerene veličine su promjer vanjskog cilindra, promjeri četiri provrta (unutarnjih cilindara), udaljenosti između različitih ploha te udaljenosti između ploha i provrta. Mjerene su i geometrijske značajke ravnosti i paralelnosti ploha te cilindričnosti i koaksijalnosti cilindara. Na slici 4-4 označene su veličine od interesa mjerene i praćene u ovom radu.



Slika 4-4. Crtež cilindra složene geometrije.

Predmeti su izrađeni metodom odvajanja čestica na 5-osnom obradnom centru, u jednom stezanju, a mjerenja referentnom metodom su provedena u laboratorijskim uvjetima na trokoordinatnom mjernom uređaju Tesa Micro Hite 3D. Rezultati referentnih mjerenja dani su u tablicama 4-1 i 4-2.

Tablica 4-1. Referentne vrijednosti promatranih veličina aluminijskog cilindra složene geometrije.

Veličina	Referentna vrijednost	Veličina	Referentna vrijednost	Veličina	Referentna vrijednost
D	30,016	$\square A$	0,004	$// AB$	0,013
d_1	6,006	$\square B$	0,004	$// CE$	0,007
d_2	6,008	$\square C$	0,001	$\neq D$	0,018
d_3	9,994	$\square D$	0,002	$\neq d_1$	0,032
d_4	9,990	$\square E$	0,002	$\neq d_2$	0,014
L	90,066	$\perp AD$	0,004	$\neq d_3$	0,015
l_1	10,019	$\perp BD$	0,016	$\neq d_4$	0,018
l_2	64,972	$\perp CD$	0,003	$\odot D-d_3$	0,009
l_3	15,013	$\perp ED$	0,002	$\odot D-d_4$	0,033
l_4	23,932				

Tablica 4-2. Referentne vrijednosti promatranih veličina aluminijskog cilindra složene geometrije.

Veličina	Referentna vrijednost	Veličina	Referentna vrijednost	Veličina	Referentna vrijednost
D	29,986	$\square A$	0,019	$// AB$	0,031
d_1	6,010	$\square B$	0,021	$// CE$	0,019
d_2	6,030	$\square C$	0,007	$\neq D$	0,029
d_3	10,063	$\square D$	0,004	$\neq d_1$	0,033
d_4	10,049	$\square E$	0,006	$\neq d_2$	0,020
L	89,992	$\perp AD$	0,021	$\neq d_3$	0,016
l_1	9,982	$\perp BD$	0,023	$\neq d_4$	0,014
l_2	65,030	$\perp CD$	0,010	$\odot D-d_3$	0,032
l_3	15,044	$\perp ED$	0,010	$\odot D-d_4$	0,022
l_4	24,005				

4.1 Preliminarna istraživanja

U radu je proveden djelomični plan pokusa u kojem je istražen utjecaj sedam parametara na rezultate mjerenja računalnom tomografijom. Istraživanja su provedena na polimernom cilindru složene geometrije. Djelomični plan pokusa koristi se kod verifikacijskih analiza u ranoj fazi pokusa, kada se u obzir uzima veliki broj ulaznih parametara na izlaznu varijablu te se odvajaju oni parametri koji nemaju značajan utjecaj na konačan rezultat pokusa.

S obzirom na podjelu ulaznih parametara prema koracima provedbe dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom, o čemu je više bilo riječi u poglavlju 3.1.5 *Utjecajni parametri kod industrijske računalne tomografije*, preliminarna istraživanja uključivala su odabir parametara iz potprocesa skeniranja, rekonstrukcije i analize modela. Odabrani su parametri geometrijskog povećanja, jakosti struje, napona, broja projekcija, metoda definiranja granične vrijednosti sive skale, filtera korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja te formata spremanja podataka izraženog parametrom raspona vrijednosti skale sivih tonova. S obzirom na to da se radi o preliminarnom istraživanju ulaznih parametara na rezultate mjerenja metodom računalne tomografije, faktori su varirani na dvije odabrane razine, označene kao *Razina –* i *Razina +*. Parametri skeniranja i postavljanja predmeta odabrani su sukladno mjeriteljskom iskustvu i praksi. Odabranim iznosima geometrijskog povećanja omogućena je projekcija cijelog predmeta na detektoru jednim skeniranjem, dok je odabranim postavkama izvora rendgenske cijevi omogućeno prozračivanje predmeta. Odabir broja projekcija definiran je prema navodima iz literature o čemu se više govori u poglavlju 4.4 *Utjecaj hrapavosti predmeta*. Definirani parametri i njihovi iznosi prikazani su u tablici 4-3.

Tablica 4-3. Odabrani parametri kod polovičnog djelomičnog plana pokusa.

Oznaka parametra	Opis parametra	Vrsta parametra	Razina -	Razina +
<i>A</i>	geometrijsko povećanje	Numerički	2,19	2,81
<i>B</i>	jakost struje	Numerički	45 μ A	50 μ A
<i>C</i>	napon	Numerički	90 kV	100 kV
<i>D</i>	broj projekcija	Numerički	500	1000
<i>E</i>	metoda definiranja granične vrijednosti sive skale	Kategorički	globalna	lokalna
<i>F</i>	korekcija artefakata otvrdnjavanja zračenja	Kategorički	Filter 1	Filter 2
<i>G</i>	odabir formata podataka	Kategorički	8 bit	16 bit

Za odabranih sedam faktora broj eksperimenata kod provedbe faktorskog plana pokusa na dvije razine iznosio bi 128. Međutim, kako je riječ o dugotrajnom i skupom procesu mjerenja, pri čemu skeniranje može trajati i do nekoliko sati, a povezano s time, i ovisno o količini podataka koji se obrađuju, proces generiranja modela također se vremenski odužuje. Iz navedenih razloga odabran je djelomični faktorski plan pokusa, rezolucije IV; 2_{IV}^{7-3} iz čega proizlazi šesnaest stanja pokusa [86]. Rezolucija IV označava djelomični plan pokusa u kojem nijedan glavni čimbenik nije zamijenjen nijednim glavnim čimbenikom niti dvofaktorskom interakcijom dvaju glavnih čimbenika, dok dvofaktorski čimbenici mogu biti zamijenjeni drugim dvofaktorskim čimbenicima [86]. Tablicom 4-4 prikazan je plan pokusa.

Tablica 4-4. Stanje pokusa za odabrani djelomični plan pokusa.

		Stanje pokusa															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Utjecajni faktori	<i>A</i>	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
	<i>B</i>	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
	<i>C</i>	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+
	<i>D</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>E</i>	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+
	<i>F</i>	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+
	<i>G</i>	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+

Utjecajni parametri promatrani su na tri odabrane izlazne veličine, vanjskom promjeru cilindra *D*, duljini cilindra *L* i ravnosti plohe D (slika 4-4). Dobivenim rezultatima utvrđen je značajan utjecaj broja projekcija, geometrijskog povećanja, odabranog filtera korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja te odabrane metode definiranja granične vrijednosti sive skale. Izdvojeni utjecajni parametri dalje se istražuju drugim metodama.

4.2 Utjecaj broja projekcija na rezultate mjerenja

Broj projekcija, 2D zapisa, kasnije korištenih za generiranje 3D volumena predmeta mjerenja jest parametar vezan uz zakret rotacijskog stola na kojem se nalazi predmet ispitivanja. Odabir broja projekcija jest parametar koji se definira za potrebe procesa skeniranja predmeta, a predstavlja broj zakreta rotacijskog stola, odnosno predmeta mjerenja unutar jednog rotacijskog ciklusa od 360° te se može izraziti formulom:

$$n = \frac{360^\circ}{\phi_{\text{rot.}}} . \quad (4-1)$$

Pri čemu su:

n - broj projekcija

$\phi_{\text{rot.}}$ $^\circ$ kut zakreta rotacijskog stola.

Rezultati mjerenja uvelike ovise o kvaliteti 3D modela, pri čemu se bolja kvaliteta modela, između ostalog, može postići i većom količinom informacija, tj. većim brojem 2D zapisa korištenih za rekonstrukciju 3D modela.

Iz aspekta proizvođača mjernih uređaja i pripadajućih softvera za rekonstrukciju modela, postavljeni zahtjevi na odabir broja projekcija bazirani su na zahtjevima za što boljom kvalitetom modela pri čemu je prvi postavljeni zahtjev odabir dovoljnog broja projekcija kako bi se uopće mogla provesti rekonstrukcija modela, dok se drugi zahtjev odnosi na osiguravanje kvalitete modela pri čemu se povećanjem broja projekcija povećava i omjer signal-šum [29]. Stoga se minimalan broj projekcija definira kao stanje u kojem je osiguran prolazak jedne zrake kroz jedan voksela te je kod primjene konusnog snopa zračenja preporučan broj projekcija dan izrazom [29]:

$$n_{\text{min}} = \frac{2 r \pi}{v_0} . \quad (4-2)$$

Pri čemu su:

n_{min} - minimalan broj projekcija

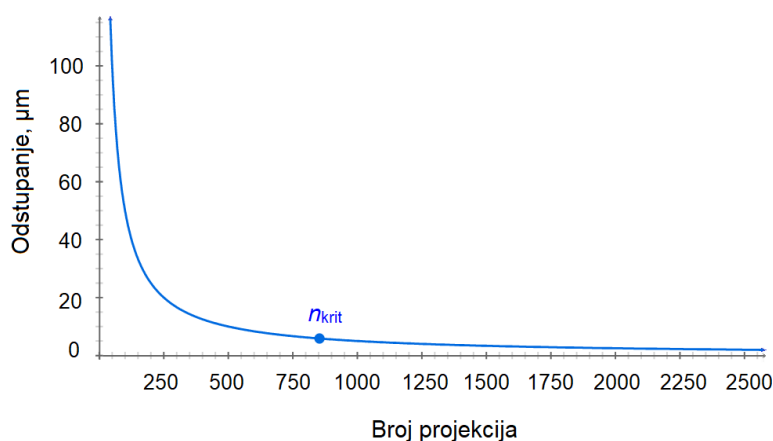
r mm maksimalna udaljenost predmeta od osi rotacije

v_0 mm veličina voksela.

Pregledom literature utvrđena je važnost broja projekcija te je istaknuta potreba za pronalaskom najmanjeg broja projekcija kojim se postiže zadovoljavajuća kvaliteta modela i rezultata mjerenja. Autori u [87] izdvajaju sedam ključnih parametara skeniranja koji utječu na kvalitetu rezultata pri čemu je jedan od parametara upravo broj projekcija. Važnost broja

projekcija naglašena je i u [62] gdje je parametar definiran brojem koraka zakreta rotacijskog stola i pripisuje se utjecajima rotacijskog stola.

Nadalje, važnost broja projekcija na kvalitetu slike naglašavaju autori u [5] gdje se parametar broja projekcija razmatra kao parametar koji utječe na iznos prostorne rezolucije. Međutim, povećanje broja projekcija ujedno znači i produljenje vremena mjerenja; pri čemu osim produljenja vremena potrebnog za skeniranje predmeta, dolazi i do povećanja obujma podataka čime se direktno produljuje vrijeme potrebno za generiranje i analizu 3D modela. Iste probleme navode i autori u [13, 38, 88, 89]. Stoga se nameće pitanje koji je to minimalan broj projekcija kojim se postiže zadovoljavajuća kvaliteta rezultata te koliki je utjecaj broja projekcija na rezultate dimenzionalnih mjerenja. U ovom radu pretpostavljena je eksponencijalna funkcija dana slikom 4-5 gdje se očekuje stabilizacija odstupanja rezultata od referentnih vrijednosti kod kritičnog broja projekcija n_{krit} .



Slika 4-5. Odstupanje rezultata mjerenja u ovisnosti o broju projekcija prema teorijski pretpostavljenoj funkciji.

U cilju smanjenja vremena skeniranja i kasnije obrade podataka, kao i smanjenja obujma podataka te utrošenih resursa skeniranja, poželjno je definirati minimalan broj projekcija kojim se postiže stanje u kojem se odstupanja rezultata više ne mogu pripisati utjecaju broja projekcija.

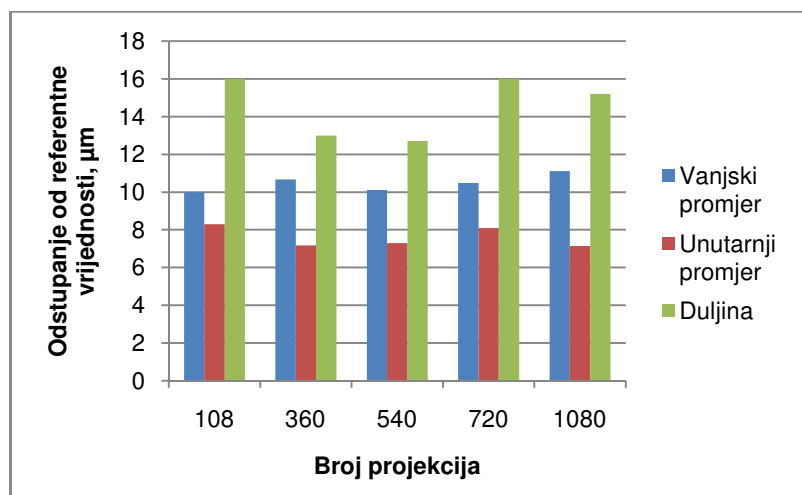
Istraživanja provedena u [6] navode kako povećanje broja projekcija iznad broja 800 dovodi do smanjenja odstupanja rezultata, na konkretnom primjeru mjerenja referentnog štapića, za manje od 5 % te stoga autori smatraju da se zadovoljavajući broj projekcija nalazi negdje u rasponu od 400 do 800 projekcija po jednom zakretu predmeta za puni krug. Međutim, u praksi se odabrani broj projekcija kreće u rasponu od 700 do 3010 projekcija.

Najčešći odabrani broj projekcija korišten u svrhe kako istraživanja, tako i industrijskih dimenzionalnih mjerenja iznosi 720 [63, 74, 90, 91], čime se osigurava zakret predmeta za svakih $0,5^\circ$. Nadalje, često birani broj projekcija iznosi 900 [38, 87], dok pojedini autori mjerenja provode na modelima generiranim iz 1440 [90], 1550 [92] ili 3010 [61] projekcija.

U cilju ispitivanja i određivanja minimalnog broja projekcija na konkretnim slučajevima mjerenja predmeta različitih složenosti oblika provedena su eksperimentalna istraživanja. Utjecaj odabranog broja projekcija na rezultate dimenzionalnih i geometrijskih mjerenja ispitan je na dva predmeta: predmetu jednostavne geometrije, aluminijskom cilindru, te na predmetu složene geometrije, polimernom cilindru opisanom u poglavlju 4. *Eksperimentalna istraživanja*. U slučaju mjerenja konkretnih predmeta, cilindra jednostavne geometrije i cilindra složene geometrije, uz postavljeni uvjet odabira onog geometrijskog povećanja kod kojeg je projekcija cijelog predmeta vidljiva na detektoru, preporučeni broj projekcija prema izrazu (4-2) u prvom slučaju iznosio bi 4187, a u drugom 4300. S obzirom na to da veći broj kutova skeniranja tj. upada rendgenskih zraka na predmet mjerenja poboljšava točnost rekonstrukcije, ali povećava vrijeme procesa skeniranja i obrade podataka te obujmom zauzima velik kapacitet memorije, provedena su istraživanja s ciljem utvrđivanja minimalnog broja projekcija.

4.2.1 Utjecaj broja projekcija kod aluminijskog cilindra jednostavne geometrije

Prvi dio eksperimentalnih istraživanja utjecaja parametra odabranog broja projekcija, kasnije korištenih za rekonstrukciju 3D modela, na rezultate mjerenja proveden je za slučaj mjerenja predmeta jednostavne geometrije. Istraživanja su najprije provedena za 1080 i 720 projekcija, pri čemu je uočeno slaganje rezultata, te su naknadno provedena skeniranja predmeta pri čemu je promijenjen jedino parametar broja projekcija, dok su ostale postavke skeniranja zadržane. Skeniranje je provedeno kod geometrijskog povećanja 7,05 i kod snage izvora rendgenskog zračenja 4,8 W. Rezultati prikazani slikom 4-6 prikazuju odstupanja aritmetičkih sredina pet ponovljenih mjerenja izmjerenih vrijednosti u odnosu na referentne vrijednosti izmjerene kontaktnim trokoordinatnim uređajem.



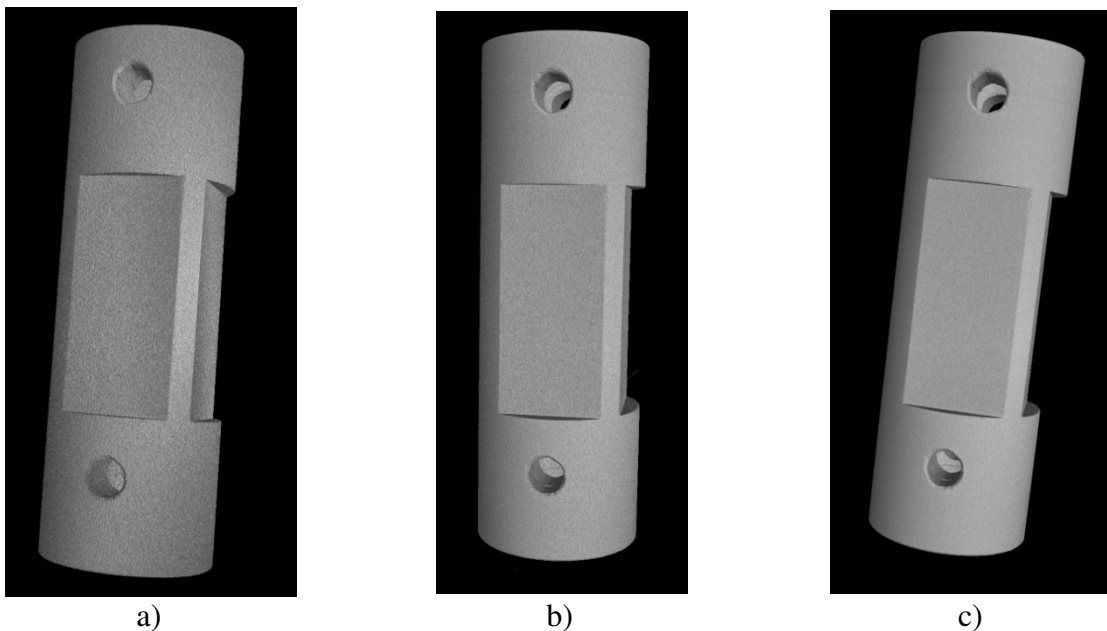
Slika 4-6. Odstupanje rezultata mjerenja dimenzionalnih značajki cilindra jednostavne geometrije s povećanjem broja projekcija.

Za svaku promatranu značajku provedena je analiza varijance. U svim slučajevima utvrđeno je da ne postoji statistički značajna razlika između odstupanja rezultata mjerenja od referentne vrijednosti s obzirom na broj projekcija.

4.2.2 Utjecaj broja projekcija kod polimernog cilindra složene geometrije

U cilju ispitivanja utjecaja broja projekcija na mjerenja dimenzionalnih i geometrijskih značajki predmeta mjerenja u radu je ispitano odstupanje rezultata mjerenja na modelima rekonstruiranim od redom 400, 600, 800, 1000, 2000 i 3000 projekcija. U procesu skeniranja predmeta definirane su jednake postavke snage izvora zračenja u svim slučajevima pri čemu je odabran napon iznosa 100 kV. Predmet je u procesu skeniranja bio pozicioniran na lakoprozračivom postolju od polistirena u blago nagnutoj orijentaciji. Odabrana udaljenost predmeta od izvora zračenja iznosila je 380 mm.

Slika 4-7 prikazuje dobivene modele za rekonstruiranih redom 400, 1000 i 3000 projekcija gdje je vidljiva promjena u površinskoj strukturi modela nastala kao posljedica odabranog broja projekcija. Bolja kvaliteta modela s manje šumova vidljiva je kod modela nastalih odabirom većeg broja projekcija.



a) b) c)

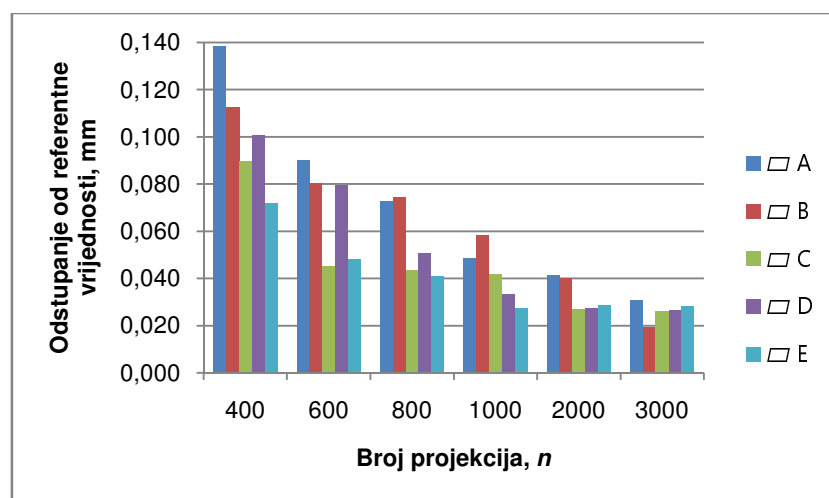
Slika 4-7. Rekonstruirani modeli za različit broj 2D projekcija:

a) $n = 400$, b) $n = 1000$, c) $n = 3000$.

a) Utjecaj broja projekcija na mjerenje geometrijskih značajki

Promatran je utjecaj broja projekcija korištenih za generiranje 3D modela predmeta mjerenja na rezultate mjerenja geometrijskih značajki. Praćena su odstupanja od oblika: ravnost ploha i cilindričnost, te odstupanja od položaja: paralelnost ploha, okomitosti ploha i koaksijalnost cilindara. Kod praćenja značajki uočene su, u pojedinim slučajevima, pravilnosti u ponašanju rezultata značajki jednako orijentiranih u odnosu na smjer rendgenskih zraka i detektora. Uočena zapažanja dana su u nastavku.

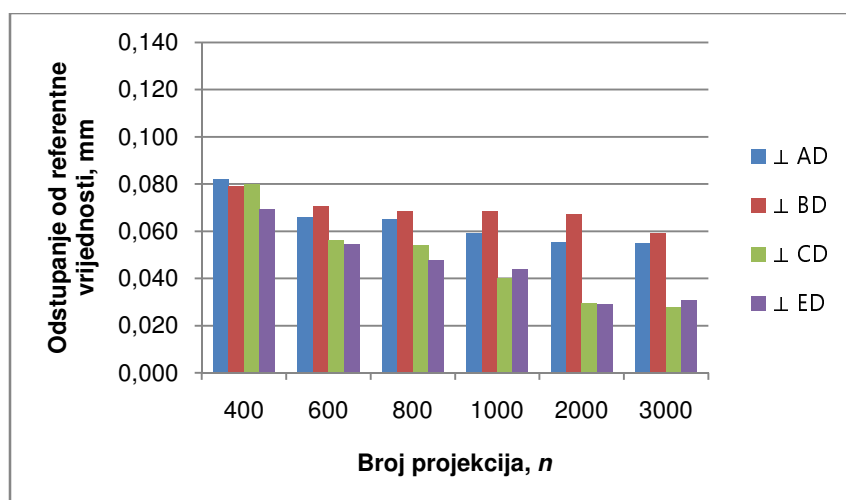
Kod praćenja odstupanja od ravnosti ploha međusobno različito orijentiranih, uočen je trend smanjenja iznosa odstupanja od ravnosti s povećanjem broja projekcija (slika 4-8).



Slika 4-8. Odstupanje rezultata mjerenja ravnosti s povećanjem broja projekcija.

Iznosom najveća odstupanja javljaju se za najmanji promatrani broj projekcija. Kod odstupanja od ravnosti ploha A i B, koje definiraju duljinu cilindra i međusobno su paralelne, povećanjem broja projekcija, uočava se trend kontinuiranog smanjenja iznosa odstupanja. Promatranjem rezultata odstupanja od ravnosti ploha C, D i E, koje su položajem okomite na plohe A i B, također je vidljivo smanjenje vrijednosti odstupanja s povećanjem broja projekcija. Za rezultate odstupanja od ravnosti ploha C, D i E kod broja projekcija od 2000 i 3000 proveden je statistički *t*-test. Utvrđeno je da nema statistički značajne razlike između rezultata odstupanja od ravnosti navedenih ploha s obzirom na broj projekcija ($p > 0,05$). Za rezultate odstupanja od ravnosti ploha A i B kod broja projekcija od 2000 i 3000 proveden je statistički *t*-test. Utvrđeno je da postoji statistički značajna razlika između rezultata odstupanja od ravnosti navedenih ploha s obzirom na broj projekcija ($p < 0,05$). Istraživanja provedena korištenjem CT skenera Nikon XT H 225 za promatrani uzorak su pokazala da su minimalna odstupanja rezultata od ravnosti ostvarena kod odabira 3000 projekcija.

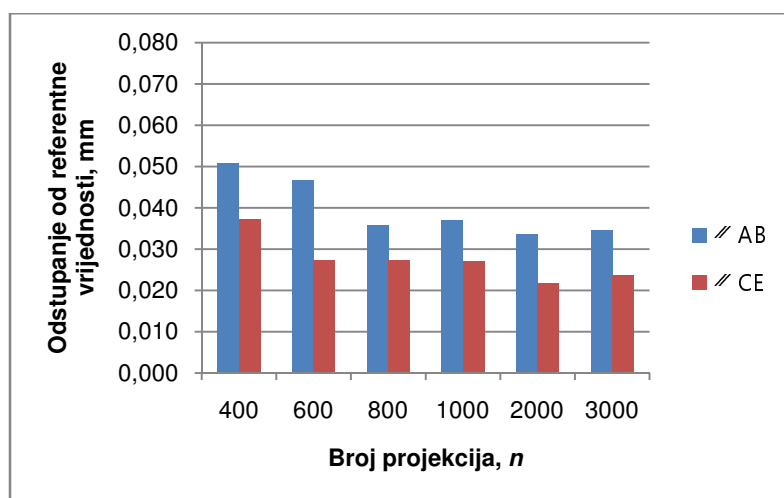
Iduća promatrana značajka, odstupanje od okomitosti, praćena je za slučajeve odstupanja ploha A, B, C i E od plohe D (slika 4-9).



Slika 4-9. Odstupanje rezultata mjerenja okomitosti s povećanjem broja projekcija.

Analizom varijance rezultata odstupanja od okomitosti AD i BD za broj projekcija od 600 do 3000 nije utvrđena statistički značajna razlika između rezultata odstupanja mjerenja. Analizom varijance odstupanja od okomitosti CD i ED utvrđena je statistički značajna razlika između rezultata odstupanja mjerenja s obzirom na broj projekcija ($p < 0,05$). *T*-testom provedenim za rezultate odstupanja od okomitosti CD i ED za broj projekcija 2000 i 3000 utvrđeno je da ne postoji statistički značajna razlika između rezultata mjerenja ($p > 0,05$).

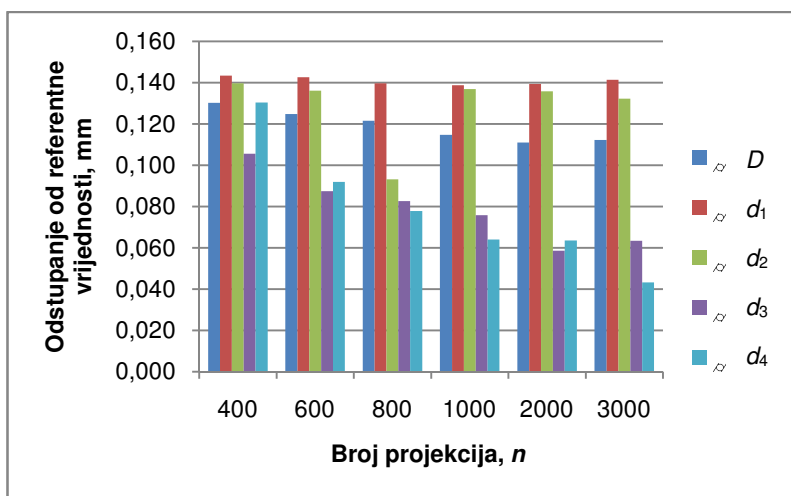
Slika 4-10 prikazuje odstupanja paralelnosti ploha A i B te C i D u ovisnosti od broja projekcija. Kod praćenja odstupanja paralelnosti između ploha A i B analizom varijance je utvrđeno da nema statistički značajne razlike između odstupanja rezultata od referentne vrijednosti za broj projekcija od 800 do 3000 ($p > 0,05$). U slučaju odstupanja od paralelnosti između ploha C i E analizom varijance je utvrđeno da nema statistički značajne razlike između odstupanja rezultata od referentne vrijednosti za broj projekcija od 600 do 3000 ($p > 0,05$). Za promatrani predmet mjerenja, polimerni cilindar složene geometrije, kritičan broj projekcija u slučaju mjerenja odstupanja od paralelnosti iznosi 800.



Slika 4-10. Odstupanje rezultata mjerenja paralelnosti s povećanjem broja projekcija.

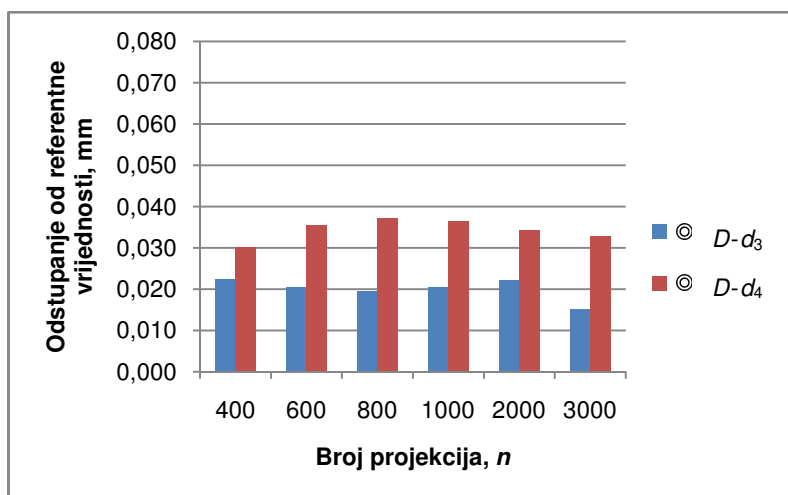
Odstupanje od cilindričnosti praćeno je na pet cilindara od čega je jedan cilindar vanjska značajka promatranog predmeta (vanjski cilindar D), dok je u ostalim slučajevima riječ o unutarnjim značajkama promatranog predmeta (cilindri d_1 , d_2 , d_3 i d_4). Cilindri D , d_3 i d_4 čine skupinu promatranih značajki orijentiranih u toku skeniranja okomito na snop zračenja, odnosno okomito na rotacijski stol, dok cilindri d_1 i d_2 predstavljaju skupinu cilindara orijentiranih paralelno sa smjerom zračenja, odnosno paralelno s rotacijskim stolom. Uočeno je dvojako ponašanje rezultata, ovisno o orijentaciji promatranih cilindara (slika 4-11). Analizom varijance odstupanja od cilindričnosti vanjskog cilindra D te unutarnjih cilindara d_1 i d_2 kod broja projekcija 1000, 2000 i 3000 nije utvrđena statistički značajna razlika između rezultata mjerenja s obzirom na broj projekcija ($p > 0,05$). Analizom varijance odstupanja cilindričnosti unutarnjih promjera d_3 i d_4 od referentnih mjerenja utvrđena je statistički značajna razlika između rezultata mjerenja u odnosu na broj projekcija. T -testom je utvrđeno da ne postoji statistički značajna razlika između rezultata odstupanja cilindričnosti d_3 za broj projekcija 2000 i 3000 ($p > 0,05$). Istraživanja provedena za konkretan slučaj mjerenja

cilindra složene geometrije na uređaju Nikon XT H 225 pokazala su da kod utvrđivanja geometrijske značajke cilindričnosti kritičan broj projekcija iznosi 2000.



Slika 4-11. Odstupanje rezultata mjerenja cilindričnosti s povećanjem broja projekcija.

Kod definiranja odstupanja od koaksijalnosti unutarnjeg promjera d_3 i d_4 u odnosu na vanjski promjer promatranog cilindra D , analizom varijance između rezultata odstupanja mjerenja utvrđeno je da nema statistički značajne razlike ($p > 0,05$) između rezultata mjerenja u odnosu na odabrani broj projekcija (slika 4-12).

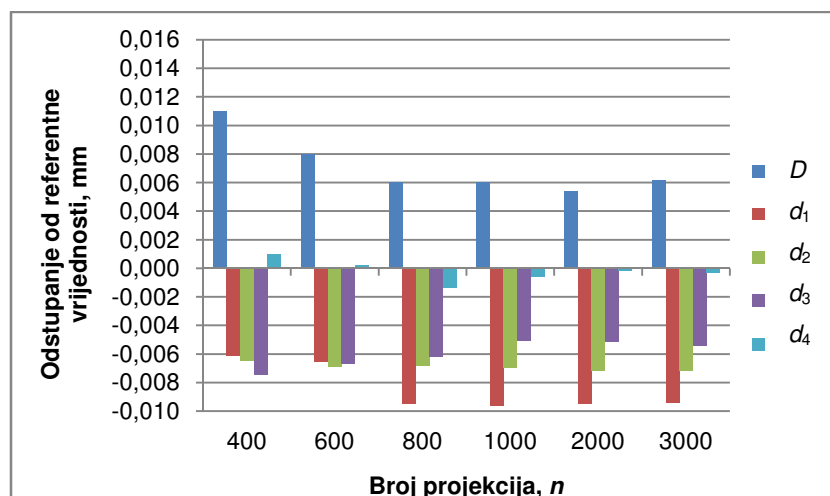


Slika 4-12. Odstupanje rezultata mjerenja koaksijalnosti s povećanjem broja projekcija.

b) Utjecaj broja projekcija na mjerenje dimenzionalnih značajki

Od dimenzionalnih značajki, praćene su dimenzije vanjskog i unutarnjih promjera te udaljenosti između ploha i kombinacija ploha i cilindara. Slika 4-13 prikazuje ponašanje odstupanja vrijednosti promjera unutarnjih cilindara d_1 , d_2 , d_3 i d_4 te odstupanje promjera

vanjskog cilindra D od referentnih vrijednosti ostvarenih mjerenjima kontaktnim trokoordinatnim mjernim uređajem.

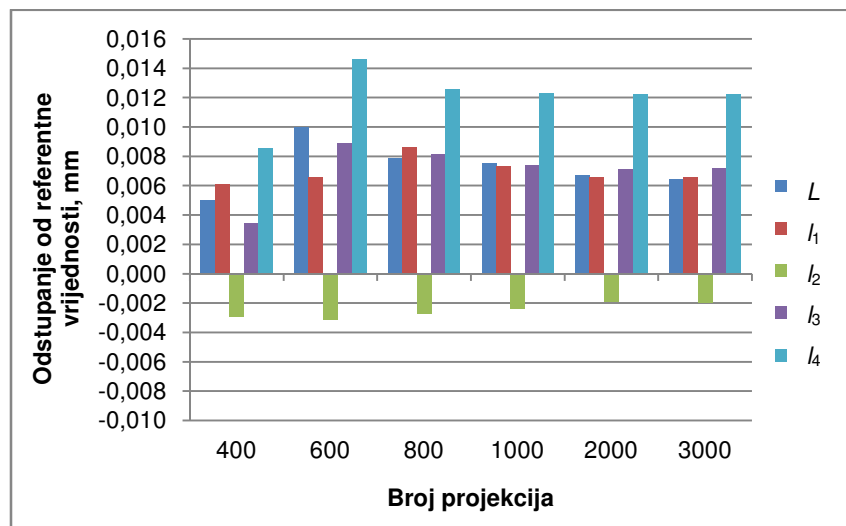


Slika 4-13. Odstupanje rezultata mjerenja vanjskog i unutarnjih promjera s povećanjem broja projekcija.

Iz grafa je vidljivo kako je odstupanje vanjskog promjera, u odnosu na odstupanja unutarnjih promjera suprotnog predznaka, no iznosom rezultati ne prelaze vrijednost od 11 μm . Kod mjerenja vanjskog promjera najveće odstupanje uočeno je kod najmanjeg odabranog broja projekcija, dok se kod unutarnjih promjera uočava različito ponašanje iznosa odstupanja rezultata mjerenja. Odstupanja rezultata mjerenja promjera d_1 s povećanjem broja projekcija sa 600 na 800 rastu, odstupanja rezultata mjerenja promjera d_2 ne mijenjaju značajno svoj iznos, dok se kod mjerenja promjera d_3 i d_4 uočava pad vrijednosti odstupanja. Međutim, uspoređujući rezultate može se primijetiti stabilizacija iznosa odstupanja za odabrani broj projekcija 800 pa na više. Analizom varijance rezultata odstupanja mjerenja od referentnih vrijednosti utvrđeno je da nema statistički značajnih razlika između rezultata mjerenja kod broja projekcija 800 i više. Rasipanja koja ipak postoje između dobivenih rezultata ne mogu se pripisati utjecaju broja projekcija.

Kod promatranja dimenzija definiranih kao udaljenosti između dviju paralelnih ploha, tj. ukupne duljine predmeta L te dimenzije l_4 , može se reći kako utjecaj broja projekcija ne dolazi do izražaja kod odabira broja projekcija većeg od 800 (slika 4-14). Analizom varijance rezultata odstupanja mjerenja od referentnih vrijednosti utvrđeno je da ne postoji statistički značajna razlika odstupanja duljina L i l_4 u odnosu na broj projekcija ($p > 0,05$). Razlike u rezultatima koje ipak postoje nisu posljedica odabira različitog broja projekcija. Kod analize rezultata odstupanja za udaljenosti l_1 i l_3 definiranih kao udaljenosti između vanjske plohe

predmeta te osi provrta, za broj projekcija 800 i veći analizom varijance nije utvrđena statistički značajna razlika između rezultata ($p > 0,05$). Promatrajući odstupanja rezultata veličine l_2 , definirane kao udaljenost između dvaju provrta, uočena su iznosom manja te predznakom suprotna odstupanja u odnosu na ostale promatrane udaljenosti. U slučaju duljine l_2 , analizom varijance nije utvrđen statistički značajan utjecaj broja projekcija na rezultate mjerenja ($p > 0,05$).



Slika 4-14. Odstupanje rezultata mjerenja udaljenosti L , l_1 , l_2 , l_3 i l_4 s povećanjem broja projekcija.

Analizom rezultata odabranih dimenzionalnih i geometrijskih značajki kod mjerenja polimernog cilindra složene geometrije CT skenerom Nikon XT H 225, moguće je donijeti sljedeće zaključke:

- Kod analize dimenzionalnih značajki, analizom varijance utvrđeno je da ne postoji statistički značajna razlika između rezultata odstupanja od referentnih vrijednosti kod broja projekcija 800 i više.
- Kod mjerenja geometrijskih značajki ravnosti minimalna odstupanja rezultata od referentnih vrijednosti ostvarena su kod odabira 3000 projekcija.
- Provedbom analize varijance i t -testa rezultata odstupanja od okomitosti, utvrđen je kritičan broj projekcija iznosa 2000.
- Kod mjerenja odstupanja od paralelnosti kritičan broj projekcija, za promatrani mjerni sustav i predmet mjerenja, iznosi 800.
- Istraživanja provedena za konkretan slučaj mjerenja cilindra složene geometrije na uređaju Nikon XT H 225 pokazala su da kod utvrđivanja geometrijske značajke cilindričnosti kritičan broj projekcija iznosi 2000.

- Povećanjem broja projekcija moguće je smanjiti iznos odstupanja mjerene veličine u odnosu na referentnu vrijednost.

Uspoređujući dobivene rezultate mjerenja dimenzionalnih veličina aluminijskog cilindra jednostavne geometrije i polimernog cilindra složene geometrije, utvrđeno je postojanje utjecaja odabranog broja projekcija na rezultate mjerenja kod mjerenja predmeta složene geometrije. U cilju potvrde dobivenog kritičnog broja projekcija, provedena su dodatna skeniranja aluminijskog cilindra složene geometrije za odabrani broj projekcija 800 i 2000. Dobiveni rezultati ne ukazuju na postojanje statistički značajne razlike.

U slučaju mjerenja homogenog predmeta jednostavne geometrije, za promatrani raspon broja projekcija i odabrane parametre skeniranja, nije uočena statistički značajna razlika između dobivenih rezultata odstupanja.

4.3 Utjecaj orijentacije predmeta na rezultate mjerenja

Orijentacija predmeta važan je parametar koji se definira u procesu koji prethodi CT skeniranju. Riječ je o parametru koji se klasificira u utjecajne parametre prisutne u procesu skeniranja ili se razmatra unutar grupe utjecajnih parametara koji ovise o mjeritelju.

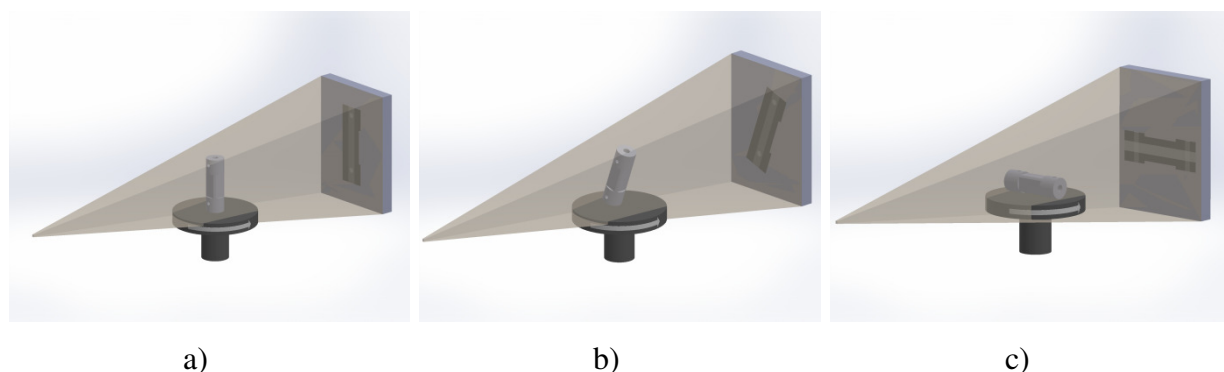
Orijentacija predmeta u procesu skeniranja nesumnjivo je važan parametar što je vidljivo iz pregleda dostupne literature gdje autori u [38] navode kako na kvalitetu podataka dobivenih CT skeniranjem utječu parametri vezani uz ograničenja izvedbe uređaja kao i odabrani parametri skeniranja, položaja i orijentacije samog predmeta definirani od strane mjeritelja. Odabirom nepovoljne orijentacije predmeta, kao i nepovoljnih postavki u procesu skeniranja moguće je utjecati na kvalitetu podataka skeniranja (pojavu zamagljenih rubova i artefakata CT skeniranja) koji uzrokuju velika odstupanja rezultata mjerenja od stvarnih vrijednosti. Iz tog razloga važno je definirati ulazne parametre skeniranja, kao i orijentaciju samog predmeta u procesu skeniranja kojim će se maksimalno umanjiti odstupanja rezultata mjerenja. Nadalje, autori u [6] navode kako je odabir orijentacije predmeta značajan u samoj pripremi skeniranja, a zajedno s odabirom parametara skeniranja (snage izvora, geometrijskog povećanja, trajanja ekspozicije, okrupnjavanja piksela (engl. *pixel binning*) i dr.) čini grupu parametara limitiranih od strane CT skenera, ali ipak odabranih od strane mjeritelja. Autori stoga naglašavaju značajan utjecaj mjeritelja na dostižnu točnost kao i na nesigurnost rezultata mjerenja [14, 62, 93]. Orijentacija predmeta mjerenja u procesu CT skeniranja direktno utječe na duljinu puta koje rendgensko zračenje prolazi kroz predmet kao i na

varijaciju te duljine u samom procesu skeniranja [1, 71]. S obzirom na to da orijentacija predmeta u velikom obujmu utječe na svojstva apsorpcije rendgenskog zračenja u materijalu, odabirom optimalne orijentacije predmeta u procesu skeniranja moguće je umanjiti utjecaj otvrdnjavanja zračenja prolaskom kroz materijal te tako umanjiti pojavu pogrešaka otvrdnjavanja zračenja. Također, u velikom broju slučajeva odgovarajuća orijentacija predmeta pomaže u minimizaciji debljine kojom prolaze rendgenske zrake čime se direktno utječe na potrebnu snagu izvora zračenja što može omogućiti smanjenje veličine fokusa te konačno bolju kvalitetu slike, odnosno smanjenje mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja [58]. Isto tako, autori u svojim radovima [13, 58] preporučuju takav položaj predmeta u procesu skeniranja, kojim se osigurava stanje u kojem put koji zračenje prolazi za vrijeme rotacije predmeta jest ujednačen. Ukoliko se put, koji zračenje prolazi, tijekom rotacije predmeta u procesu CT skeniranja značajno mijenja, moguća je pojava situacije u kojoj je put koji zračenje prolazi prekratak pa će u tom slučaju predmet biti previše prozračen, odnosno u slučaju značajno duljeg puta prolaska zračenja, prethodno definirana snaga izvora neće biti dostatna za prozračivanje predmeta. Konačno, značajne varijacije u duljini puta rendgenskog zračenja u procesu skeniranja predmeta utjecat će na kvalitetu 2D zapisa, kao i na rezultate dimenzionalnih mjerenja.

Dosadašnja istraživanja utjecaja orijentacije predmeta u procesu skeniranja na rezultate mjerenja obuhvaćala su istraživanja provedena kod primjene predmeta jednostavne geometrije. Autori Weckenmann i Krämer [71] promatraju utjecaj dviju orijentacija na slučaju mjerenja vanjskog i unutarnjeg promjera jednostavnog PVC cilindra. U prvom slučaju predmet je orijentiran paralelno u odnosu na os rotacije, a u drugom slučaju okomito u odnosu na os rotacije okretnog stola. Rezultati mjerenja pokazali su gotovo zanemariv utjecaj orijentacije u slučaju mjerenja vanjskog promjera cilindra, dok se kod mjerenja unutarnjeg promjera utvrdio značajan utjecaj orijentacije provrta na rezultate mjerenja pri čemu se manja odstupanja od referentne vrijednosti postižu kod orijentacije predmeta okomite na smjer rotacije okretnog stola [71]. Istraživanjem utjecaja orijentacije predmeta bave se i autori Cantatore i Müller u [88] pri čemu promatraju utjecaj orijentacije lakoprozračivog polimernog predmeta zupčastog oblika (slika 3-6 d) u procesu rotacije i skeniranja u dva slučaja. Prvi slučaj jest orijentacija predmeta uzduž osi rotacije, dok drugi slučaj podrazumijeva orijentaciju predmeta pod kutom od 45° u odnosu na os rotacije okretnog stola. Manja odstupanja postignuta su kod mjerenja u nagnutoj orijentaciji.

Važnost odabira odgovarajuće orijentacije, a u cilju optimizacije parametara skeniranja kao i osiguravanja bolje kvalitete 2D zapisa, naglašava se u velikom broju znanstvenih radova. Osim samog saznanja o važnosti utjecaja postavljanja predmeta tj. odabira odgovarajuće orijentacije, ne postoji definirani doprinos utjecaja orijentacije predmeta mjerenja u općenitom slučaju. Nadalje, kako trenutno ne postoje procedure koje bi propisivale postavke za optimalnu provedbu CT skeniranja, ovaj proces temelji se isključivo na iskustvima mjeritelja. Iz navedenih razloga, u ovom radu provedena su daljnja istraživanja u cilju konkretizacije učinka orijentacije predmeta u procesu skeniranja na rezultate dimenzionalnih mjerenja.

Utjecaj odabira orijentacije na rezultate mjerenja promatran je u slučaju mjerenja dvaju predmeta značajno različitih gustoća materijala, aluminijskog i polimernog cilindra složene geometrije predstavljenih u poglavlju 4. Odabrana su tri slučaja različite orijentacije predmeta, vertikalna orijentacija, nagnuta orijentacija te horizontalna orijentacija predmeta (slika 4-15). Skeniranje predmeta u svakom položaju ponovljeno je tri puta.



Slika 4-15. Prikaz različitih orijentacija predmeta mjerenja tijekom procesa skeniranja:
a) vertikalna orijentacija 90 °, b) nagnuta orijentacija 60 °, c) horizontalna orijentacija 0 °.

Proces CT skeniranja proveden je korištenjem industrijskog CT skenera oznake Nikon XT H 225. U cilju minimizacije ostalih utjecajnih parametara koji se javljaju u procesu skeniranja predmeta, odabrani su parametri skeniranja kojima je omogućeno prozračivanje predmeta u sve tri odabrane orijentacije, kao i geometrijsko povećanje koje omogućuje projekciju cijelog predmeta na detektor neovisno o odabranoj orijentaciji. Odabir ostalih parametara u procesu skeniranja (ekspozicija, broj uprosječenih slika, okrupnjavanje piksela, mod skeniranja) izvršen je prema dobroj mjeriteljskoj praksi s ciljem minimizacije njihova utjecaja na kasnije procese. Korištenjem posebno oblikovanih polistirenskih postolja za svaku od orijentacija, osigurana je identična orijentacija oba cilindra u svim ponovljenim mjerenjima.

Proces rekonstrukcije, u kojem je softverski korigiran utjecaj otvrdnjavanja zračenja, proveden je korištenjem softvera CT-Pro, dok se analiza 3D modela provela korištenjem softvera VGStudio MAX. Granica između predmeta i pozadine određena je metodom lokalne ekstrakcije površine. Korekcija veličine vokselâ provedena je korištenjem referentnog predmeta, štapića od ugljičnih vlakana s rubinskim kuglicama na krajevima. Skeniranje štapića provedeno je prije i poslije skeniranja cilindra složene geometrije. Za referencu kod umjeravanja veličine vokselâ koristila se aritmetička sredina izmjerenih udaljenosti između centara rubinskih kuglica.

Odabran je pristup mjerenja gdje su oblaku točaka dodijeljeni oblici jednostavne geometrije, ravnine i cilindri, a promatran je odnos između različitih kombinacija oblika jednostavne geometrije prikazan u tablici 4-5.

Tablica 4-5. Prikaz mjernih strategija za odabrane veličine.

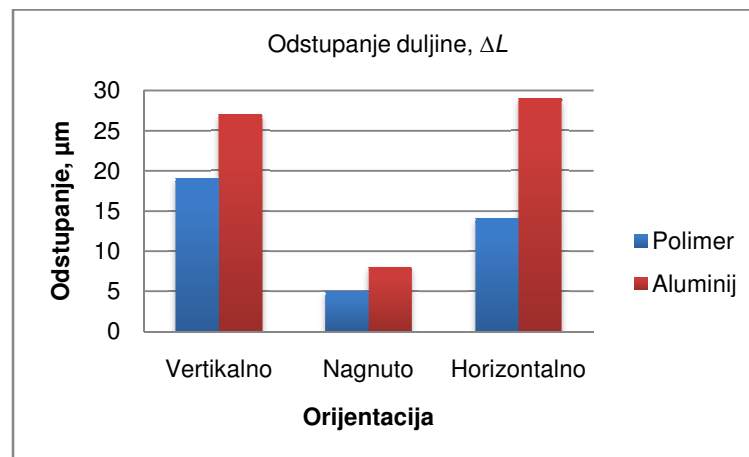
Mjerna veličina	Oznaka	Mjerna strategija
Duljina cilindra	L	ravnina - ravnina
Udaljenost između plohe A i provrta d_1	l_1	ravnina - cilindar
Udaljenost između provrta d_1 i d_2	l_2	cilindar - cilindar
Udaljenost između plohe B i provrta d_2	l_3	ravnina - cilindar
Udaljenost između ploha C i E	l_4	ravnina - ravnina
Vanjski promjer	D	cilindar
Unutarnji promjeri provrta	d_1, d_2, d_3, d_4	cilindar

Dobiveni rezultati bit će u nastavku rada prikazani grafički kao odstupanja dobivenih rezultata mjerenja računalnom tomografijom od referentnih vrijednosti izmjerenih kontaktnim trokoordinatnim mjernim uređajem. Rezultati su dani grafički za svaku promatranu veličinu i orijentaciju te za oba promatrana predmeta izrađena iz različitih materijala. Provedena je statistička analiza rezultata primjenom metode ANOVA.

4.3.1 Analiza rezultata dimenzionalnih značajki s obzirom na odabranu orijentaciju

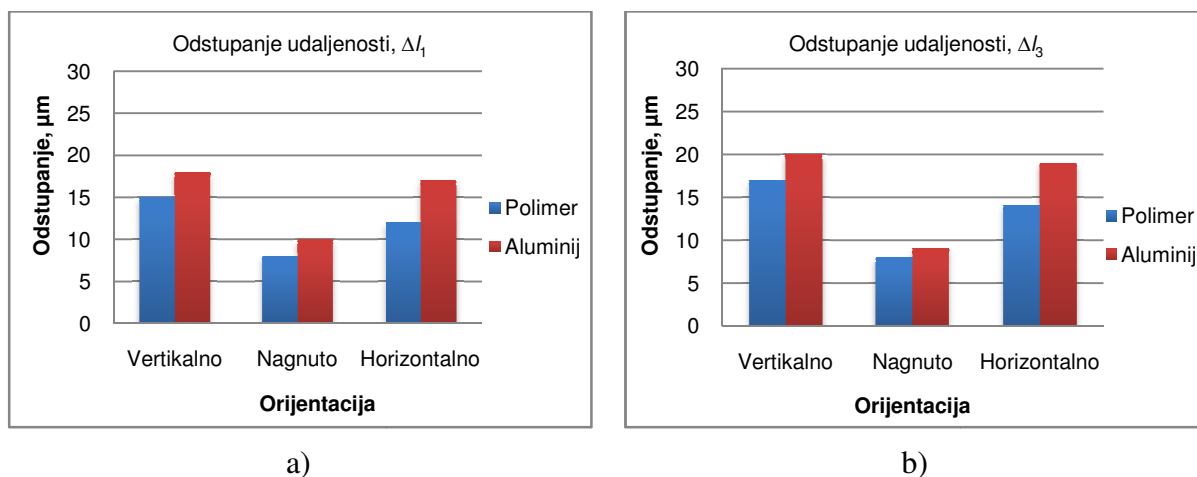
Kod analize rezultata odstupanja ukupne duljine aluminijskog cilindra, L , uočeni su različiti iznosi odstupanja dobivenih rezultata od referentne vrijednosti s obzirom na odabranu orijentaciju predmeta u procesu skeniranja (slika 4-16). Najveća odstupanja uočena su u vertikalnoj i horizontalnoj orijentaciji, dok su najmanja odstupanja zabilježena u nagnutoj orijentaciji. Analizom varijance utvrđena je statistički značajna razlika rezultata

mjerenja između odabranih orijentacija. Objašnjenje ovakvog ponašanja rezultata moguće je pripisati prisutnosti šumova na granicama materijala (engl. *border noise*) koji otežavaju određivanje granice između predmeta i pozadine u vertikalnoj orijentaciji. Takvi rezultati su također posljedica nepovoljnog kuta upada rendgenskih zraka na površine koje definiraju duljinu L . Odstupanje u horizontalnoj orijentaciji također je značajno, no u manjoj mjeri izraženo nego kod vertikalne orijentacije. Razlog velikim odstupanjima u horizontalnoj orijentaciji može se pripisati utjecaju artefakata otvrdnjavanja zračenja. Jednako ponašanje rezultata zabilježeno je i u slučaju aluminijskog i u slučaju poliamidnog cilindra.



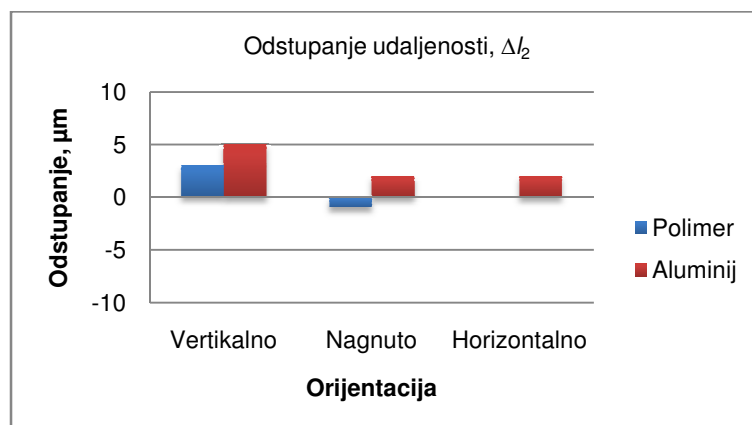
Slika 4-16. Odstupanja rezultata mjerenja duljine L kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra.

Analizom varijance utvrđeno je da ne postoji statistički značajna razlika rezultata mjerenja ($p > 0,05$) između udaljenosti l_1 i l_3 kod promatranih orijentacija (slika 4-17). S obzirom na to da su mjerene veličine l_1 i l_3 djelomično definirane ploham A i B koje su izložene šumovima, dobiveni iznosi odstupanja u vertikalnoj orijentaciji su očekivani. Veći iznosi odstupanja kod horizontalne orijentacije aluminijskog cilindra pripisuju se nepotpunoj eliminaciji artefakata otvrdnjavanja zračenja u procesu rekonstrukcije 3D modela. Najmanja odstupanja od referentnih vrijednosti i u slučajevima mjerenja l_1 i l_3 uočena su kod nagnute orijentacije, što je u skladu s odstupanjima rezultata ukupne duljine cilindra ΔL .



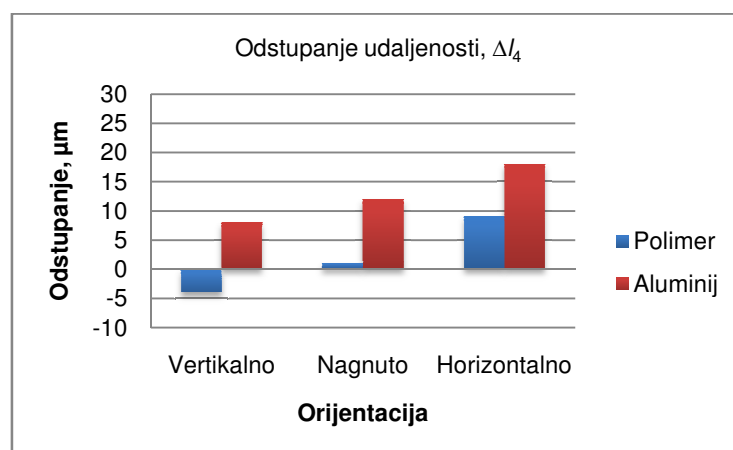
Slika 4-17. Odstupanja rezultata mjerenja udaljenosti kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra: a) l_1 , b) l_3 .

Kod mjerenja udaljenosti između dvaju provrta (d_1 i d_2), označene kao l_2 , nisu bila očekivana odstupanja rezultata od referentnih vrijednosti. Razlog tome jest činjenica da osni razmak između dvaju provrta ne ovisi o odabranoj graničnoj vrijednosti sive skale, za razliku od slučaja mjerenja promjera promatranih provrta. Odabirom pogrešne granične vrijednosti sive skale moguće je značajno utjecati na iznos promjera. U slučaju odabira granične vrijednosti sive skale manje od optimalne vrijednosti, promjer provrta rezultirat će vrijednostima manjim od stvarnih i obrnuto, odabirom granične vrijednosti sive skale veće od optimalne vrijednosti, promjer provrta rezultirat će vrijednostima većim od stvarnih. U oba spomenuta slučaja položaj centralne osi provrta se ne mijenja, odnosno osni razmak između promatranih provrta ostaje isti. Upravo iz spomenutog razloga osni razmak između dva provrta ili dviju sfera u velikom broju slučajeva koristi se za korekciju veličine vokselu o čemu je više bilo riječi u poglavlju 3.1. *Referentni predmeti*. Analizom varijance nije utvrđena statistički značajna razlika rezultata mjerenja ($p > 0,05$), čime su potvrđena očekivanja (slika 4-18).



Slika 4-18. Odstupanja rezultata mjerenja udaljenosti l_2 kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra.

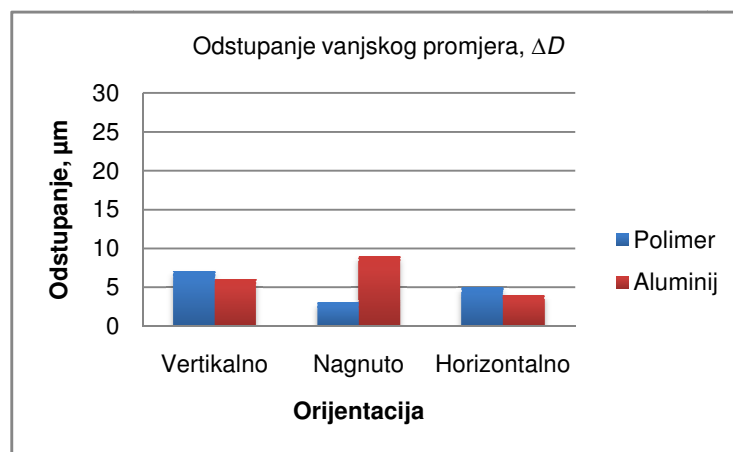
Iduća promatrana značajka jest udaljenost l_4 definirana površinama C i E. Odstupanja u vertikalnoj i nagnutoj orijentaciji iznosima su približna te manjih vrijednosti nego u slučaju mjerenja udaljenosti l_4 u horizontalnoj orijentaciji (slika 4-19).



Slika 4-19. Odstupanja rezultata mjerenja udaljenosti l_4 kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra.

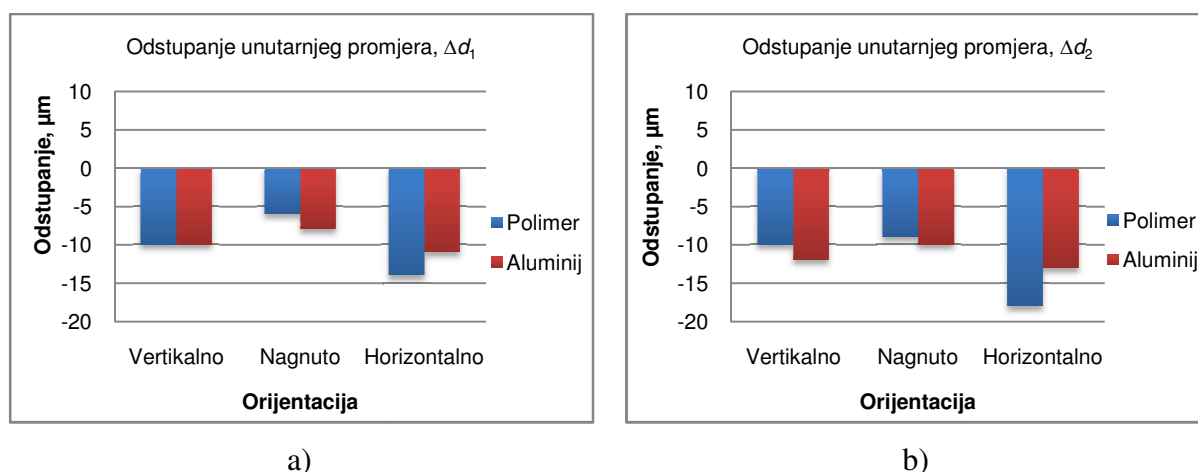
Analizom varijance je utvrđeno da ne postoji statistički značajna razlika između rezultata mjerenja u različitim orijentacijama ($p > 0,05$). Izrazito nepovoljni rezultati horizontalne orijentacije u slučaju mjerenja aluminijskog cilindra posljedica su prisutnosti velikog broja utjecajnih parametara: artefakata otvrdnjavanja zračenja, prisutnosti šuma na granicama materijala te nepovoljnog kuta upada rendgenskih zraka na površine C i E. Ponašanje rezultata i u slučaju aluminijskog i u slučaju polimernog cilindra je jednako, ali su odstupanja iznosom veća kod aluminijskog cilindra.

Kod mjerenja vanjskog promjera analizom varijance je utvrđeno da ne postoji statistički značajna razlika između rezultata mjerenja u različitim orijentacijama ($p > 0,05$). U svim promatranim slučajevima uočena su mala odstupanja rezultata od referentnih vrijednosti, kao i mala odstupanja između rezultata kod cilindara različitih materijala (slika 4-20).



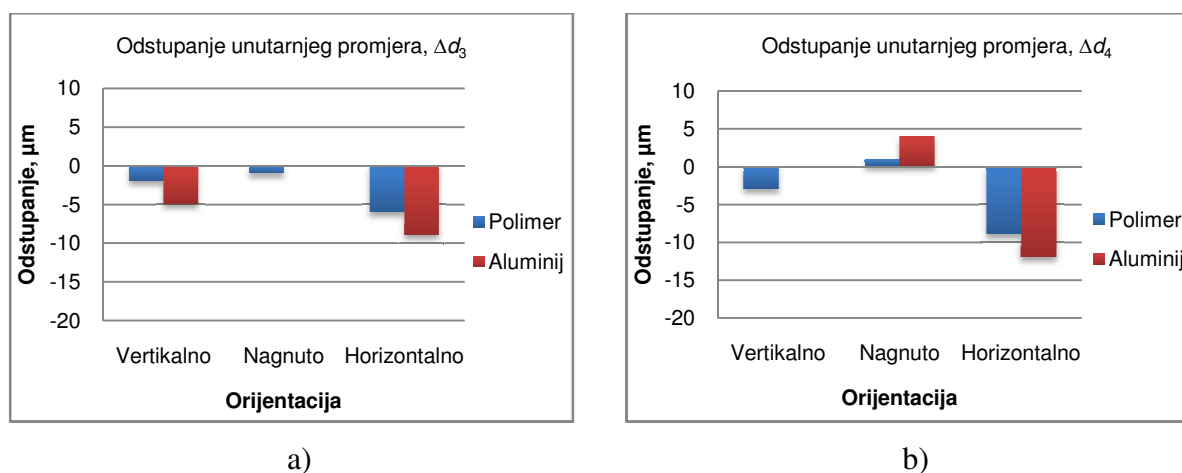
Slika 4-20. Odstupanja rezultata mjerenja vanjskog promjera D kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra.

Jednako ponašanje uočeno je i kod promatranja iznosa odstupanja rezultata mjerenja unutarnjih promjera d_1 i d_2 kod oba cilindra (slika 4-21). Analizom varijance je utvrđeno da ne postoji statistički značajna razlika između rezultata mjerenja u različitim orijentacijama između značajki d_1 i d_2 te između različitih materijala ($p > 0,05$). Odstupanja negativnog predznaka ukazuju na mogućnost pogrešnog odabira granične vrijednosti sive skale koji je iznosom manji od optimalne vrijednosti.



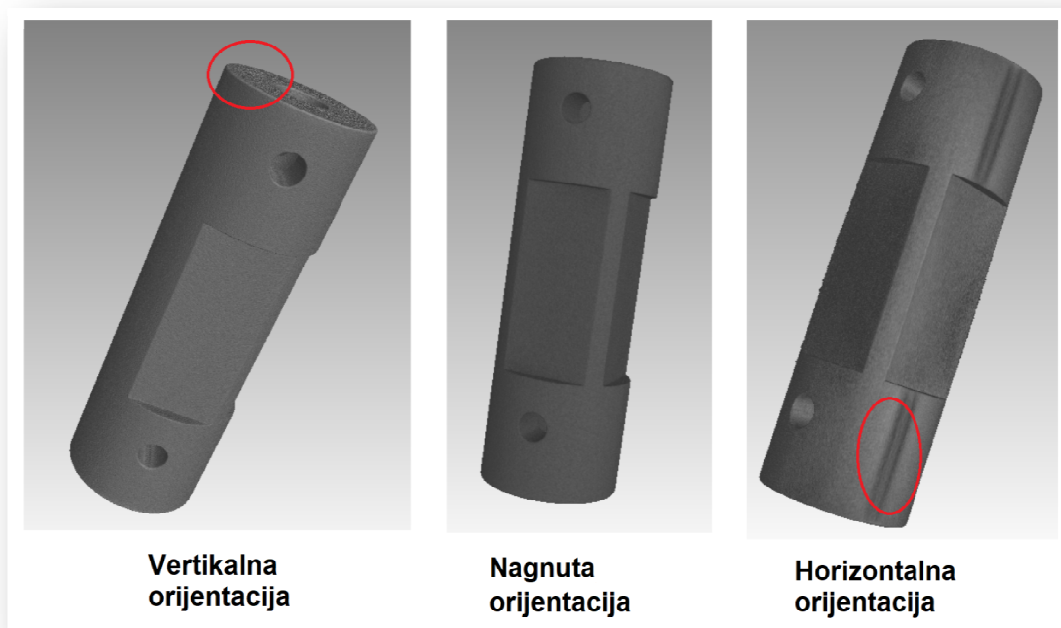
Slika 4-21. Odstupanja rezultata mjerenja unutarnjih promjera kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra: a) d_1 , b) d_2 .

Nadalje, rezultati analize varijance rezultata mjerenja unutarnjih promjera d_3 i d_4 također, kao i u slučaju promatranog vanjskog promjera D i unutarnjih promjera d_1 i d_2 , ne ukazuju na postojanje statistički značajne razlike rezultata mjerenja u odnosu na odabranu orijentaciju (slika 4-22). Iznosi dobivenih odstupanja ne prelaze vrijednosti od $12\text{ }\mu\text{m}$, međutim, u usporedbi s rezultatima odstupanja vanjskog promjera, uočena su odstupanja suprotnog predznaka jednako kao i kod unutarnjih promjera d_1 i d_2 . Uočena odstupanja suprotnog predznaka u odnosu na odstupanja vanjskog promjera idu u prilog postavljenoj pretpostavci odabira manjeg iznosa granične vrijednosti sive skale od optimalnog iznosa.



Slika 4-22. Odstupanja rezultata mjerenja unutarnjih promjera kod različitih orijentacija polimernog i aluminijskog cilindra: a) d_3 , b) d_4 .

Najmanja odstupanja rezultata mjerenja dimenzionalnih značajki u odnosu na referentna CMM mjerenja, a s obzirom na odabranu orijentaciju, i kod aluminijskog i kod polimernog cilindra dobivena su za slučaj nagnute orijentacije. Objašnjenje tome nalazi se u orijentaciji predmeta u konusnom snopu zračenja, kao i prisutnosti artefakata otvrdnjavanja zračenja i sekundarnog zračenja. Artefakti otvrdnjavanja zračenja dolaze do izražaja kod horizontalne orijentacije gdje zrake prolaze najdulji put kroz materijal, koji iznosom odgovara duljini cilindra. Slika 4-23 prikazuje dobivene modele aluminijskog cilindra za različite odabrane orijentacije. Iz slike je vidljiva prisutnost pogrešaka na modelima kod vertikalne orijentacije gdje su na plohama koje definiraju duljinu cilindra prisutni šumovi, dok se kod modela dobivenog skeniranjem u horizontalnoj orijentaciji uočava pogreška oblika linije koja odgovara mjestu na kojem je predmet bio položen. S obzirom na dobivene rezultate, sva daljnja eksperimentalna istraživanja utjecajnih veličina promatrana su u nagnutoj orijentaciji predmeta.



Slika 4-23. 3D modeli aluminijskog cilindra dobiveni rekonstrukcijom 2D zapisa skeniranja u različitim orijentacijama.

4.3.2 Analiza rezultata geometrijskih značajki s obzirom na odabranu orijentaciju

Osim dimenzionalnih značajki, promatrano je ponašanje rezultata geometrijskih značajki. Odabrane su i analizirane ravnosti svih ploha, različite kombinacije okomitosti ploha, paralelnosti između ploha A i B, te C i E te cilindričnosti i koaksijalnosti pojedinih cilindara.

Provedena istraživanja su pokazala značajna odstupanja rezultata od referentnih vrijednosti i značajna rasipanja ponovljenih mjerenja i kod aluminijskog i kod polimernog cilindra. Iznosi odstupanja premašuju iznose od 50 μm . Razlog tome jest relativno veliki šum na granicama materijala čime je otežano definiranje geometrije predmeta. Nadalje, na rezultate utječu i artefakti otvrdnjavanja zračenja kao i pogrešan odabir granične vrijednosti sive skale. Dobiveni rezultati su u slaganju s literaturom gdje su se istraživanjem mogućnosti CT mjerenja za potrebe definiranja odstupanja od oblika i položaja bavile dvije interkomparacije; CT audit i CIA-CT. Jedan od zahtjeva za mjerenjima u sklopu CT audita jest mjerenje pogreške oblika idealnih sfera i kalota na dva različita predmeta. Mjerene su pogreške oblika (engl. *form error*) definirane normom ISO 10360 kao razlika udaljenosti između maksimalno i minimalno udaljene definirane točke do središta regresijske sfere. Izmjereni rezultati pogreške oblika mjerenja na sferama predmeta 1 - CT *tetraedra* između 14 laboratorija nalaze se u rasponu od (1,2 do 119,2) μm s očekivanom srednjom vrijednošću

iznosa 34,7 μm i standardnom devijacijom od 31,4 μm . Kod mjerenja pogreške oblika predmeta 2 - *kocke s kalotama*, rezultati se nalaze u rasponu od (0 do 80) μm . U oba slučaja faktor slaganja *En* za veći broj laboratorija bio je veći od 1 što ukazuje na nekompatibilnost rezultata [54]. U sklopu CIA-CT usporedbenih mjerenja, mjerene su karakteristike kružnosti također na dva različita predmeta, polimernoj Lego kocki i inzulinskoj olovci izrađenoj iz mesinga. Dobiveni rezultati promatrani su u usporedbi s referentnim vrijednostima te su zabilježena odstupanja CT rezultata u rasponu od (0 do 60) μm za kružnost inzulinske olovke, te (0 do 90) μm za kružnost Lego kocke [82]. U obje interkomparacije, usporedbeno mjerenja pokazala su kako su mjerenja oblika problematičnija od mjerenja veličina kao što su promjeri ili udaljenosti. Zaključak CT audita vezan uz zabilježena velika odstupanja objašnjava se prisutnošću šumova u podacima koji utječu na mjerenja oblika, ali ne i na mjerenja veličina dobivenih uprosječivanjem podataka, čime se značajno umanjuje utjecaj vrijednosti *outliera* na ukupni rezultat [54], dok se u zaključku CIA-CT interkomparacije značajna odstupanja rezultata mjerenja kružnosti od referentnih vrijednosti objašnjavaju većom debljinom stijenke, prisutnošću statističkih šumova u setovima podataka te prisutnošću artefakata nastalih kao posljedice raspršenja rendgenskih zraka [82].

Iz spomenutih razloga primjena računalne tomografije ne preporuča se u definiranju odstupanja od oblika i položaja i dalje je otvorena za znanstvena istraživanja.

Konačno, dobiveni rezultati upućuju na korištenje nagnute orijentacije kao najpovoljnije kod postavljanja predmeta mjerenja. Međutim ponekad, uslijed složenosti oblika predmeta mjerenja, pri čemu nisu sve značajke na predmetu u istoj, glavnoj osi ili okomite na glavnu os predmeta, postavlja se pitanje kako pravilno, optimalno namjestiti predmet prije samog procesa skeniranja? Ukoliko postoji zahtjev za mjerenjem točno definiranih značajki, predmet je potrebno orijentirati na način da te značajke zauzimaju nagnutu orijentaciju u odnosu na os zračenja te da se postave što je više moguće u centar snopa konusnog zračenja. Ipak, za slučaj kada je potrebno definirati cijelu geometriju predmeta, mjeritelj mora biti svjestan mogućih većih odstupanja kao posljedice odabrane orijentacije. Ukoliko je to moguće, predlaže se provedba skeniranja u više orijentacija te provedba mjerenja pojedinih značajki u njima optimalnom položaju.

4.4 Utjecaj hrapavosti predmeta

Površinska hrapavost definira se kao sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta primarno nastalih nekim od postupaka obrade. Dosadašnjim istraživanjima utvrđena je značajna zavisnost površinske hrapavosti ispitivanog predmeta i rezultata dimenzionalnih mjerenja metodom računalne tomografije u odnosu na rezultate dimenzionalnih mjerenja kontaktnim trokoordinatnim mjernim uređajima. Veći utjecaj na rezultate uočen je kod mjerenja predmeta izraženije površinske hrapavosti. S obzirom na to da se radi o parametru vezanom uz predmet ispitivanja, sastavnica mjerne nesigurnosti utjecaja površinske hrapavosti na ukupnu mjernu nesigurnost rezultata mjerenja računalnom tomografijom u dosadašnjim istraživanjima procjenjivala se unutar sastavnice utjecaja predmeta mjerenja, a prema zahtjevu norme ISO 15530-3 [78]. Boeckmans i suradnici [94] u svojim istraživanjima promatraju vrijednosti vanjskih promjera aluminijskih cilindara dobivene kontaktnim i CT mjerenjima u odnosu na različite iznose R_p parametra hrapavosti. Rezultati njihova istraživanja pokazuju sustavni pomak vrijednosti rezultata mjerenja CT-om u iznosu koji približno odgovara izmjerenoj vrijednosti parametra hrapavosti R_p ispitivane površine [94]. Nadalje, Schmitt i Niggemann [63] procijenjuju utjecaj parametra hrapavosti kao dijela sastavnice utjecaja predmeta mjerenja na rezultate mjerenja te predlažu kombiniranu sastavnicu mjerne nesigurnosti danu izrazom:

$$u_w = \sqrt{\Delta L_t^2 + \left(\beta \cdot \frac{R_{z\text{mean}}}{2}\right)^2}. \quad (4-3)$$

Pri čemu je:

ΔL_t	μm	promjena duljine predmeta uslijed promjene temperature
β	-	koeficijent pravokutne raspodjele
$R_{z\text{mean}}$	μm	srednja vrijednost parametra hrapavosti R_z ispitivane površine.

Iz izraza (4-3) vidljivo je kako Schmitt i Niggemann pretpostavljaju veličinu sustavne pogreške uslijed hrapavosti ispitivane površine u iznosu polovice izmjerene srednje vrijednosti hrapavosti površine R_z pri čemu se R_z definira kao najveća visina profila na referentnoj duljini ispitivanja. Zavisnost rezultata dimenzionalnih mjerenja o površinskoj hrapavosti prema izrazu danom od strane Schmitta i Niggemanna, a prikazanim izrazom (4-3) potvrđuju i istraživanja provedena od strane Aloisi i Carmignata [95].

Izrazi sastavnica mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja uslijed utjecaja hrapavosti predmeta predloženi u gore navedenim istraživanjima isključivo se odnose na konkretne

slučajeve mjerenja tj. još uvijek ne postoji opći izraz utjecaja površinske hrapavosti na rezultate dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom. Iz tog razloga provedena su eksperimentalna istraživanja u cilju evaluacije spomenute sastavnice mjerne nesigurnosti.

Eksperimentalni dio

Eksperimentalna istraživanja utjecaja površinske hrapavosti na rezultate dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom provodila su se u dva dijela na ukupno osam aluminijskih cilindara značajno različitih iznosa površinske hrapavosti, vanjskog nazivnog promjera 12 mm. U prvom dijelu istraživanja analizirao se utjecaj hrapavosti na primjeru četiri aluminijska cilindra prikazanih slikom 4-24. U kasnijoj fazi istraživanja uključena su još četiri cilindra istih nazivnih promjera i duljine, izrađeni iz istog sirovca, različitih iznosa površinske hrapavosti.



Slika 4-24. Prikaz četiri aluminijska cilindra različite površinske hrapavosti.

Istraživanje je uključivalo skeniranje aluminijskih cilindara u jednakim uvjetima, a u cilju eliminacije ostalih utjecajnih parametara. Tablica 4-6 prikazuje postavke CT skenera korištene za skeniranja aluminijskih cilindara.

Tablica 4-6. Parametri skeniranja aluminijskih cilindara.

Parametar	Iznos
Napon, kV	90
Struja, μ A	55
Broj projekcija	1000
Veličina detektora, piksel	3192×2296
Veličina piksela, μ m	127×127
Promjer žarišta zračenja, μ m	4,95

Cilindri su u tijeku skeniranja bili smješteni na posebno oblikovanom postolju čime je omogućen jednak položaj svih cilindara u procesu skeniranja. Za materijal nosača odabran je lako prozračiv polistiren, kako bi se u kasnijem procesu determinacije granične vrijednosti sive skale olakšao proces određivanja površine. U tom slučaju, profil sivih tonova sadrži dva vrha pri čemu se jedan dodjeljuje pozadini, dok drugi predstavlja materijal. Os kojom se definira geometrijsko povećanje dovedena je u položaj u kojem projekcija aluminijskog cilindra zauzima najveću moguću površinu detektora čime je postignuta veličina vokselâ iznosa 9 μm . Rekonstrukcija 3D modela skeniranih cilindara provedena je korištenjem softvera CT-Pro prilikom koje je provedena korekcija utjecaja otvrdnjavanja rendgenskog zračenja matematičkom metodom linearizacije koeficijenata prigušenja prema dosadašnjem iskustvu. Korekcija smanjenja statističkih šumova niskopropusnim filterima nije provedena kako bi se osigurala što oštija slika rubova predmeta. Dimenzionalna analiza cilindara provedena je korištenjem softvera VGStudio MAX. Korištena je lokalna metoda dodjeljivanja površine oblaku točaka, dok je mjerenje provedeno metodom dodjele oblika jednostavne geometrije pri čemu su mjerene dvije značajke; dimenzionalna značajka vanjskog promjera cilindra D_i te geometrijska značajka cilindričnosti vanjskog cilindra.

Površinska hrapavost cilindara mjerena je sukladno zahtjevima norme ISO 4288:1996 [96] te ISO 4287:1997 [97]. Kako se radi o predmetima izrađenim postupkom obrade odvajanjem čestica, tokarenjem, što rezultira periodičkim površinskim profilom, sukladno zahtjevu norme ISO 4288:1996 duljina granične vrijednosti filtera (λ_c) kod određivanja vrijednosti parametara hrapavosti odabrana je s obzirom na iznos parametra srednjeg koraka elemenata profila RS_m . Međutim, kako nazivna duljina cilindra iznosi 15 mm, kod mjerenja parametara hrapavosti cilindra označenog brojem 4, put vrednovanja, kao i iznos granične vrijednosti Gaussova filtera definirani su s obzirom na dostupnu duljinu puta ticala uređaja i dobru mjeriteljsku praksu. Isti pristup preporučuje se i u [98]. Parametri korišteni kod mjerenja hrapavosti dani su tablicom 4-7.

Tablica 4-7. Postavke parametara mjerenja hrapavosti cilindara.

	Cilindar			
	1	2	3	4
λ_c , mm	0,25	0,8	0,8	0,8
l_n , mm	1,25	4,0	4,0	4,0

Pri čemu je:

λ_c mm granična vrijednost filtera

l_n mm duljina vrednovanja hrapavosti.

Analiza rezultata dimenzionalnih mjerenja računalnom tomografijom promatrana je u odnosu na amplitudni parametar hrapavosti Rz koji se definira kao najveća visina profila na referentnoj duljini ispitivanja. Iznosi parametara hrapavosti dani su u tablici 4-8.

Tablica 4-8. Izmjerene vrijednosti površinske hrapavosti cilindara.

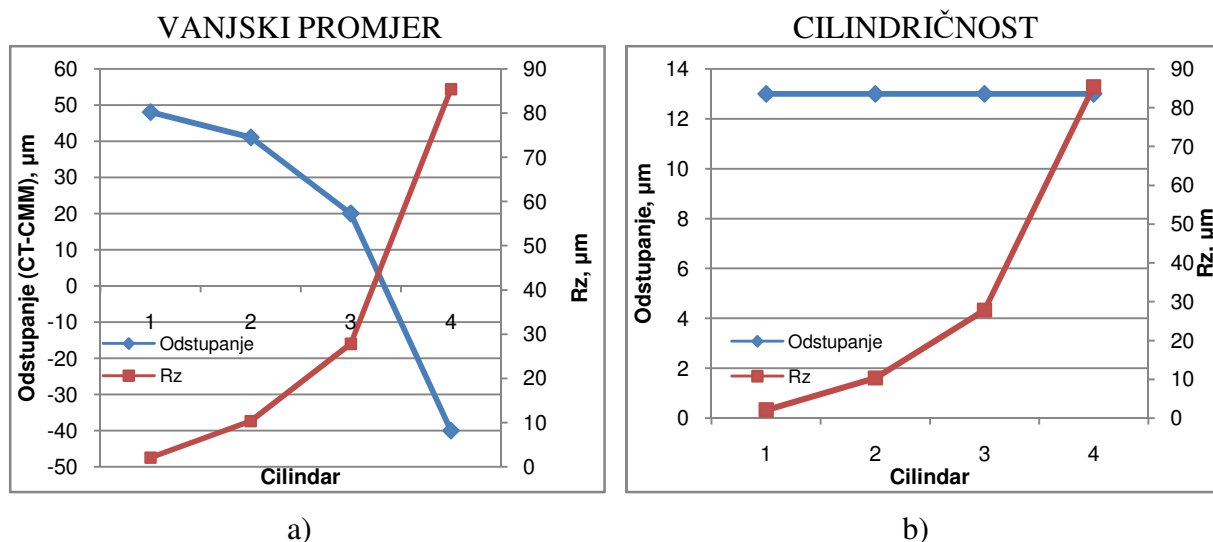
	Cilindar			
	1	2	3	4
$Rz, \mu m$	2,0	10,3	27,8	85,4
RSm, mm	0,049	0,168	0,350	0,557

Rezultati dobiveni računalnom tomografijom promatrani su u odnosu na referentne vrijednosti dobivene ponovljenim mjerenjima kontaktnim mjernim uređajem Tesa Micro Hite 3D. Izmjerene referentne vrijednosti, zajedno s iznosima proširene mjerne nesigurnosti za $k = 2$ i $P = 95 \%$ dane su u tablici 4-9.

Tablica 4-9. Iznosi referentnih vrijednosti cilindara različitih površinskih hrapavosti.

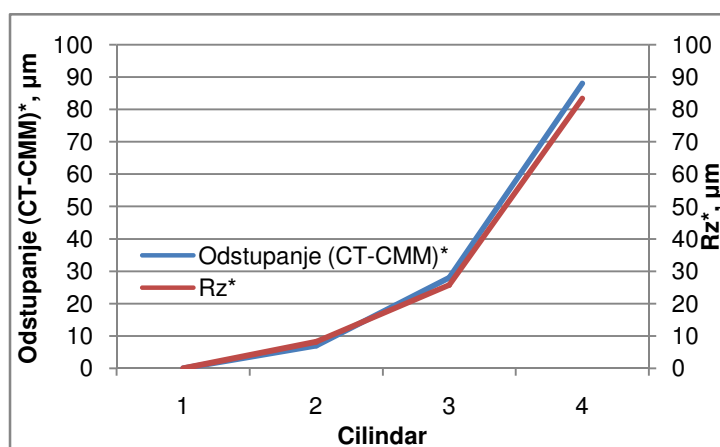
Cilindar	Vanjski promjer, D_x, mm	Proširena mjerna nesigurnost, $U, \mu m$	Cilindričnost, mm	Proširena mjerna nesigurnost, $U, \mu m$
1	11,936	4	0,009	5
2	11,966		0,009	
3	11,964		0,009	
4	12,066		0,009	

Analizom rezultata odstupanja vanjskog promjera aluminijskog cilindra u odnosu na vrijednosti referentnih mjerenja uočena je pravilnost u ponašanju rezultata s obzirom na izmjerenu hrapavost Rz (slika 4-25 a). Kod mjerenja geometrijske značajke cilindričnosti vanjskog cilindra nije uočena zavisnost rezultata u odnosu na iznos površinske hrapavosti Rz (slika 4-25 b) te se iz tog razloga odnos cilindričnosti i površinske hrapavosti neće dalje analizirati.



Slika 4-25. Rezultati dimenzionalnih mjerenja 4 cilindra u odnosu na izmjerenu hrapavost R_z : a) vanjski promjer, b) cilindričnost.

Iz slike 4-25 *a* vidljiva je zrcalna simetričnost između iznosa odstupanja rezultata vanjskog promjera cilindra i iznosa njegove površinske hrapavosti R_z . Kako bi se izdvojio utjecaj površinske hrapavosti na rezultate mjerenja računalnom tomografijom, izvršena je korekcija rezultata. Uz pretpostavku najmanjeg utjecaja hrapavosti na rezultate mjerenja za slučaj cilindra 1 kod kojeg je ukupna visina profila na referentnoj udaljenosti najmanjeg promatranog iznosa ($R_z = 2,06 \mu\text{m}$), dobiveni rezultati za slučaj drugih cilindara korigirani su upravo za iznos odstupanja izmjerene vrijednosti vanjskog cilindra u odnosu na referentnu vrijednost. Slika 4-26 prikazuje odstupanja rezultata vanjskog promjera kao i iznose parametra hrapavosti R_z nakon izvršene korekcije. Koeficijent korelacije za dobivene rezultate iznosi 0,9997.



Slika 4-26. Rezultati dimenzionalnih mjerenja vanjskog promjera 4 cilindra u odnosu na izmjerenu hrapavost R_z nakon izvršene korekcije rezultata.

S obzirom na pravilnost ponašanja rezultata odstupanja iznosa vanjskog promjera u odnosu na iznos površinske hrapavosti R_z , eksperiment je proširen s još četiri cilindra istih nazivnih dimenzija, izrađenih iz istog sirovca pri čemu je postavljen zahtjev za površinskom hrapavošću koja će iznosom pokriti područja između vrijednosti hrapavosti R_z danih tablicom 4-7. Radi lakšeg praćenja ponašanja rezultata novi cilindri, poredani po rastućem iznosu parametra hrapavosti R_z , označeni su redom kao: 1a, 2a, 2b i 3a (slika 4-27).



Slika 4-27. Osam aluminijskih cilindara različitih površinskih hrapavosti.

U ovom slučaju promatrane su samo dimenzionalne vrijednosti vanjskog promjera. Iznosi referentnih mjerenja dani su tablicom 4-10, dok su površinske hrapavosti novih cilindara prikazane u tablici 4-11, proširenoj verziji tablice 4-8.

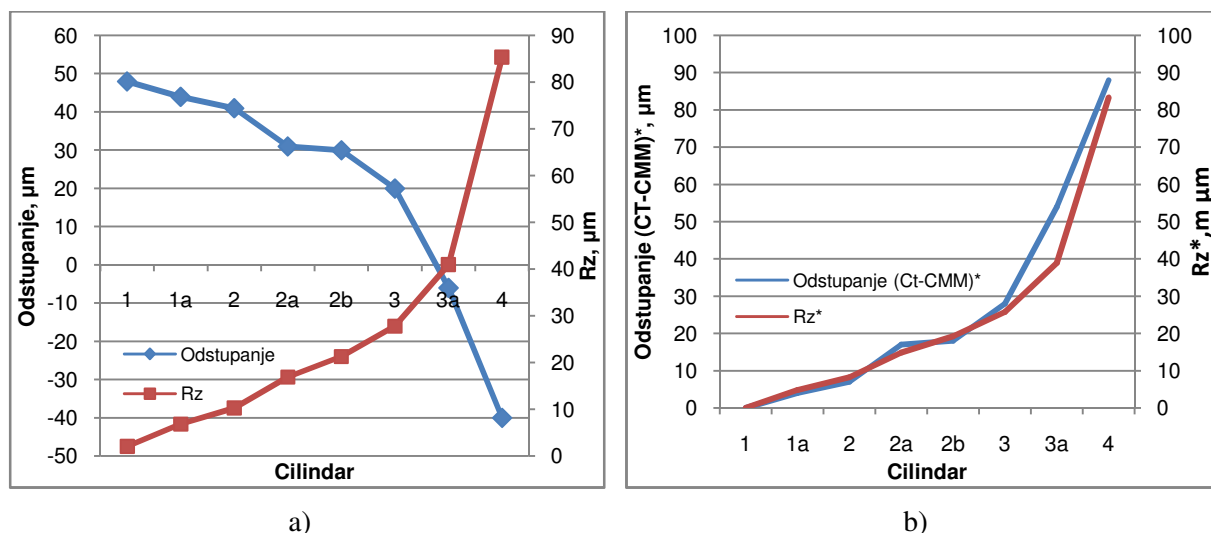
Tablica 4-10. Iznosi referentnih vrijednosti.

Cilindar	Vanjski promjer, D_x , mm	Proširena mjerna nesigurnosti, U , μm
1a	11,958	4
2a	11,995	
2b	11,955	
3a	12,024	

Tablica 4-11. Izmjerene vrijednosti površinske hrapavosti svih cilindara.

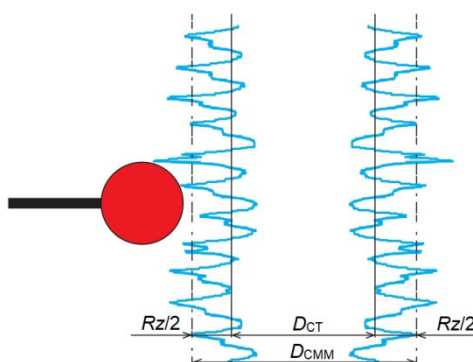
	Cilindar							
	1	1a	2	2a	2b	3	3a	4
R_z , μm	2,0	6,8	10,3	16,9	21,3	27,8	41,0	85,4
R_{Sm} , mm	0,049	0,112	0,168	0,214	0,320	0,350	0,469	0,557

Uključivanjem dodatnih cilindara iznosa površinske hrapavosti koji pokrivaju područje između definiranih hrapavosti danih tablicom 4-8 potvrđen je obrazac ponašanja rezultata dimenzionalnih mjerenja vanjskog promjera u zavisnosti od površinske hrapavosti R_z dobiven u početnom dijelu eksperimenta (Slika 4-28). Uključivanjem nova četiri cilindra, koeficijent korelacije rezultata odstupanja u odnosu na parametar R_z iznosi 0,9877 mm.



Slika 4-28. Rezultati dimenzionalnih mjerenja promjera vanjskog cilindra 8 cilindara u odnosu na izmjerenu hrapavost R_z : a) prije korekcije rezultata, b) nakon korekcije rezultata.

Analizom rezultata mjerenja vanjskog promjera aluminijskih cilindara različitih površinskih hrapavosti utvrđena je funkcijska veza odstupanja rezultata mjerenja i parametra R_z . Kod utvrđivanja veze između rezultata odstupanja dimenzionalnih mjerenja i površinske hrapavosti, iznosi odstupanja izraženi su apsolutnim vrijednostima, a korekcija rezultata provela se u dva smjera: korekcija za iznos početnog odstupanja te za iznos početne hrapavosti. Također, važno je napomenuti kako parametar R_z utječe na rezultat mjerenja vanjskog promjera računalnom tomografijom s polovičnim iznosom sa svake strane, kao što je prikazano na slici 4-29.



Slika 4-29. Utjecaj parametra hrapavosti R_z na rezultate mjerenja vanjskog promjera cilindra.

Iz tog razloga moguće je zaključiti kako cijeli iznos parametra R_z doprinosi odstupanjima rezultata dvosmjernih mjerenja kod mjerenja vanjske i unutarnje geometrije, dok će kod jednosmjernih mjerenja utjecaj hrapavosti na rezultate mjerenja biti u potpunosti isključen.

Sukladno utvrđenom ponašanju, provest će se procjena mjerne nesigurnosti uslijed utjecaja parametra površinske hrapavosti mjerenog predmeta.

4.5 Utjecaj skaliranja i geometrijskog povećanja

4.5.1 Veličina vokseli i utjecajne veličine

S obzirom da je konačan rezultat procesa skeniranja 3D model sastavljen od vokseli, dimenzionalna analiza modela bit će omogućena definiranjem veličine vokseli. Veličina vokseli direktno ovisi o poziciji predmeta na z -osi, odnosno udaljenosti predmeta od izvora zračenja, o udaljenosti između izvora i detektora te o veličini senzora na detektoru i može se izraziti formulom [99]:

$$v_0 = \frac{a}{GP} \quad (4-4)$$

gdje je:

v_0 μm veličina vokseli

a μm veličina senzora na detektoru

GP - geometrijsko povećanje.

Veličina senzora na detektoru je određena izvedbom detektora i ne može se mijenjati. Stoga se može zaključiti kako veličina vokseli isključivo ovisi o geometrijskom povećanju.

Geometrijsko povećanje moguće je definirati kao omjer veličine slike na detektoru i stvarne veličine predmeta pri čemu se iznos geometrijskog povećanja (GP) kod konusnih CT skenera izražava kao omjer udaljenosti od izvora zračenja do detektora (UID) i udaljenosti od izvora zračenja do centra rotacije predmeta mjerenja (UIP) [61]:

$$GP = \frac{UID}{UIP} . \quad (4-5)$$

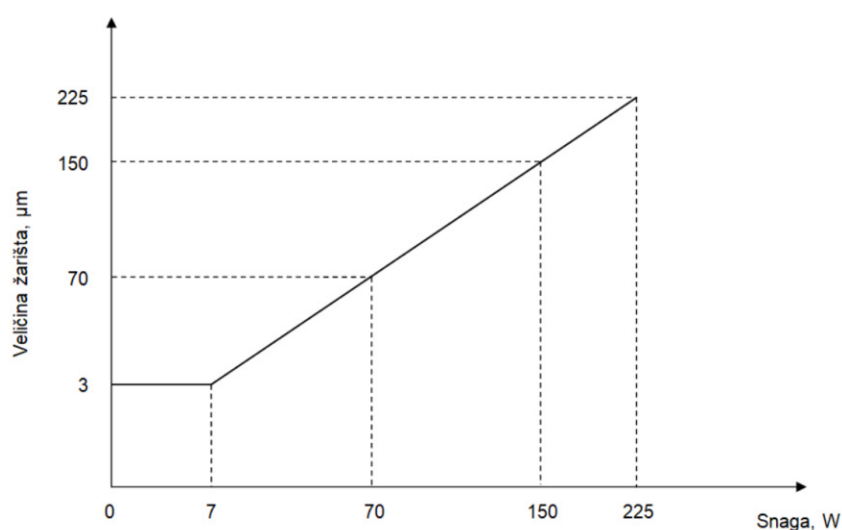
Kako je udaljenost između izvora zračenja i detektora definirana izvedbom CT skenera te se kod industrijskih CT skenera ne može mijenjati, iznos geometrijskog povećanja ovisi isključivo o poziciji predmeta na z -osi, često nazivanoj i os povećanja.

Približavanjem predmeta izvoru zračenja, odnosno povećanjem iznosa geometrijskog povećanja moguće je poboljšati rezoluciju mjerenja. Maksimalno geometrijsko povećanje (GP_{max}) ovisi o veličini predmeta mjerenja te se može definirati kao omjer širine slike predmeta projicirane na detektor ($\check{S}_D$) i najveće dimenzije promatranog predmeta ($\check{S}_p$) kod onog postava CT skeniranja u kojem predmet mjerenja upada u vidno polje detektora i zauzima njegovu najveću površinu, kao što je dano izrazom:

$$GP_{\max} = \frac{\check{s}_D}{\check{s}_P}. \quad (4-6)$$

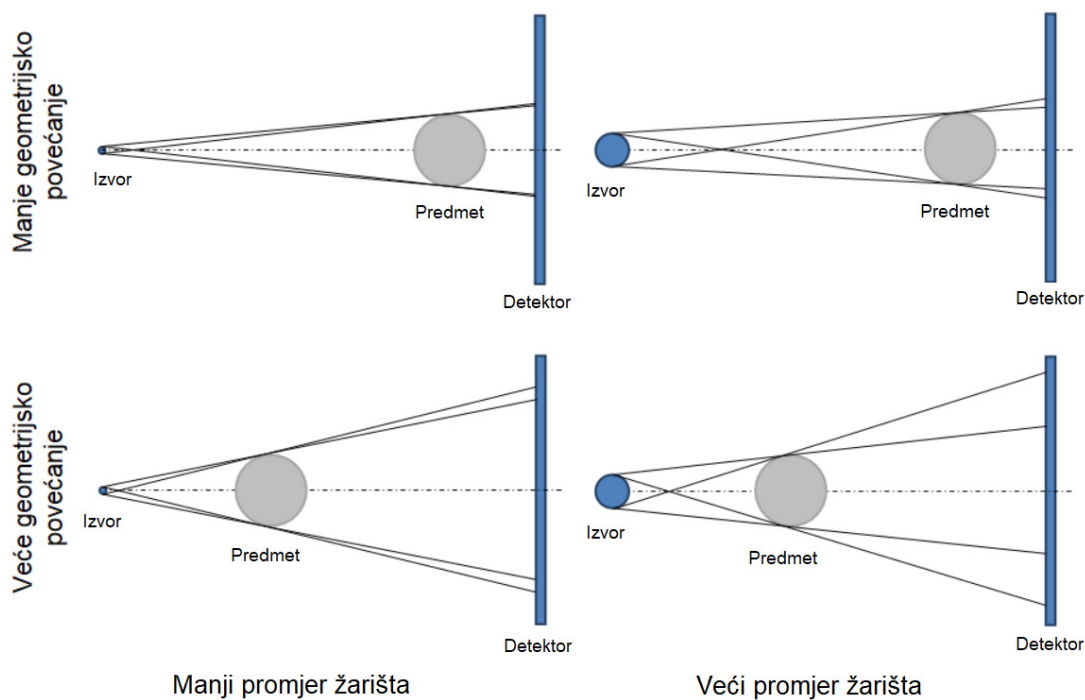
Međutim, u slučaju većeg geometrijskog povećanja javlja se nejasan obris na 2D zapisima koji otežava definiranje ruba predmeta, poznat pod nazivom penumbra efekt tj. efekt polusjene. Pojava efekta polusjene posljedica je konačne veličine žarišta te se očituje pojavom neoštine na rubovima projekcije predmeta.

Idealan slučaj podrazumijeva žarište zanemarivih dimenzija, međutim u procesu provedbe skeniranja, moguća je promjena oblika i veličine žarišta. Konkretno za korišteni uređaj Nikon XT H 225, proizvođač specificira veličinu žarišta s obzirom na snagu rendgenske cijevi kao što je prikazano slikom 4-30 [100].



Slika 4-30. Relacija veličine žarišta i snage izvora zračenja.

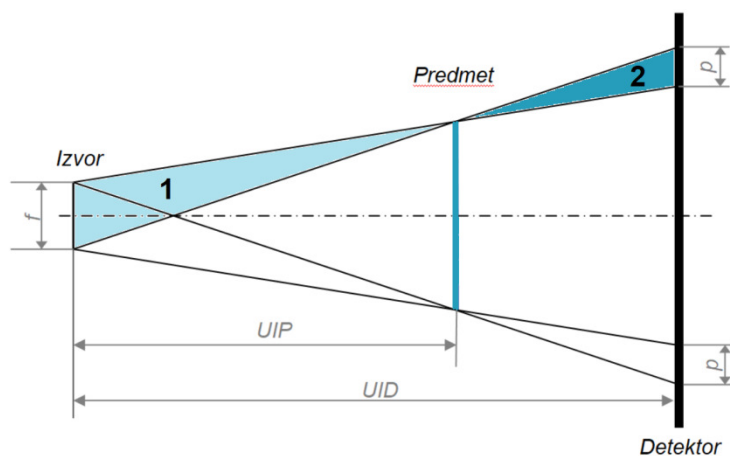
Pojava efekta polusjene potencirana je odabranim geometrijskim povećanjem, pri čemu efekt polusjene više dolazi do izražaja za slučaj većeg geometrijskog povećanja. Slika 4-31 prikazuje utjecaj veličine žarišta i odabranog geometrijskog povećanja na pojavu efekta polusjene.



Slika 4-31. Utjecaj veličine žarišta i odabranog geometrijskog povećanja na pojavu efekta polusjene.

Uzevši u obzir spomenute utjecajne parametre na pojavu efekta polusjene, efekt polusjene moguće je matematički izraziti formulom (4-7) koja slijedi iz sličnosti trokuta 1 i 2 prikazanih slikom 4-32.

$$\frac{p}{f} = \frac{UID - UIP}{UIP} = \frac{UID}{UIP} - 1 = GP - 1. \quad (4-7)$$



Slika 4-32. Efekt polusjene.

Odnosno područje polusjene tj. neoštrina je jednaka:

$$p = f \cdot (GP - 1). \quad (4-8)$$

Smanjenje utjecaja efekta polusjene moguće je postići odabirom manjih snaga izvora rendgenskog zračenja, kao i smanjenjem geometrijskog povećanja. Međutim, manjim snagama izvora zračenja onemogućeno je prozračivanje materijala većih dimenzija i gustoća, dok se smanjenjem geometrijskog povećanja smanjuje razlučivost detalja te povećava utjecaj pojave pogrešaka uslijed raspršenja zraka o čemu je bilo više riječi u poglavlju 2.2.2 *Rekonstrukcija 3D modela*.

U nastavku su dani rezultati utjecaja geometrijskog povećanja na rezultate dimenzionalnih mjerenja.

4.5.1.1 *Utjecaj geometrijskog povećanja na rezultate mjerenja*

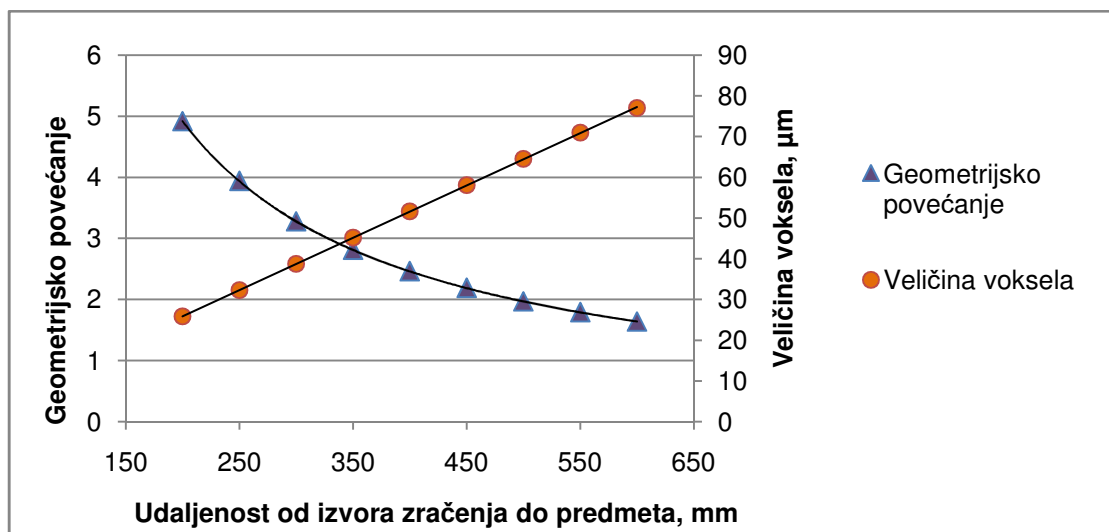
Utjecaj veličine geometrijskog povećanja na rezultate mjerenja istražen je na primjeru aluminijskog cilindra jednostavne geometrije, pri čemu je ispitano ukupno osam različitih iznosa geometrijskog povećanja, odnosno osam različitih udaljenosti predmeta od izvora zračenja. Odabranim parametrima skeniranja ($U_{izv} = 130$ kV, $I_{izv} = 30$ μ A) zabilježeno je 1000 projekcija kasnije korištenih u rekonstrukciji 3D modela. Predmet je u procesu rotacije postavljen na podlogu od lakoprozračivog materijala, polistirena, u blago nagnutu orijentaciju. Osim udaljenosti predmeta od izvora, koja direktno utječe na iznos geometrijskog povećanja, ostali parametri držani su konstantnim za sva stanja istraživanja. Odabrani su takvi parametri izvora zračenja kod kojih je omogućeno prozračivanje predmeta na svim definiranim udaljenostima.

Utjecaj geometrijskog povećanja promatran je na području ukupne udaljenosti od 400 mm pri čemu prva promatrana udaljenost predmeta od izvora zračenja iznosi 200 mm. S obzirom na to da je udaljenost od izvora zračenja do detektora definirana prilikom izvedbe i podešavanja CT sustava te iznosi 984,27 mm, vrijednosti promatranih geometrijskih povećanja, za odabrane udaljenosti predmeta od izvora zračenja, izračunate su korištenjem izraza (4-5) te su dane u tablici 4-12.

Tablica 4-12. Iznosi geometrijskih povećanja.

Parametar	Stanje pokusa/Eksperiment br.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Udaljenost predmeta od izvora zračenja, mm</i>	200	250	300	350	400	450	550	600
<i>Geometrijsko povećanje</i>	4,92	3,94	3,28	2,81	2,46	2,19	1,79	1,64

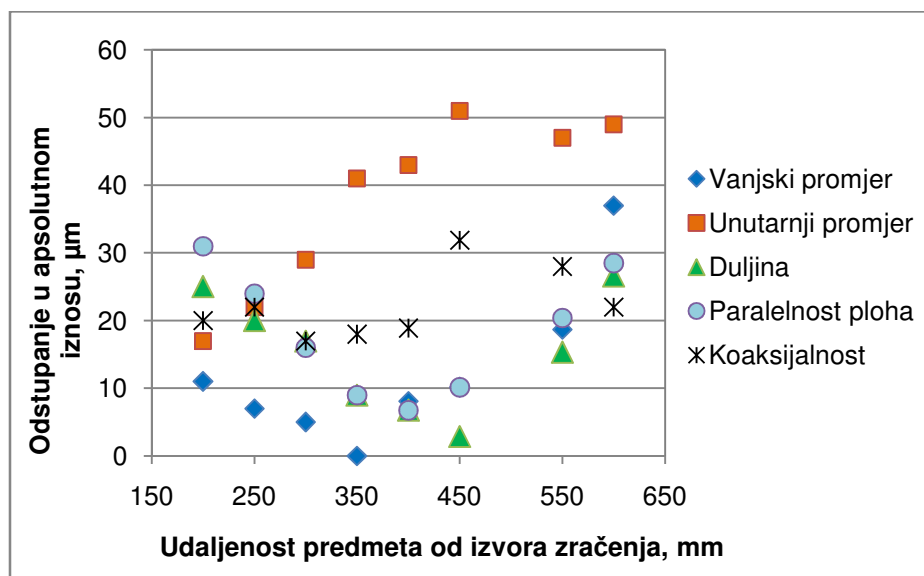
Veličina vokseli izražena je omjerom veličine senzora na detektoru i iznosa geometrijskog povećanja za promatrani slučaj. Za svaki promatrani slučaj veličina vokseli mijenja se s promjenom iznosa geometrijskog povećanja pri čemu se bolja rezolucija modela postiže kod većih iznosa geometrijskog povećanja. Slika 4-33 prikazuje promjenu iznosa veličine vokseli s povećanjem udaljenosti predmeta od izvora zračenja.



Slika 4-33. Ovisnost veličine vokseli i geometrijskog povećanja o udaljenosti predmeta od izvora zračenja.

U procesu rekonstrukcije 3D modela provedena je korekcija artefakata otvrdnjavanja zračenja. Analiza rekonstruiranog modela provedena je korištenjem softverskog paketa VGStudio MAX u kojem je proveden postupak dodjeljivanja površine predmeta globalnom metodom.

Mjerenja su provedena metodom dodjeljivanja oblika jednostavne geometrije 3D modelu, a promatrane su dimenzionalne značajke unutarnjeg i vanjskog promjera cilindra te duljina cilindra, kao i tolerancije odstupanja od paralelnosti ploha te koaksijalnost cilindara. Za korekciju veličine vokseli koristila se udaljenost između centara kuglica referentnog štapića. Skeniranje referentnog štapića provedeno je istovremeno s cilindrom, za svako promatrano geometrijsko povećanje. Odstupanja rezultata mjerenja od referentnih vrijednosti u ovisnosti o geometrijskom povećanju prikazana su slikom 4-34.



Slika 4-34. Odstupanja rezultata mjerenja u ovisnosti o geometrijskom povećanju.

S obzirom na to da se odmicanjem predmeta od izvora zračenja smanjuje geometrijsko povećanje, očekivana su odstupanja koja će iznosom pratiti porast iznosa veličine voksel. Međutim, takvo ponašanje rezultata nije zabilježeno. Odstupanja dobivenih rezultata od referentnih vrijednosti vanjskog promjera, duljine i paralelnosti, za konkretan slučaj mjerenja, zaprimaju najmanje iznose u području između (300-400) mm udaljenosti predmeta od izvora zračenja, dok odstupanja u područjima bližih izvoru, kao i bližih detektoru, iznosom rastu. Veća odstupanja rezultata u područjima većeg iznosa geometrijskog povećanja moguće je pripisati utjecaju pojave efekta polusjene koja otežava određivanje granica između predmeta i pozadine. Za konkretan slučaj, najmanja odstupanja postignuta su za iznose geometrijskog povećanja u rasponu od 3,28-2,46, odnosno u području srednjih geometrijskih povećanja za promatrani CT sustav.

4.5.1.2 Korekcija veličine voksel

Poznavanjem veličine voksel moguće je provesti dimenzionalna mjerenja 3D modela dobivenog procesom računalne tomografije. Međutim, kod CT skenera koji nemaju ugrađenu kompenzaciju pogrešaka pozicioniranja manipulatora, a u ovom slučaju se to najviše odnosi na pozicioniranje z-osi, pojava pogreške veličine voksel (engl. *scaling error*) je prisutna [101]. Pogreška veličine voksel vodila bi do pogrešaka u rezultatima dimenzionalnih mjerenja te se iz tog razloga nužno mora provesti korekcija veličine voksel. CT skeneri bez ugrađenog sustava za kompenzaciju pogrešaka pozicioniranja manipulatora su industrijski CT skeneri, dok su CT skeneri s ugrađenim sustavom za kompenzaciju pogrešaka pozicioniranja poznati pod nazivom mjeriteljski CT skeneri.

Kod mjeriteljskih CT skenera veličinu vokselu određenu prema izrazu (4-4) nije potrebno korigirati, dok se kod industrijskih CT skenera nužno provodi korekcija veličine vokselu, najčešće korištenjem referentnih predmeta za korekciju veličine vokselu detaljnije opisanih u poglavlju 3.1.1 *Referentni predmeti za korekciju veličine vokselu* ili neke od veličina samog predmeta mjerenja poznatog iznosa.

Korekcija veličina vokselu provodi se prema izrazu:

$$v = v_0 \cdot C_s \quad (4-9)$$

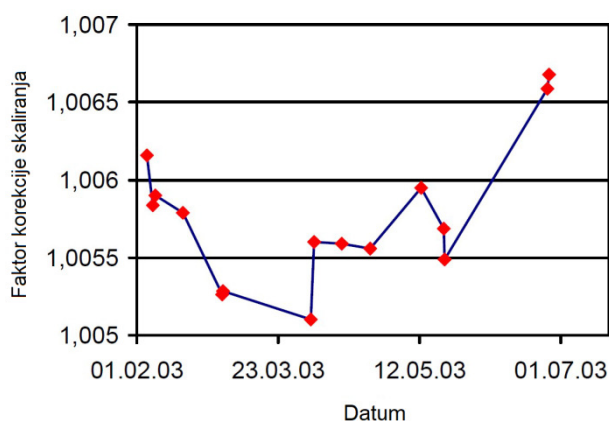
gdje su:

v μm korigirana veličina vokselu
 C_s - faktor korekcije skaliranja

pri čemu se faktor korekcije skaliranja određuje usporedbom poznatog iznosa mjerne veličine, određenog referentnom metodom mjerenja ili, u slučaju korištenja referentnih predmeta, dostupnog kao informacije s umjernice ($l_{\text{referentno}}$), s iznosom iste veličine dobivene mjerenjem 3D modela (l_{CT}):

$$C_s = \frac{l_{\text{referentno}}}{l_{\text{CT}}} . \quad (4-10)$$

Logičan slijed razmišljanja vodi do ideje ispitivanja cijelog mjernog područja z-osi te izračuna faktora korekcije skaliranja za cijelo mjerno područje. Jednom utvrđeni iznosi faktora skaliranja mogu se koristiti u svim kasnijim mjerenjima. Međutim, postavlja se pitanje zašto se to i ne koristi. Razlog leži u činjenici da je CT skener nestabilan sustav te se već u istom danu, samo zbog utjecaja promjene temperature, faktor povećanja može promijeniti, čime se mijenja i veličina vokselu. Nadalje kod pozicioniranja manipulatora može doći do pomaka namještanja u odnosu na softverski definiranu udaljenost, također, moguća je pojava nagiba bilo osi rotacije rotacijskog stola na kojem se nalazi predmet ispitivanja ili u rjeđem slučaju, nagiba detektora čime se unose pogreške u rezultate mjerenja. Nestabilnost sustava utvrđena je u [102] praćenjem iznosa faktora korekcije skaliranja u razdoblju od 5 mjeseci, a utvrđene promjene dane su slikom 4-35.



Slika 4-35. Promjena faktora korekcije skaliranja u razdoblju od 5 mjeseci [102].

Iz navedenih razloga, preporučeni pristup korekcije veličine vokselu podrazumijeva skeniranje referentnog predmeta i prije i poslije skeniranja predmeta od interesa te izračun i odabir aritmetičke sredine dvaju dobivenih faktora korekcije skaliranja kao konačne vrijednosti faktora korekcije skaliranja.

Eksperimentalni dio

Ponavljanjem procesa CT skeniranja u duljem vremenskom periodu za odabrane iste postavke CT skeniranja kao što su napon i jakost struje rendgenske cijevi, geometrijsko povećanje, broj odabranih projekcija, ekspozicija detektora i sl. izmjerene su različite udaljenosti između centara kuglica referentnog štapića za korekciju veličine vokselu. S obzirom na to da se radi o mjerenju jednosmjerne karakteristike koja ne ovisi o eventualnom pogrešnom odabiru granične vrijednosti sive skale, kao i da se radi o lakoprozračivom materijalu koji nije podložan značajnom utjecaju artefakata otvrdnjavanja zračenja, odstupanja u rezultatima udaljenosti između centara kuglica referentnog štapića mogu se u velikoj mjeri pripisati nestabilnosti mjernog sustava. Nestabilnost mjernog sustava očituje se promjenom iznosa udaljenosti između detektora i izvora zračenja (*UID*) u odnosu na umjerenu vrijednost koja se koristi kao referenca za izračun veličine vokselu, kao i odstupanjima kod pozicioniranja predmeta tj. promjena udaljenosti *UIP* u odnosu na softverski definiranu vrijednost.

Kako bi se utvrdio utjecaj korekcije veličine vokselu na rezultate mjerenja, kod odabira z-osi manipulatora iznosa 350 mm, pretpostavljena je promjena definirane udaljenosti na rezultate mjerenja.

Vrijednosti najmanjeg i najvećeg geometrijskog povećanja izračunate su prema izrazu (4-5) pri čemu su iznosi $UID = 984,2712 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ te $UIP = 350 \pm 0,010 \text{ mm}$:

$$GP_{\min} = 2,8990358 , \quad GP_{\max} = 2,8992124 .$$

Za dobivene vrijednosti minimalnog i maksimalnog geometrijskog povećanja te na CT-u izmjerenu duljinu referentnog štapića za veličinu vokselu L_{CT} (uz $GP_{\text{softver}} = 2,8991241$) izračunate su moguće minimalne i maksimalne vrijednosti duljina referentnog štapića prema izrazima:

$$L_{CT\min} = \frac{L_{CT}}{v_o} \cdot \frac{a}{GP_{\max}} , \quad (4-11)$$

$$L_{CT\max} = \frac{L_{CT}}{v_o} \cdot \frac{a}{GP_{\min}} . \quad (4-12)$$

Uz izračunate minimalne i maksimalne vrijednosti duljine referentnog štapića te uz poznatu referentnu vrijednost iz certifikata izračunat je faktor skaliranja prema izrazu (4-10). Dobivene su vrijednosti:

$$Cs_{\min} = 0,9984526 , \quad Cs_{\max} = 0,9985134 .$$

Odnosno za slučaj mjerenja značajki nominalnih iznosa 10 mm, 50 mm i 100 mm dobivene vrijednosti bit će jednake iznosima danim u tablici 4-13.

Tablica 4-13. Analiza izračunatih rezultata uslijed različitih iznosa faktora skaliranja.

Nominalni iznos, mm	Izračunata vrijednost faktora skaliranja, mm		Razlika rezultata, μm
	$Cs_{\min} = 0,9984526$	$Cs_{\max} = 0,9985134$	
10	09,9845	09,9851	0,6
50	49,9226	49,9256	3,0
100	99,8453	99,8513	6,0

Za provedenu analizu mogućih ishoda rezultata mjerenja uslijed različitih mogućih faktora skaliranja nastalih kao posljedice nestabilnosti i nesavršenosti komponenata mjernog uređaja moguća su odstupanja u iznosu 0,6 μm kod mjerenja karakteristika nazivne duljine 10 mm, odnosno 6 μm kod mjerenja karakteristika nazivne duljine 100 mm. Izvedba CT skenera u vidu strožih konstrukcijskih zahtjeva na točnost i preciznost komponenata uređaja omogućit će provedbu točnijih i preciznijih mjerenja.

4.6 Utjecaj korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja prilagodbom koeficijenta prigušenja

Utjecaj artefakata otvrdnjavanja zračenja na rezultate dimenzionalnih mjerenja jest neizbježan, međutim, unatoč širokom opsegu istraživanja još uvijek nije poznat doprinos korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja mjernoj nesigurnosti rezultata mjerenja. Utjecaj artefakata otvrdnjavanja zračenja pripada sustavnim pogreškama mjerenja, a njihovom korekcijom moguće je postići veću točnost rezultata. U cilju određivanja utjecaja neizbježnog procesa otvrdnjavanja rendgenskog zračenja na rezultate dimenzionalnih mjerenja, provedena su istraživanja.

U radu je promatran utjecaj korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja prilagodbom koeficijenta prigušenja na slučaju mjerenja dvaju predmeta značajno različitih gustoća, aluminijskog i polimernog cilindra složene geometrije. Skeniranje svakog od predmeta provedeno je tri puta, a proces rekonstrukcije uključivao je odabir triju opcija kod softverske korekcije utjecaja otvrdnjavanja zračenja. Za odabir iznosa koeficijenta korekcije korišteni su unaprijed postavljeni predlošci korekcije u softveru za rekonstrukciju 3D modela CT-Pro. Softverska korekcija vrijednosti koeficijenta prigušenja rendgenskog zračenja provedena je korištenjem polinomnih funkcija. U tablici 4-14 prikazani su odabrani predlošci s definiranim koeficijentima polinomne funkcije. Oba cilindra skenirana su u nagnutoj orijentaciji, pri čemu su odabrane postavke skeniranja sukladno najboljoj mjeriteljskoj praksi. Korekcija utjecaja artefakata otvrdnjavanja zračenja kod polimernog cilindra provedena je samo softverski, dok se kod aluminijskog cilindra koristila kombinacija spomenute metode i filtriranja rendgenskog zračenja korištenjem bakrenog filtera debljine 3 mm.

Tablica 4-14. Odabrani parametri polinomne funkcije kod prilagodbe koeficijenta prigušenja.

Parametar						
Predložak	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
1	1	0	1	0	0	0
2	1,32	0	0,75	0,25	0	0
3	1,94	0	0,5	0,5	0	0

Analiza utjecaja faktora korekcije otvrdnjavanja zračenja na rezultate mjerenja ispitana je analizom varijance uz vjerojatnost $P = 95 \%$ ($\alpha_{\text{rizik}} = 5 \%$). Postavljena je jednaka nulta hipoteza za oba slučaja mjerenja dimenzionalnih i geometrijskih značajki polimernog i aluminijskog cilindra.

Postavljena nulta i alternativna hipoteza glase:

$$H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2 = \bar{x}_3$$

$$H_1: \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2 \neq \bar{x}_3$$

Na dobivenim podacima proveden je Levenov test uz vjerojatnost $P = 95 \%$ ($\alpha_{\text{rizik}} = 5 \%$), kojim je ispitana homogenost varijanci te je zatim provedena analiza varijanci na rezultatima mjerenja vanjskog promjera, unutarnjih promjera, duljine cilindra, udaljenosti između plohe i centra provrta te osnovog razmaka, ravnosti, paralelnosti, cilindričnosti i koaksijalnosti.

Postavljena nulta i alternativna hipoteza Levenova testa glase:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

Temeljem analize varijance, kod aluminijskog i polimernog cilindra utvrđen je statistički značajan utjecaj provedbe korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja prilagodbom koeficijenata prigušenja za sva mjerenja osim za mjerenja osnovog razmaka i paralelnosti (Tablica 4-15 i 4-16).

ALUMINIJ

Tablica 4-15. Analiza varijance utjecaja korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja prilagodbom koeficijenta prigušenja kod aluminijskog cilindra složene geometrije.

Mjerena veličina, mm	Levenov test	ANOVA	
	<i>p</i> -vrijednost	<i>F</i> -vrijednost	<i>p</i> -vrijednost
<i>D</i>	0,003	227,08	0,000
<i>d</i> ₁	0,018	515,30	0,000
<i>d</i> ₂	0,107	440,22	0,000
<i>L</i>	0,449	358,47	0,000
<i>l</i> ₁	0,007	576,18	0,000
<i>l</i> ₂	0,573	0,38	0,691
Ravnost	0,879	8,14	0,049
Paralelnost	0,986	2,20	0,133
Koaksijalnost	0,962	12,96	0,000
Cilindričnost	0,158	7,30	0,003

POLIMER

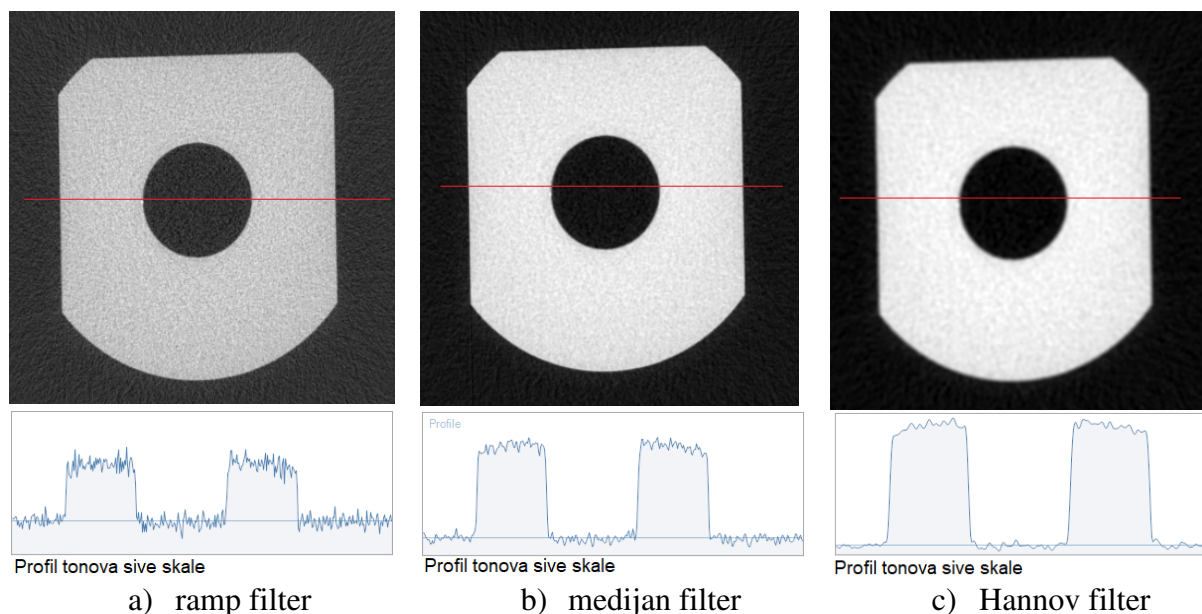
Tablica 4-16. Analiza varijance utjecaja korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja prilagodbom koeficijenta prigušenja kod polimernog cilindra složene geometrije.

Mjerena veličina, mm	<i>Levenov test</i>	<i>ANOVA</i>	
	<i>p</i> -vrijednost	<i>F</i> -vrijednost	<i>p</i> -vrijednost
<i>D</i>	0,001	52,86	0,000
<i>d</i> ₁	0,002	65,99	0,000
<i>d</i> ₂	0,007	76,07	0,000
<i>L</i>	0,000	484,83	0,000
<i>l</i> ₁	0,011	170,98	0,000
<i>l</i> ₂	0,501	1,33	0,282
Ravnost	0,295	10,91	0,000
Paralelnost	0,647	7,14	0,004
Koaksijalnost	0,200	0,08	0,925
Cilindričnost	0,965	1,06	0,361

4.7 Utjecaj primjene filtera za uklanjanje šumova neobrađenih CT podataka

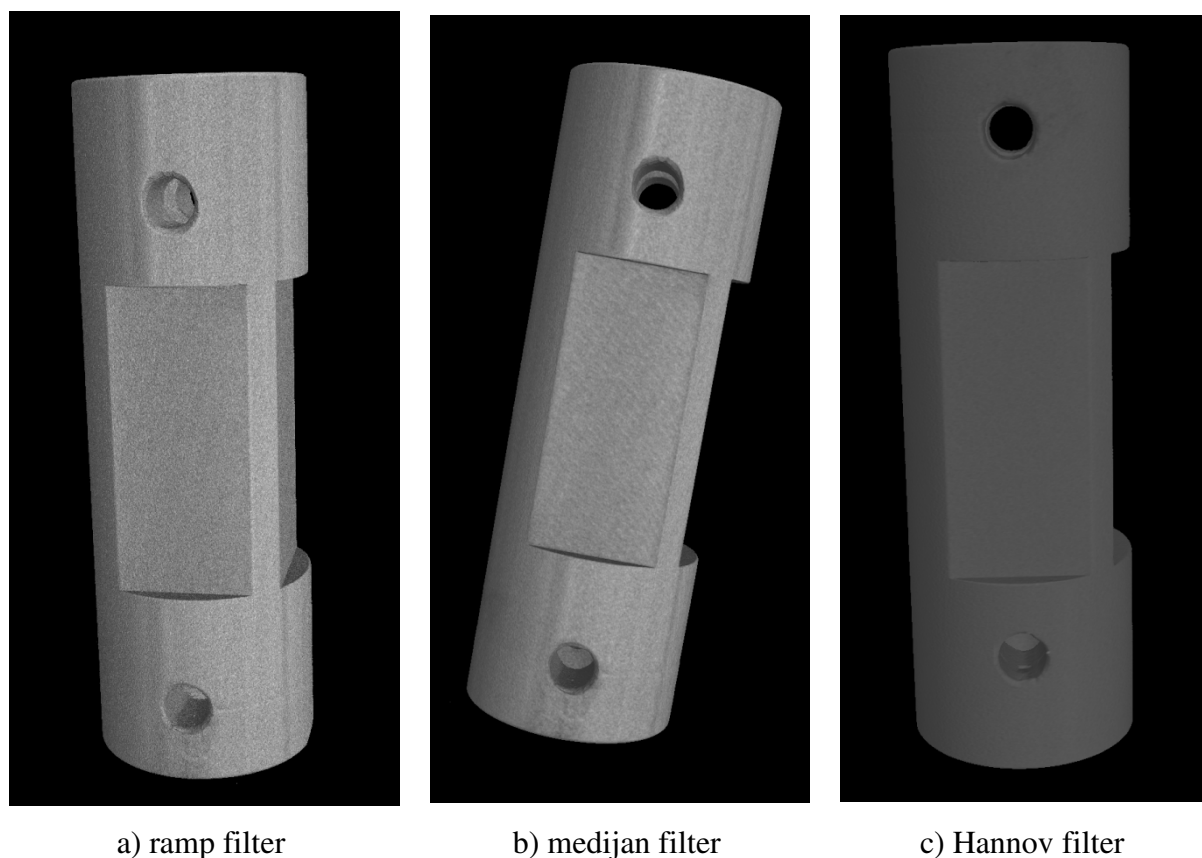
Proces filtriranja podataka sastavni je dio procesa filtrirane povratne projekcije gdje se rekonstrukcija slika temelji na kombinaciji povratne projekcije i visokopropusnog ramp filtera. Upotreba visokopropusnih filtera omogućuje eliminaciju artefakata slike nastalih u procesu rekonstrukcije slika. Međutim upotrebom visokopropusnih filtera do većeg izražaja dolaze šumovi uslijed smanjenja omjera signal-šum.

Slika 4-36 prikazuje utjecaj filtera za uklanjanje šumova na kvalitetu slike kod rekonstrukcije poliamidnog cilindra složene geometrije. Filtriranjem uz korištenje ramp filtera postižu se oštriji rubovi slike, no prisutnost šumova je velika što se vidi iz profila sivih tonova (slika 4-36 a). Niskopropusni filteri, Hannov filter i medijan filter, prigušenjem visokih frekvencija eliminiraju prisutnost šumova čime se za prikazani slučaj postiže veći kontrast na slici vidljiv i iz slika rekonstruiranih presjeka i iz profila sivih tonova kao omjer signal-šum. Primijenjeni Hannov filter u promatranom slučaju gotovo u potpunosti eliminira šumove, međutim njegovo korištenje rezultira pojavom rubova veće neoštine (slika 4-36 c). Medijan filter se u ovom slučaju pokazao kao kompromisno rješenje za smanjenje šumova pri čemu se značajno ne narušava oština rubova (slika 4-36 b).



Slika 4-36. Primjer utjecaja visoko i niskopropusnih filtera na kvalitetu slike kod rekonstrukcije poliamidnog cilindra složene geometrije.

Na slici 4-37 prikazani su dobiveni modeli kao rezultat odabranih filtera kod eliminacije šumova prilikom rekonstrukcije poliamidnog cilindra složene geometrije.



Slika 4-37. Primjer utjecaja visokopropusnog i niskopropusnih filtera na izgled 3D modela poliamidnog cilindra složene geometrije.

Kako bi se ispitao utjecaj filtriranja CT neobrađenih podataka (engl. *raw data*) niskopropusnim filterima, provedena su eksperimentalna istraživanja na dva primjera. Smanjenje šumova na slikama provedeno je korištenjem dvaju filtera: Hannova filtera i medijan filtera kod rekonstrukcije modela aluminijskog i poliamidnog cilindra složene geometrije. Utjecaj odabranih filtera u svim slučajevima promatran je na primjerima dimenzionalnih karakteristika vanjskog promjera D , unutarnjih promjera d_1 i d_2 , duljine cilindra L i udaljenosti l_1 i l_2 , te geometrijskih karakteristika ravnosti, paralelnosti, cilindričnosti i koaksijalnosti. Provedba filtriranja Hannovim filterom promatrana je za dvije granične frekvencije: 25 % i 50 %, dok je filtriranje medijan filterom provedeno variranjem broja susjednih piksela na temelju kojih je izračunat medijan profila sivih tonova. Broj variranih susjednih piksela iznosio je 9 (3×3), odnosno 25 (5×5). Sve statističke analize provedene su uz vjerojatnost $P = 95 \%$ ($\alpha_{\text{rizik}} = 5 \%$).

Utjecaj filtera na rezultate mjerenja značajki polimernog i aluminijskog cilindra složene geometrije analiziran je na modelima rekonstruiranim prema parametrima danim u tablici 4-17. Odabrani parametri definirani su dostupnim obrascima rekonstrukcije u softveru CT-Pro.

Tablica 4-17. Parametri filtera korišteni kod rekonstrukcije modela polimernog i aluminijskog cilindra složene geometrije.

Filter	Parametar	Model								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hann	Postavka granične frekvencije	-	-	-	25 %	25 %	25 %	50 %	50 %	50 %
Medijan	Broj susjednih piksela	-	3×3	5×5	-	3×3	5×5	-	3×3	5×5

ALUMINIJ

Provedena je analiza varijance utjecaja filtera za uklanjanje šumova na rezultatima mjerenja aluminijskog cilindra složene geometrije pri čemu je utvrđena statistički značajna razlika između rezultata mjerenja geometrijskih karakteristika s obzirom na odabir različitih parametara niskopropusnih filtera u procesu rekonstrukcije slike ($p < 0,05$). Kod mjerenja dimenzionalnih karakteristika nije utvrđena statistički značajna razlika između rezultata mjerenja na modelima ($p > 0,05$) s obzirom na odabir različitih parametara niskopropusnih filtera u procesu rekonstrukcije slike. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4-18.

Tablica 4-18. Rezultati analize varijance utjecaja Hannova i medijan filtera za uklanjanje statističkih šumova kod aluminijskog cilindra.

Mjerena veličina, mm	<i>F</i> -vrijednost	<i>p</i> -vrijednost
<i>D</i>	0,13	0,734
<i>d</i> ₁	0,07	0,796
<i>d</i> ₂	0,03	0,868
<i>L</i>	0,06	0,820
<i>l</i> ₁	0,11	0,750
<i>l</i> ₂	0,01	0,905
Ravnost	6,50	0,021
Paralelnost	7,65	0,003
Koaksijalnost	6,24	0,024
Cilindričnost	5,22	0,013

Analizirani su podaci dobiveni korištenjem Hannova filtera za odabrane dvije vrijednosti granične frekvencije filtera f_m (25 % i 50 %) pri čemu nije utvrđena značajna razlika između graničnih vrijednosti. Kod provedbe filtracije podataka medijan filterom variran je broj susjednih piksela na temelju kojih je izračunat medijan profila sivih tonova pri čemu je broj piksela u prvom slučaju iznosio 9 (3x3), a u drugom 25 (5x5). Dobiveni podaci ne ukazuju na postojanje statistički značajne razlike.

POLIMER

Analiza varijance utjecaja filtera za uklanjanje šumova provedena je i na rezultatima mjerenja polimernog cilindra složene geometrije pri čemu nije utvrđeno postojanje statistički značajnih razlika između rezultata dimenzionalnih i geometrijskih karakteristika s obzirom na odabir različitih parametara niskopropusnih filtera u procesu rekonstrukcije slike ($p > 0,05$).

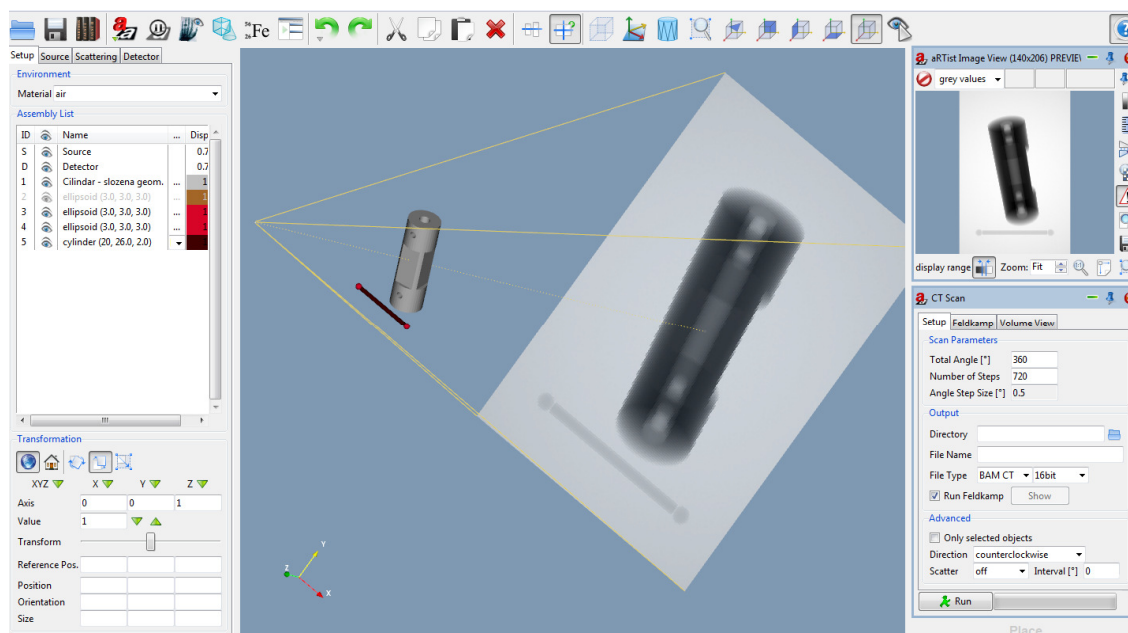
5. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI

Procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja značajki cilindra složene geometrije provedena je sukladno normi ISO 15530-3:2011 odnosno smjernicama *VDI/VDE 2630 Part 2.1*, te kombinacijom metode Monte Carlo sukladno normi JCGM 101:2008 [103] i virtualnog CT sustava korištenjem softverskog paketa *aRTist*.

5.1 Procjena mjerne nesigurnosti kombinacijom metode Monte Carlo i virtualnog CT sustava

Korištenje virtualnih CMM uređaja prepoznat je pristup kod procjene mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja složenim trokoordinatnim metodama [104-106]. Numerička procjena mjerne nesigurnosti kontaktnih trokoordinatnih uređaja korištenjem virtualnih CMM (VCMM) uređaja prihvaćana je metoda procjene u akreditiranim laboratorijima [104], a isti pristup kod procjene mjerne nesigurnosti CT mjerenja koriste i autori Hiller [70], Helmecke [104, 107] i Hilpert [108]. Pristup podrazumijeva provedbu simulacije procesa mjerenja što je realnije moguće, odnosno u procesu simulacije važno je stvoriti stanje koje što vjernije odgovara stvarnom stanju mjernog sustava.

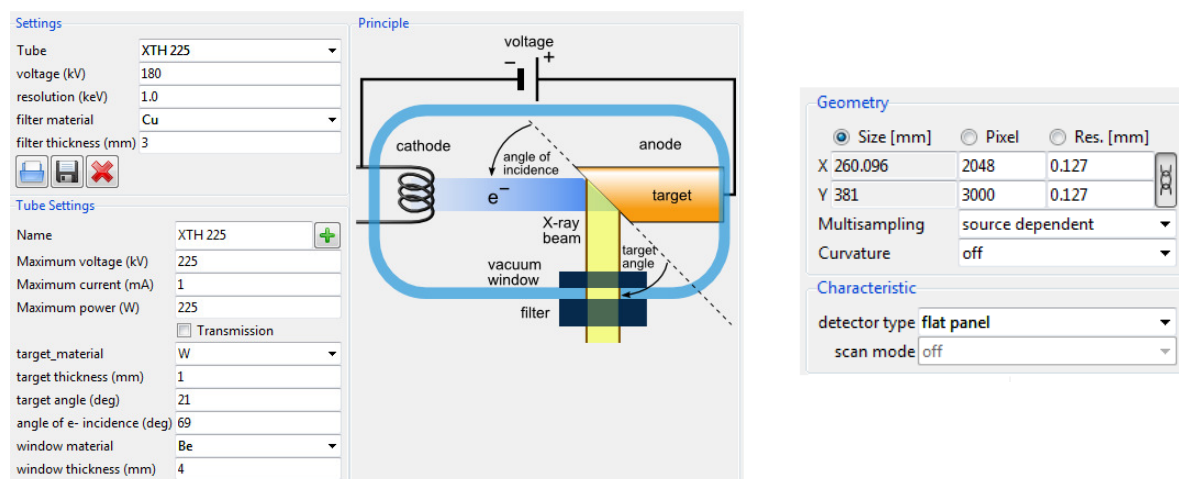
Simulacija mjerenja provedena je na CAD modelu cilindra složene geometrije korištenjem softvera *aRTist*. Izgled simuliranog CT sustava dan je slikom 5-1.



Slika 5-1. Simulacija procesa skeniranja virtualnim CT sustavom. Slika je generirana korištenjem softvera *aRTist*.

Virtualna CT mjerenja provedena su u dva koraka, skeniranje CAD modela u virtualnom mjernom sustavu te provedba dimenzionalnih mjerenja na dobivenom 3D modelu. Korištena su dva softvera; *aRTist* za provedbu skeniranja i generiranja 3D modela te VGStudio MAX za provedbu dimenzionalnih mjerenja (slika 4-1).

Odabrane su postavke geometrije virtualnog mjernog sustava, karakteristika rendgenske cijevi te oblika i veličine detektora koje odgovaraju stvarnom stanju dostupnog CT uređaja (slika 5-2).



Postavke izvora zračenja

Postavke detektora

Slika 5-2. Postavke virtualnog CT sustava. Slika je generirana korištenjem softvera *aRTist*.

Postavke procesa skeniranja odabrane su sukladno provedenim istraživanjima iz poglavlja 4. *Eksperimentalna istraživanja*.

S obzirom na prisutnost velikog broja utjecajnih parametara u procesu mjerenja računalnom tomografijom, u provedenim procesima skeniranja simulirana su moguća stanja uzrokovana nesavršenošću sustava. Provedeno je trideset simulacija procesa skeniranja aluminijskog i trideset simulacija procesa skeniranja polimernog cilindra složene geometrije zajedno sa štapićem korištenim za korekciju veličine voksel (slika 5-1). U provedenim simulacijama procesa naizmjenično su uključivane pogreške mjernog sustava uzrokovane nesavršenošću geometrije CT skenera (nagib detektora oko osi x za $\pm 0,01$ mm, pomicanje izvora i detektora po osima x i y u odnosu na idealno stanje za iznose $\pm 0,001$ mm, te pomicanje predmeta u odnosu na definirano stanje po svim osima za iznos $\pm 0,01$ mm). Vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih devijacija rezultata dobivenih mjerenjima simuliranih modela korištene su za numeričku procjenu mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja polimernog i aluminijskog cilindra složene geometrije sukladno JCGM 101:2008.

Procjena mjerne nesigurnosti metodom Monte Carlo izvršena je primjenom računalnog programa *Mathcad* – probna verzija. Funkcije gustoće vjerojatnosti izlaznih veličina dobivene su konvolucijom razdioba ulaznih veličina uz $M = 100000$ simulacija.

5.1.1 Procjena mjerne nesigurnosti MCS metodom za aluminijski cilindar

VANJSKI PROMJER

Uvođenjem utjecajnih veličina u postupku mjerenja vanjskog promjera aluminijskog cilindra postavljen je matematički model prema izrazu (5-1):

$$D = D_0 \cdot \frac{L_{sref}}{L_{sCT}} - x_{tresh.} - \alpha_p \cdot \Delta t_p \cdot D_{nom} - Rz_p . \quad (5-1)$$

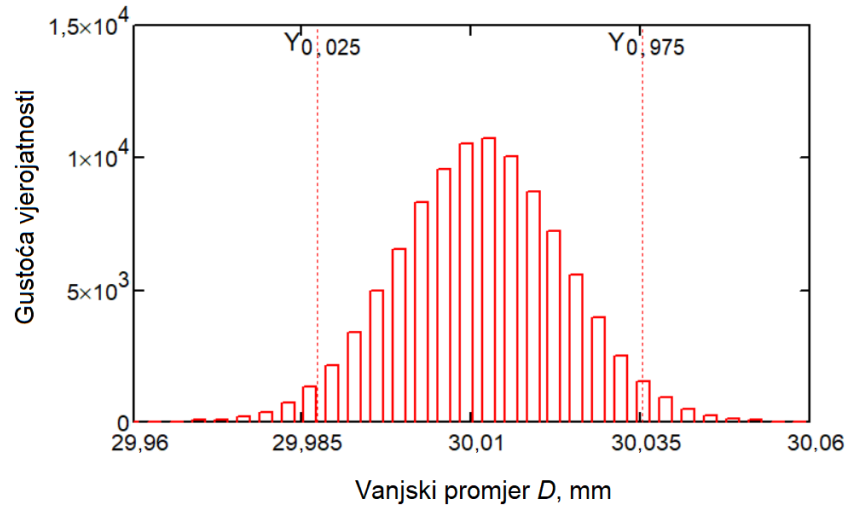
Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine D simulirana je MCS metodom na osnovu izraza (5-1). Ulazne veličine x_i za vanjski promjer D definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5-1.

Vrijednosti standardnih devijacija prikazanih u tablici 5-1 dobivene su iz rezultata mjerenja na simuliranim 3D modelima aluminijskog cilindra složene geometrije. Procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja provedena je za mjerenja u industrijskim uvjetima kod promjene temperature u iznosu od ± 3 °C u odnosu na zahtijevanih 20 °C. Parametar hrapavosti predmeta određen je ponovljenim mjerenjima uzorka sukladno zahtjevima norme ISO 4288:1996.

Tablica 5-1. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine D aluminijskog cilindra složene geometrije.

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Vanjski promjer izmjeren na 3D CT modelu prije korekcije skaliranja	D_0	Normalna razdioba ($M; D_0, 0,006$ mm)
Referentna vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sref}	Normalna razdioba ($M; 60,0288$ mm, 0,0008 mm)
Vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sCT}	Normalna razdioba ($M; L_{sCT}, 0,014$ mm)
Utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale	x_{tresh}	Normalna razdioba ($M; 0$ mm, 0,008 mm)
Koeficijent temperaturnog rastezanja predmeta mjerenja	α_p	Pravokutna razdioba ($M; 21 \cdot 10^{-6} K^{-1}; 24 \cdot 10^{-6} K^{-1}$)
Razlika temperature predmeta mjerenja od 20 °C	Δt_p	Pravokutna razdioba ($M; 0$ °C; 6 °C)
Nazivni promjer	D_{nom}	30 mm
Parametar hrapavosti Rz predmeta mjerenja	Rz_p	Pravokutna razdioba ($M; 0,001$ mm, 0,003 mm)

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(D)$ dobivena je uz $M = 100000$ simulacija. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine D aluminijskog cilindra složene geometrije prikazana je slikom 5-3.



Slika 5-3. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(D)$ vanjskog promjera aluminijskog cilindra složene geometrije.

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine D aluminijskog cilindra složene geometrije iznosi 12 μm . Izlazna veličina D nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 29,9874 \text{ mm}; Y_{0,975} = 30,0354 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95 \text{ \%}.$$

UNUTARNJI PROMJER

Uvođenjem utjecajnih veličina u postupku mjerenja unutarnjeg promjera aluminijskog cilindra postavljen je matematički model prema izrazu (5-2):

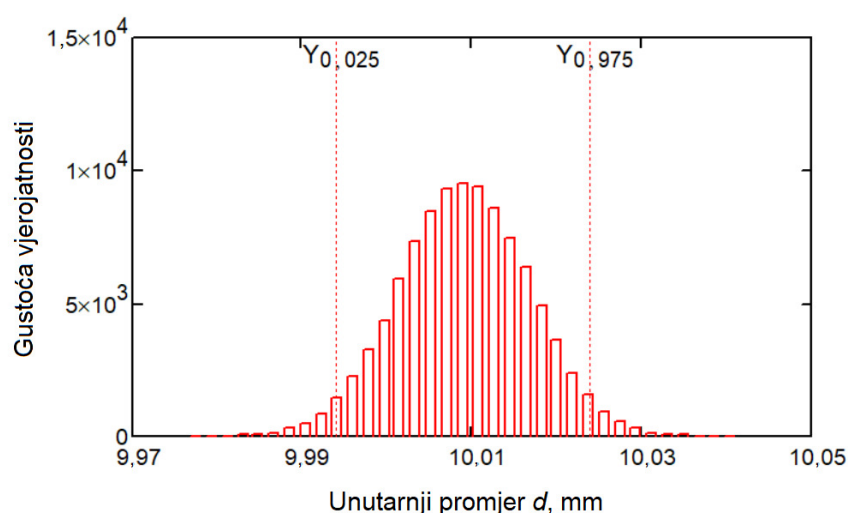
$$d_3 = d_0 \cdot \frac{L_{\text{sref}}}{L_{\text{SCT}}} - x_{\text{tresh.}} - \alpha_p \cdot \Delta t_p \cdot d_{\text{nom}} - Rz_p. \quad (5-2)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine d_3 simulirana je MCS metodom na osnovu izraza (5-2). Ulazne veličine x_i za unutarnji promjer d_3 definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5-2.

Tablica 5-2. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine d_3 aluminijskog cilindra složene geometrije.

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Promjer izmjeren na 3D CT modelu prije korekcije skaliranja	d_0	Normalna razdioba ($M; d_0, 0,007$ mm)
Referentna vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sref}	Normalna razdioba ($M; 60,0288$ mm, $0,0008$ mm)
Vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sCT}	Normalna razdioba ($M; L_{sCT}, 0,014$ mm)
Utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale	x_{tresh}	Normalna razdioba ($M; 0$ mm, $0,002$ mm)
Koeficijent temperaturnog rastezanja predmeta mjerenja	α_p	Pravokutna razdioba ($M; 21 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}; 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
Razlika temperature predmeta mjerenja od 20°C	Δt_p	Pravokutna razdioba ($M; 0^\circ\text{C}; 6^\circ\text{C}$)
Nazivni promjer	d_{nom}	10 mm
Parametar hrapavosti R_z predmeta mjerenja	R_{zp}	Pravokutna razdioba ($M; 0,001$ mm, $0,003$ mm)

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(d_3)$ dobivena je uz $M = 100000$ simulacija. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine unutarnjeg promjera d_3 aluminijskog cilindra složene geometrije prikazana je slikom 5-4.



Slika 5-4. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(d_3)$ unutarnjeg promjera aluminijskog cilindra složene geometrije.

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine d_3 aluminijskog cilindra složene geometrije iznosi $8 \mu\text{m}$. Izlazna veličina d_3 nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 9,9941 \text{ mm}; Y_{0,975} = 10,0241 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95 \text{ \%}.$$

DULJINA CILINDRA

Uvođenjem utjecajnih veličina u postupku mjerenja duljine aluminijskog cilindra postavljen je matematički model prema izrazu (5-3):

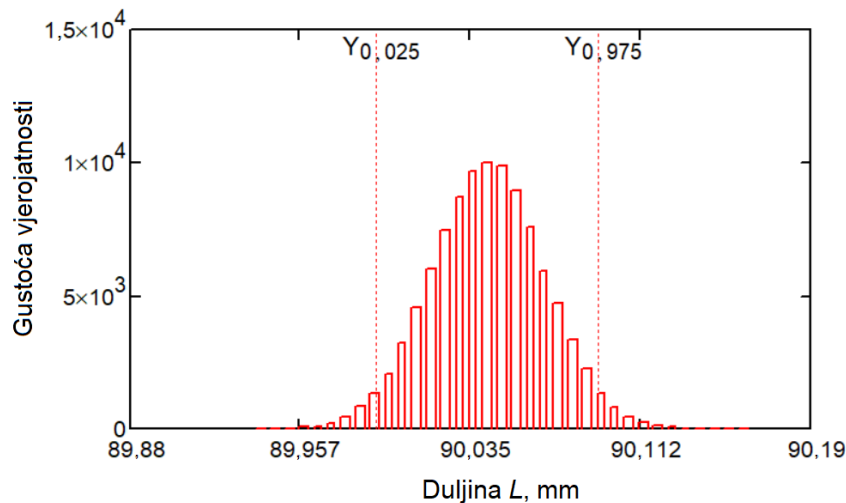
$$L = L_0 \cdot \frac{L_{sref}}{L_{sCT}} - x_{tresh.} - \alpha_p \cdot \Delta t_p \cdot L_{nom} - Rz_p . \quad (5-3)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine L simulirana je MCS metodom na osnovu izraza (5-3). Ulazne veličine x_i za duljinu cilindra L definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5-3.

Tablica 5-3. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine L aluminijskog cilindra složene geometrije.

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Duljina izmjerena na 3D CT modelu prije korekcije skaliranja	L_0	Normalna razdioba ($M; L_0, 0,012 \text{ mm}$)
Referentna vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sref}	Normalna razdioba ($M; 60,0288 \text{ mm}, 0,0008 \text{ mm}$)
Vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sCT}	Normalna razdioba ($M; L_{sCT}, 0,014 \text{ mm}$)
Utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale	x_{tresh}	Normalna razdioba ($M; 0 \text{ mm}, 0,008 \text{ mm}$)
Koeficijent temperaturnog rastezanja predmeta mjerenja	α_p	Pravokutna razdioba ($M; 21 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}; 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
Razlika temperature predmeta mjerenja od $20 \text{ }^\circ\text{C}$	Δt_p	Pravokutna razdioba ($M; 0 \text{ }^\circ\text{C}; 6 \text{ }^\circ\text{C}$)
Nazivna duljina	L_{nom}	90 mm
Parametar hrapavosti Rz predmeta mjerenja	Rz_p	Pravokutna razdioba ($M; 0,001 \text{ mm}, 0,003 \text{ mm}$)

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(L)$ dobivena je uz $M = 100000$ simulacija. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine duljine L aluminijskog cilindra složene geometrije prikazana je slikom 5-5.



Slika 5-5. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L)$ duljine aluminijskog cilindra složene geometrije.

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine L aluminijskog cilindra složene geometrije iznosi 26 μm . Izlazna veličina L nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 89,9927 \text{ mm}; Y_{0,975} = 90,0934 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95 \text{ \%}.$$

DULJINA l_3

Uvođenjem utjecajnih veličina u postupku mjerenja duljine l_3 aluminijskog cilindra postavljen je matematički model prema izrazu (5-4):

$$l_3 = l_0 \cdot \frac{L_{\text{sref}}}{L_{\text{SCT}}} - \frac{x_{\text{tresh.}}}{2} - \alpha_p \cdot \Delta t_p \cdot l_{\text{nom}} - \frac{Rz_p}{2}. \quad (5-4)$$

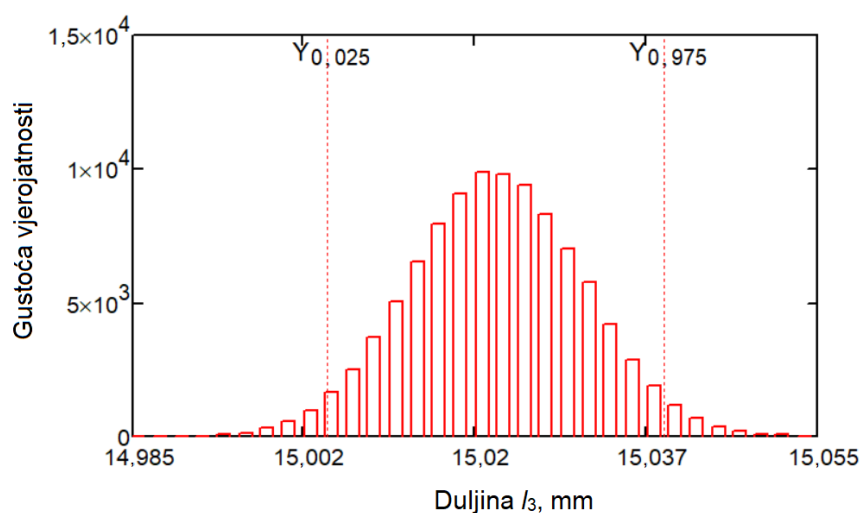
Duljina l_3 definirana je kao udaljenost između plohe B i centra provrta d_2 (slika 4-4), pri čemu je utjecaj hrapavosti prisutan jedino kod definiranja plohe B. Iz tog razloga je u postavljenom matematičkom modelu (5-4) utjecaj hrapavosti na rezultat mjerenja uzet u obzir u polovičnom iznosu.

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine l_3 simulirana je MCS metodom na osnovu izraza (5-4). Ulazne veličine x_i za duljinu l_3 definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5-4.

Tablica 5-4. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine l_3 aluminijskog cilindra složene geometrije.

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Duljina izmjerena na 3D CT modelu prije korekcije skaliranja	l_0	Normalna razdioba ($M; l_0, 0,007 \text{ mm}$)
Referentna vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sref}	Normalna razdioba ($M; 60,0288 \text{ mm}, 0,0008 \text{ mm}$)
Vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sCT}	Normalna razdioba ($M; L_{\text{sCT}}, 0,014 \text{ mm}$)
Utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale	x_{tresh}	Normalna razdioba ($M; 0 \text{ mm}, 0,008 \text{ mm}$)
Koeficijent temperaturnog rastezanja predmeta mjerenja	α_p	Pravokutna razdioba ($M; 21 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}; 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
Razlika temperature predmeta mjerenja od $20 \text{ }^\circ\text{C}$	Δt_p	Pravokutna razdioba ($M; 0 \text{ }^\circ\text{C}; 6 \text{ }^\circ\text{C}$)
Nazivna duljina	l_{nom}	15 mm
Parametar hrapavosti R_z predmeta mjerenja	R_{z_p}	Pravokutna razdioba ($M; 0,001 \text{ mm}, 0,003 \text{ mm}$)

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(l_3)$ dobivena je uz $M = 100000$ simulacija. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine duljine l_3 aluminijskog cilindra složene geometrije prikazana je slikom 5-6.



Slika 5-6. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(l_3)$ duljine l_3 aluminijskog cilindra složene geometrije.

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine l_3 aluminijskog cilindra složene geometrije iznosi $9 \text{ }\mu\text{m}$. Izlazna veličina l_3 nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 15,0049 \text{ mm}; Y_{0,975} = 15,0393 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95 \text{ } \%$$

DULJINA l_2 – osni razmak

Uvođenjem utjecajnih veličina u postupku mjerenja duljine osnog razmaka aluminijskog cilindra postavljen je matematički model prema izrazu (5-5):

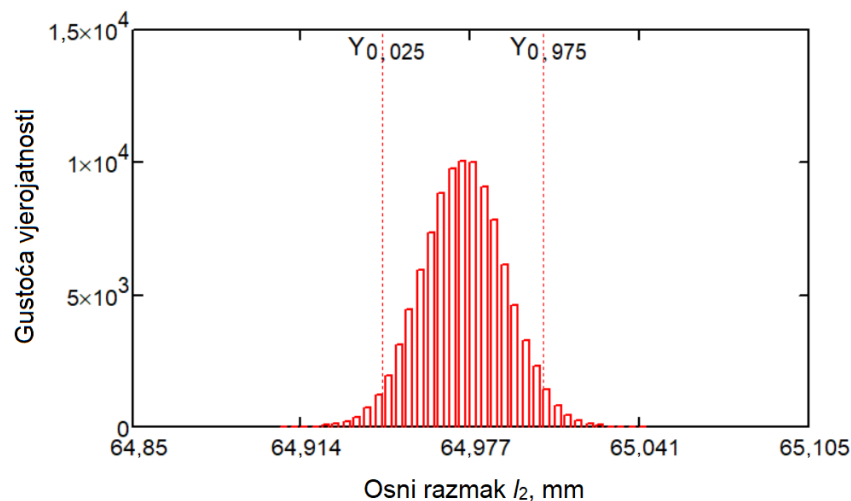
$$l_2 = l_0 \cdot \frac{L_{sref}}{L_{sCT}} - x_{tresh} - \alpha_p \cdot \Delta t_p \cdot l_{nom} - Rz_p . \quad (5-5)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine osnog razmaka l_2 simulirana je MCS metodom na osnovu izraza (5-5). Ulazne veličine x_i za osni razmak l_2 definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5-5. S obzirom da se radi o veličini definiranoj jednosmjernim mjerenjima, utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale kao i utjecaj hrapavosti na rezultate mjerenja je zanemariv.

Tablica 5-5. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine l_2 aluminijskog cilindra složene geometrije.

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Duljina izmjerena na 3D CT modelu prije korekcije skaliranja	l_0	Normalna razdioba ($M; l_0, 0,003 \text{ mm}$)
Referentna vrijednost osnog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sref}	Normalna razdioba ($M; 60,0288 \text{ mm}, 0,0008 \text{ mm}$)
Vrijednost osnog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sCT}	Normalna razdioba ($M; L_{sCT}, 0,014 \text{ mm}$)
Utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale	x_{tresh}	Zanemarivo
Koeficijent temperaturnog rastezanja predmeta mjerenja	α_p	Pravokutna razdioba ($M; 21 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}; 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
Razlika temperature predmeta mjerenja od $20 \text{ }^\circ\text{C}$	Δt_p	Pravokutna razdioba ($M; 0 \text{ }^\circ\text{C}; 6 \text{ }^\circ\text{C}$)
Nazivna duljina	l_{nom}	65 mm
Parametar hrapavosti Rz predmeta mjerenja	Rz_p	Zanemarivo

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(l_2)$ dobivena je uz $M = 100000$ simulacija. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine osnog razmaka l_2 aluminijskog cilindra složene geometrije prikazana je slikom 5-7.



Slika 5-7. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(l_2)$ osnov razmaka aluminijskog cilindra složene geometrije.

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine l_2 aluminijskog cilindra složene geometrije iznosi 16 μm . Izlazna veličina l_2 nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 64,9443 \text{ mm}; Y_{0,975} = 65,0055 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95 \text{ \%}.$$

5.1.2 Procjena mjerne nesigurnosti MCS metodom za polimerni cilindar

VANJSKI PROMJER

Uvođenjem utjecajnih veličina u postupku mjerenja vanjskog promjera polimernog cilindra postavljen je matematički model prema izrazu (5-6):

$$D = D_0 \cdot \frac{L_{\text{sref}}}{L_{\text{sCT}}} - x_{\text{tresh.}} - \alpha_p \cdot \Delta t_p \cdot D_{\text{nom}} - Rz_p. \quad (5-6)$$

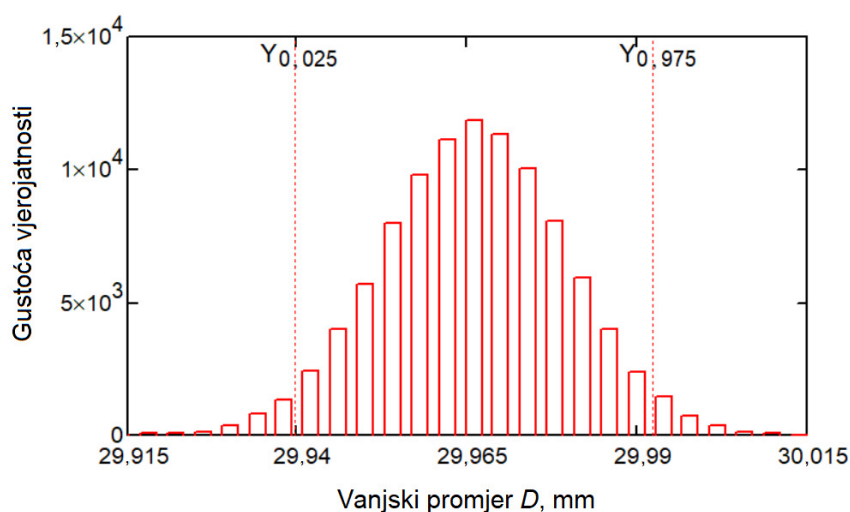
Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine D simulirana je MCS metodom na osnovu izraza (5-6). Ulazne veličine x_i za vanjski promjer D definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5-6.

Vrijednosti standardnih devijacija prikazanih u tablici 5-6 dobivene su iz rezultata mjerenja na simuliranim 3D modelima polimernog cilindra složene geometrije. Procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja provedena je za mjerenja u industrijskim uvjetima kod promjene temperature u iznosu od $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ u odnosu na zahtijevanih $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Parametar hrapavosti predmeta određen je ponovljenim mjerenjima uzorka sukladno zahtjevima norme ISO 4288:1996.

Tablica 5-6. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine D polimernog cilindra složene geometrije.

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Promjer izmjeren na 3D CT modelu prije korekcije skaliranja	D_0	Normalna razdioba ($M; D_0, 0,006 \text{ mm}$)
Referentna vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sref}	Normalna razdioba ($M; 60,0288 \text{ mm}, 0,0008 \text{ mm}$)
Vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sCT}	Normalna razdioba ($M; L_{\text{sCT}}, 0,010 \text{ mm}$)
Utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale	x_{tresh}	Normalna razdioba ($M; 0 \text{ mm}, 0,010 \text{ mm}$)
Koeficijent temperaturnog rastezanja predmeta mjerenja	α_p	Pravokutna razdioba ($M; 70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}; 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
Razlika temperature predmeta mjerenja od $20 \text{ }^\circ\text{C}$	Δt_p	Pravokutna razdioba ($M; 0 \text{ }^\circ\text{C}; 6 \text{ }^\circ\text{C}$)
Nazivni promjer	D_{nom}	30 mm
Parametar hrapavosti R_z predmeta mjerenja	R_{z_p}	Pravokutna razdioba ($M; 0,0015 \text{ mm}, 0,0029 \text{ mm}$)

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(D)$ dobivena je uz $M = 100000$ simulacija. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine D polimernog cilindra složene geometrije prikazana je slikom 5-8.



Slika 5-8. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(D)$ vanjskog promjera polimernog cilindra složene geometrije.

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine D polimernog cilindra složene geometrije iznosi $13 \text{ }\mu\text{m}$. Izlazna veličina D nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 29,9396 \text{ mm}; Y_{0,975} = 29,9925 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95 \text{ } \%$$

UNUTARNJI PROMJER

Uvođenjem utjecajnih veličina u postupku mjerenja unutarnjeg promjera polimernog cilindra postavljen je matematički model prema izrazu (5-7):

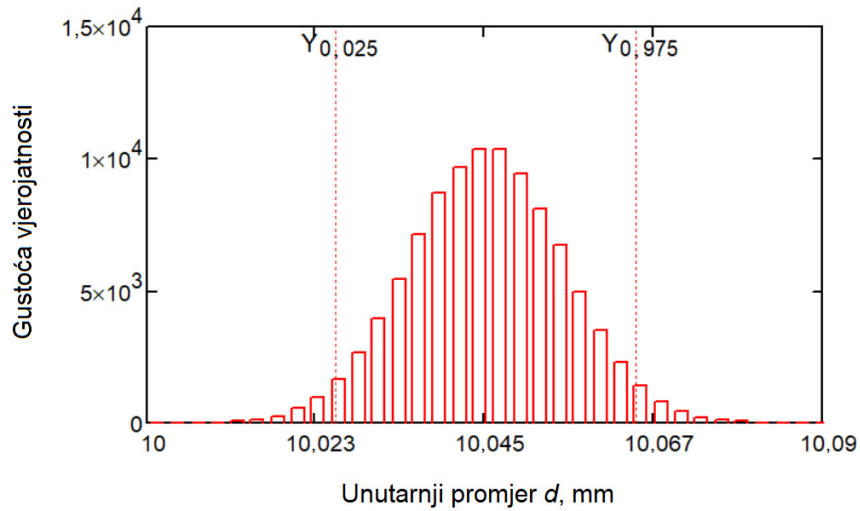
$$d_3 = d_0 \cdot \frac{L_{sref}}{L_{sCT}} - x_{tresh.} - \alpha_p \cdot \Delta t_p \cdot d_{nom} - Rz_p . \quad (5-7)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine d_3 simulirana je MCS metodom na osnovu izraza (5-7). Ulazne veličine x_i za unutarnji promjer d_3 definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5-7.

Tablica 5-7. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine d_3 polimernog cilindra složene geometrije.

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Promjer izmjeren na 3D CT modelu prije korekcije skaliranja	d_0	Normalna razdioba ($M; d_0, 0,008 \text{ mm}$)
Referentna vrijednost osnog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sref}	Normalna razdioba ($M; 60,0288 \text{ mm}, 0,0008 \text{ mm}$)
Vrijednost osnog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sCT}	Normalna razdioba ($M; L_{sCT}, 0,010 \text{ mm}$)
Utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale	x_{tresh}	Normalna razdioba ($M; 0 \text{ mm}, 0,006 \text{ mm}$)
Koeficijent temperaturnog rastezanja predmeta mjerenja	α_p	Pravokutna razdioba ($M; 70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}; 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
Razlika temperature predmeta mjerenja od $20 \text{ }^\circ\text{C}$	Δt_p	Pravokutna razdioba ($M; 0 \text{ }^\circ\text{C}; 6 \text{ }^\circ\text{C}$)
Nazivni promjer	d_{nom}	10 mm
Parametar hrapavosti Rz predmeta mjerenja	Rz_p	Pravokutna razdioba ($M; 0,0015 \text{ mm}, 0,0029 \text{ mm}$)

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(d_3)$ dobivena je uz $M = 100000$ simulacija. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine unutarnjeg promjera d_3 polimernog cilindra složene geometrije prikazana je slikom 5-9.



Slika 5-9. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(d_3)$ unutarnjeg promjera polimernog cilindra složene geometrije.

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine d_3 polimernog cilindra složene geometrije iznosi $10 \mu\text{m}$. Izlazna veličina d_3 nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 10,0301 \text{ mm}; Y_{0,975} = 10,0704 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95 \text{ \%}.$$

DULJINA CILINDRA

Uvođenjem utjecajnih veličina u postupku mjerenja duljine polimernog cilindra postavljen je matematički model prema izrazu (5-8):

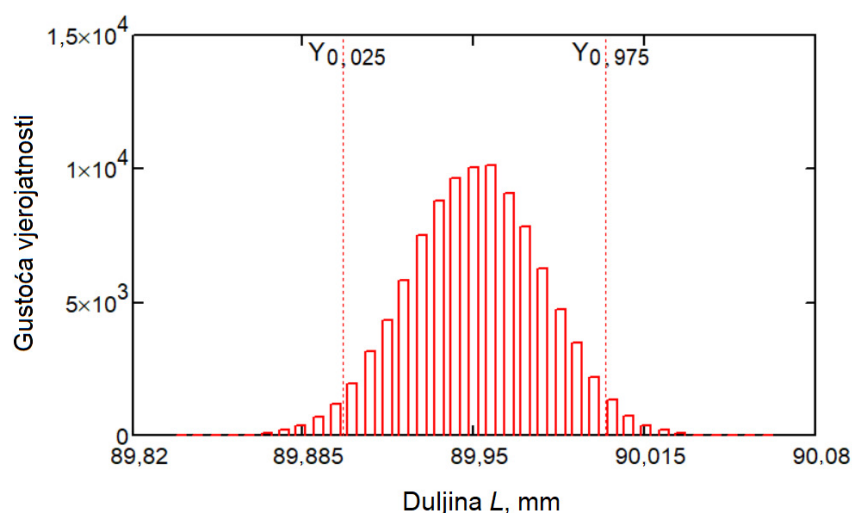
$$L = L_0 \cdot \frac{L_{s\text{ref}}}{L_{s\text{CT}}} - x_{\text{tresh.}} - \alpha_p \cdot \Delta t_p \cdot L_{\text{nom}} - Rz_p. \quad (5-8)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine L simulirana je MCS metodom na osnovu izraza (5-8). Ulazne veličine x_i za duljinu cilindra L definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5-8.

Tablica 5-8. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine L polimernog cilindra složene geometrije.

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Duljina izmjerena na 3D CT modelu prije korekcije skaliranja	L_0	Normalna razdioba ($M; L_0, 0,012 \text{ mm}$)
Referentna vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sref}	Normalna razdioba ($M; 60,0288 \text{ mm}, 0,0008 \text{ mm}$)
Vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sCT}	Normalna razdioba ($M; L_{\text{sCT}}, 0,010 \text{ mm}$)
Utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale	x_{tresh}	Normalna razdioba ($M; 0 \text{ mm}, 0,010 \text{ mm}$)
Koeficijent temperaturnog rastezanja predmeta mjerenja	α_p	Pravokutna razdioba ($M; 70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}; 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
Razlika temperature predmeta mjerenja od $20 \text{ }^\circ\text{C}$	Δt_p	Pravokutna razdioba ($M; 0 \text{ }^\circ\text{C}; 6 \text{ }^\circ\text{C}$)
Nazivna duljina	L_{nom}	90 mm
Parametar hrapavosti R_z predmeta mjerenja	R_{z_p}	Pravokutna razdioba ($M; 0,0015 \text{ mm}, 0,0029 \text{ mm}$)

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(L)$ dobivena je uz $M = 100000$ simulacija. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine duljine L polimernog cilindra složene geometrije prikazana je slikom 5-10.



Slika 5-10. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L)$ duljine polimernog cilindra složene geometrije.

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine L polimernog cilindra složene geometrije iznosi $25 \text{ }\mu\text{m}$. Izlazna veličina L nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 89,9005 \text{ mm}; Y_{0,975} = 90,0001 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95 \text{ } \%$$

DULJINA l_3

Uvođenjem utjecajnih veličina u postupku mjerenja duljine l_3 polimernog cilindra postavljen je matematički model prema izrazu (5-9):

$$l_3 = l_0 \cdot \frac{L_{sref}}{L_{sCT}} - \frac{x_{tresh.}}{2} - \alpha_p \cdot \Delta t_p \cdot l_{nom} - \frac{Rz_p}{2}. \quad (5-9)$$

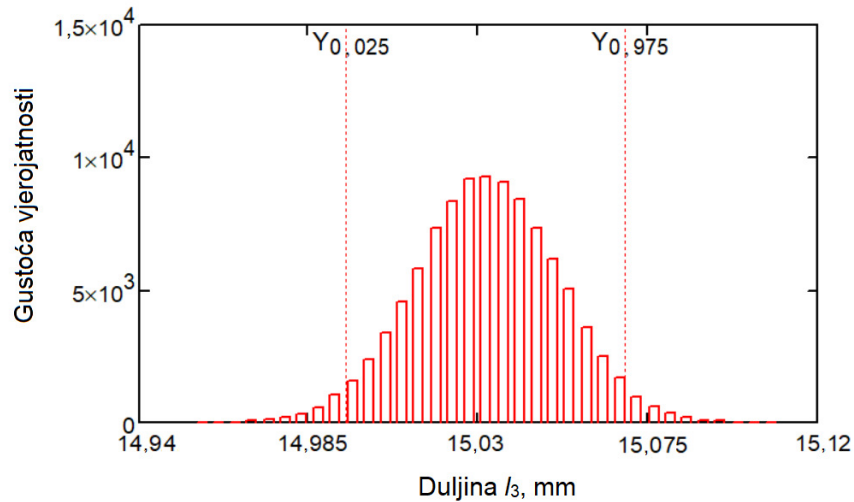
Duljina l_3 definirana je kao udaljenost između plohe B i centra provrta d_2 (slika 4-4), pri čemu je utjecaj hrapavosti prisutan jedino kod definiranja plohe B. Iz tog razloga je u postavljenom matematičkom modelu (5-9) utjecaj hrapavosti na rezultat mjerenja uzet u obzir u polovičnom iznosu.

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine l_3 simulirana je MCS metodom na osnovu izraza (5-9). Ulazne veličine x_i za duljinu l_3 definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5-9.

Tablica 5-9. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine l_3 polimernog cilindra složene geometrije.

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Duljina izmjerena na 3D CT modelu prije korekcije skaliranja	l_0	Normalna razdioba ($M; l_0, 0,019 \text{ mm}$)
Referentna vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sref}	Normalna razdioba ($M; 60,0288 \text{ mm}, 0,0008 \text{ mm}$)
Vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sCT}	Normalna razdioba ($M; L_{sCT}, 0,010 \text{ mm}$)
Utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale	x_{tresh}	Normalna razdioba ($M; 0 \text{ mm}, 0,010 \text{ mm}$)
Koeficijent temperaturnog rastezanja predmeta mjerenja	α_p	Pravokutna razdioba ($M; 70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}; 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
Razlika temperature predmeta mjerenja od $20 \text{ }^\circ\text{C}$	Δt_p	Pravokutna razdioba ($M; 0 \text{ }^\circ\text{C}; 6 \text{ }^\circ\text{C}$)
Nazivna duljina	l_{nom}	15 mm
Parametar hrapavosti Rz predmeta mjerenja	Rz_p	Pravokutna razdioba ($M; 0,0015 \text{ mm}, 0,0029 \text{ mm}$)

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(l_3)$ dobivena je uz $M = 100000$ simulacija. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine duljine l_3 polimernog cilindra složene geometrije prikazana je slikom 5-11.



Slika 5-11. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(l_3)$ duljine l_3 polimernog cilindra složene geometrije.

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine l_3 polimernog cilindra složene geometrije iznosi 20 μm . Izlazna veličina l_3 nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 14,9972 \text{ mm}; Y_{0,975} = 15,0751 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95 \text{ \%}.$$

DULJINA l_2 – osni razmak

Uvođenjem utjecajnih veličina u postupku mjerenja osnovnog razmaka polimernog cilindra postavljen je matematički model prema izrazu (5-10):

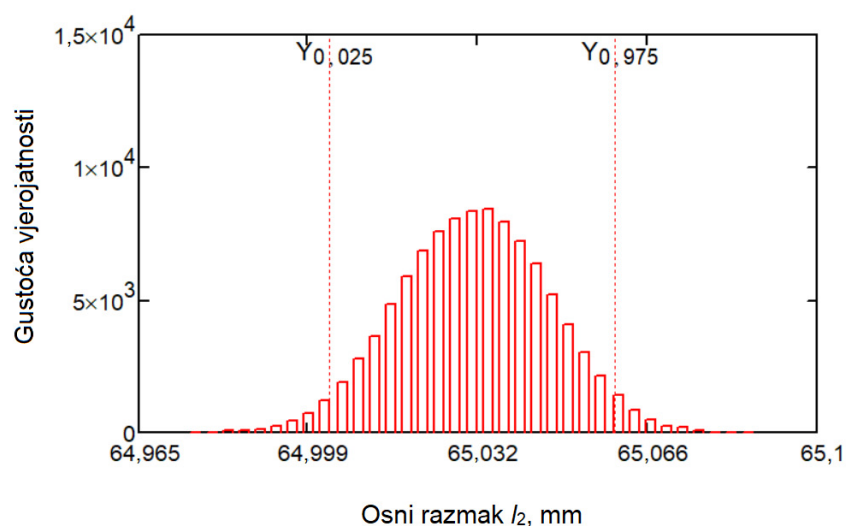
$$l_2 = l_0 \cdot \frac{L_{sref}}{L_{sCT}} - x_{thres} - \alpha_p \cdot \Delta t_p \cdot l_{nom} - Rz_p. \quad (5-10)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine osnovnog razmaka l_2 simulirana je MCS metodom na osnovu izraza (5-10). Ulazne veličine x_i za osni razmak l_2 definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5-10. S obzirom da se radi o veličini definiranoj jednosmjernim mjerenjima, utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale kao i utjecaj hrapavosti na rezultate mjerenja je zanemariv.

Tablica 5-10. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti za procjenu mjerne nesigurnosti veličine l_2 polimernog cilindra složene geometrije.

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Duljina izmjerena na 3D CT modelu prije korekcije skaliranja	l_0	Normalna razdioba ($M; l_0, 0,002 \text{ mm}$)
Referentna vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sref}	Normalna razdioba ($M; 60,0288 \text{ mm}, 0,0008 \text{ mm}$)
Vrijednost osnovog razmaka predmeta za skaliranje	L_{sCT}	Normalna razdioba ($M; L_{\text{sCT}}, 0,010 \text{ mm}$)
Utjecaj odabrane granične vrijednosti sive skale	x_{tresh}	Zanemarivo
Koeficijent temperaturnog rastezanja predmeta mjerenja	α_p	Pravokutna razdioba ($M; 70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}; 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
Razlika temperature predmeta mjerenja od $20 \text{ }^\circ\text{C}$	Δt_p	Pravokutna razdioba ($M; 0 \text{ }^\circ\text{C}; 6 \text{ }^\circ\text{C}$)
Nazivna duljina	l_{nom}	65 mm
Parametar hrapavosti R_z predmeta mjerenja	R_{z_p}	Zanemarivo

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(l_2)$ dobivena je uz $M = 100000$ simulacija. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine osnovog razmaka l_2 polimernog cilindra složene geometrije prikazana je slikom 5-12.



Slika 5-12. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(l_2)$ osnovog razmaka polimernog cilindra složene geometrije.

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine l_2 polimernog cilindra složene geometrije iznosi $15 \text{ }\mu\text{m}$. Izlazna veličina l_2 nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 65,0032 \text{ mm}; Y_{0,975} = 65,0600 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95 \text{ } \%$$

U istraživanjima su provedena i mjerenja geometrijskih značajki paralelnosti, ravnosti, okomitosti te cilindričnosti i koaksijalnosti. Rezultati mjerenja i procjene mjerne nesigurnosti rezultata geometrijskih značajki nisu dani u radu iz razloga što su kod mjerenja značajki ravnosti, paralelnosti te okomitosti utvrđena odstupanja i do 70 μm. Uključivanje iznosa sustavnih pomaka u procjenu mjerne nesigurnosti dovelo bi do neprihvatljivih iznosa mjerne nesigurnosti.

5.1.3 Izračun faktora slaganja En

Prema preporuci EA-2/03 faktor slaganja En računa se prema izrazu:

$$En = \frac{|\bar{x}_{\text{ref}} - \bar{x}_{\text{CT}}|}{\sqrt{U_{\text{ref}}^2 + U_{\text{CT}}^2}} \quad (5-11)$$

pri čemu je:

$\bar{x}_{\text{ref}}$	mm	aritmetička sredina rezultata mjerenja referentnom CMM metodom
$\bar{x}_{\text{CT}}$	mm	aritmetička sredina rezultata mjerenja računalnom tomografijom
U_{ref}	mm	proširena mjerna nesigurnost rezultata mjerenja referentnom CMM metodom
U_{CT}	mm	proširena mjerna nesigurnost rezultata mjerenja računalnom tomografijom.

Faktor slaganja En izračunat je u svrhu usporedbe rezultata dobivenih na CT-u s referentnom vrijednosti dobivenom mjerenjima na kontaktnim trokoordinatnim mjernim uređajima. Vrijednost En treba biti manja od 1 da bi se rezultati smatrali kompatibilnima. Rezultati mjerenja s pripadajućim mjernim nesigurnostima te faktorom slaganja En dani su u tablicama 5-11 i 5-12.

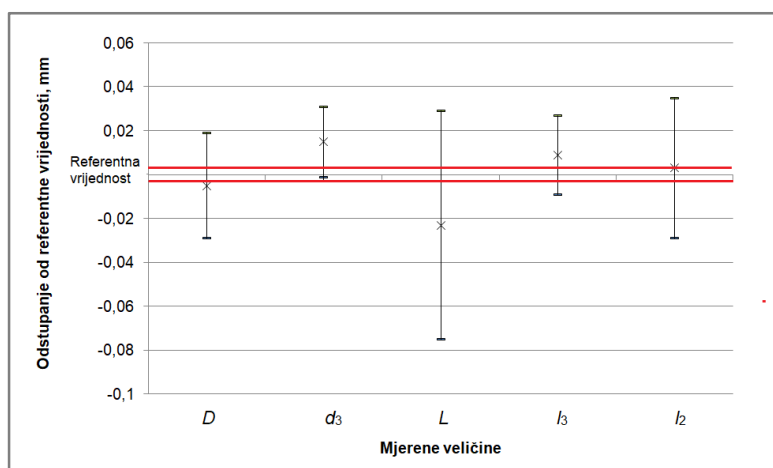
Tablica 5-11. Rezultati mjerenja dimenzionalnih karakteristika aluminijskog cilindra s pripadnim mjernim nesigurnostima i faktorom slaganja En .

Mjerena veličina	CMM		CT		En
	Rezultat mjerenja, mm	$U_{\text{ref}},$ $k = 2, P = 95 \%,$ mm	Rezultat mjerenja, mm	$U_{\text{CT}},$ $k = 2, P = 95 \%,$ mm	
D	30,016	0,0031	30,011	0,024	0,21
d_3	9,994	0,0029	10,009	0,016	0,92
L	90,066	0,0035	90,043	0,052	0,44
l_3	15,013	0,0031	15,022	0,018	0,49
l_2	64,972	0,0033	64,975	0,032	0,09

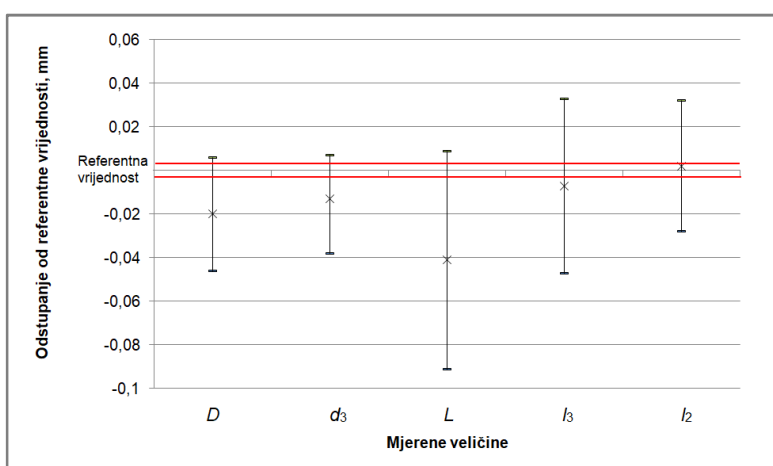
Tablica 5-12. Rezultati mjerenja dimenzionalnih karakteristika polimernog cilindra s pripadnim mjernim nesigurnostima i faktorom slaganja En .

Mjerena veličina	CMM		CT		En
	Rezultat mjerenja, mm	$U_{\text{ref}},$ $k = 2, P = 95 \%,$ mm	Rezultat mjerenja, mm	$U_{\text{CT}},$ $k = 2, P = 95 \%,$ mm	
D	29,986	0,0031	29,966	0,026	0,76
d_3	10,063	0,0029	10,050	0,020	0,64
L	89,992	0,0035	89,951	0,050	0,82
l_3	15,044	0,0031	15,037	0,040	0,17
l_2	65,030	0,0033	65,032	0,030	0,07

Sve vrijednosti En manje su od 1 čime je potvrđena kompatibilnost rezultata mjerenja računalnom tomografijom u odnosu na referentnu vrijednost. Odstupanja rezultata mjerenja od referentnih vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima prikazana su na slikama 5-13 i 5-14.



Slika 5-13. Odstupanja dimenzionalnih karakteristika aluminijskog cilindra od referentnih vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima.



Slika 5-14. Odstupanja dimenzionalnih karakteristika polimernog cilindra od referentnih vrijednosti s pripadnim mjernim nesigurnostima.

Iako je dobivenim rezultatima potvrđena kompatibilnost rezultata mjerenja računalnom tomografijom u odnosu na referentne vrijednosti, analiza rezultata i iznosi mjernih nesigurnosti ukazuju na značajnu prisutnost sustavnih i slučajnih pogrešaka. Razlog tome jest nedovoljno poznavanje ulaznih veličina i nemogućnost korekcije svih sustavnih pogrešaka koje se javljaju u procesu mjerenja izravnom metodom pomoću CT skenera.

5.2 Procjena mjerne nesigurnosti kod provedbe supstitucijske metode

Tijek provedbe usporedbenih mjerenja sukladno normi ISO 15530-3:2011 prilagođenoj dimenzionalnim mjerenjima računalnom tomografijom dan je slikom 3-12, u poglavlju 3.2.3 *Supstitucijska metoda – usporedbeno mjerenje*. U slučaju promatranog predmeta mjerenja, cilindra složene geometrije, proces provedbe usporedbenih mjerenja započinje provedbom referentnih mjerenja reprezentativnog predmeta, referentnom kontaktnom trokoordinatnom metodom mjerenja. Prvi korak uključuje provedbu mjerenja umjerenih radnih etalona koji oblikom i iznosom približno odgovaraju mjernim karakteristikama predmeta od interesa, ovdje cilindra složene geometrije. Postupak je dan tablicom 5-13 za mjerenje duljine cilindra te unutarnjeg i vanjskog promjera.

Za slučaj promatranja značajke duljine cilindra, nazivne vrijednosti 90 mm, za radni etalon je odabrana planparalelna granična mjerka duljine 90 mm, za mjerenje vanjskog promjera nazivne duljine 30 mm odabran je radni etalon glatkog kalibra ide/ne ide nazivnog vanjskog promjera 30 mm, dok je za mjerenje unutarnjeg promjera odabran radni etalon kontrolnog prstena nazivne vrijednosti 10 mm.

Provedena su mjerenja radnih etalona referentnom kontaktnom trokoordinatnom metodom mjerenja, korištenjem uređaja Tesa Micro Hite 3D te su dobiveni rezultati uspoređeni s vrijednostima iz certifikata. Razlika rezultata CMM mjerenja i vrijednosti iz certifikata predstavlja iznos korekcije CMM uređaja.

Drugi korak uključuje provedbu mjerenja reprezentativnog uzorka, prvog u seriji, referentnom trokoordinatnom metodom mjerenja na istom CMM uređaju. Dobivene vrijednosti korigirane su za iznos prethodno utvrđene korekcije CMM uređaja za svaku veličinu posebno.

Isti, reprezentativni uzorak, izmjeren je računalnom tomografijom na industrijskom CT uređaju Nikon XT H 225 pri čemu su parametri skeniranja, kao i filteri korišteni kod

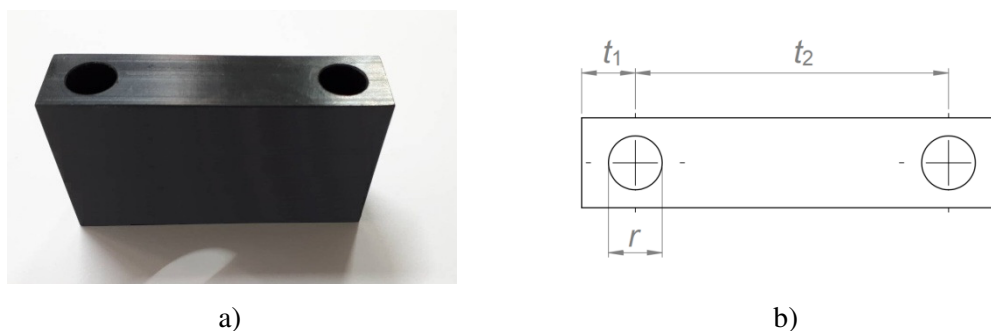
rekonstrukcije 3D modela odabrani prema prethodnim iskustvima, definiranje površine modela provedeno je korištenjem lokalno adaptivne metode te je provedena korekcija veličine vokselu umjernim štapićem. Rezultati CT mjerenja uspoređeni su s referentnim vrijednostima dobivenim u koraku 2 ovog postupka, a razlika između rezultata CT mjerenja i referentnih mjerenja predstavlja iznos korekcije promatrane veličine za svaka daljnja mjerenja sličnih predmeta metodom računalne tomografije, pri čemu se sličnost definira normom ISO 15530-3:2011, a detaljnije je opisana u poglavlju 3.2.3 *Supstitucijska metoda*.

Postupak provedbe usporedbene metode za spomenute tri karakteristike aluminijskog cilindra složene geometrije, s dobivenim vrijednostima dan je tablicom 5-13.

Tablica 5-13. Supstitucijska metoda na primjeru aluminijskog cilindra složene geometrije.

Promatrana veličina	Duljina cilindra, L	Vanjski promjer, D	Unutarnji promjer, d_3
Nazivna vrijednost promatrane veličine	90 mm	30 mm	10 mm
Radni etalon	<i>Planparalelna granična mjerka nazivne duljine 90 mm</i>	<i>Kalibar ide/ne ide nazivne vrijednosti 30 mm</i>	<i>Kontrolni prsten nazivne vrijednosti 10 mm</i>
Vrijednost dimenzionalne veličine radnog etalon iz certifikata	90,0005 mm	30,0002 mm	9,9970 mm
Izmjerena vrijednost etalona CMM uređajem	90,0015 mm	29,9980 mm	10,0000 mm
Iznos korekcije CMM-a	- 0,0010 mm	0,0022 mm	- 0,0030 mm
Izmjerena vrijednost reprezentativnog primjerka predmeta od interesa referentnom CMM metodom	90,0670 mm	30,0140 mm	9,9970 mm
Korigirana CMM vrijednost	90,0660 mm	30,0162 mm	9,9940 mm
Izmjerena vrijednost reprezentativnog uzorka računalnom tomografijom	90,0430 mm	30,0110 mm	10,0090 mm
Iznos korekcije svakog idućeg mjerenja	0,0230 mm	0,0052 mm	- 0,0150 mm
Izmjerena vrijednost novog (simuliranog) uzorka računalnom tomografijom	89,9970 mm	30,0040 mm	10,0070 mm
Korigirana CT vrijednost	90,0200 mm	30,0092 mm	9,9920 mm

Proces mjerenja predmeta proveden je na modelima dobivenim simulacijom korištenjem programa *aRTist*. Proces simulacije usporedbenih mjerenja proveden je na CAD modelima izmijenjenih dimenzija pri čemu promjene iznosa karakterističnih veličina nisu prelazile normom ISO 15530-3:2011 dopuštene vrijednosti (više od 10 % iznosa dimenzije referentnog predmeta). Osim prethodno definiranih veličina, mjerene su i udaljenost između plohe i provrta l_3 te osni razmak l_2 . Mjerenja referentnom CMM metodom duljina l_2 i l_3 korigirana su za iznos dobiven mjerenjima prethodno umjerenog radnog etalona za osni razmak (slika 5-15) nazivnih vrijednosti $t_1 = 6$ mm, $t_2 = 35$ mm i $r = 6$ mm. Referentne vrijednosti radnog etalona određene su mjerenjem na univerzalnom dužinskom mjernom uređaju. Iznos korekcije CMM-a kod mjerenja osnog razmaka jednak je - 0,001 mm, odnosno kod mjerenja udaljenosti od plohe do centra provrta, korekcija CMM-a iznosi - 0,002 mm.



Slika 5-15. Radni etalon za osni razmak: a) izgled, b) tlocrt.

Mjerenjima reprezentativnog uzorka aluminijskog cilindra složene geometrije računalnom tomografijom te usporedbom rezultata s korigiranim vrijednostima CMM mjerenja određen je iznos korekcije svakog idućeg CT mjerenja osnog razmaka l_2 i duljine l_3 . Iznos korekcije CT mjerenja kod mjerenja osnog razmaka jednak je - 0,003 mm, dok korekcija kod mjerenja duljine l_3 računalnom tomografijom iznosi - 0,009 mm.

Ukupno je simulirano pet procesa mjerenja, na pet različitih CAD modela pri čemu su nominalne vrijednosti varirane unutar zahtjeva norme ISO 15530-3:2011. Rezultati CT i CMM mjerenja te procjena mjerne nesigurnosti sukladno ISO 15530-3:2011 prema izrazu (3-8) dani su u tablici 5-14 za aluminijski uzorak i u tablici 5-15 za polimerni uzorak.

Tablica 5-14. Rezultati CMM i CT mjerenja različitih veličina reprezentativnog aluminijskog uzorka s procjenom mjerne nesigurnosti sukladno ISO 15530-3:2011.

	Rezultati mjerenja, mm		Procijenjene sastavnice mjerne nesigurnosti, mm				Proširena mjerna nesigurnost, mm
	CMM	CT	u_{ref}	u_p	u_w	u_b	U_{CT} $k = 2, P = 95 \%$
D	30,016	30,011	0,0022	0,003	0,0002	0,0021	0,0086
d_3	9,994	10,009	0,0021	0,002	0,0001	0,0013	0,0064
L	90,066	90,043	0,0025	0,017	0,0005	0,0009	0,0344
l_3	15,013	15,022	0,0022	0,006	0,0001	0,0012	0,0130
l_2	64,972	64,975	0,0024	0,001	0,0003	0,0010	0,0056

Tablica 5-15. Rezultati CMM i CT mjerenja različitih veličina reprezentativnog polimernog uzorka s procjenom mjerne nesigurnosti sukladno ISO 15530-3:2011.

	Rezultati mjerenja, mm		Procijenjene sastavnice mjerne nesigurnosti, mm				Proširena mjerna nesigurnost, mm
	CMM	CT	u_{ref}	u_p	u_w	u_b	U_{CT} $k = 2, P = 95 \%$
D	29,986	29,966	0,0022	0,002	0,0003	0,0023	0,0075
d_3	10,063	10,050	0,0021	0,004	0,0002	0,0014	0,0095
L	89,992	89,951	0,0025	0,012	0,0006	0,0011	0,0246
l_3	15,044	15,037	0,0022	0,003	0,0002	0,0013	0,0079
l_2	65,030	65,032	0,0024	0,001	0,0004	0,0011	0,0057

Sastavnica u_{ref} predstavlja sastavnicu mjerne nesigurnosti referentnog postupka mjerenja promatranih značajki na kontaktnom trokoordinatnom mjernom uređaju. Sastavnica u_{ref} je procijenjena prema izrazu:

$$u_{\text{ref.}} = \sqrt{u_{\text{umjer.}}^2 + u_{\text{pon.}}^2 + u_{\text{pr.dijag}}^2} \quad (5-12)$$

gdje je:

$u_{\text{umjer.}}$ μm standardna nesigurnost umjeravanja

$u_{\text{pon.}}$ μm standardna nesigurnost ponovljivosti rezultata mjerenja

$u_{\text{pr.dijag}}$ μm standardna nesigurnost pogreške prostorne dijagonale.

Nesigurnost umjeravanja proizlazi iz certifikata o umjeravanju i iznosi $U_{umjer.} = (1 + 1 \times 10^{-3} L) \mu\text{m}$, L u mm uz faktor proširenja $k = 2$ i $P = 95 \%$. Iz toga slijedi standardna nesigurnost umjeravanja:

$$u_{umjer.} = \frac{U_{umjer.}}{k}. \quad (5-13)$$

Nesigurnost ponovljivosti procijenjena je na osnovu procijenjenog standardnog odstupanja s . Za svaku značajku provedeno je trideset ponovljenih mjerenja ($n = 30$). Standardna nesigurnost $u_{pon.}$ jednaka je:

$$u_{pon.} = \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (5-14)$$

Nesigurnost pogreške prostorne dijagonale proizlazi iz certifikata o umjeravanju. Pogreška prostorne dijagonale dana je u rasponu od $-0,4 \mu\text{m}$ do $4,4 \mu\text{m}$, pri čemu je granica intervala pojavljivanja $a = 2,4 \mu\text{m}$. Uz pretpostavku pravokutne raspodjele slijedi standardna nesigurnost pogreške prostorne dijagonale:

$$u_{pr.dijag.} = \frac{a}{\sqrt{3}}. \quad (5-15)$$

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti mjerne procedure u_p dobivena je iz podataka pet ponovljenih mjerenja računalnom tomografijom reprezentativnog uzorka prema izrazu:

$$u_{p_{Y_{ICT}}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Y_{ICT} - \bar{Y}_{CT})^2}{n-1}}. \quad (5-16)$$

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti predmeta mjerenja u_w uključuje varijacije predmeta uslijed procesa proizvodnje pri čemu su najznačajniji parametri promjene površinske hrapavosti, pogreške oblika te promjene materijala izražene koeficijentom toplinske rastezljivosti i elastičnosti [78]. Ukoliko svojstva predmeta mjerenja i reprezentativnog predmeta korištenog u provedbi usporedbenih mjerenja ulaze u prethodno definirane granice, utjecaj predmeta mjerenja na ukupnu mjernu nesigurnost izražen sastavnicom u_w može biti neznatan [78]. Ipak, korištenjem reprezentativnog predmeta dio nesigurnosti uslijed proizvodnog procesa ne može se u potpunosti zanemariti, stoga će se unutar sastavnice u_w razmotriti utjecaj promjena uslijed varijacije u sastavu materijala između ispitnih predmeta, odnosno nesigurnost temperaturnog koeficijenta rastezanja ispitnog predmeta:

$$u_w = u_e = (t - 20) \cdot u_\alpha \cdot l. \quad (5-17)$$

Pri čemu je:

u_e	mm	standardna mjerna nesigurnost uslijed temperaturne korekcije
t	° C	prosječna temperatura tijekom ponavljanja CT mjerenja
u_α	K ⁻¹	nesigurnost temperaturnog koeficijenta rastezanja ispitnog predmeta
l	mm	izmjerena duljina.

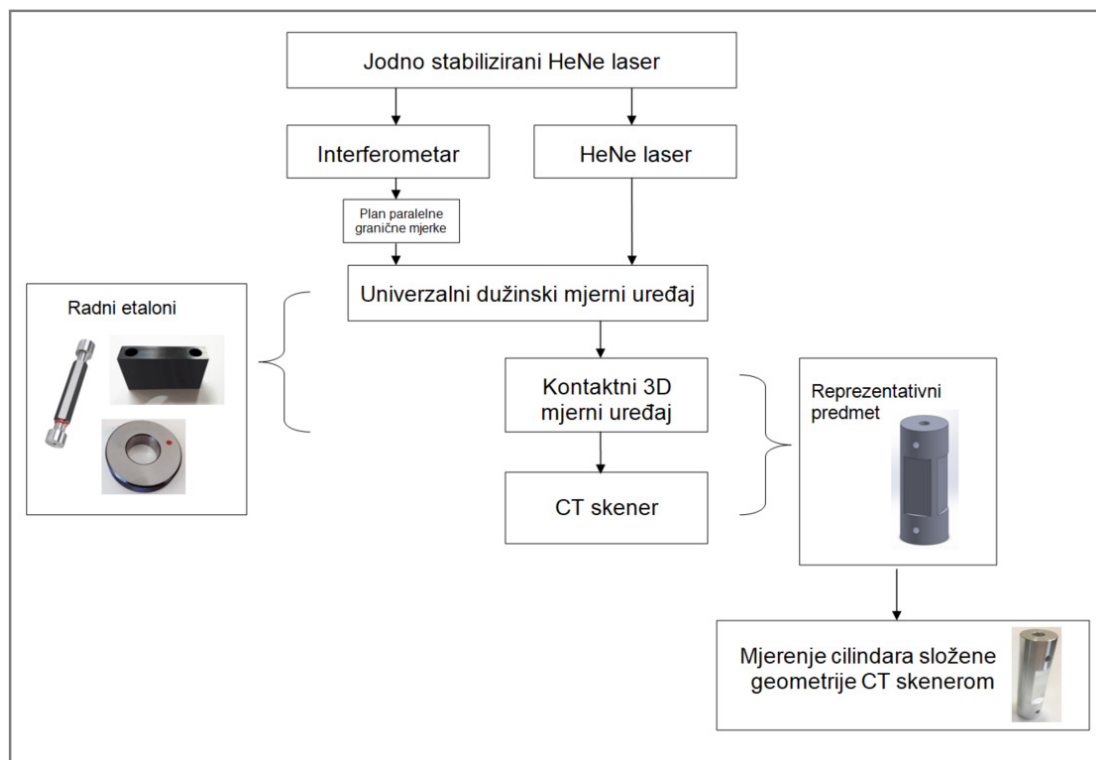
Sastavnica mjerne nesigurnosti uslijed korekcije sustavnog pomaka u_b procijenjena je prema izrazu:

$$u_b = (t - 20) \cdot u_{\alpha b} \cdot l . \quad (5-18)$$

Gdje je:

u_{ab} K⁻¹ nesigurnost temperaturnog koeficijenta rastezanja reprezentativnog predmeta.

Na osnovu analize rezultata može se zaključiti da se primjenom usporedbenih mjerenja, kod kojih se provodi korekcija rezultata sukladno vrijednostima dobivenim mjerenjima reprezentativnog umjerenog predmeta, ostvaruju pouzdaniji rezultati sa značajno manjim mjernim nesigurnostima u odnosu na izravnu metodu. Shema osiguravanja sljedivosti kod primjene supstitucijske metode mjerenja cilindra složene geometrije dana je slikom 5-16.



Slika 5-16. Osiguravanje sljedivosti kod supstitucijske metode mjerenja cilindra složene geometrije.

Supstitucijska metoda je trenutno jedina metoda primjenjiva i za mjerenje geometrijskih značajki. Procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja geometrijskih značajki kod provedbe supstitucijske metode u radu nije provedena zbog nedostatka radnih etalona za geometrijske karakteristike.

6. ZAKLJUČAK

Istraživanja u ovom radu definirana su aktualnom potrebom rješavanja znanstvenog pitanja osiguravanja sljedivosti kod primjene računalne tomografije u dimenzionalnom mjeriteljstvu. S obzirom na to da primjena računalne tomografije u području mjeriteljstva otvara mnoge mogućnosti u proizvodnoj industriji, te kako je riječ o beskontaktnoj nerazornoj metodi dimenzionalnih mjerenja predmeta, istraživanja su bila usmjerena prema uspostavljanju sljedivosti kod primjene ove metode.

U teorijskom dijelu rada prikazana je potreba za istraživanjima u području osiguravanja sljedivosti te je pregledom literature utvrđeno postojeće stanje razvoja područja koje upućuje na poteškoće u provedbi umjeravanja CT mjernog sustava. U cilju osiguravanja sljedivosti u radu je razmatran postupak umjeravanja CT mjernog sustava. Prema prijedlogu, postupak umjeravanja u obzir treba uzeti geometriju CT skenera definiranjem odnosa između sastavnih komponenata te rekonstrukciju modela kroz umjeravanje 2D zapisa. U radu je također opisan i razmatran proces provedbe dimenzionalnih mjerenja u tri odvojena potprocesa pri čemu su identificirani utjecajni parametri na proces provedbe mjerenja.

U radu je provedena sistematizacija postojećih referentnih predmeta korištenih za korekcije sustavnih pogrešaka. Sistematizacija je provedena prema namjeni referentnog predmeta za korekciju različitih vrsta pogrešaka kao i prema geometriji predmeta. Na osnovu istraživanja njihovih značajki te sukladno smjernicama *VDI/VDE 2630 - Part 1.3.* predložen je model referentnog predmeta kod primjene računalne tomografije u području dimenzionalnog mjeriteljstva. Predloženim referentnim predmetom moći će se osigurati pravilan odabir faktora skaliranja praćenjem dimenzionalne značajke udaljenosti između centara dviju kuglica. Mjerenjima između različito udaljenih kuglica prošireno je područje skaliranja pri čemu su moguća mjerenja u istoj ili u različitim osima. Kuglice s provrtima omogućit će lakše i točnije definiranje granične vrijednosti sive skale praćenjem dimenzija vanjskog promjera kuglice od interesa i unutarnjeg promjera provrta kod iste kuglice. Jednim referentnim predmetom moguće je pokriti veći raspon različitih materijala bilo da se radi o mjerenju predmeta izrađenog od jedne vrste materijala ili od više vrsta. Kako bi se obuhvatila geometrijska povećanja različitih iznosa, preporučena je izvedba predloženog referentnog predmeta u dvije ili više veličina pri čemu će predmet manjih dimenzija služiti za korekciju sustavnih pogrešaka kod većih geometrijskih povećanja, dok će se predmet većih dimenzija koristiti za korekciju sustavnih pogrešaka kod manjih geometrijskih povećanja.

Eksperimentalna istraživanja bila su usmjerena na istraživanje utjecajnih parametara prisutnih u cjelokupnom procesu mjerenja. S obzirom na to da se radi o izrazito složenoj metodi, u prvoj fazi eksperimentalnih istraživanja provedena su preliminarna istraživanja korištenjem djelomičnog plana pokusa. Odabrani su ulazni parametri iz svakog od potprocesa pri čemu su izdvojeni značajni parametri. U daljnjim istraživanjima temeljem rezultata preliminarnih istraživanja analizirani su utjecaji broja projekcija, utjecaj geometrijskog povećanja te utjecaj korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja. Dodatno, a na temelju pregleda literature, u istraživanja su uključeni utjecaj postavljanja predmeta mjerenja u odnosu na os rotacije, utjecaji filtriranja šumova neobrađenih CT podataka te utjecaj površinske hrapavosti predmeta mjerenja. Istraživanja su provedena na homogenim predmetima jednostavne i složene geometrije te različitih gustoća materijala. Rezultati dobiveni mjerenjima računalnom tomografijom uspoređeni su s rezultatima mjerenja kontaktnim trokoordinatnim mjernim uređajem.

Istraživanje utjecaja broja projekcija promatrano je na primjeru predmeta jednostavne geometrije te na primjeru predmeta složene geometrije. Usporedbom dobivenih rezultata mjerenja dimenzionalnih veličina cilindra jednostavne geometrije i cilindra složene geometrije, utvrđeno je postojanje utjecaja odabranog broja projekcija na rezultate mjerenja kod mjerenja predmeta složene geometrije. Kod analize dimenzionalnih značajki na predmetu složene geometrije, stabilnost iznosa odstupanja postiže se već kod odabira 800 projekcija, dok se taj broj povećava za slučaj mjerenja geometrijskih značajki. U slučaju mjerenja homogenog predmeta jednostavne geometrije, odabrani broj projekcija ne utječe značajno na rezultate mjerenja.

Istraživanje postavljanja predmeta u procesu skeniranja promatrano je parametrom orijentacije predmeta u odnosu na os rotacije te pozicioniranjem predmeta u odnosu na udaljenost od izvora rendgenskog zračenja. Utjecaj orijentacije predmeta promatran je na predmetima složene geometrije pri čemu su analizirani rezultati dimenzionalnih i geometrijskih značajki. Najmanja odstupanja izmjerenih vrijednosti dimenzionalnih značajki u odnosu na referentna CMM mjerenja i kod aluminijskog i kod polimernog cilindra složene geometrije dobivena su kod nagnute orijentacije. Objašnjenje tome nalazi se u položaju predmeta u konusnom snopu zračenja, kao i prisutnosti artefakata otvrdnjavanja zračenja i sekundarnog zračenja. Artefakti otvrdnjavanja zračenja dolaze do izražaja kod horizontalne orijentacije gdje zrake za konkretni slučaj prolaze najdulji put kroz materijal, dok artefakti sekundarnog zračenja više dolaze do izražaja kod vertikalne orijentacije na plohama

okomitim na os rotacije. S obzirom na dobivene rezultate, preporučeno namještanje predmeta u procesu skeniranja podrazumijeva odabir nagnute orijentacije.

Utjecaj geometrijskog povećanja na rezultate mjerenja istražen je na primjeru aluminijskog cilindra jednostavne geometrije, pri čemu je ispitano ukupno osam različitih iznosa geometrijskog povećanja, odnosno osam različitih udaljenosti predmeta od izvora zračenja. Najmanja odstupanja dobivenih rezultata od referentnih vrijednosti vanjskog promjera, duljine i paralelnosti, za konkretan slučaj mjerenja proveden na CT skeneru Nikon XT H 225, zabilježena su u području raspona udaljenosti predmeta od izvora zračenja (300 - 400) mm, dok odstupanja u područjima bližih izvoru, kao i bližih detektoru, iznosom rastu. Veća odstupanja rezultata u područjima većeg iznosa geometrijskog povećanja moguće je pripisati utjecaju pojave efekta polusjene koja otežava određivanje granica između predmeta i pozadine. Slijedom navedenog, u konkretnom slučaju provedenom na CT skeneru Nikon XT H 225, mjerenja je potrebno provoditi kod geometrijskog povećanja u rasponu 3,28-2,46.

S obzirom na značajnu povezanost kvalitete slike na točnost mjerenja u vidu prisutnosti i utjecaja artefakata slike na određivanje granice između različitih materijala i pozadine, u radu je promatran utjecaj korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja prilagodbom koeficijenta prigušenja te utjecaj filtriranja šumova neobrađenih CT podataka. Istraživanja su provedena na primjerima cilindara složenih geometrija. Kod aluminijskog i polimernog cilindra utvrđen je statistički značajan utjecaj provedbe korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja prilagodbom koeficijenata prigušenja za sva mjerenja osim za mjerenja osnog razmaka i paralelnosti. Analizom rezultata mjerenja kod provedbe filtracije šumova utvrđeno je postojanje statistički značajnih razlika između rezultata mjerenja dimenzionalnih i geometrijskih karakteristika aluminijskog cilindra, dok kod polimernog cilindra nije utvrđeno postojanje statistički značajnih razlika između rezultata mjerenja.

Utjecaj površinske hrapavosti predmeta mjerenja ispitan je na aluminijskim cilindrima jednostavne, međusobno jednake geometrije. Analizom rezultata mjerenja promjera cilindara utvrđena je zavisnost rezultata dimenzionalnih mjerenja u odnosu na parametar hrapavosti R_z . Pritom parametar R_z utječe na rezultate promjera polovicom iznosa na svakoj strani.

Mjerna nesigurnost rezultata mjerenja je procijenjena sukladno normi ISO 15530-3:2011 odnosno smjernicama *VDI/VDE 2630 Part 2.1*, te kombinacijom metode Monte Carlo (MCS) sukladno normi JCGM 101:2008 i virtualnog CT sustava korištenjem softverskog paketa *aRTist*. Istraživanja su pokazala da su skaliranje i odabir granične vrijednosti sive skale

ključni izvori mjerne nesigurnosti u postupku mjerenja dimenzionalnih karakteristika odabranih predmeta industrijskim CT uređajem. Odabir granične vrijednosti sive skale promatran je kao posljedica geometrijskog povećanja, orijentacije predmeta, korekcije artefakata otvrdnjavanja zračenja te filtriranja šumova neobrađenih CT podataka. Utvrđeno je da se vrijednosti proširenih mjernih nesigurnosti, procijenjene kombinacijom metode Monte Carlo i virtualnog CT sustava, dane uz faktor proširenja $k = 2$ i vjerojatnost $P = 95 \%$ nalaze u rasponu od $16 \mu\text{m}$ do $52 \mu\text{m}$ ovisno o mjerenoj dimenzionalnoj karakteristici.

Validacija rezultata je provedena usporedbom rezultata mjerenja s referentnim vrijednostima izračunom faktora slaganja En . Iako je dobivenim rezultatima potvrđena kompatibilnost rezultata mjerenja računalnom tomografijom u odnosu na referentne vrijednosti, analiza rezultata i iznosi mjernih nesigurnosti ukazuju na značajnu prisutnost sustavnih i slučajnih pogrešaka.

U cilju uspostave mjeriteljske sljedivosti kod mjerenja cilindra složene geometrije, korištenjem CT skenera Nikon XT H 225, provedena je supstitucijska metoda mjerenja te je procijenjena mjerna nesigurnost rezultata mjerenja. Utvrđeno je da se vrijednosti proširenih mjernih nesigurnosti dane uz faktor proširenja $k = 2$ i vjerojatnost $P = 95 \%$ nalaze u rasponu od $6 \mu\text{m}$ do $34 \mu\text{m}$ ovisno o mjerenoj dimenzionalnoj karakteristici. Procijenjene mjerne nesigurnosti dimenzionalnih karakteristika cilindara složenih geometrija mjerenih supstitucijskom metodom nekoliko puta su manje po iznosu od mjernih nesigurnosti procijenjenih MCS metodom kod primjene izravne metode mjerenja. Razlog tome jest nemogućnost korekcije svih sustavnih pogrešaka koje se javljaju u procesu mjerenja izravnom metodom. Kod supstitucijske metode primjenom reprezentativnog predmeta sustavni pomak je u najvećoj mjeri korigiran, a u nesigurnost je uključena sastavnica nesigurnosti korekcije koja je značajno manja po iznosu od iznosa korekcije. Kod primjene supstitucijske metode mjerna nesigurnost rezultata izmjerenih CT uređajem direktno ovisi o mjerenoj nesigurnosti rezultata izmjerenih primjenom trokoordinatnog mjernog uređaja. Drugim riječima, kod primjene supstitucijske metode, mjerna nesigurnost rezultata izmjerenih CT uređajem nikada ne može biti manja od nesigurnosti ostvarene primjenom trokoordinatnog mjernog uređaja. U cilju smanjenja mjernih nesigurnosti daljnja istraživanja treba usmjeriti i na razvoj virtualnih mjernih sustava koji će omogućavati simulaciju većeg broja utjecajnih veličina CT mjernog sustava.

Prijedlozi za daljnja istraživanja, a s ciljem uspostavljanja sljedivosti rezultata mjerenja do definicije metra, uključuju:

1. Istraživanja utjecaja postavki skeniranja na rezultate mjerenja s ciljem definiranja međunarodno prihvaćenih smjernica i uputa za provedbu procesa skeniranja predmeta.
2. Istraživanja povezanosti kvalitete 2D slike na točnost mjerenja u vidu prisutnosti i utjecaja artefakata slike na određivanje granice između različitih materijala i pozadine.
3. Izradu predloženog etalona za eliminaciju sustavnih pogrešaka te daljnja ispitivanja korekcije sustavnih pogrešaka.
4. Razvoj novih algoritama rekonstrukcije slika u kojima će se apsorpcija rendgenskog zračenja temeljiti na stvarnom stanju promjene koeficijenta apsorpcije duž puta prolaska rendgenskog zračenja čime će se umanjiti utjecaj artefakata slike.
5. Osiguravanje stabilne geometrije CT skenera pri čemu se stabilnost postiže ugradnjom komponenata visokih točnosti uz osiguravanje konstantne i jednake temperature svih komponenata u procesu provedbe skeniranja.

Provedenim istraživanjima, u cilju uspostavljanja sljedivosti rezultata mjerenja kod primjene računalne tomografije, ostvareni su sljedeći znanstveni doprinosi:

1. Utvrđeni su, kvantificirani te minimizirani utjecaji parametara korištenog CT mjernog sustava na točnost i preciznost rezultata mjerenja dimenzionalnih značajki predmeta uključenih u istraživanja.
2. Procijenjena je mjerna nesigurnost rezultata mjerenja dimenzionalnih značajki predmeta složene geometrije istraživanih u radu.
3. Ostvarena je kompatibilnost rezultata mjerenja dimenzionalnih značajki predmeta uključenih u istraživanja, dobivenih računalnom tomografijom u odnosu na referentne vrijednosti.

7. LITERATURA

- [1] Bartscher M, Neukamm M, Hilpert U, Neuschaefer-Rube U, Härtig F, Kniel K, Ehrig K, Staude A, Goebbels, J. Achieving Traceability of Industrial Computed Tomography. *Key Engineering Materials*. 2010;437:79-83. doi. 10.4028/www.scientific.net/KEM.437.79.
- [2] Lifton JJ, Malcolm AA, McBride J. An initial experimental study on the influence of beam hardening in X-ray CT for dimensional metrology. 4thInternational Conference on Industrial Computed Tomography - iCT 2014. Austria, Wels, February 2014.
- [3] Illemann J, Bartscher M, Neuschaefer-Rube U. An efficient procedure for traceable dimensional measurements and the characterization of industrial CT systems. *Digital Industrial Radiology and Computed Tomography international symposium - DIR 2015*. Belgium, Ghent, June 2015.
- [4] Andersen L, Holmberg M. An investigation into CT uncertainty using a high-density reference object. 6thInternational Conference on Industrial Computed Tomography - iCT 2016. Austria, Wels, February 2016.
- [5] Sun W, Brown SB, Leach RK. An overview of industrial X-ray computed tomography. NPL Report ENG 32. Teddington: National Physical Laboratory; 2012.
- [6] Weckenmann A, Krämer P. Assessment of measurement uncertainty caused in the preparation of measurements using computed tomography. XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology 2009. Portugal, Lisabon, September 2009.
- [7] Kraemer A, Lanza G. Assessment of the measurement procedure for dimensional metrology with X-ray computed tomography. *Procedia CIRP*. 2016;43:362-367. doi. 10.1016/j.procir.2016.02.018.
- [8] Fleßner M, Müller A, Götz D, Helmecke E, Hausotte T. Assessment of the single point uncertainty of dimensional CT measurements. 6thInternational Conference on Industrial Computed Tomography - iCT 2016. Austria, Wels, February 2016.
- [9] Müller P, Hiller J, Cantatore A, De Chiffre L. A study on evaluation strategies in dimensional X-ray computed tomography by estimation of measurement uncertainties. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2012;3(2):107-15. doi. 10.1051/ijmqe/2012011.
- [10] Hsieh J. *Computed tomography: Principles, Design, Artifacts and Recent Advances*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.; 2009.
- [11] Malcolm AA, Liu T, Lifton JL. Case Studies in Use of Computed Tomography for Non-Destructive Testing, Inspection and Measurement. Singapore International NDT Conference & Exhibition 2013. Singapore, July 2013.
- [12] Gapinski B, Janicki P, Marciniak-Podsadna L, Jakubowicz M. Application of the computed tomography to control parts made on additive manufacturing process. *Procedia Engineering*. 2016;149:105-121.
- [13] De Chiffre L, Carmignato S, Kruth J-P, Schmitt R, Weckenmann A. Industrial applications of computed tomography. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2014;63(2):655-677. doi. 10.1016/j.cirp.2014.05.011.
- [14] Kruth JP, Bartscher M, Carmignato S, Schmitt R, De Chiffre L, Weckenmann A.

- Computed tomography for dimensional metrology. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*. 2011;60(2):821-42. doi. 10.1016/j.cirp.2011.05.006.
- [15] https://www.periodni.com/gallery/spektar_elektromagnetskog_zracenja.png(21.12.2017.)
- [16] [https://phys.libretexts.org/TextMaps/General_Physics_TextMaps/Map%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/Map%3A_University_Physics_III_\(OpenStax\)/8%3A_A_Atomic_Structure/8.5%3A_Atomic_Spectra_and_X-rays](https://phys.libretexts.org/TextMaps/General_Physics_TextMaps/Map%3A_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_III_(OpenStax)/8%3A_A_Atomic_Structure/8.5%3A_Atomic_Spectra_and_X-rays)(19.12.2017.)
- [17] Flay N, Leach RK. Application of the optical transfer function in X-ray computed tomography – a review. NPL Report 41. Teddington: National Physical Laboratory; 2012.
- [18] Agarwal BK. X-Ray Spectroscopy: An Introduction. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 1991.
- [19] <http://philschatz.com/physics-book/contents/m42599.html> (12.12.2017.)
- [20] Uo M, Wada T, Sugiyama, T. Applications of X-ray fluorescence analysis (XRF) to dental and medical specimens. *Japanese Dental Science Review*. 2015;51:2-9. doi. 10.1016/j.jdsr.2014.07.001.
- [21] <http://pd.chem.ucl.ac.uk/pdnn/inst1/anode.htm>
- [22] ISO 15708-1:2002, Non-destructive testing – Radiation methods – Computed tomography – Part 1: Principles.
- [23] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=55063>. (17.1.2018.)
- [24] VDI/VDE 2630 Part 1.2 – Computed tomography in dimensional measurement: Influencing variables on measurement results and recommendations for computed-tomography dimensional measurements.
- [25] <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/dynamicrange.html>(19.1.2018.)
- [26] Lončarić, S. Rekonstrukcija slike iz projekcija. Predavanja. Dostupno online: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/opdos07.pdf
- [27] Hawkins, J. The Basics of Tomographic Reconstruction and Filtering. Predavanja. Dostupno online: http://apps.snm.org/docs/CME/PresenterItems/EventID_85/PresenterItemTypeID_1/1.%20Hawkins%20-%20800.pdf
- [28] Zargar S, Phad V, Kumar Poola P, John R. Role of filtering techniques in computed tomography (CT) image reconstruction. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015;4(12):69-74.
- [29] X-Tek X-ray and CT Inspection – CT Pro 3D for XT 4.3.2. – User Manual XTM0271-B1. Hertfordshire: Nikon Metrology Tring, 2015.
- [30] Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW. Practical cone-beam algorithm. *Journal of the Optical Society of America A*. 1984;1(6):612-619.
- [31] Müller P, Hiller J, Cantatore A, Bartscher M, De Chiffre L. Investigation on the influence of image quality in X-ray CT metrology. 2nd International Conference on Industrial Computed Tomography - iCT 2012. Austria, Wels, September 2012.
- [32] Lifton JJ, Malcolm AA, McBride JW. A simulation-based study on the influence of beam hardening in X-ray computed tomography for dimensional metrology. *Journal of X-Ray Science and Technology*. 2015;23(1):65-82. doi. 10.3233/XST-140471.
- [33] Krumm M, Kasperl S, Franz M. Reducing non-linear artifacts of multi-material

- objects in industrial 3D computed tomography. *NDT&E International*. 2008;41:242-251. doi.10.1016/j.ndteint.2007.12.001.
- [34] http://www.schoolphysics.co.uk/age1619/Medical%20physics/text/X_ray_absorption/index.html
- [35] Hiller J, Genta G, Barbato G, De Chiffre L, Levi R. Measurement uncertainty evaluation in dimensional X-ray computed tomography using the bootstrap method. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2014;15(4):617-22. doi. 10.1007/s12541-014-0379-9.
- [36] Tan Y, Kiekens K, Welkenhuyzen F, Angel J, De Chiffre L, Kruth J-P, Dewulf W. Simulation-aided investigation of beam hardening induced errors in CT dimensional metrology. *Measurement Science & Technology*. 2014;25. doi. 10.1088/0957-0233/25/6/064014.
- [37] Lehmann LA, Alvarez RE, Macovski A, Brody WR, Pelc NJ, Riederer SJ, Hall AL. Generalized image combinations in dual KPV digital radiography. *Medical Physics*. 1981;8(5):659-667. doi.10.1118/1.595025.
- [38] Reiter M, Heinzl C, Salaberger D, Weiss D, Kastner J. Study on parameter variation of an industrial computed tomography simulation tool concerning dimensional measurement deviations. 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, Russia, June 2010.
- [39] https://cdn.goconqr.com/uploads/flash_card/image_answer/5521641/desktop_e77f2302-8b13-4237-a83c-1ee4e746a645.png (14.1.2018.)
- [40] ISO 15708-2:2002, Non-destructive testing – Radiation methods – Computed tomography – Part 2: Examination practices.
- [41] Boas FE, Fleischmann D. CT artifacts: Causes and reduction techniques. *Imaging in Medicine*. 2012;4(2):229-240. doi. 10.2217/IIM.12.13.
- [42] Frković M, Višković, K. Radiološka oprema. Zagreb: Zdravstveno veleučilište; 2013.
- [43] Lee RD. Common Image Artifacts in Cone Beam CT. In: Quarterly Publication of the American Association of Dental Maxillofacial Radiographic Technicians. 2008.
- [44] Jaju PP, Jain M, Singh A, Gupta A. Artefacts in cone beam CT. *Open Journal of Stomatology*. 2013;3:292-297. doi. 10.4236/ojst.2013.35049.
- [45] https://www.shimadzu.com/an/ndi/products/x_rylk/metal.html (9.1.2018.)
- [46] Gjesteby L, De man B, Jin Y, Paganetti H, Verburg J, Giantsoudi D, Wang G. Metal Artifact Reduction in CT: Where Are We After Four Decades? *IEEE Access*. 2016;4:5826-5849. doi. 10.1109/ACCESS.2016.2608621.
- [47] Amirkhanov A, Heinzl C, Kuhn C, Kastner J, Gröller ME. Fuzzy CT Metrology: Dimensional Measurements on Uncertain Data. 29th Spring Conference on Computer Graphics. Slovakia, Smolenice, May 2013.
- [48] Kiekens K, Welkenhuyzen F, Tan Y, Bleys P, Voet A, Dewulf W, Kruth JP. A test object for calibration and accuracy assessment in X-ray CT metrology. 10th International Symposium on Measurement and Quality Control 2010, Japan, Osaka, September 2010.
- [49] VGStudio MAX 2.2 – Reference Manual. Heidelberg: Volume Graphics GmbH, 2013.
- [50] Reinhart C. Industrial Computer Tomography – A Universal Inspection Tool. 17th

- World Conference on Nondestructive Testing. China, Shanghai, October 2008.
- [51] JCGM 200:2008: Međunarodni mjeriteljski rječnik – Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM), 2008.
 - [52] VDI/VDE 2630 Part 1.3 – Computed tomography in dimensional measurement: Guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT sensors.
 - [53] De Chiffre L, Andreasen JL, Christensen LB, Feidenhans'l RK, Vinter B, Jensen NT, Arentoft M, Jørgensen PB, Vester-Christensen M, Schmidt PR. Centre for Industrial Application of CT scanning (CIA-CT) – Four years of results 2009-2013. Lyngby: Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering; 2014.
 - [54] Carmignato S, Pierobon A, Savio E. CT Audit: Interlaboratory Comparison of Computed Tomography Systems for Dimensional Metrology – Final Report. Padova: Laboratory of Industrial and Geometrical Metrology; 2012.
 - [55] <https://www.qualitydigest.com/inside/metrology-article/verification-accuracy-computed-tomography.html#> (23.11.2017.)
 - [56] Lifton JJ, Cross KJ, Malcolm AA, McBride JW. A reference workpiece for voxel size correction in X-ray computed tomography. International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology - icOPEN2013. Singapore, April 2013.
 - [57] Leonard F, Brown SB, Withers PJ, Mummary PM, McCarthy MB. A new method of performance verification for x-ray computed tomography measurements. Measurement Science & Technology. 2014;25(6). doi. 10.1088/0957-0233/25/6/065401.
 - [58] Bartscher M, Hilpert U, Goebbels J, Weidemann G. Enhancement and proof of accuracy of industrial computed tomography (CT) measurements. Cirp Annals-Manufacturing Technology. 2007;56(1):495-498. doi. 10.1016/j.cirp.2007.05.118.
 - [59] Carmignato S, Pierobon A. Preliminary Results of the 'CT Audit' Project: First International Intercomparison of Computed Tomography Systems for Dimensional Metrology. International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography - Mo.2.1. Germany, Berlin, 2011.
 - [60] Carmignato S, Dreossi D, Mancini L, Marinello F, Tromba G, Savio E. Testing of x-ray microtomography systems using a traceable geometrical standard. Measurement Science & Technology. 2009;20(8). doi. 10.1088/0957-0233/20/8/084021.
 - [61] Kiekens K, Welkenhuyzen F, Tan Y, Bleys P, Voet A, Kruth JP, Dewulf W. A test object with parallel grooves for calibration and accuracy assessment of industrial computed tomography (CT) metrology. Measurement Science & Technology. 2011;22(11). doi. 10.1088/0957-0233/22/11/115502.
 - [62] Welkenhuyzen F, Kiekens K, Pierlet M, Dewulf W, Bleys P, Kruth JP, Voet A. Industrial Computer Tomography for Dimensional Metrology: Overview of Influence Factors and Improvement Strategies. Optical Measurement Techniques for Structures & Systems 2. 2009:1-9.
 - [63] Schmitt R, Niggemann C. Uncertainty in measurement for x-ray-computed tomography using calibrated work pieces. Measurement Science & Technology. 2010;21(5):9. doi. 10.1088/0957-0233/21/5/054008.
 - [64] Bartscher M, Sato O, Härtig F, Neuschaefer-Rube U. Current state of standardization

- in the field of dimensional computed tomography. *Measurement Science & Technology*. 2014;25(6). doi. 10.1088/0957-0233/25/6/064013.
- [65] Müller P. Use of reference objects for correction of measuring errors in X-ray computed tomography. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering; 2010.
 - [66] Kasperl S, Schielein R, Sukowski F, Hornberger P, Gruber A. CT simulation study to demonstrate material impact using hole plates. 11th European Conference on Non-Destructive Testing - ECNDT 2014, Czech Republic, Prague, October 2014.
 - [67] Müller P, Cantatore A, Andreasen JL, Hiller J, De Chiffre L. Computed tomography as a tool for tolerance verification of industrial parts. *Procedia CIRP*. 2013;10:125-132. doi. 10.1016/j.procir.2013.08.022.
 - [68] <http://www.matweb.com/> (prosinac 2017.)
 - [69] JCGM 100:2008: Vrednovanje mjernih podataka - Uputa za iskazivanje mjerne nesigurnosti, 2008.
 - [70] Hiller J, Reindl LM. A computer simulation platform for the estimation of measurement uncertainties in dimensional X-ray computed tomography. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2012;45(8):2166-2182. doi. 10.1016/j.measurement.2012.05.030.
 - [71] Weckenmann A, Krämer P. Predetermination of Measurement Uncertainty in the Application of Computed Tomography. In: Giordano M, Mathieu L, Villeneuve F., editors. *Product Lifecycle Management: Geometric Variations*. Wiley;2010.
 - [72] Horvatić Novak A, Runje B, Stepanić J. Capabilities of industrial computed tomography in the field of dimensional measurements. *Advances in Production Engineering & Management*. 2017;152(3):245-253. doi. 10.14743/apem2017.3.255.
 - [73] B. Runje, Istraživanje mjernih nesigurnosti u postupcima umjeravanja etalona duljine [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2002.
 - [74] Müller P, Hiller J, Cantatore A, De Chiffre L. Investigation on measuring strategies in computed tomography. 2nd Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies – NEWTECH 11, Czech Republic, Brno, 2011.
 - [75] Müller P, Păcurar A, De Chiffre L, Cantatore A, Berce P. Geometrical metrology on silicone rubber by computed tomography. 11th euspen International Conference. Italy, Como, May 2011.
 - [76] Păcurar R, Müller P. Geometrical metrology on vacuum cast silicone rubber form using computed tomography – Technical report. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering; 2011.
 - [77] Müller P, Hiller J, Dai Y, Andreasen JL, Hansem HN, De Chiffre L. Estimation of measurement uncertainties in X-ray computed tomography metrology using the substitution method. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2014;7(3):222-232. doi. 10.1016/j.cirpj.2014.04.002.
 - [78] ISO 15530-3:2011, Geometrical product specifications (GPS) -- Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement -- Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards.
 - [79] ISO/IEC 17043:2010, Conformity assessment -- General requirements for proficiency testing.

- [80] Carmignato S, Pierobon A, Rampazzo P, Parisatto M, Savio E. CT for Industrial Metrology – Accuracy and Structural Resolution of CT Dimensional Measurement. 2nd International Conference on Industrial Computed Tomography - iCT 2012. Austria, Wels, September 2012.
- [81] Carmignato S. Computed tomography as a promising solution for industrial quality control and inspection of castings. *Metallurgical Science and Technology*. 2012;30(1):5-14.
- [82] Angel J, De Chiffre L. Comparison on Computed Tomography using industrial items. *CIRP Annals*. 2014;63(1):473-476. doi. 10.1016/j.cirp.2014.03.034.
- [83] [https://www.interaqct.eu/about\(18.11.2017.\)](https://www.interaqct.eu/about(18.11.2017.))
- [84] Stolfi A, De Chiffre L. InteraqCT Comparison on Assemblies – Final Report. Technical University of Denmark; 2016.
- [85] Stolfi A, De Chiffre L. Selection of items for “InteraqCT Comparison on Assemblies”. 6th Conference on Industrial Computed Tomography - iCT2016, Austria, Wels, February 2016.
- [86] Montgomery DC, Runger GC. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.; 2011.
- [87] Reiter M, Harrer B, Heinzl C, Salaberger D, Gusenbauer C, Kuhn C, Kastner J. Simulation Aided Study for Optimising Industrial X-ray CT Scan Parameters for Non-Destructive Testing and Materials Characterisation. *Digital Industrial Radiology and Computed Tomography international symposium - DIR 2011*. Germany, Berlin, June 2011.
- [88] Cantatore A, Müller P. *Introduction to computed tomography*. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering; 2011.
- [89] Weckenmann A, Kraemer P. Computed tomography in quality control: chances and challenges. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*. 2013;227(B5):634-642. doi. 10.1177/0954405413479849.
- [90] Elter M, Maass N, Koch P. Suitability of a new alignment correction method for industrial CT. 4th International Conference on Industrial Computed Tomography - iCT 2014. Austria, Wels, February 2014.
- [91] Schrapp M, Goldammer M, Schrörner K, Stephan J. Improvement of image quality in computed tomography via data fusion. 4th International Conference on Industrial Computed Tomography - iCT 2014. Austria, Wels, February 2014.
- [92] Krämer A, Kovacheva E, Lanza G. Projection based evaluation of CT image quality in dimensional metrology. *Digital Industrial Radiology and Computed Tomography international symposium - DIR 2015*. Belgium, Ghent, June 2015.
- [93] Tan Y, Kiekens K, Welkenhuyzen F, Kruth JP, Dewulf W. Defining the Optimal Beam Hardening Correction Parameters for CT Dimensional Metrology Applications. *COMA 13 – International Conference on Competitive Manufacturing*, Stellenbosch, South Africa, January 2013.
- [94] Boeckmans B, Tan Y, Welkenhuyzen F, Guo YS, Dewulf W, Kruth JP. Roughness offset differences between contact and non-contact measurements. *Euspen’s 15th International Conference & Exhibition*, Leuven, Belgium, June 2015.
- [95] Aloisi V, Carmignato S. Influence of surface roughness on X-ray computed

- tomography dimensional measurements of additive manufactured parts. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation. 2016;6(Part B):104-110. doi. 10.1016/j.csndt.2016.05.005.
- [96] ISO 4288:1996, Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Rules and procedures for the assessment of surface texture.
 - [97] ISO 4287:1997, Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method -- Terms, definitions and surface texture parameters.
 - [98] Mitutoyo: Quick guide to surface roughness measurement – Reference guide for laboratory and workshop. Mitutoyo America Corporation, 2016.
 - [99] Salzinger M, Hornberger P, Hiller J. Analysis and comparison of the surface filtering characteristics of computed tomography and tactile measurements. 6thInternational Conference on Industrial Computed Tomography - iCT 2016. Austria, Wels, February 2016.
 - [100] <https://www.nikonmetrology.com//images/brochures/xt-h-series-en.pdf> (29.4.2018.)
 - [101] Muller P, Hiller J, Dai Y, Andreasen JL, Hansen HN, De Chiffre L. Quantitative analysis of scaling error compensation methods in dimensional X-ray computed tomography. Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology. 2015;10:68-76. doi. 10.1016/j.cirpj.2015.04.004.
 - [102] Bartscher M, Neuschaefer-Rube U, Wäldele F. Computed tomography - A highly potential tool for industrial quality control and production near measurements. NUMB 2004;1860:477-482.
 - [103] JCGM 101:2008: Vrednovanje mjernih podataka – Dopuna 1. *Uputama za iskazivanje mjerne nesigurnosti* – Prijenos razdioba uporabom metode monte karlo, 2008.
 - [104] Helmecke E, Fleßner M, Gröschl A, Staude A, Hausotte T. Numerical measurement uncertainty determination for computed tomography in dimensional metrology. XXI IMEKO World Congress „Measurement in Research and Industry“ 2015. Czech Republic, Prague, September 2015.
 - [105] Acko B, McCarthy M, Haertig F, Buchmeister B. Standards for testing freeform measurement capability of optical and tactile coordinate measuring machines. Measurement Science & Technology. 2012;23. doi. 10.1088/0957-0233/23/9/094013.
 - [106] Kunzmann H, Trapet E, Wäldele F. Concept for the Traceability of Measurements with Coordinate Measuring Machines. 7th International Precision Engineering Seminar 1993. Japan, Kobe, May 1993.
 - [107] Helmecke E, Fleßner M, Kaufmann M, Staude A, Hausotte T. Numerical measurement uncertainty determination for dimensional measurements of microparts with CT. 6th International Conference on Industrial Computed Tomography - iCT 2016. Austria, Wels, February 2016.
 - [108] Hilpert U, Bartscher M, Neugebauer M, Goebbels J, Weidemann G, Bellon C. Simulation-aided computed tomography (CT) for dimensional measurements. Digital Industrial Radiology and Computed Tomography international symposium - DIR 2007. France, Lyon, June 2007.

ŽIVOTOPIS

Amalija Horvatić Novak rođena je 1989. godine u Varaždinu. Po završetku Prve gimnazije Varaždin 2008. upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Fakultet završava 2013. godine obranivši diplomski rad naslova *Statistički alati i metode u mjeriteljstvu*, pod mentorstvom prof. dr. sc. Biserke Runje. Za uspjeh na studiju nagrađena je medaljom Fakulteta strojarstva i brodogradnje za najbolje studente. Po završetku diplomskog studija upisuje poslijediplomski studij smjera Znanstveno mjeriteljstvo u strojarstvu, a od lipnja 2015. godine radi kao asistentica pri Zavodu za kvalitetu na Katedri za mjerenje i kontrolu Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Sudjeluje u izvođenju nastave većeg broja kolegija: *Teorija i tehnika mjerenja*, *Kontrola kvalitete*, *Upravljanje kvalitetom*, *Quality management*, *Statistika u mjeriteljstvu*, *Mjeriteljstvo*, *Etika u mjeriteljstvu*, te asistira u vođenju završnih i diplomskih radova. Autorica je i koautorica više znanstvenih radova. Izlagala je na nekoliko međunarodnih konferencija, od kojih je na 27th DAAAM International Conference dobila nagradu za najbolji rad. U sklopu iste konferencije sudjelovala je u međunarodnoj doktorskoj školi (5th International Doctoral School) za koju je dobila Festo stipendiju i Festo nagradu mladim znanstvenicima i istraživačima. Članica je Hrvatskog interdisciplinarnog društva i Hrvatskog društva za zaštitu materijala. Aktivno se služi engleskim jezikom u govoru i pismu, a pasivno njemačkim.

BIOGRAPHY

Amalija Horvatić Novak was born in 1989. in Varaždin. Upon graduating in the Gymnasium of Varaždin, she applied to Faculty of mechanical engineering and naval architecture at the University of Zagreb in year 2008. She finished studies in 2013 with a Master Thesis titled "*Statistical tools and methods in metrology*", which was supervised by Prof. Biserka Runje. For her high performance, she was awarded with Magna Cum Laude. After her graduation she started postgraduate studies, module Scientific Metrology in Mechanical Engineering, and from June 2015 she is employed at the Department of Quality, Chair for measurement and control, at the University of Zagreb, Faculty of mechanical engineering and naval architecture as a research and teaching assistant. She is involved in educational activities within the courses: *Measurement Theory and Techniques*, *Quality Control*, *Quality management*, *Statistics in Metrology*, *Metrology*, *Ethics in Metrology*. She is also assisting in supervising bachelor and master theses. She is author and co-author of numerous scientific papers. She had lectures on several international conferences, including the 27th DAAAM *International Conference* where she was given a certificate for the best conference paper. Within the same symposium, she participated in the 5th DAAAM *International Doctoral School*, where she was awarded with *Festo scholarship*, *Festo prize for young researchers and scientists*. She is a member of the Croatian interdisciplinary society and Croatian society for materials protection. She is fluent in English and speaks a little German.