

# Utjecaj zagrijavanja izvora zračenja u računalnoj tomografiji

---

**Doko, Bariša**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:391688>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Bariša Doko**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**UTJECAJ ZAGRIJAVANJA  
IZVORA ZRAČENJA U  
RAČUNALNOJ TOMOGRAFIJI**

Mentor:

izv. prof.. dr. sc. Marko Katić

Student:

Bariša Doko

Zagreb, 2022.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Rad je rađen na Katedri za mjerenje i kontrolu Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.*

*Iznimna zahvala mentoru izv. prof. dr. sc. Marku Katiću na prihvaćanju mentorstva, te na stručnom vodstvu, savjetima, strpljenju i izdvojenom vremenu za ovaj diplomski rad.*

*Hvala svim profesorima, kolegama, a posebno prijateljima koji su bili tu za vrijeme studija.*

*Neizmjerne hvala mojoj obitelji i roditeljima na bezuvjetnoj podršci i ljubavi tijekom cijelog studija.*

*Posebno hvala mojoj zaručnici Mari na vjeri i podršci u svakom trenutku.*

Bariša Doko



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za diplomске radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **BARIŠA DOKO** Mat. br.: 0035201070

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj zagrijavanja izvora zračenja u računalnoj tomografiji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of X-ray source heating in computed tomography**

Opis zadatka:

Računalna tomografija se sve češće koristi kao mjerna metoda za dimenzionalna mjerenja, pri čemu se od uobičajenih metoda razlikuje ne samo po činjenici da omogućuje mjerenje unutrašnjih značajki, već i po tome što je u sam mjeriteljski lanac ugrađen aktivni izvor topline. Kako bi se mogao karakterizirati utjecaj zagrijavanja izvora zračenja na rezultate dobivene ovom metodom, u ovom je radu potrebno:

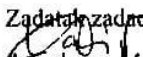
1. opisati princip rada računalne tomografije
2. osmisliti i izraditi eksperimentalni postav kojim je moguće snimiti temperaturno polje izvora zračenja tijekom rada
3. osmisliti i izraditi eksperimentalni postav za praćenje pozicije žarišne točke izvora zračenja tijekom rada
4. provesti simultana mjerenja temperature i pomaka žarišne točke.
5. obraditi dobivene rezultate s ciljem utvrđivanja funkcionalnih parametara koji ovise o promjeni temperature.

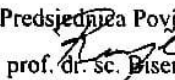
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
29. rujna 2022.

Rok prednje rada:  
1. prosinca 2022.

Predvideni datum obrane:  
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadano:  
  
doc. dr. sc. Marko Katić

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. INDUSTRIJSKA RAČUNALNA TOMOGRAFIJA.....	3
2.1. Osnove rada industrijskih CT uređaja.....	4
2.1.1. Izvor X – zračenja .....	6
2.1.2. Detektor.....	8
2.1.3. Ostali dijelovi.....	10
2.2. Vrste industrijskih CT uređaja .....	12
2.2.1. Podjela prema vrsti rendgenskog snopa.....	12
2.2.2. Prikaz uređaja prema snazi i proizvođačima.....	13
2.3. Primjena industrijskih CT uređaja .....	15
2.4. Prednosti i nedostaci industrijskih CT uređaja .....	17
3. UTJECAJI NA TOČNOST MJERENJA CT UREĐAJA.....	18
3.1. Osnovni mjeriteljski pojmovi.....	18
3.1.1. Vrste pogrešaka.....	18
3.1.2. Mjerne pogreške.....	18
3.1.2.1. Netočnost .....	18
3.1.2.2. Linearna pogreška.....	18
3.1.2.3. Nestabilnost.....	19
3.1.2.4. Ponovljivost .....	19
3.1.2.5. Obnovljivost.....	20
3.1.2.6. Točnost i preciznost .....	20
3.1.2.7. Mjerna nesigurnost.....	21
3.2. Utjecaji na mjernu nesigurnost .....	21
22	
3.3. Sustavne greške industrijskih CT uređaja.....	22
3.3.1. Pomak izvora X – zraka.....	22
3.3.2. Prstenasti i prugasti artefakti.....	24
3.3.3. Stvrdnjavanje snopa zračenja.....	25
3.4. Metode obrade podataka .....	26
3.4.1. Detekcija rubova .....	27
4. TEMPERATURNI UTJECAJ NA TOČNOST MJERENJA CT UREĐAJA .....	29
4.1. Postavka za mjerenja.....	29
4.2. Pojednostavljeni matematički prikaz .....	31
4.3. Snimanje temperature i pomaka.....	34
4.3.1. Temperaturne promjene .....	35

---

4.3.2. Prikaz pomaka.....	37
4.3.3. X – Y koordinate pomaka .....	40
4.3.4. Veza temperature i pomaka.....	41
4.4. Vremenske konstante .....	43
4.4.1. Toplinske konstante .....	43
4.4.2. Konstante pomaka.....	45
4.5. Odnosi pomaka i snage .....	46
5. ZAKLJUČAK.....	49
LITERATURA.....	51
PRILOZI.....	53

**POPIS SLIKA**

Slika 1	Izrada međunarodnog parametra 1874.....	1
Slika 2	Spektar elektromagnetskih valova.....	3
Slika 3	Shema strukture industrijskog CT uređaja.....	4
Slika 4	Industrijski CT uređaj Nikon XT H 225.....	5
Slika 5	Unutarnji dijelovi CT uređaja.....	6
Slika 6	Shematski prikaz izvora zračenja.....	7
Slika 7	Prikaz direktnog i indirektnog detektora.....	8
Slika 8	Prikaz bežičnog detektora CT uređaja proizvođača Rayence.....	9
Slika 9	Rotacijski stol umjeravan vanjskim manipulatorom.....	10
Slika 10	Prikaz linijskog zračenja.....	12
Slika 11	Shema CT uređaja sa konusnim zračenjem.....	13
Slika 12	Aluminijska komponenta mjerenja CT uređajem.....	15
Slika 13	Proces segmentacije za idealizirani i stvarni slučaj.....	16
Slika 14	Netočnost mjerenja.....	18
Slika 15	Linearna pogreška mjerenja.....	19
Slika 16	Nestabilnost mjerenja.....	19
Slika 17	Ponovljivost mjerenja.....	20
Slika 18	Obnovljivost mjerenja.....	20
Slika 19	Točnost ili preciznost.....	21
Slika 20	Ishikawa dijagram utjecaja na mjernu sigurnost.....	22
Slika 21	Efekt relativnog pomaka žarišta u odnosu na mjerni objekt i detektor.....	23
Slika 22	Shematski prikaz zagrijavanja izvora zračenja CT uređaja.....	24
Slika 23	Prikaz prstenastog artefakta slikan na CT uređaju.....	24
Slika 24	Prikaz prstenastih i prugastih artefakata.....	25
Slika 25	Efekt stvrdnjavanja zračenjem.....	26
Slika 26	Prikaz funkcija intenziteta crno - bijele slike.....	27
Slika 27	Promjene funkcije intenziteta slike na primjeru.....	28
Slika 28	Nikon XT H 225 na kojem je provedeno mjerenje.....	29
Slika 29	Termistor broj 3 spojen na uređaj.....	30
Slika 30	Uređaj za mjerenje temperature na termistorima.....	30
Slika 31	Pozicije postavljanja osam termistora na uređaju.....	31
Slika 32	Pomak izvora zračenja u smjeru X osi.....	32
Slika 33	Pomak izvora zračenja u smjeru Y osi.....	32
Slika 34	Pomak izvora zračenja u smjeru Z osi.....	33
Slika 35	Prikaz primjene algoritma detekcije rubova kod radiograma (lijevo snimljeni radiogram, desno slika nakon primjene algoritma).....	34
Slika 36	Izbornik za postavljanje mjerenja u softverskom paketu „Fiji“.....	35
Slika 37	Mjerenje temperature na snazi od 10W.....	36
Slika 38	Mjerenje temperature na snazi od 20W.....	36
Slika 39	Mjerenje temperature za snagu od 30W.....	37
Slika 40	Mjerenje temperature za snagu od 40W.....	37
Slika 41	Prikaz početnih i krajnjih radiograma ( a) za snagu od 10W, b) za snagu od 20W, c) za snagu od 30W, d) za snagu od 40W).....	38
Slika 42	Pomak projekcije po Y osi za četiri snage.....	39
Slika 43	Pomaci središta kuglice za različite razine snage.....	40
Slika 44	Usporedba promjene temperature senzora 2 i pomaka izvora po Y osi.....	41
Slika 45	Usporedba promjene temperature senzora 2 i pomaka izvora po Y osi.....	41
Slika 46	Usporedba promjene temperature senzora 2 i pomaka izvora po Y osi.....	42



---

Slika 47	Usporedba promjene temperature senzora 2 i pomaka izvora po Y osi.....	42
Slika 48	Ovisnost pomaka i temperature za četiri razine snage .....	43
Slika 49	Usporedba stvarne i teoretske krivulje senzora 2 za 4 razine snage.....	44
Slika 50	Usporedba stvarnog i teoretskog $\tau Y$ za razine snage .....	46
Slika 51	Grafički prikaz funkcija pomaka i snage uređaja .....	47

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1	Klasifikacija CT uređaja prema snazi [4].....	13
Tablica 2	Prikaz proizvođača industrijskih CT sustava .....	14
Tablica 3	Usporedba izmjerenih i izračunatih vrijednosti $\tau$ .....	45
Tablica 4	Usporedba vrijednosti $\tau Y$ za pomak Y osi .....	46

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$t$	S	vrijeme
$FOD$	Mm	udaljenost između žarišne točke i objekta mjerenja
$FDD$	Mm	udaljenost između žarišne točke i detektora
$M, M'$	-	geometrijsko povećanje
$d$	Mm	promjer mjernog uzorka
$T_p$	°C	početna temperatura
$T_k$	°C	temperatura u posljednjoj mjernoj točki
$Y_p$	mm	početni pomak
$Y_k$	mm	pomak u posljednjoj mjernoj točki
$\tau$	s	toplinska vremenska konstanta
$\tau_Y$	s	vremenska konstanta pomaka po Y osi
$P$	W	snaga uređaja
$\Delta X_i$	mm	pomak žarišne točke u smjeru X osi
$\Delta X_r$	mm	pomak projekcije u smjeru X osi
$\Delta Y_i$	mm	pomak žarišne točke u smjeru Y osi
$\Delta Y_r$	mm	pomak projekcije u smjeru Y osi
$\Delta Z_i$	mm	pomak žarišne točke u smjeru Z osi
$\Delta Z_r$	mm	pomak projekcije u smjeru Z osi
$\Delta T$	°C	promjena temperature

**SAŽETAK**

U posljednjih dvadeset godina eksponencijalan je rast i primjena industrijskih CT uređaja u kontroli kvalitete i optimiranju kvalitete proizvoda. Iako je ovo poprilično nova metoda nerazornih ispitivanja, koristi se u raznim sferama strojarstva. Međutim, mjerna nesigurnost ovakvih uređaja još nije potpuno utvrđena i postoje razni utjecaji na točnost mjerenja. Jedan od uzroka je oslobađanje topline pri generiranju X – zračenja i povećanje temperature koje može imati značajne utjecaje na točnost radiograma koji se snimaju na CT uređaju. Za potrebe detaljnijeg prikaza u ovom radu je provedena analiza i mjerenje temperature kućišta izvora X – zračenja i promjena, odnosno pomaka na radiogramima. Ispitivanje je provedeno na četiri razine snage uređaja (10W, 20W, 30W i 40W) te su prikazane ovisnosti temperature o pomacima. Prikazani su grafički prikazi i objašnjenja mjernih podataka sa svih mjerenja, te su podaci povezivani matematičkim i grafičkim modelima u svrhu bolje analize utjecaja temperature na točnost CT uređaja. Dobiveni rezultati pokazuju veliki utjecaj promjene temperature na pomak izvora zračenja, a samim time i pomaka na dobivenim radiogramima. U slučaju dugotrajnijih snimanja, veće su promjene temperature i veći su pomaci. Ispitivanja su pokazala da i razina snage uređaja utječe na promjene i stabilnost rada uređaja.

Ključne riječi: računalna tomografija, CT uređaj, temperatura, dimenzionalna stabilnost, mjerna nesigurnost

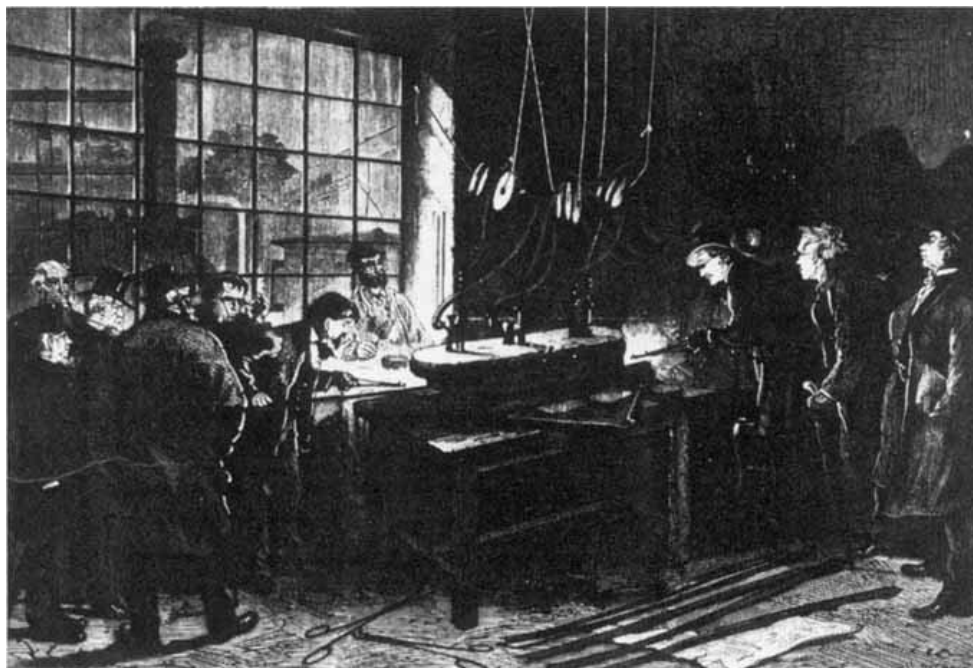
**SUMMARY**

In the last twenty years, the growth and application of industrial CT devices in quality control and product quality optimization has been exponential. Although this is a fairly new method of non-destructive testing, it is used in various spheres of mechanical engineering. However, the measurement uncertainty of such devices has not yet been fully determined and there are various influences on the accuracy of the measurement. One of the causes is the release of heat when generating X - rays is the increase in temperature, which can have significant effects on the accuracy of radiographs recorded on a CT device. For the purpose of a more detailed presentation, this paper analyzes and measures the temperature of the housing of X - ray sources and changes, ie displacements on radiograms. The test was performed at four power levels of the device (10W, 20W, 30W and 40W) and the temperature dependences on the displacements are shown. Graphical representations and explanations of measurement data from all measurements are presented, and the data are connected by mathematical and graphical models for the purpose of better analysis of the influence of temperature on the accuracy of CT devices. The obtained results show a large influence of temperature change on the shift of the radiation source, and thus the shift on the obtained radiograms. In the case of longer recordings, the greater the temperature changes and the greater the shifts. Tests have shown that the power level of the device also affects changes and stability of device operation.

Key words: computed tomography, CT device, temperature, dimensional stability, measurement uncertainty

## 1. UVOD

Od rimskih vremena postoji izreka „Historia magistra vitae est“ – „Povijest je učiteljica života“. Da bi se mogla objasniti sama bit kontrole kvalitete i potrebe za svim mjerenjima mogli bi se osvrnuti u povijest i reći da je kvaliteta, iako percipirana na drugačiji način nego danas, uvijek bila pojam razmatranja i procjene bilo da se radilo oružjima i oruđima, kvaliteti nastambi ili hrani. Bez napretka kvalitete svega oko nas, zasigurno ne bi bilo ni svijeta kakvog danas poznajemo. Tadašnji zahtjevi za kvalitetom koji su bili uglavnom egzistencijalne prirode doveli su uglavnom do zadivljujućih građevinskih i arhitektonskih postignuća, čega bi primjer bile Egipatske piramide. Kontrola kvalitete ne bi bila moguća bez mjerenja, pa je tako od iznimne važnosti bio „Dogovor o metru“ ili „Metarska konvencija“ koji predstavlja temeljni dokument svjetskoga mjernog jedinstva. Potpisali su ga 20. 5. 1875. predstavnici 17 zemalja, među njima i ondašnja Austro-Ugarska, u čijem je sastavu tada bila Hrvatska [1]. Do danas je Dogovor o metru potpisalo pedesetak zemalja, među njima one gospodarski najrazvijenije, pa je zato on polazište međunarodne normizacije u razmjeni dobara, usluga i informacija. Dogovorom je međunarodno prihvaćen Metarski sustav jedinica, nastao u Francuskoj 1795. iz kojega se razvio današnji Međunarodni sustav jedinica (SI), prihvaćen 1960., koji je polazište suvremenoga međunarodnoga mjernog jedinstva [1].



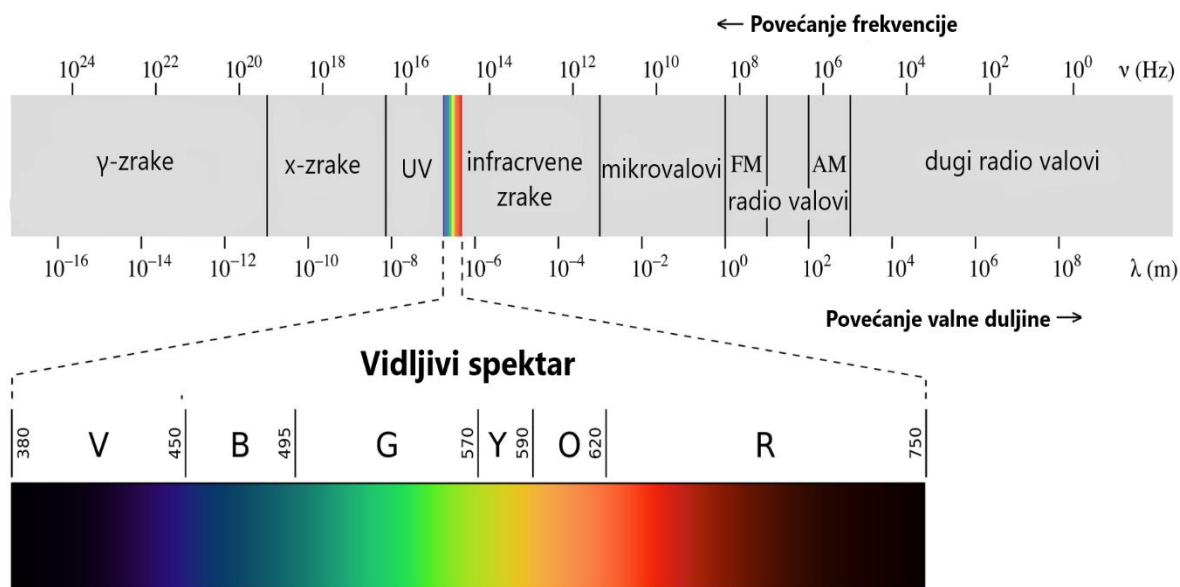
**Slika 1** Izrada međunarodnog parametra 1874. [1]

Današnji način moderne kontrole kvalitete počeo se razvijati 1930-ih godina primjenom nekih statističkih metoda kao što su kontrolni grafikoni, dok se ozbiljan razvoj smatra tek od 60-ih godina upotrebom kontrolnih grafikona da bi se pratili proizvodni procesi i da se dobiju povratne informacije o njima. Sve veći zahtjevi i konkurencija na tržištu proizvoda, posebno strojeva i strojarskih dijelova traži i sve veću preciznost, te takvim razvojem postoje sve robusniji, precizniji i kvalitetniji mjerni uređaji. Mjerne metode se dijele na razorne (one kojima se na neki način mora oštetiti promatrani objekt) i nerazorne (one kojima se ne oštećuje promatrani objekt). Nerazorna ispitivanja (eng. *non-destructive testing*, NDT) ili kontrola bez razaranja danas postaju sve više popularna i tražena kako zbog ekonomskih, tako i zbog tehnoloških čimbenika. Metode ispitivanja bez razaranja su: vizualni pregled (VP), dimenzionalna kontrola (DK), penetrantsko ispitivanje (PI), magnetsko ispitivanje (MI), ultrazvučno ispitivanje (UI), radiografsko ispitivanje (RI), akustička emisija (AE), ispitivanje nepropusnosti i ostale metode [2].

Računalna tomografija (eng. *Computed Tomography* - CT), razvijena 1970-ih kao tehnika medicinskog snimanja danas se također koristi u nekoliko industrijskih primjena. Jedna od najperspektivnijih industrijskih primjena je dimenzionalno mjeriteljstvo [3]. Samo porijeklo riječi tomografija (grč. tomos - presjek, graphein - pisati) ukazuje na proces koji se odvija kako bi se dobio 3D prikaz objekta. CT uređaj koristi X-zračenje za uzimanje velikog broja dvodimenzionalnih (2D) projekcija presjeka objekta u različitim orijentacijama od kojih se pomoću računalnih algoritama dobiva konačni 3D prikaz [4]. Prvi CT uređaj koji je osposobljen za korištenje bio je 1971. godine, a prvo snimanje izvedeno je na pacijentu, u bolnici Atkinson Morley u Ujedinjenom Kraljevstvu, koji je imao tumor na prednjem režnju mozga. 1975 [5]. Nakon toga uspješnog snimanja CT je prihvaćen u medicini i smatra se kao jedno od najvažnijih otkrića u radiologiji. Iza toga 1980-ih počela je primjena CT uređaja u industriji kod analize materijala. Industrijsko CT skeniranje (industrijska računalna tomografija) je proces koji koristi rendgensku opremu za proizvodnju 3D prikaza komponenti izvana i iznutra. Industrijsko CT skeniranje koristi se u mnogim područjima industrije za internu inspekciju komponenti. Neke od ključnih upotreba za CT skeniranje bile su otkrivanje nedostataka, analiza kvarova, mjeriteljstvo, analiza sklopa, metode konačnih elemenata temeljene na slikama [6].

## 2. INDUSTRIJSKA RAČUNALNA TOMOGRAFIJA

CT je tehnika koja koristi X-zrake za stvaranje 3D volumena/modela uzorka iz serije projekcijske slike ili radiografije. Sir Godfrey N. Hounsfield patentirao je prvi CT skener u 1972. i dobio je Nobelovu nagradu 1979. za svoj izum. Do ranih 1990-ih, CT se uobičajeno koristi za otkrivanje i lociranje materijalnih nedostataka i nedostataka za važne primjene kod pregleda bez razaranja [7]. Industrijski CT strojevi mogu dati dimenzije uzorka i doprinijeti području mjeriteljstva i kontrole geometrijske tolerancije, što je vrlo važno u procjeni funkcionalnosti mehaničkih dijelova. Sposobnošću poboljšanja kvalitete proizvoda, smanjenja troškova pregleda i analize, i smanjenja vremena proizvodnje na tržište, CT se sve više koristi u raznim industrijama kao što su automobilska, elektronika, zrakoplovstvo, medicinski uređaji, lijevani materijali, kod brizganje plastike, u izradi guma, pri proizvodnji 3D tiska, kao i u mnogim drugim industrijskim područjima. Osnova rada bilo kojeg industrijskog CT stroja su X - zrake, odnosno postupak X - zračenja, koje prolaze kroz promatrani objekt. X – zrake su dio elektromagnetskog spektra svjetlosti, koje su izvan vidljivog dosega ljudskog oka.

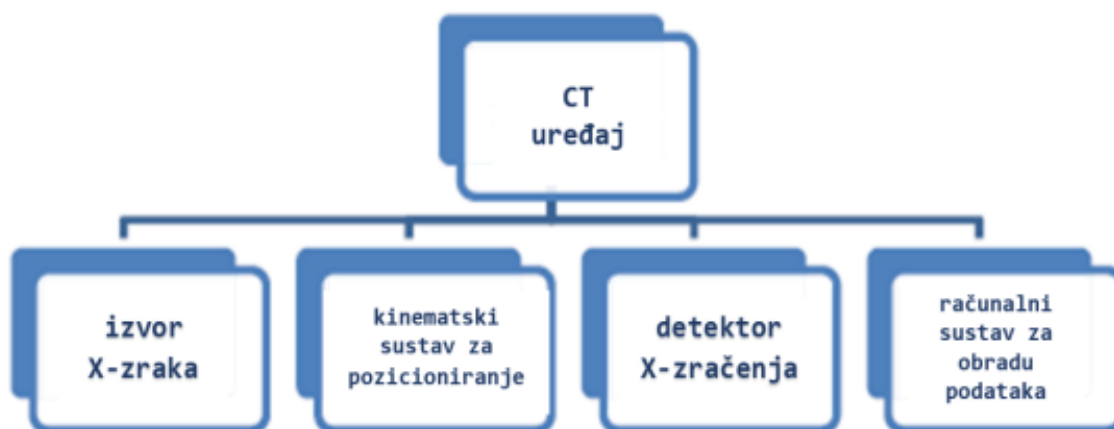


Slika 2 Spektar elektromagnetskih valova [8]



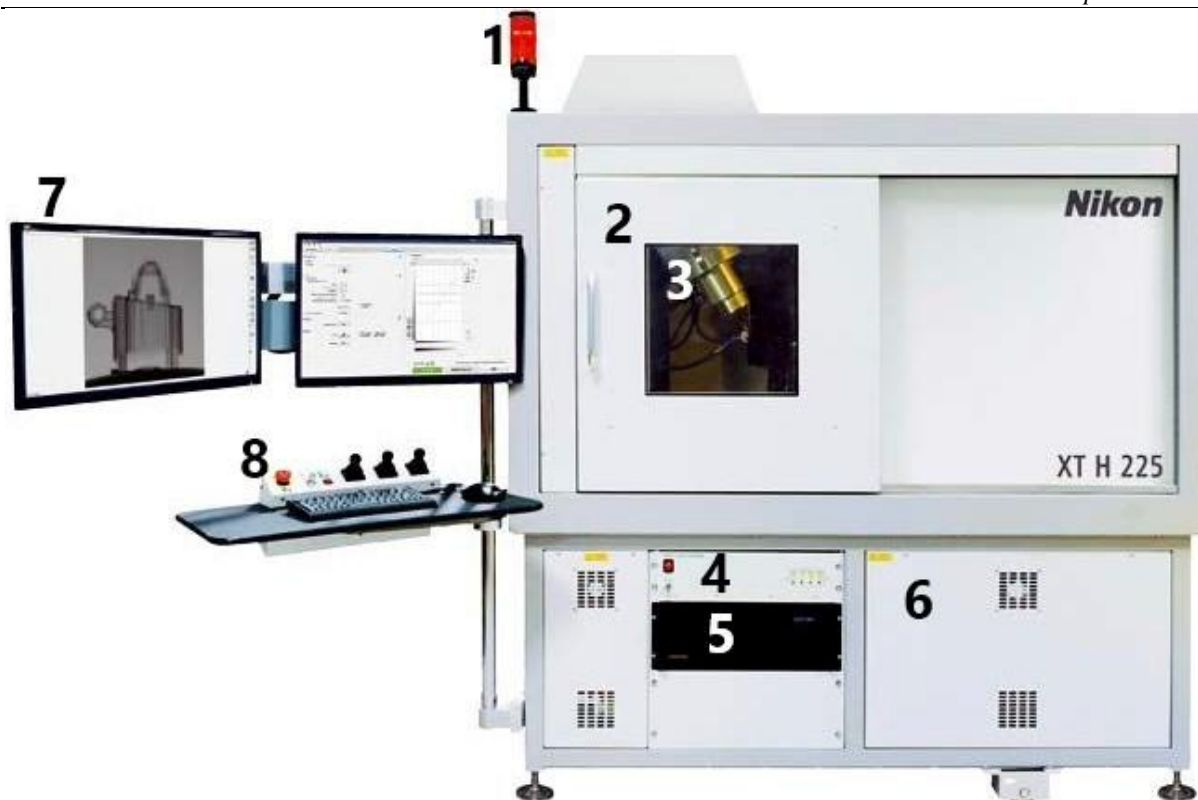
## 2.1. Osnove rada industrijskih CT uređaja

Da bi se objasnila osnova rada industrijskih CT uređaja potrebno je poći od dijelova uređaja, na slici 3 je prikazana općenita struktura industrijskih CT uređaja, dok su na slici 4 prikazani dijelovi CT uređaja na primjeru na kojem je ujedno rađen eksperimentalni dio u poglavlju 4. Kako je prikazano na slici 3, svaki industrijski CT se sastoji od izvora X – zračenja, određenog kinematskog sustava za pozicioniranje (robot ili manipulator), detektora X – zraka koje dolaze sa izvora i prolaze kroz promatrani objekt, te računalnog sustava za obradu dobivenih mjernih podataka koji može biti vanjski, odnosno naknadno dodan na uređaj, ali uglavnom su računalni sustavi tvornički integrirani u CT uređaje.



Slika 3 Shema strukture industrijskog CT uređaja [4]

X – zrake koje izvor zračenja emitira se tijekom prolaska kroz objekt promatranja apsorbiraju i raspršuju, dok samo jedan dio zraka dolazi do detektora. Količina zraka koju detektor očitava određena je vrstom materijala objekta i njegovim dimenzijama. Što je veća gustoća materijala i debljina objekta, manje zraka će detektor očitavati, dok će za manje gustoće materijala i manje debljine objekta detektor očitati više X – zraka.

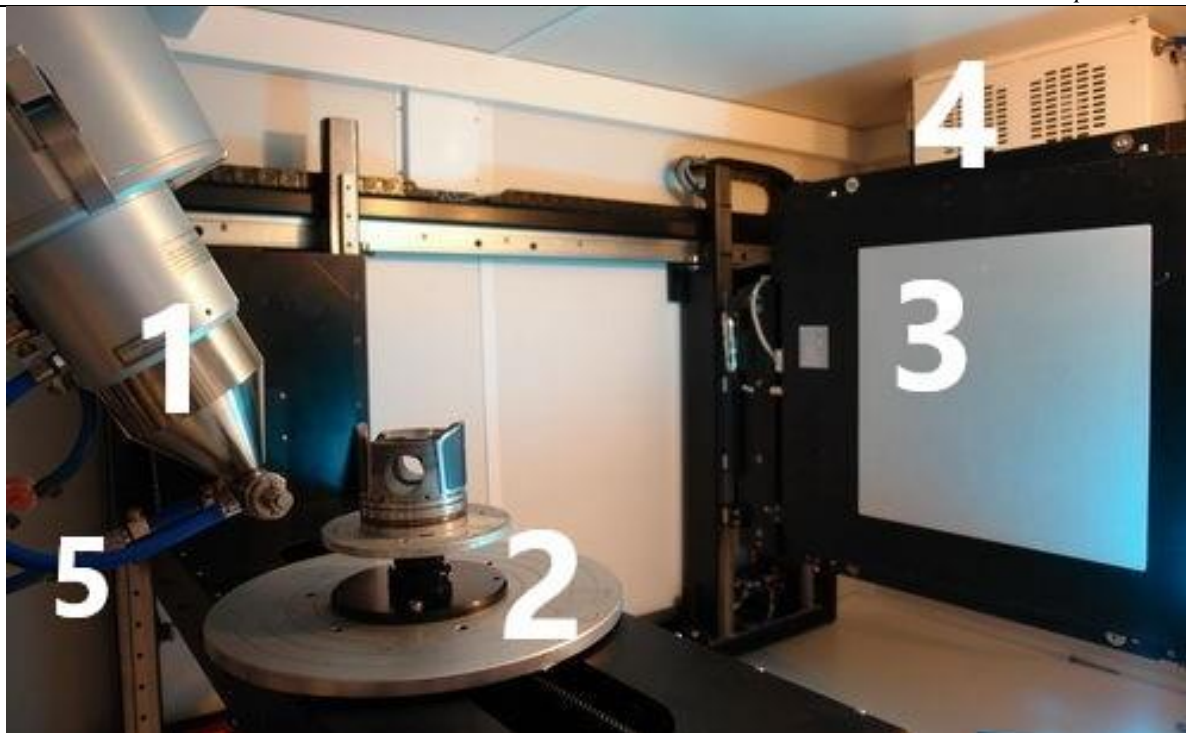


**Slika 4 Industrijski CT uređaj Nikon XT H 225 [9]**

Industrijski CT uređaj proizvođača Nikon oznake XT H 225 sastoji se od:

1. Svjetlo za upozorenje o aktivaciji X – zraka
2. Vrata uređaja sa zaštitom prolaska X - zračenja
3. Prozor za promatranje unutrašnjosti
4. SR4 kontroler
5. Računalo uređaja na kojem se pohranjuju podaci snimanja
6. Pristupna ploča
7. Monitor povezan sa računalom uređaja
8. Kontroler manipulatora izvora zračenja

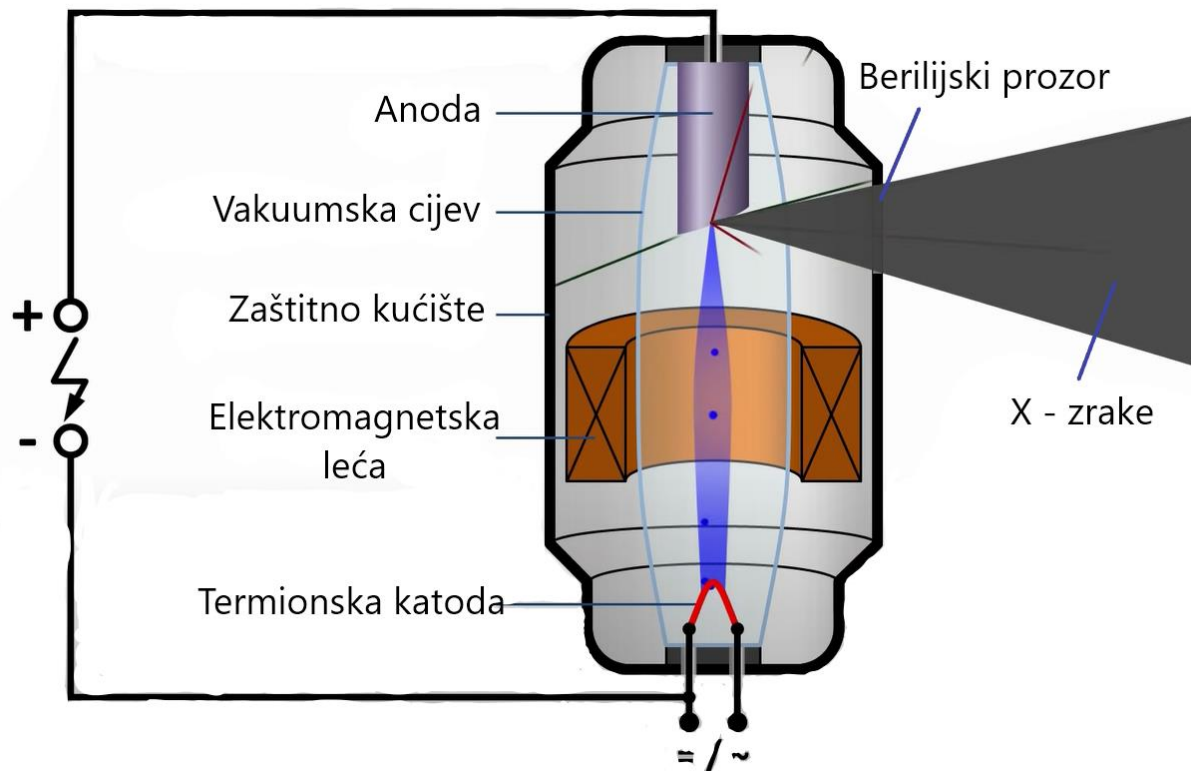
Dio uređaja gdje su oznake 1, 2 i 3 je komora obložena olovom u kojoj se s unutarnje strane nalaze dijelovi prikazani na slici 5: 1 – izvor X – zraka, 2 – rotacijski stol na koji se postavlja objekt koji se snima, 3 – detektor X – zraka, 4 – ventilator koji služi za hlađenje uređaja iznutra, 5 – crijeva za hlađenje izvora zračenja. Donji dio gdje su oznake 4, 5 i 6 se sastoji od napajanja uređaja električnom energijom i ostalih elektroničkih komponenti, pogona rotacionog stola ( manipulatora), pumpe za hlađenje izvora rendgenskih X – zraka, vakuum pumpe i integriranog računala.



Slika 5 Unutarnji dijelovi CT uređaja [9]

### 2.1.1. Izvor X – zračenja

Najvažniji dio svakog CT uređaja je izvor zračenja u kojem se generiraju X – zrake. Osnovni dio izvora je tzv. tankostijena vakuumska cijev koja mora imati visoki vakuum; ona može biti izrađena od stakla, a u novije vrijeme se koriste metalne ili keramičke cijevi zbog dužeg životnog vijeka i bolje provodljivosti zračenja [4]. Ukoliko ne bi bio potpuni vakuum u cijevi generirane zrake bi udarale čestice zraka i drugih plinova te bi se raspršivale i ne bi bilo moguće dobiti usko centrirano zračenje. Na jednoj strani vakuumske cijevi nalazi se termionska katoda koja se izrađuje od volframa kao žica u obliku slova V, dok je na drugoj pozicionirana katoda, koja je na slici 6 spojena na bakreni cilindar. Iz izvora visokog napona pozitivni pol se spaja na anodu, a negativni pol se spaja na termionsku katodu. Takvim spajanjem između anode i katode se stvara jako električno područje koje usmjerava elektrone prema anodi, odnosno stvoren je elektronski snop. Sudaranjem tih elektrona, pri velikim brzinama, o metalnu anodu stvaraju se X – zrake, koje se šire u svim smjerovima. X – zrake se generiraju u dva procesa: zakočno zračenje (ger. Bremsstrahlung) i karakteristično zračenje [4].

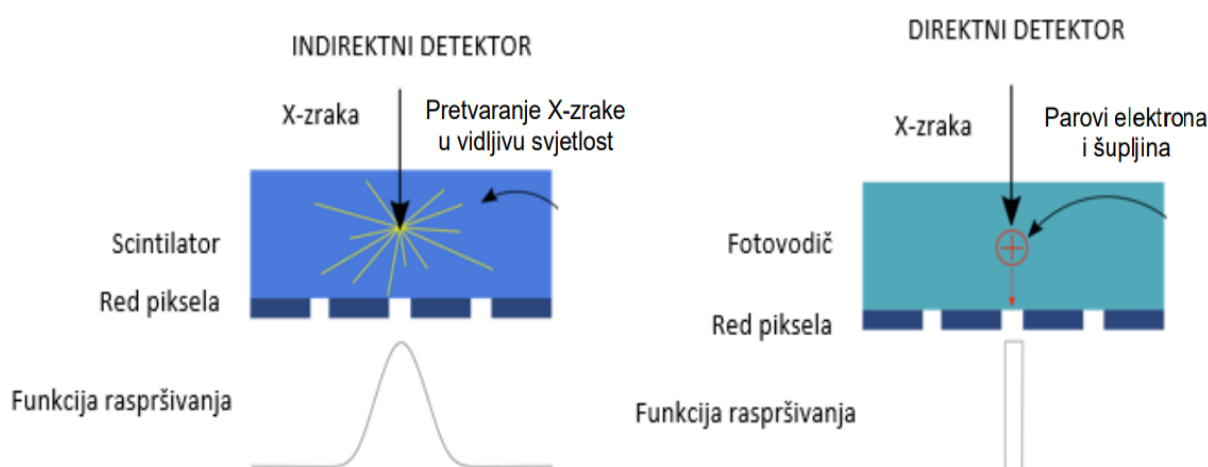


Slika 6 Shematski prikaz izvora zračenja

Zakočno zračenje nastaje kada se elektron približi vrlo blizu jezgri atoma, ali se zapravo ne sudari ni s jednim njezinim dijelom. Tijekom tog procesa, elektron je pod utjecajem jakog nuklearnog privlačenja, gdje pozitivno nabijena jezgra privlači negativno nabijeni elektron. Rezultirajući gubitak energije, zbog interakcije, dovodi do emisije fotona s istom energijom [4]. Karakteristično zračenje nastaje kada se dolazni elektron izravno sudari s jednim od elektrona ljuske, stvarajući prazno mjesto elektrona. Kada se ovo prazno mjesto popuni elektronom iz vanjske ljuske, emitira se diskretni spektar X-zraka [4]. Ovaj način rada generira mnogo topline koja rezultira zagrijavanjem uređaja, pa je potrebno adekvatno izvedeno hlađenje izvora zračenja. O posljedicama nedovoljno dobro realiziranog zračenja govorit će se detaljno u poglavlju 4. Budući da se X – zrake odbijaju u svim smjerovima od anodu potrebno je zaštitno kućište koje će štiti okolinu od zračenja i u ovom slučaju, zrake prolaze samo kroz berilijski prozor koji je ostavljen na kućištu. Elektronski snop je širok zbog širine anode kako je prikazano na slici 6 i zbog toga se dodaje elektromagnetska leća koja sužava elektronski snop. Što je snop na anodi manji to će konačna kvaliteta dobivene slike biti oštija i veće rezolucije. Siva površina na slici 6 prikazuje sve moguće X – zrake koje mogu izaći van kućišta.

### 2.1.2. Detektor

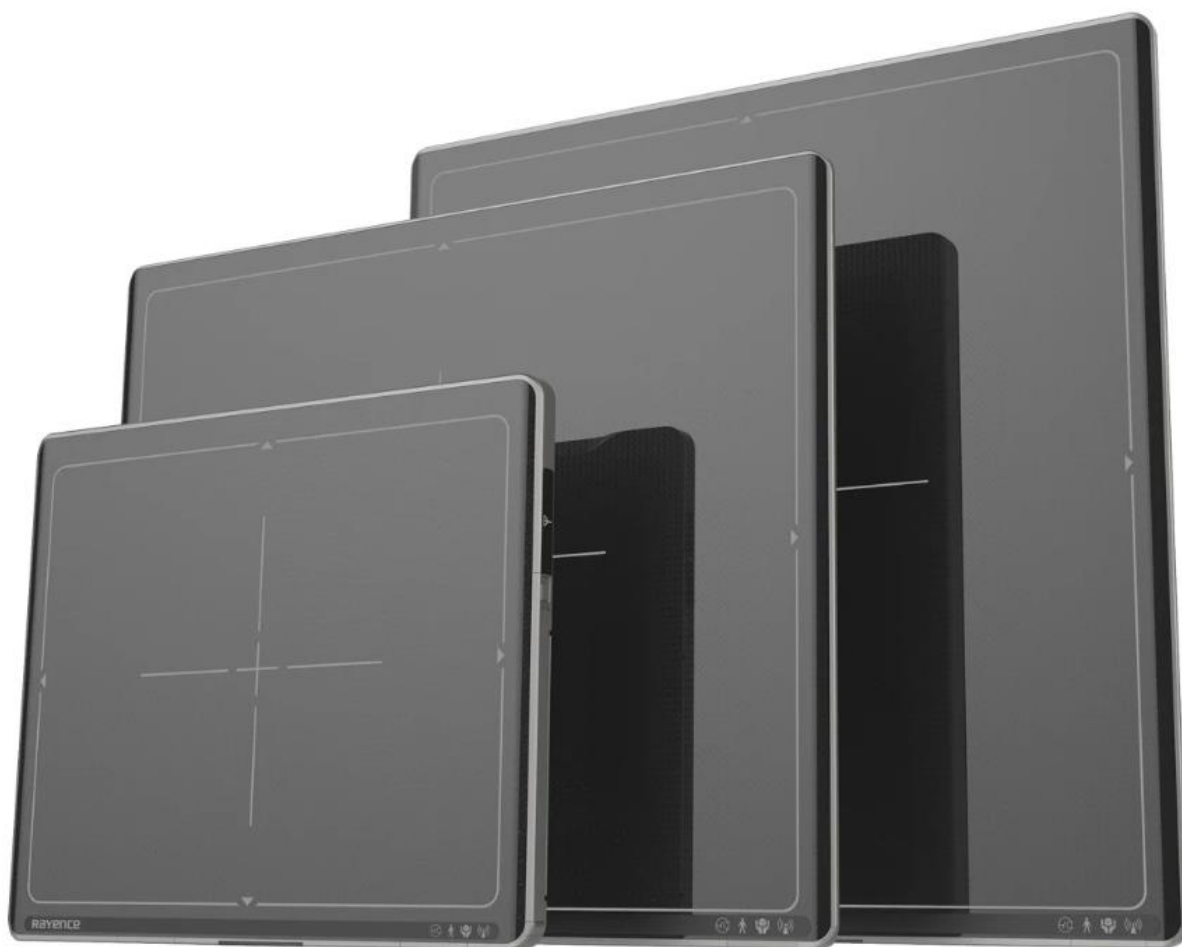
Osnovna funkcija detektora je pretvaranje rendgenskog toka u električne signale koji se obrađuju u računalnom uređaju i kroz pretvorbu u softveru daju konačnu sliku. Kod industrijskih CT uređaja se uglavnom koriste detektori ravnih panela koji su 2D (dvodimenzionalni), jer su izvori uglavnom konusni. Kod linijskih izvora X – zraka koriste se 1D detektori. Detektor ravnog panela (eng. *Flat panel detector*, FPD) je fotografski element koji se koristi u digitalnoj radiografiji. Na isti način na koji normalna digitalna kamera koristi senzor za primanje svjetlosti koja prolazi kroz leću i pretvaranje u sliku, detektor ravnog panela pretvara X-zrake koje prolaze kroz objekt u sjeni u sliku.



**Slika 7 Prikaz direktnog i indirektnog detektora [10]**

Indirektni detektori sadrže sloj scintilatornog materijala, obično ili gadolinijev oksisulfid ili cezijev jodid, koji pretvara X-zrake u svjetlo. Neposredno iza sloja scintilatora nalazi se niz detektora amornog silicija proizveden postupkom koji je vrlo sličan onom koji se koristi za izradu LCD televizora i računalnih monitora. Za razliku od LCD-a, ali sličan čipu senzora slike digitalnog fotoaparata, svaki piksel također sadrži fotodiodu koja generira električni signal proporcionalno svjetlu koje proizvodi dio scintilatorskog sloja ispred piksela. Signali s fotodioda se pojačavaju i kodiraju dodatnom elektronikom smještenom na rubovima ili iza niza senzora kako bi se proizvela točna i osjetljiva digitalna reprezentacija rendgenske slike. Indirektni detektori sadrže sloj scintilatornog materijala, obično ili gadolinijev oksisulfid ili cezijev jodid, koji pretvara X-zrake u svjetlo. Neposredno iza sloja scintilatora nalazi se niz detektora amornog silicija

proizveden postupkom koji je vrlo sličan onom koji se koristi za izradu LCD televizora i računalnih monitora. Poput TFT-LCD zaslona, milijuni piksela od otprilike 0,2 mm od kojih svaki sadrži tankoslojni tranzistor tvore mrežu s uzorkom amornog silicija na staklenoj podlozi [11]. Za razliku od LCD-a, ali ipak sličan čipu senzora slike digitalnog fotoaparata, svaki piksel također sadrži fotodiodu koja generira električni signal proporcionalno svjetlu koje proizvodi dio scintilatorskog sloja ispred piksela. Signali s fotodioda se pojačavaju i kodiraju dodatnom elektronikom smještenom na rubovima ili iza niza senzora kako bi se proizvela točna i osjetljiva digitalna reprezentacija rendgenske slike [12].



**Slika 8** Prikaz bežičnog detektora CT uređaja proizvođača Rayence

Najvažnije karakteristike detektora su: pokrivenost polja, geometrijske karakteristike, kvantna učinkovitost, osjetljivost, prostorna razlučivost, karakteristike šuma, dinamički raspon, uniformnost, brzina akvizicije, brzina kadrova i cijena [13].

### 2.1.3. Ostali dijelovi

Osim izvora zračenja i detektora zraka ostali dijelovi CT uređaja imaju gotovo jednaku važnost u kvaliteti izrade i za kvalitetu, točnost i preciznost snimljenih slika, budući da su CT uređaji kompleksno složeni od mnoštva dijelova. Prilikom izrade jednog dijela mora se obraćati pozornost na sve ostale, jer mehanički dijelovi moraju biti u korelaciji i koegzistentni jedni s drugima, u protivnom velika je mogućnost da konačni rezultati mjerenja neće biti validni.

Rotacijski stol je dio uređaja koji se nalazi između izvora zračenja i detektora, na koji se smješta objekt promatranja. Rotacijski stol se još može nazivati i manipulator ili kinematski sustav za pozicioniranje, ovisno koja se literatura iščitava. Zapravo je rotacijski stol postavljen na manipulator. Kod većine industrijskih CT uređaja rotacijski stol je pomičan, te je spojen na kontroler. Kada se objekt ispravno postavi na njega sa kontrolerom se objekt pozicionira onako kako snimanje zahtjeva. Manipulator ima najmanje jednu pomičnu os, ali najčešće, kod novijih CT uređaja, tri ili više osi. Ovaj dio mora biti izuzetno precizno i točno postavljen. Dodatno se u pogonima znaju koristiti vanjski roboti ili manipulatori koji umjeravaju rotacijski stol na isprogramirane vrijednosti.



**Slika 9** Rotacijski stol umjeravan vanjskim manipulatorom [9]

Zaštitno kućište je iznimno važno zbog zdravlja i sigurnosti operatera na CT uređaju, budući da je ovakva vrsta zračenja štetna za živa bića, posebno prilikom dugotrajnijeg izlaganja i može dovesti do ozbiljnih zdravstvenih poremećaja, stoga mora biti oprezno, izabrano pažljivo i sa velikim koeficijentom sigurnosti. Parametri na osnovu kojih se odabire vrsta kućišta su snaga snopa, radno opterećenje, raspršenje i curenje X - zraka. Veća snaga energije zračenja zahtijeva veću debljinu kućišta. Tradicionalni materijal koji se koristi u zaštiti od štetnih rendgenskih zraka je olovo, zbog svoje velike gustoće ( $11340 \text{ kg m}^{-3}$ ) i atomskog broja (82) [4]. Osim zaštite ljudi izvan uređaja važna je izolacija od buke i temperature okoline, koji bi potencijalno mogli utjecati na rezultate snimanja.

Sustav hlađenja je sljedeći važan kotačić izrade kvalitetnog CT uređaja. Kada rendgenska cijev radi, otprilike 1 % generirane energije emitira se kao rendgenske zrake, a preostala energija se oslobađa kao toplina. Značajna količina proizvedene topline može uzrokovati štetu i utjecati na stabilnost generiranih rendgenskih zraka [4]. Moderni dizajni koriste rotirajuće anodne cijevi tako da se toplina može raspršiti na različitim dijelovima ciljne ploče. Osim upotrebe rotirajuće anode i bakra za raspršivanje topline, za hlađenje rendgenskih cijevi često se koriste i recirkulacijski sustavi vode, ulja ili drugih toplinski vodljivih materijala. Također se za hlađenje koristi ventilacijski sustav za održavanje temperature unutar uređaja za vrijeme snimanja.

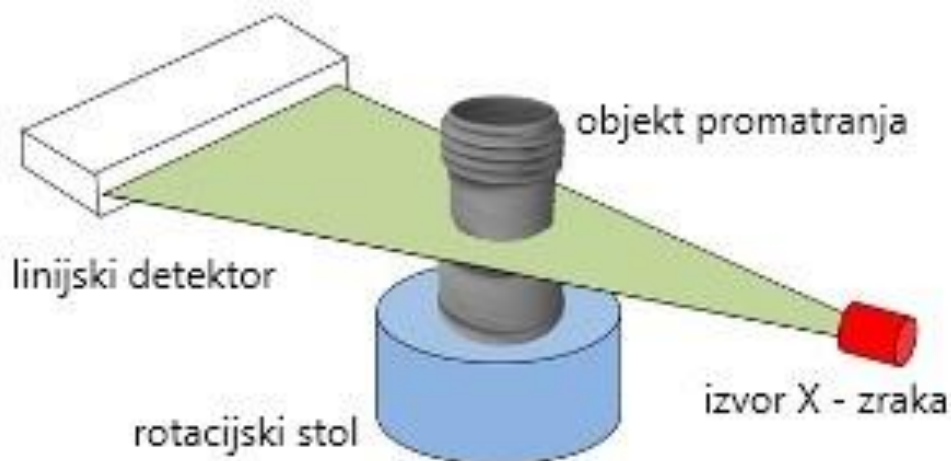
Sljedeći važan dio je računalni hardver, kod kojeg je važno obratiti pozornost na tri komponente kao i kod svakog drugog računala - radnu memoriju (RAM), snagu procesora (CPU) i grafičku karticu (GPU). Budući da je danas ubrzan razvoj računalnih komponenti, ovaj dio rijetko predstavlja problem pri konstrukciji CT uređaja. Dodatno je bitno naglasiti važnost grafičke kartice pomoću koje se učitavaju slike dobivene snimanjem na uređaju, gdje ona mora biti dosta jaka da bi mogla ispravno upravljati velikim količinama fotografija. Idealno je koristiti procesore sa više jezgri i sa dovoljno radne memorije da bi računalu bilo lakše upravljati s više procesa odjednom, bez poteškoća. Ovaj dio uređaja je važan također zbog brzine korištenja i snimanja, odnosno što je kvalitetniji računalni hardver, to ćemo brže moći raditi sa slikama dobivenim snimanjem.



## 2.2. Vrste industrijskih CT uređaja

### 2.2.1. Podjela prema vrsti rendgenskog snopa

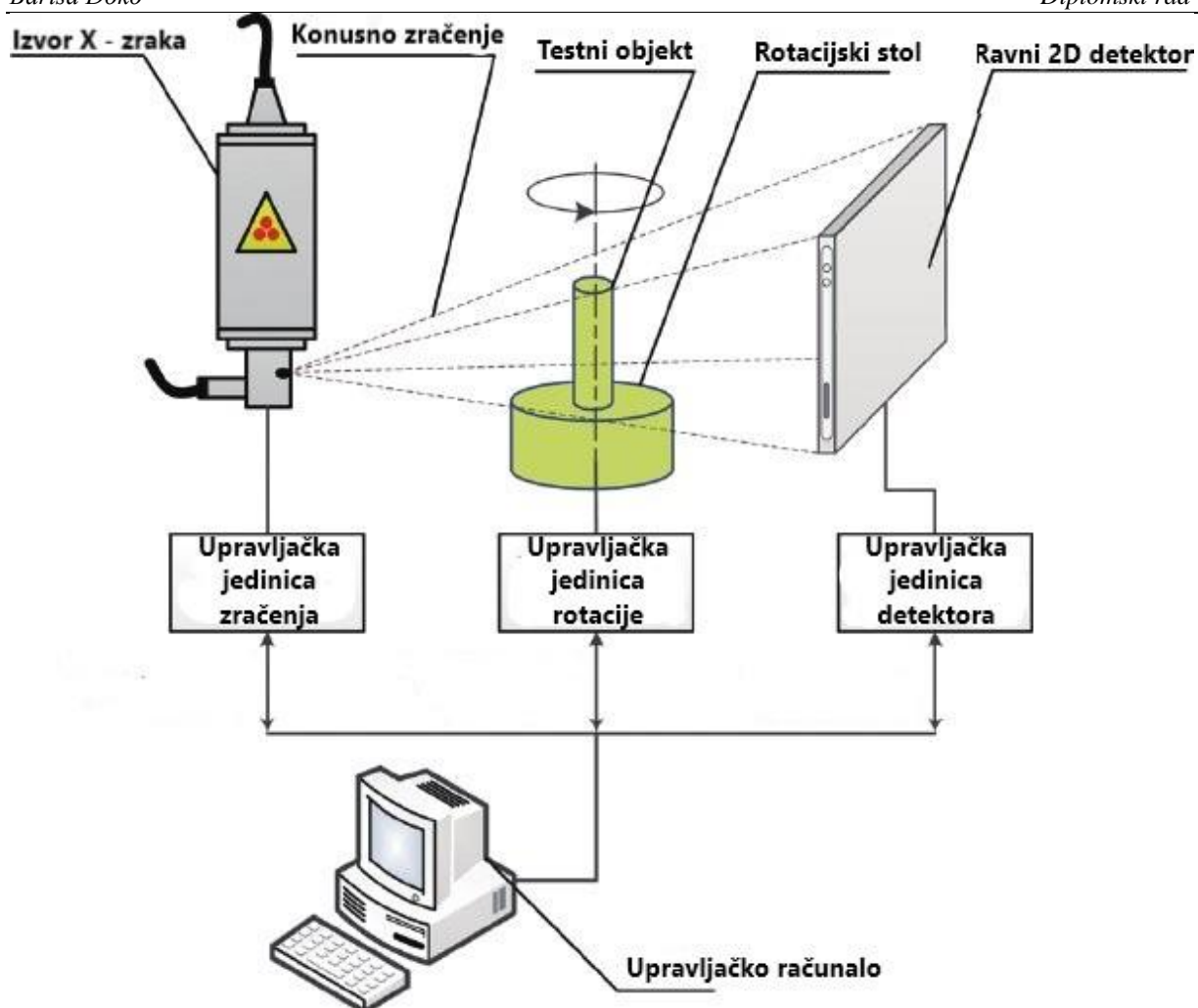
Industrijski CT uređaji mogu se podijeliti prema vrsti izvora rendgenskog snopa na linijske i konusne. Najčešće se u industriji koriste konusni, ali za određene potrebe koriste se i linijski izvori X – zračenja.



Slika 10 Prikaz linijskog zračenja [14]

Skeniranje linijskim snopom (eng. *line beam scanning*) tradicionalni je proces industrijskog CT skeniranja, a ujedno i prvi koji je razvijen. X-zrake se generiraju u izvoru zračenja i snop se kolimira kako bi se stvorila linija, kako je prikazano na slici 10. Snop rendgenske linije se zatim prevodi preko objekta promatranja i detektor prikuplja podatke. Objekt promatranja se treba snimati iz dosta različitih pozicija da bi imali što više podataka pomoću kojih bi mogli napraviti daljnju analizu. Podaci se zatim rekonstruiraju kako bi se stvorio 3D volumenski prikaz dijela. Ovaj proces za složene strojarске dijelove može biti dosta dugotrajan, stoga se kod novijih CT uređaja uglavnom koriste izvori sa konusnim rendgenskim snopovima.

Kod skeniranja konusnim snopom (eng. *cone beam scanning*), dio koji se skenira postavlja se na rotirajući stol, kako je prikazano na slici 11. Kako se dio rotira, stožac rendgenskih zraka snima veliki broj 2D slika koje detektor prikuplja i šalje na upravljačko računalo. 2D slike se zatim obrađuju na upravljačkom računalu kako bi se stvorio 3D volumenski prikaz vanjske i unutarnje geometrije dijela.



Slika 11 Shema CT uređaja sa konusnim zračenjem [15]

### 2.2.2. Prikaz uređaja prema snazi i proizvođačima

Općenito postoje četiri razine energije za CT uređaje, koje su obično grupirane prema energiji izvora zračenja (energija izražena u jedinicama elektron-voltima) i one su prikazane u tablici 1. Najčešći uređaji su srednjih snaga i oni se najviše koriste u industrijskim i akademskim područjima.

Tip uređaja	Raspon Snage	Rezolucija
Nano	n/a	< 1 $\mu\text{m}$
Niska snaga	0 – 110 keV	> 1 $\mu\text{m}$
Srednja snaga	110 keV – 999 keV	> 1 $\mu\text{m}$
Visoka snaga	> 1 MeV	> 1 $\mu\text{m}$

Tablica 1 Klasifikacija CT uređaja prema snazi [4]

U tablici 2 su prikazani proizvođači industrijskih CT uređaja, lokacija tvrtki, te primjena njihovih CT uređaja u različitim područjima.

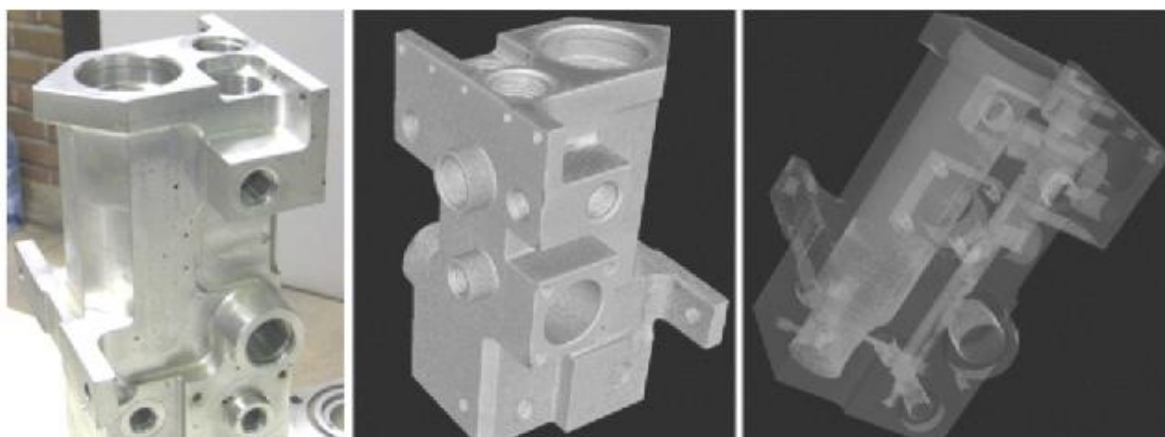
<b>Tvrtka</b>	<b>Lokacija</b>	<b>Primjena</b>
Carl Zeiss AG	Oberkochen, Njemačka	Odljevci Tehnologija plastike Elektronika Automatizacija
GE Sensing and Inspection Technologies	Wunstorf, Njemačka	Znanost o materijalima Inženjering plastike Geologija/biološke znanosti Lijevanje i zavarivanje Senzori i elektrotehnika
Nikon Metrology NV	Tring, Velika Britanija	Mikročip Turbinska lopatica
Nordson Corporation	Aylesbury, Velika Britanija	Sklop tiskane ploče Analiza kvarova Poluvodiči
Skyscan	Kontich, Belgija	Biomedicinski Znanost o materijalima Elektronika Geologija
North Star Imaging Inc.	Minnesota, SAD	Zrakoplovstvo Medicinski uređaji i farmaceutski proizvodi Odljevci plastike Elektronika Muzej
Werth Messtechnik GmbH	Dusseldorf, Njemačka	Plastika/hibridna plastika Lagani metali visoke gustoće
Xradia Inc.	California, SAD	Znanost o materijalima Geološke znanosti Poluvodiči

**Tablica 2 Prikaz proizvođača industrijskih CT sustava**

### 2.3. Primjena industrijskih CT uređaja

Razvojem tehnologije i samih CT uređaja stvoreno je okruženje u kojemu se CT uređaji koriste u različitim primjenama da bi se kontrolirala kvaliteta konačnih proizvoda. Već iz tablice 2 na prethodnoj stranici je vidljivo koliko je široka primjena rendgenskih uređaja. Danas se analiza računalnom tomografijom najčešće koristi u znanosti o materijalima, industrijskom mjeriteljstvu i proizvodnji, biomedicini, znanosti o hrani, paleontologiji i znanosti o Zemlji.

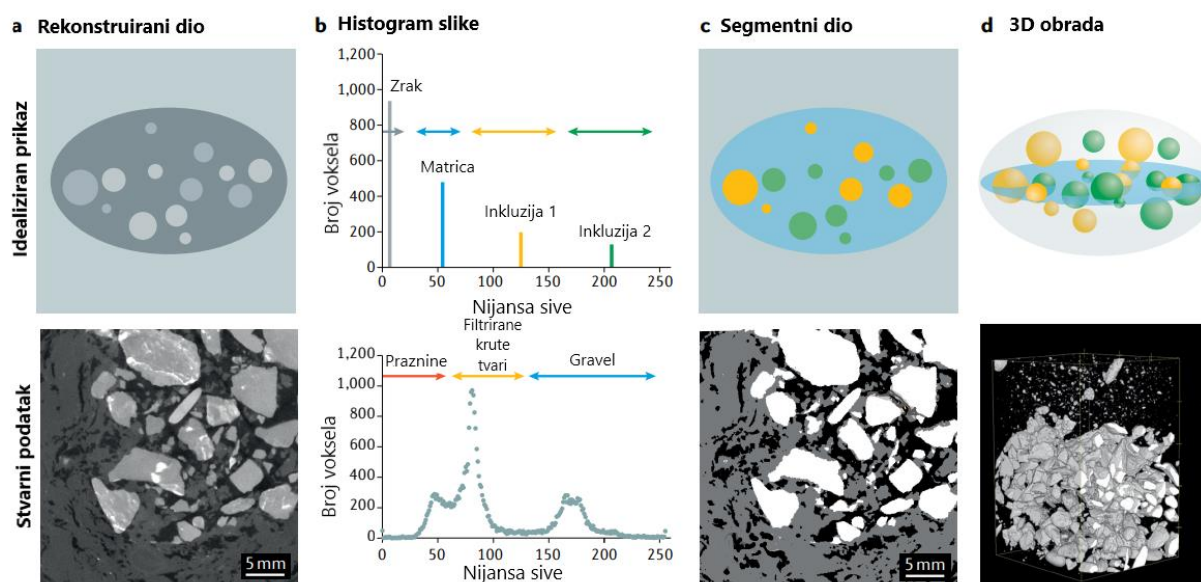
Rendgenski CT se sve više koristi u proizvodnji, ne samo za pregled i mjerenje proizvedenih proizvoda i komponenti, nego i za pružanje povratnih informacija kako bi poboljšati kvalitetu u svim fazama razvoja proizvoda. Prednost CT-a u odnosu na konvencionalne industrijske mjeriteljske alate, kao što su strojevi za koordinatno mjerenje, jest u tome što CT može kvantificirati unutarne značajke i detalje koji su teški/nemogući za vanjski pristup bez razaranja materijala. Osim proizvodnih nedostataka kao što su pore, pukotine, inkluzije mogu se identificirati varijacije gustoće, osiguravajući kvalitetu mehaničkih dijelova [16]. U automobilskoj i zrakoplovnoj industriji CT se koristi za inspekciju metalnih odljevaka i provjeru kvalitete zavarenih i lijepljenih spojeva, te poroznost i pukotine na dijelovima. CT slike mogu dosta optimizirati proizvodne procese i otkrivati pore na različitim dubinama materijala.



Slika 12 Aluminijska komponenta mjerenja CT uređajem [17]

U svrhu bolje analize konačnih fotografija razvijeni su specifični softverski alati za mjeriteljske analize, kao što su nominalne i stvarne usporedbe — usporedbe izmjerene geometrije s računalnim modelom projektiranja, te provjera dimenzijskih i geometrijskih tolerancija. Razvijeno je nekoliko algoritama za poboljšanje točnosti CT mjerenja u različitim točkama procesa za obradu CT podataka [16].

Kada se govori o primjeni CT uređaja kod analize struktura materijala, može se reći da je upotreba X – zračenja dala puno širu sliku o znanosti o materijalima nego što je to bilo do tada. Prije CT uređaja znanstvenici su se uglavnom oslanjali na elektronske ili optičke mikroskope kojima su dobivali dvodimenzionalne slike. Međutim, mnogi aspekti se ne mogu lako razaznati iz 2D sekcije, kao što je stupanj perkolacije faze u promatranom uzorku, transport tekućine kroz poroznu mrežu ili 3D struktura staničnih materijala [16].



Slika 13 Proces segmentacije za idealizirani i stvarni slučaj [16]

Pojam biomedicinsko snimanje više se odnosi na ispitivanje bioloških uzoraka ili cijelih životinja, nego na dijagnostičko skeniranje pacijenata u bolnici. Dok je optička mikroskopija često metoda izbora obrade slika, CT se pojavio kao moćan i svestran alat koji može nadopuniti ili zamijeniti ostale metodologije, zahvaljujući sposobnosti rendgenskih zraka da prođu duboko u materiju i mogućnostima za brzu vizualizaciju 3D struktura [16]. CT se doista može koristiti za digitalno ispitivanje, istovremeno prikazujući relativno velike dijelove promatranih uzoraka i vremenski neusporedivo učinkovitije od tradicionalnog rezanja i pregleda „dio po dio“ ispod mikroskopa. Kod pregleda životinja dosta je popularno promatranje fosila starih i po nekoliko milijardi godina, te korištenjem mikroCT – a, uz dodatnu programsku podršku moguće je dobiti prikaze 3D primjera fosila kakvi se do prije dvadesetak godina nisu mogli ni zamišljati. Također, CT uređaji se koriste i za pregled Zemljinog tla. Optički neprozirna i osjetljiva priroda tla i sedimenta znači da je CT vrlo prikladan za istraživanje biogeokemijskih i strukturnih heterogenosti te određivanje njihovih funkcija i ponašanja u vremenskoj domeni.

## 2.4. Prednosti i nedostaci industrijskih CT uređaja

XCT sustavi počinju nadmašivati konvencionalne taktilne koordinatne mjerne strojeve ili laserske skenere u nekim područjima zbog prednosti koje su navedene u nastavku [4]:

- sposobnost ispitivanja bez razaranja (NDT) za inspekciju i mjeriteljstvo;
- značajno smanjenje troškova pregleda i analize od testnog modela do proizvodnje;
- sposobnost brze i točne provjere konstrukcije unutarnjih i vanjskih komponenti;
- precizno mjerenje složenih unutarnjih značajki bez destruktivnog ispitivanja;
- zahtjevi za učvršćenje - dijelovi se skeniraju u slobodnom stanju, minimizirajući rizik od oštećenja ili grešaka deformacije stezanja;
- sposobnost obrnutog inženjeringa zatvorenih geometrija i komponenti;
- smanjenje troškova razvoja u izradi prvog CAD modela.

Nedostaci koji bi mogli biti su:

- Za sada nema dostupnih prihvaćenih ispitnih postupaka za uređaj;
- Složeni i brojni utjecaji koji potencijalno mogu utjecati na mjerenja;
- Smanjena sposobnost mjerenja oblika zbog pogrešaka mjerenja (artefakti);
- Mjerna nesigurnost u mnogim slučajevima nepoznata (rezultati se ne mogu pratiti);
- Problemi prilikom skeniranja više materijala unutar jednog proizvoda (ponekad teško odrediti vrstu materijala).

### 3. UTJECAJI NA TOČNOST MJERENJA CT UREĐAJA

#### 3.1. Osnovni mjeriteljski pojmovi

##### 3.1.1. Vrste pogrešaka

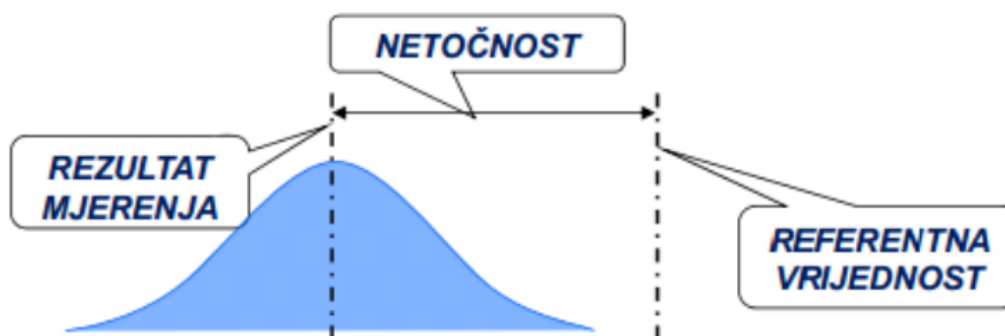
Pogreške u mjeriteljstvu se mogu podijeliti na:

- Sustavne pogreške – tijekom mjerenja ili na kraju mjernog postupka greške koje se pojavljuju su stabilne ili se mijenjaju na predvidljiv način;
- Slučajne pogreške – tijekom mjerenja greške koje se pojavljuju su nestabilne, odnosno ponašaju se nepredvidljivo;
- Grube pogreške – tijekom mjerenja greške koje se pojavljuju imaju značajna odstupanja u odnosu na ostale rezultate. Mjerni rezultati sa grubim pogreškama se odbacuju [3].
- 

##### 3.1.2. Mjerne pogreške

###### 3.1.2.1. Netočnost

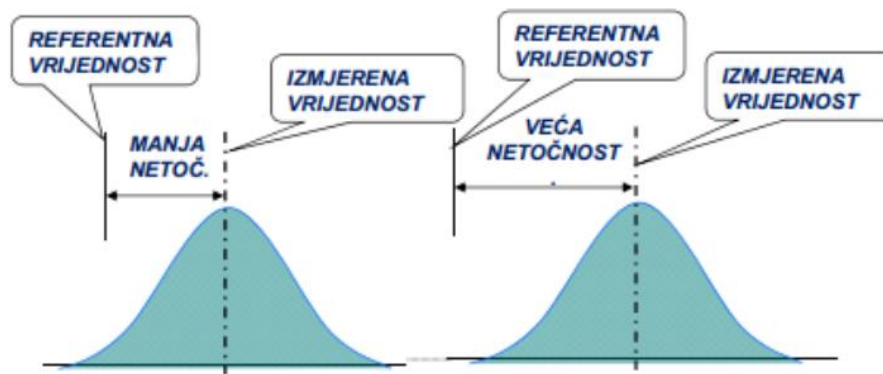
Netočnost je razlika između dobivenog rezultata mjerenja i referentne vrijednosti. Referentna vrijednost je vrijednost koja služi kao dogovorena referenca za mjernu vrijednost, a može biti utvrđena na osnovi srednje vrijednosti rezultata više mjerenja provedenih mjernom opremom više razine točnosti [18].



Slika 14 Netočnost mjerenja [18]

###### 3.1.2.2. Linearna pogreška

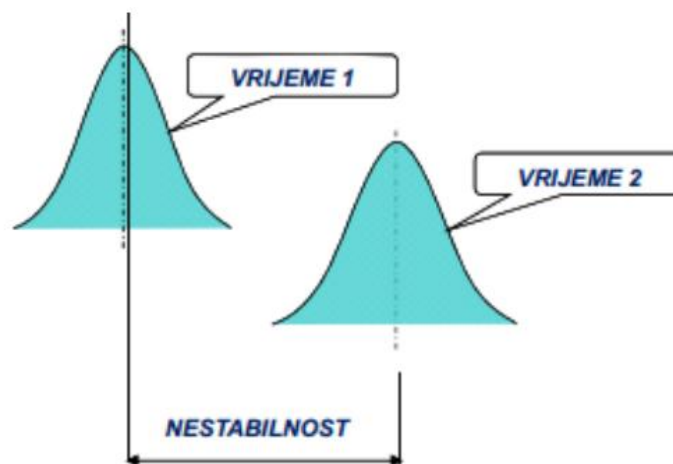
Linearna pogreška je stalan (linearni) rast ili pad vrijednosti pogreške rezultata mjerenja (netočnosti) unutar određenog dijela mjernog područja instrumenta.



Slika 15 Linearna pogreška mjerenja [18]

### 3.1.2.3. Nestabilnost

Nestabilnost je totalna varijacija mjerenja jedne karakteristike tijekom dužeg vremenskog razdoblja.



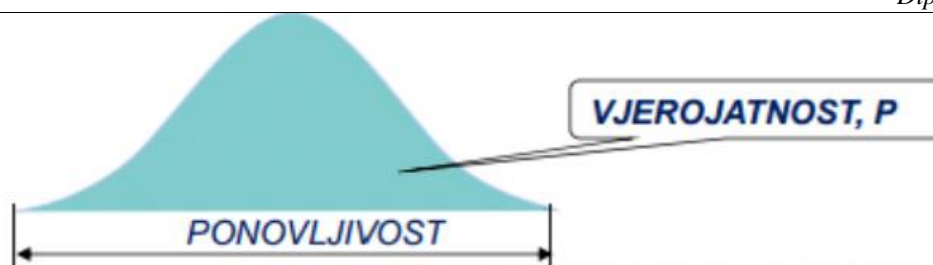
Slika 16 Nestabilnost mjerenja [18]

### 3.1.2.4. Ponovljivost

Ponovljivost je usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine izvedenih u istim mjernim uvjetima koji uključuju:

- isti mjerni postupak,
- istog mjeritelja,
- isto mjerilo upotrebljavano u istim uvjetima,
- isto mjerno mjesto,
- ponavljanje u kratkom vremenu [18].

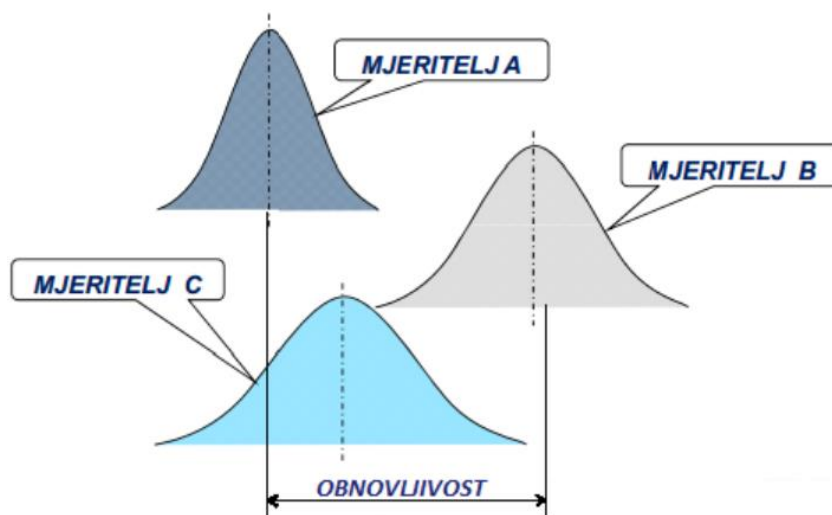




Slika 17 Ponovljivost mjerenja [18]

### 3.1.2.5. Obnovljivost

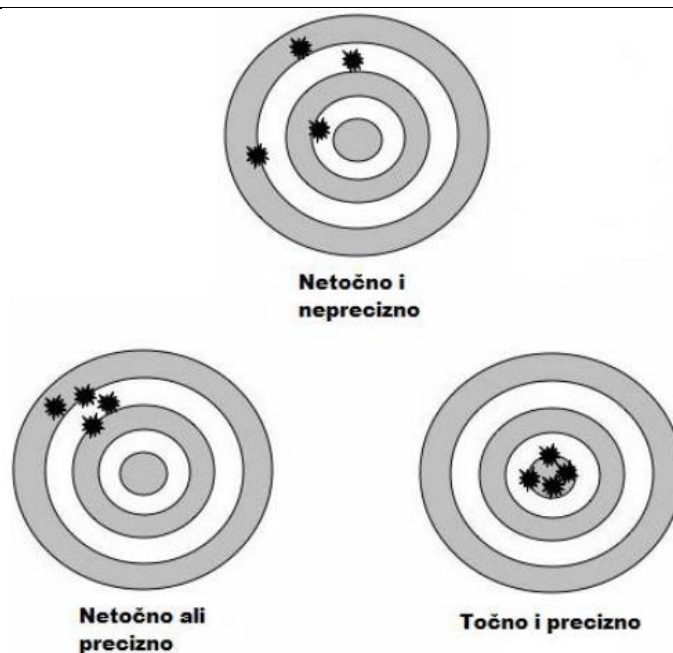
Obnovljivost je rasipanje rezultata mjerenja dobiveno od strane većeg broja mjeritelja pri višestrukom mjerenju iste karakteristike na istim dijelovima uz korištenje istog ili različitog mjernog instrumenta [18].



Slika 18 Obnovljivost mjerenja [18]

### 3.1.2.6. Točnost i preciznost

U kontroli kvalitete širok je rječnik i određene pojmove treba dobro poznavati, stoga je važno naznačiti što je točnost, a što preciznost, budući da su ta dva pojma vrlo slična. Ta dva čimbenika treba uzeti u obzir prilikom mjerenja podataka. Oba, i točnost i preciznost odražavaju koliko su blizu mjerenja stvarnoj ili istinskoj vrijednosti, ali točnost odražava koliko je blizu mjerenje poznate ili prihvaćene vrijednosti, a preciznost odražava koliko se mjerenja podudaraju čak i ako su daleko od prihvaćene (referentne ili tražene) vrijednosti. Za odstupanja kod preciznog mjerenja smatra se da su slučajna.



Slika 19 Točnost ili preciznost [18]

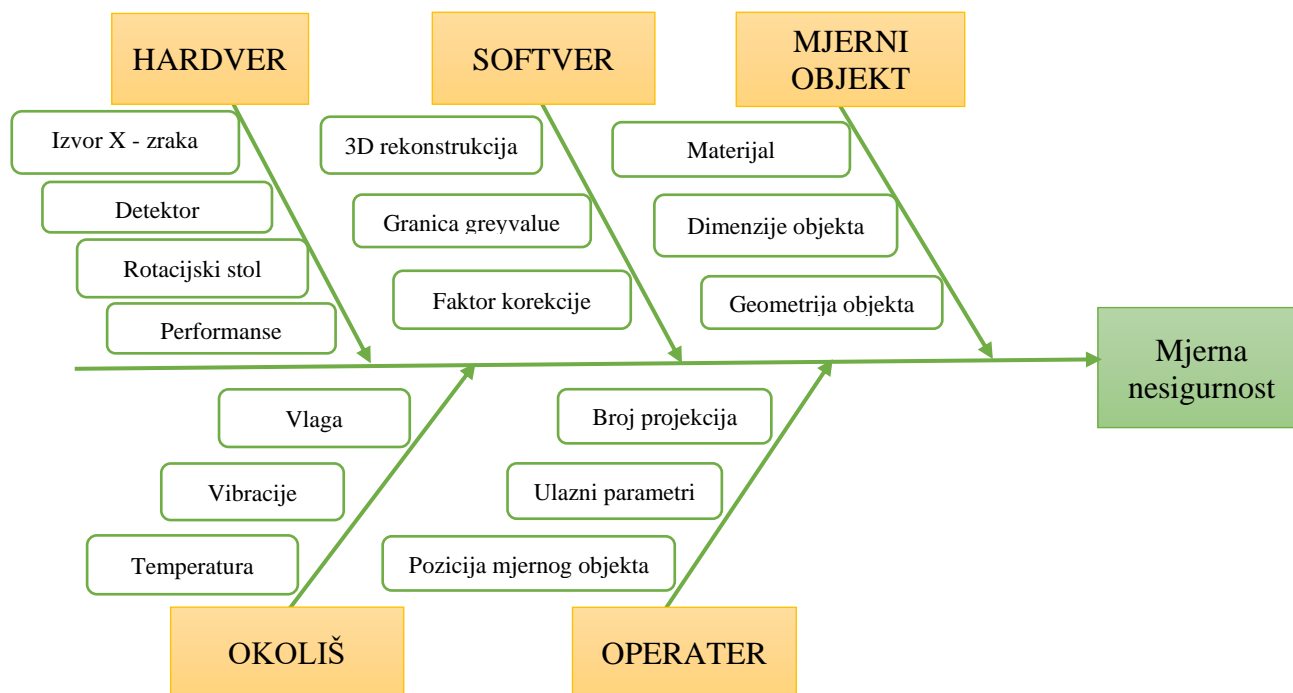
### 3.1.2.7. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost definirana je kao parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini. Procjena mjerne nesigurnosti temelji se na procjenama iz nepoznatih razdioba vjerojatnosti koje su određene pomoću ponovljenih odnosno obnovljenih mjerenja, ili iz subjektivnih ili apriornih razdioba koje se temelje na sveukupnim raspoloživim podacima [18].

## 3.2. Utjecaji na mjernu nesigurnost

Utjecaji na mjernu sigurnost kod industrijskih CT uređaja su raznoliki. Ovakvi uređaji ovise o samoj konstrukciji, tj. o hardveru i softveru od kojih se sastoje. Hardverski utjecaji mogu proizlaziti iz izvora zračenja ili postavljanja rotacijskog stola, također i detektor može igrati ulogu, budući da su to sve kvarni dijelovi koje s vremenom treba servisirati. Softverski utjecaji igraju ulogu prilikom obrade podataka, kod 3D rekonstrukcije i pri postavljanju granica (eng. *threshold*) sivih vrijednosti (eng. *greyvalue*). Također utjecaji mogu biti okolišni, ukoliko temperatura nije prikladna, ili se u istom pogonu nalaze strojevi koji stvaraju buku i jake vibracije, a također utjecaj može biti i vlaga. Mjerni objekt ima svoju gustoću, dimenzije, vrstu materijala, hrapavost i sve to može imati svoj učinak na konačne rezultate mjerenja. Operater koji izvršava mjerenja određuje ulazne parametre kao što su napon i snaga, te broj projekcija ili

snimaka koje je uradio tijekom jednog mjerenja, također kako je pozicionirao mjerni objekt. Sve navedeno može imati određeni utjecaj na mjerni rezultat, te je vidljivo da mjerenjima treba pristupati sa velikom dozom opreza. Na slici 20 su na „Ishikawa dijagramu“ prikazani razni utjecaji na mjernu sigurnost industrijskog CT uređaja.



Slika 20 Ishikawa dijagram utjecaja na mjernu sigurnost

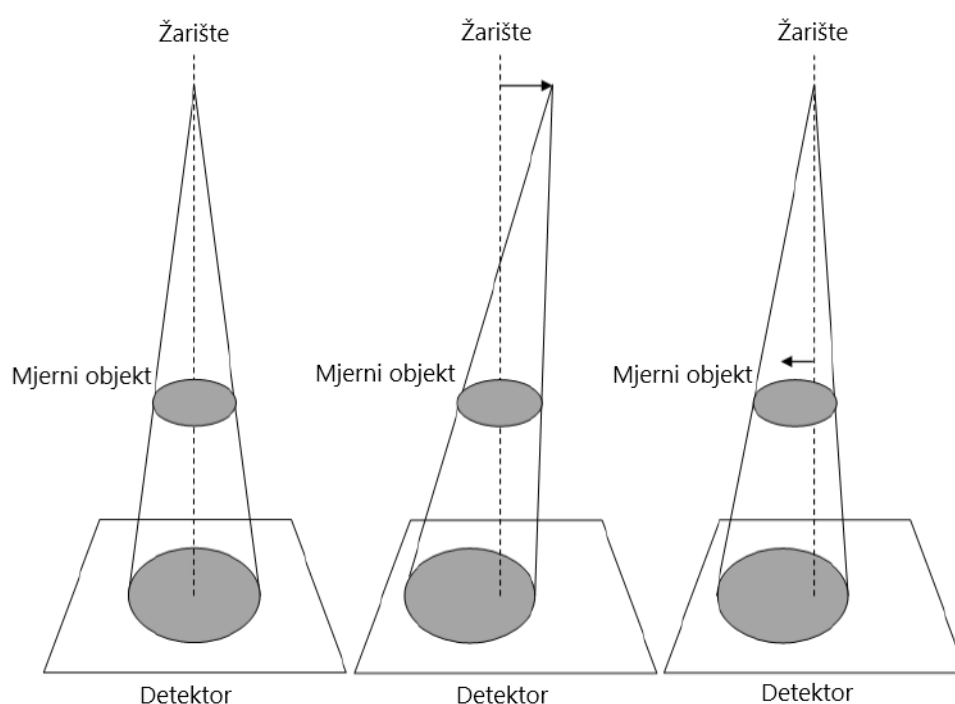
### 3.3. Sustavne greške industrijskih CT uređaja

Definicija pojma 'artefakt' koji se koristi u nastavku dana je u normi ISO 15708, dio 1, kao: nesukladnost između stvarne vrijednosti nekog fizičkog svojstva objekta i karte tog svojstva generirane XCT postupkom snimanja [4]. Na točnost 2D snimaka najveći utjecaj imaju: napon i struja izvora zračenja, materijal i svojstva objekta, vrijeme izloženosti promatranog objekta X - zračenju, umjeravanje detektora i rotacijskog stola, geometrijsko povećanje izvora zračenja, predefinirani parametri programa za obradu slike i ostalo.

#### 3.3.1. Pomak izvora X – zraka

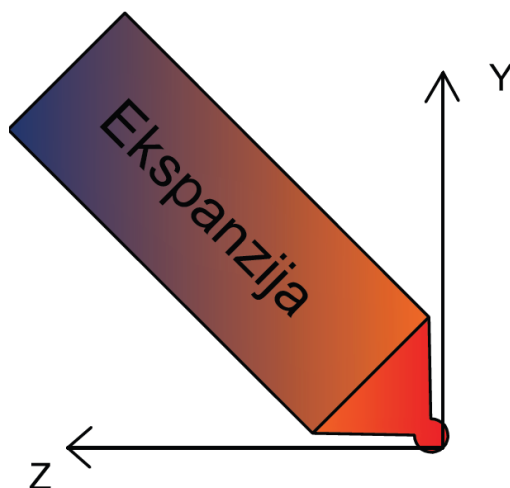
Najčešća sustavna greška koja se javlja kod industrijskih rendgenskih uređaja je pomak izvora zračenja. Mnogi industrijski CT skeneri koriste slike objekta zakrenutog za 360°. Idealno je da bi rendgenska slika snimljena pri 0° i na 360° (točno jedna rotacija) trebala dati potpuno isti rezultat. U stvarnosti to nije uvijek tako. U slučaju vrlo dugih skeniranja moguće je čak i

vizualno vidjeti pomake u sive vrijednosti i pomake u položaju slike bez pretjeranog zumiranja u piksele ili korištenja nekog softverskog optimiziranja slike. Nadalje, izvori topline (rendgenska cijev, pogoni i detektor) su zatvoreni unutar glave uređaja. Kao rezultat, mogu se pojaviti značajni vremenski i prostorni temperaturni gradijenti [19]. Ovi gradijenti bi mogli utjecati na geometriju konačnih slika, promjenom parametara sustava kao što je relativni položaj između izvora X-zraka, objekta i detektora i kutova rotacije i nagiba okretnog stola, kutova detektora i pomaka izvora zračenja. Te je promjene geometrije teško procijeniti i dovest će do pogrešaka u skaliranju i izobličenja u kasnijem rekonstruiranom 3D objektu. Na slici 21 je shematski prikaz pomaka žarišta u dva različita smjera.



**Slika 21** Efekt relativnog pomaka žarišta u odnosu na mjerni objekt i detektor [19]

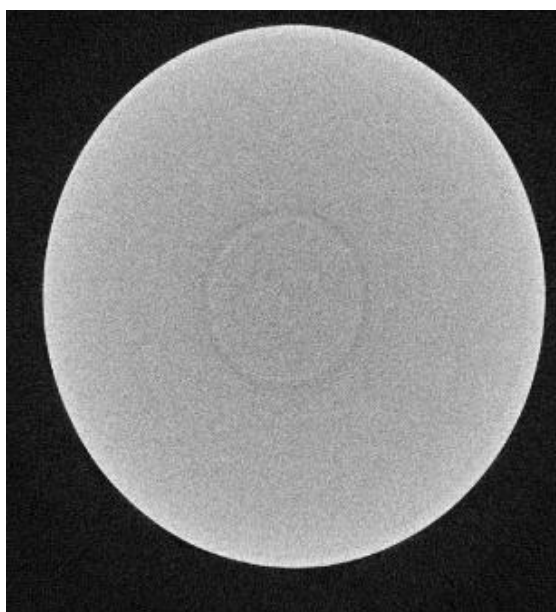
Budući da je ovaj dio problematike točnosti mjerenja industrijskih CT uređaja usko vezan uz samu temu ovog diplomskog rada, u poglavlju 4. će se detaljno iznijeti mjerenja i analiza utjecaja temperature na pomake izvora i mjernog objekta na rendgenskim slikama. Da bi jasnije shvatili zagrijavanje, na slici 22 je shematski prikazano zagrijavanje glave odnosno izvora X – zračenja CT uređaja, gdje je vidljivo da je zagrijavanje najveće na samom izlazu zračenja iz kućišta, te da se temperatura manje mijenja što je točka dalja od žarišta.



Slika 22 Shematski prikaz zagrijavanja izvora zračenja CT uređaja

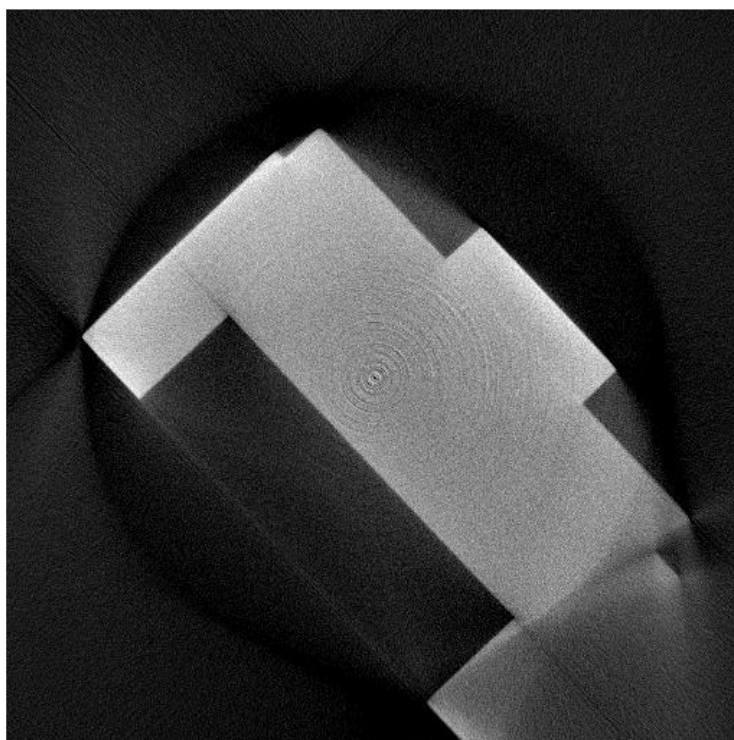
### 3.3.2. Prstenasti i prugasti artefakti

Jedna od čestih pojava greške na CT slikama su prstenasti artefakti koji mogu biti rezultat nedostataka ili loše kalibracije detektora, nelinearnog ponašanja materijala detektora, varijacije od kanala do kanala izlaznog niza detektora, tj. slabe uniformnosti ili mehaničke neusklađenosti između izvora rendgenskih zraka i izvora detektora [4]. Uzrok je slaba osjetljivost detektora, na kojem svi pikseli moraju imati stalnu osjetljivost, jer ukoliko je jedan piksel neispravan mogućnost je pojavljivanja prstenastih artefakata kao što je prikazano na slici 23.



Slika 23 Prikaz prstenastog artefakta slikan na CT uređaju [4]

Primjer prugastih artefakata može se vidjeti na slici 24. Artefakti pruga (ili metala) uobičajeni su na CT slikama s tipičnim crno-bijelim linijama, koje uzrokuju značajnu degradaciju rendgenske slike [4]. Artefakti pruga mogu biti uzrokovani mnogim čimbenicima. Uzorak s metalnim dijelovima visoke gustoće može oslabiti dio ili sve energije rendgenskih zraka, što dovodi do netočnih mjerenja objekata iza metalnog dijela. To se može ispraviti podizanjem razine energije izvora X-zraka [4]. Artefakti pruga također mogu biti uzrokovani ako se objekt pomakne tijekom mjerenja, ako su specificirane nedostatne rotacijske točke uzorkovanja ili ako je koordinatni sustav instrumenta neusklađen.

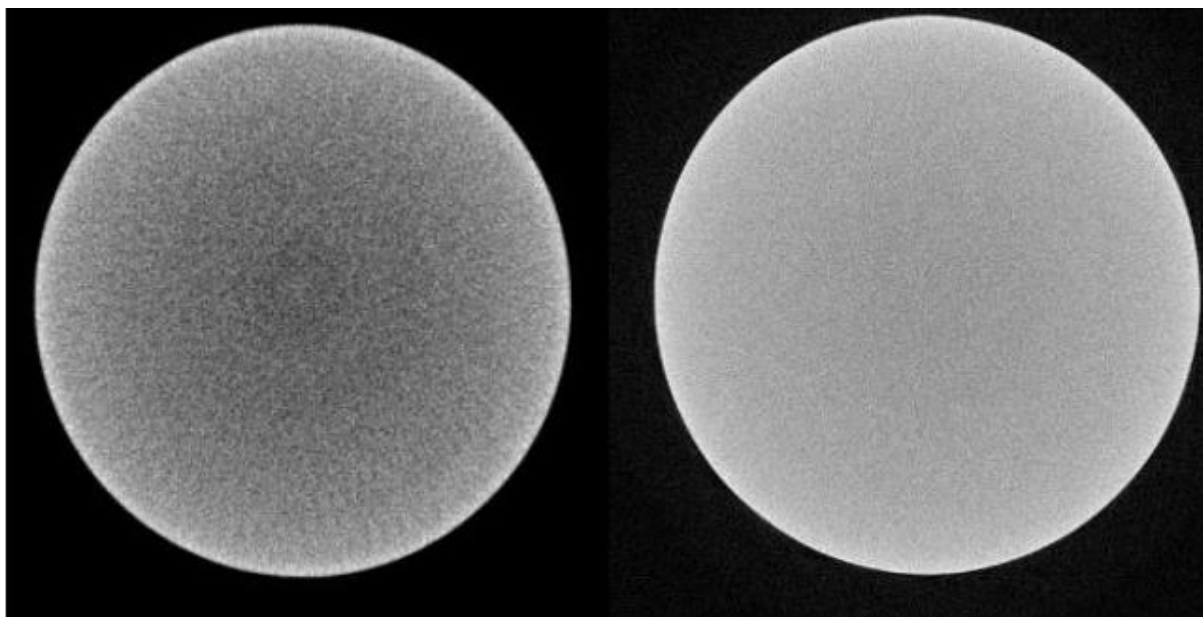


Slika 24 Prikaz prstenastih i prugastih artefakata [4]

### 3.3.3. Stvrđnjavanje snopa zračenja

Stvrđnjavanje snopa zračenja (eng. beam hardening) je pojava koja je povezana sa polikromatskim snopom rendgenskih zraka koji izlazi iz izvora zračenja. Dok X – zrake putuju od izvora zračenja, prolaze kroz materijal mjernog objekta (uzorka) i dolaze do detektora. Prilikom prolaska kroz mjerni objekt veće gustoće materijala, X – zrake sa nižom razinom energije se apsorbiraju u većoj mjeri nego one sa većom razinom energije. Do problema dolazi jer algoritam CT uređaja za rekonstrukciju ima zadanu pretpostavku da je apsorpcija zračenja isključivo svojstvo gustoće materijala i sposobnosti upijanja zraka i nema zadanu korekciju na osnovu različite razine energije koja se generira u izvoru zračenja.

Metode koje se koriste za ispravljanje učinka stvrdnjavanja snopa mogu se podijeliti u tri vrste: metode predobrade, metode naknadne obrade i metode dvostruke energije [4]. U praksi se može koristiti fizički filter za prefiltriranje izvora kako bi se uklonile rendgenske zrake niske energije, kao što je korišteno u eksperimentalnom dijelu u poglavlju 4. Filter može biti tanka ploča od bakra ili aluminija, koja se može postaviti između izvora X-zraka i uzorka. Ova metoda filtriranja je jednostavna za postizanje u praksi, ali smanjuje omjer signal - šum.



Slika 25 Efekt stvrdnjavanja zračenjem [4]

### 3.4. Metode obrade podataka

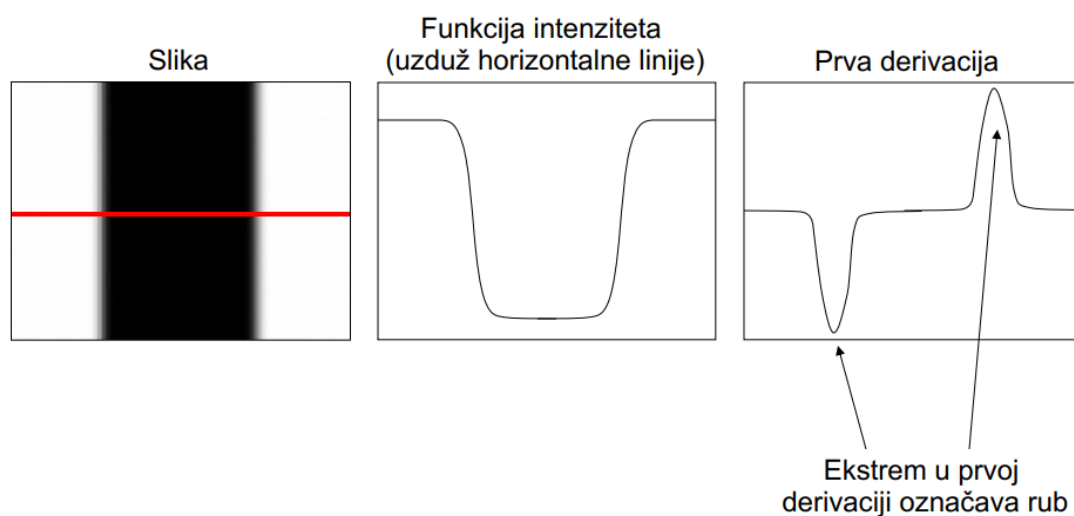
Obrada podataka igra važnu ulogu u XCT tehnologiji. Bez rekonstrukcije u procesu, CT slike su jednostavno radiogrami koje osigurava konvencionalna radiologija. Za CT sustave, rendgenska zraka prodire kroz mjerni uzorak i projicira se na detektor. Rezultantna radiografska slika je projekcija uzorka, a intenzitet svakog piksela je funkcija koeficijenta prigušenja i udaljenosti koju X-zraka prijeđe unutar uzorka. Projekcija se može izračunati korištenjem Radonove transformacije [4]. Radonova transformacija i njena inverzna funkcija čine matematičku osnovu za rekonstrukciju tomografske slike iz projekcijskih podataka.

Međutim, povratna projekcija temeljena na inverznom procesu Radon transformacije rezultira mutnom slikom. To se može svesti na minimum primjenom postupka filtriranja prije povratne projekcije, gdje postoje različite vrste filtera pomoću kojih se slike mogu obrađivati.

Postoje različiti softverski paketi za vizualizaciju rekonstruiranih CT podataka. Softverski paketi su VGStudio Max, Avizo, Simpleware. Ovi paketi nisu besplatni i koriste se uglavnom u većim pogonima. S druge strane postoje besplatni paketi (eng. *freeware*) koji se mogu pronaći na internetu i mogu pomoći u većini zadataka potrebnih za obradu slike. Ti softveri su – Drishiti, Volpack, Paraview, Visualisation Toolkit (VTK) i Fiji ( ImageJ), koji je ujedno i korišten za vizualizaciju u poglavlju 4.

### 3.4.1. Detekcija rubova

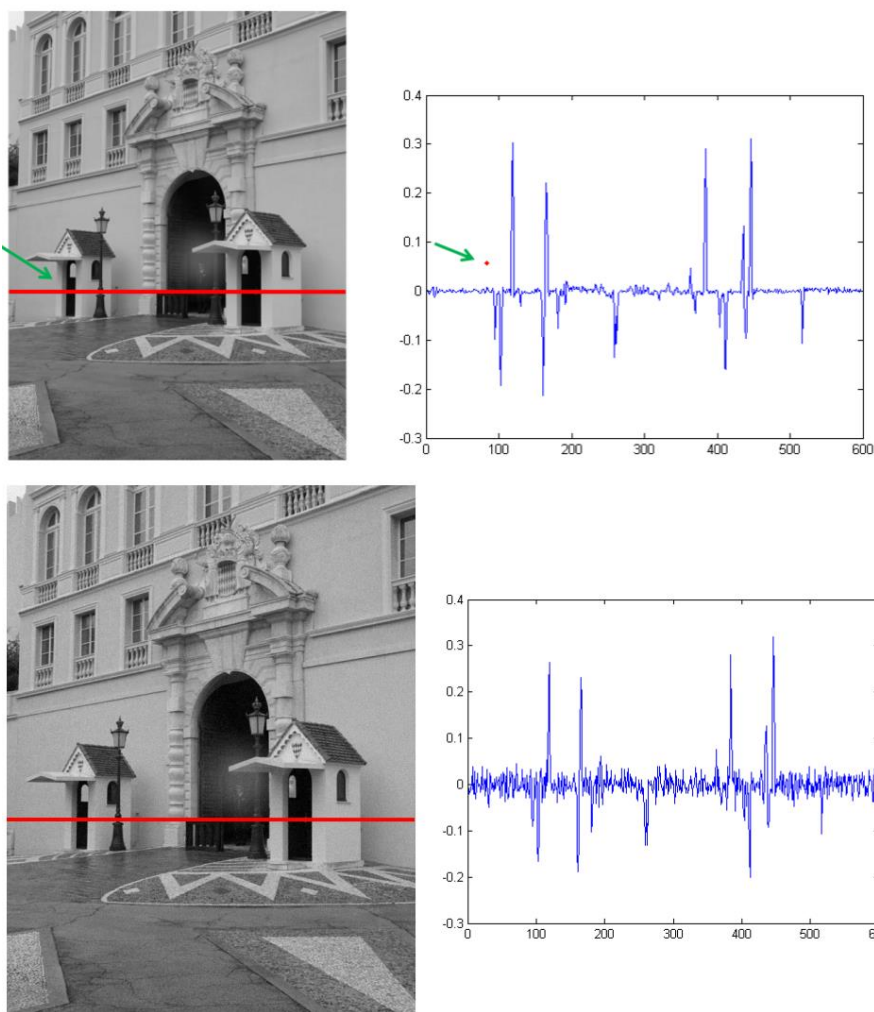
Prilikom obrade dobivenih radiograma CT uređaja postoje različiti alati i metode kako dobiti tražene podatke. Međutim, ono što se najčešće koristi, gotovo u svim znanstvenim istraživanjima, ali i u proizvodnim procesima, primjerice prilikom prepoznavanja proizvoda na proizvodnim trakama u strojarskim pogonima, jest metoda detekcije rubova (eng. edge detection). Detekcija rubova je grana računalnog vida koja podrazumijeva pronalazak dijelova digitalne slike na kojima postoji nagla promjena intenziteta svjetline. Preciznije, odnosi se na pronalazak diskontinuiteta na slici. Rub je mjesto nagle promjene unutar funkcije intenziteta slike. Detekcija rubova jedan je od temeljnih alata u obradi slike u računalnom vidu, naročito u područjima detekcije i ekstrakcije značajki na slici, budući da diskontinuitet na slici često odgovara konturama objekata ili granicama između različitih segmenata objekta [20]. Kroz razvoj računarstva razvijene su brojne metode za detekciju rubova no većina ih se može svrstati u dvije kategorije – one temeljene na pretrazi slike sa naglim promjenama svjetline (engl. search-based) i one temeljene na pronalasku nultočaka druge derivacije (engl. zero crossing).



Slika 26 Prikaz funkcija intenziteta crno - bijele slike [21]



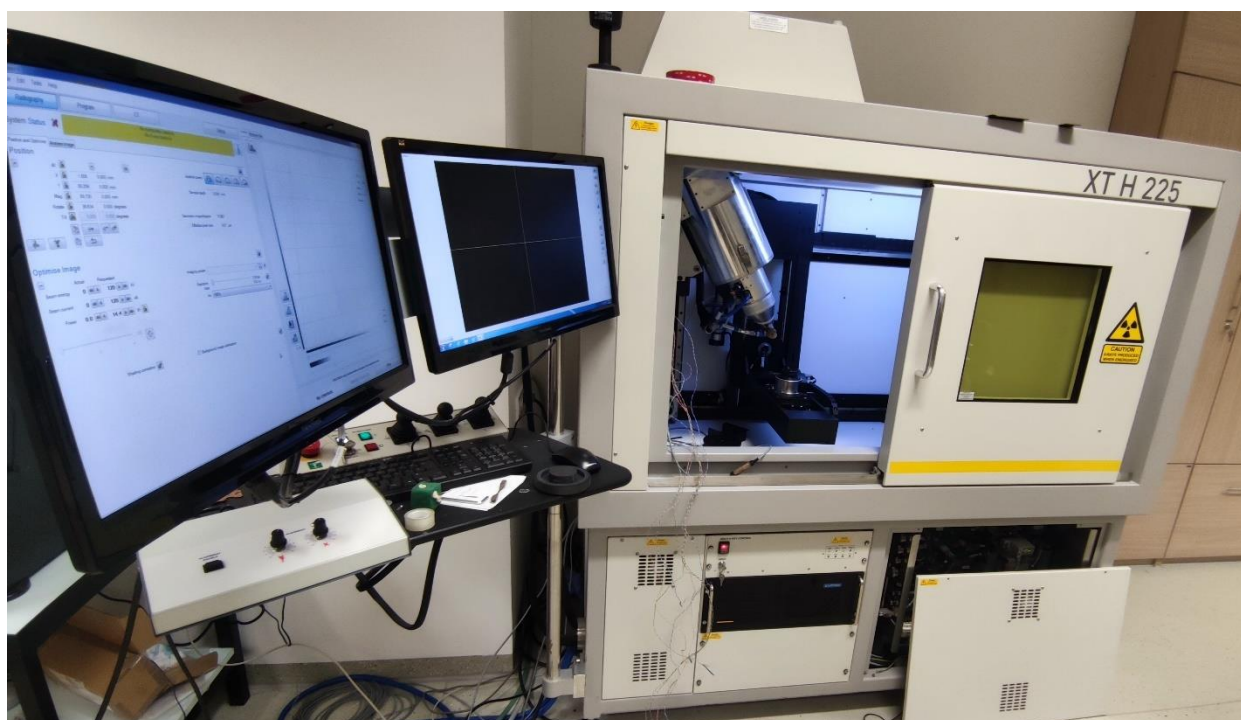
Na slici 26 je s lijeve strane pokazana crno bijela slika sa dvije bijele horizontalne linije i u sredini jednom crnom. U sredini se nalazi funkcija intenziteta crvene horizontalne linije nacrtane na slici lijevo. Funkcija intenziteta pokazuje promjenu s bijele na crnu i obrnuto, gdje je crna niska linija u funkciji, a bijela visoki intenzitet. Dok je na slici desno pokazana prva derivacija funkcije koja označava rubove, odnosno mjesta nagle promjene. Na slici 27 je primjer iz stvarnosti gdje se jasno može vidjeti objašnjeni primjer sa slike 26.



**Slika 27 Promjene funkcije intenziteta slike na primjeru [21]**

## 4. TEMPERATURNI UTJECAJ NA TOČNOST MJERENJA CT UREĐAJA

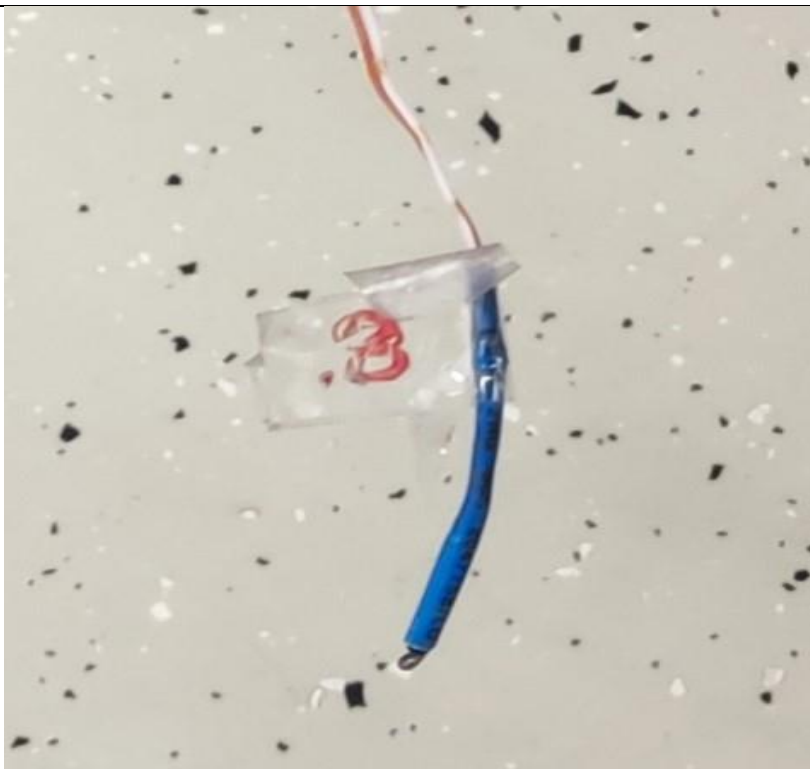
U ovom poglavlju izložit će se mjerenja koja su izvršena u Nacionalnom laboratoriju za duljinu, koji se nalazi u sklopu zgrade Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Kao što je opisano jednim dijelom u prethodnim poglavljima, utjecaji na točnost mjerenja CT uređaja su višestruki. Međutim, kod ovakvih uređaja dolazi do velikih zagrijavanja, te se pretpostavlja da je najveći utjecaj temperature, odnosno topline koja se oslobađa tijekom generiranja X -zraka. Mjerenja su rađena na uređaju proizvođača Nikon, oznake XT H 225 (Slika 28).



Slika 28 Nikon XT H 225 na kojem je provedeno mjerenje

### 4.1. Postavka za mjerenja

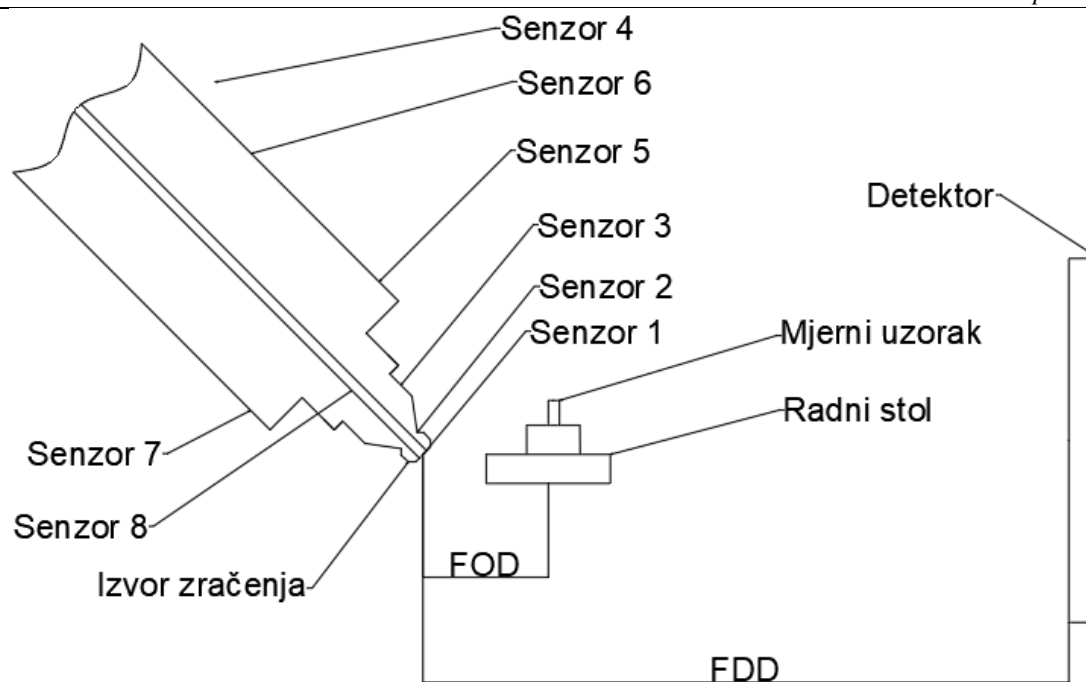
Provedena su mjerenja za 4 različite razine snage X – zračenja: 10 W, 20 W, 30 W i za 40 W. Za mjerenje temperature korišteno je 8 termistora (Slika 29) postavljenih na različite specifične pozicije unutar uređaja. Termistori su spojeni na 8 – kanalni uređaj za mjerenje temperature na termistorima (Slika 30). Uređaj je spojen putem USB – a na vanjsko računalo na kojemu se pratila promjena temperature tijekom svih mjerenja. Pozicije svih osam termistora shematski su prikazani na slici 31. Termistor broj 4 nije skiciran u dodiru sa uređajem zato što je on služio da mjeri temperaturu zraka na nekoliko centimetara udaljenosti od kućišta izvora X – zraka.



**Slika 29** Termistor broj 3 spojen na uređaj



**Slika 30** Uređaj za mjerenje temperature na termistorima



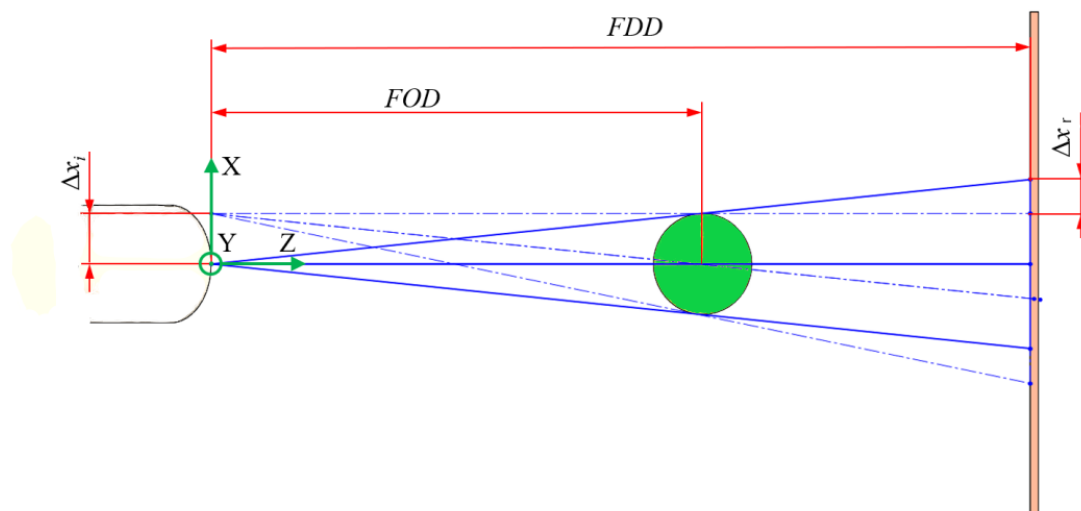
**Slika 31** Pozicije postavljanja osam termistora na uređaju

Mjerenja provedena za svaku snagu provodila su se nekoliko sati, ovisno o potrebi, odnosno u ovisnosti o konvergiranju temperaturne promjene. Nakon izvršenih mjerenja, obradom podataka zaključeno je da bi mjerenja trebalo ponoviti, jer pomak nastavlja mijenjati svoj iznos i rasti čak i nakon što je promjena temperature postala relativno minimalna. Kao što je prikazano u poglavlju 3.1.1. na slici 22, zaključak je da se uređaj izdužuje u ovisnosti o radnom vremenu. Što je duže zračenje bilo upaljeno, sve je bila veća i promjena temperature.

#### 4.2. Pojednostavljeni matematički prikaz

Određivanje pomaka izvora X – zraka na industrijskim CT uređajima, koji imaju za uzrok promjenu temperature, zahtijeva kompleksne matematičke izraze i izvode kojima bi se odredio točan pomak. Najčešće se koristi metoda konačnih elemenata koja se primjenjuje uz neke 3D optičke sustave ili softverske pakete za promatranje dinamičnih promjena. Za ovaj rad su korišteni osnovni matematički izrazi pomoću kojih su se željeli dokazati odnosi između pomaka i temperature, te i sama postojanost utjecaja temperature na točnost radiograma dobivenih snimanjem na CT uređaju. Geometrijsko povećanje M, definirano je omjerom FDD I FOD. FDD (eng. focus detector distance) je udaljenost izvora od detektora i FOD (eng. focus object distance) je udaljenost izvora od objekta.

$$M = \frac{FDD}{FOD} \quad (1)$$



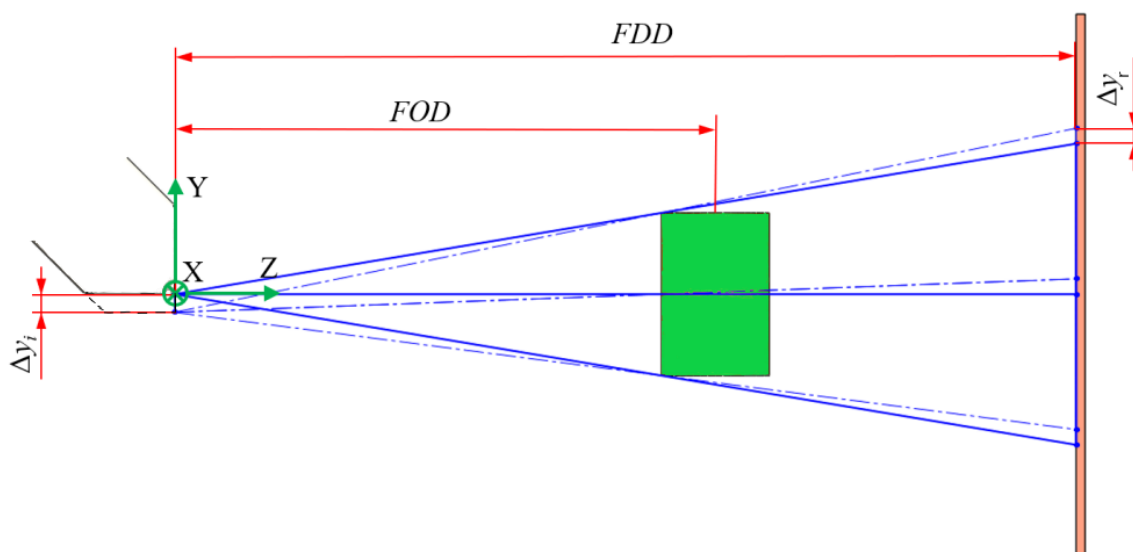
Slika 32 Pomak izvora zračenja u smjeru X osi

Na slici 32 prikazan je pomak izvora u pozitivnom smjeru osi X, što rezultira pomak projekcije kuglice u negativnom smjeru osi X. Isprekidane linije prikazuju pomaknuti izvor, a pune linije pokazuju početnu poziciju izvora zračenja, bez utjecaja na geometrijsko povećanje. Osnovni matematički izraz za odnos pomaka izvora zračenja u smjeru osi X i pomaka projekcije:

$$\frac{\Delta X_r}{\Delta X_i} = \frac{FDD - FOD}{FOD}, \quad (2)$$

gdje su:  $\Delta X_r$  - pomak projekcije u smjeru osi X,

$\Delta X_i$  - pomak žarišne točke u smjeru osi X.



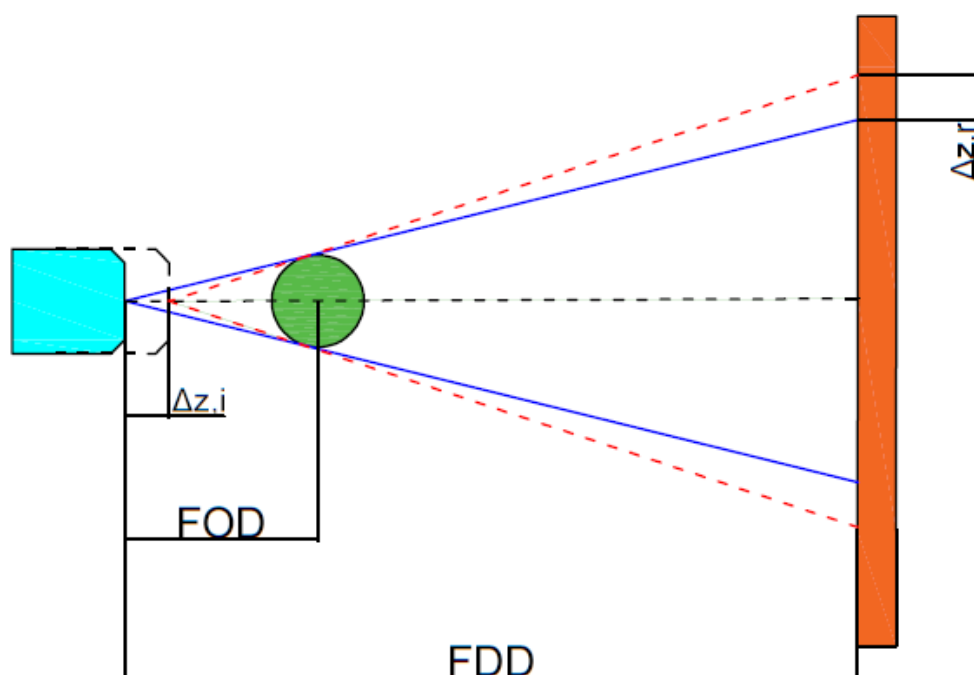
Slika 33 Pomak izvora zračenja u smjeru Y osi

Slika 33 prikazuje pomak izvora zračenja u negativnom smjeru osi Y, što rezultira pomakom projekcije na konačnom radiogramu u pozitivnom smjeru osi Y, i bez utjecaja geometrijskog povećanja. Osnovni matematički izraz za odnos pomaka izvora zračenja u smjeru osi Y i pomaka pripadajuće projekcije na detektoru jest:

$$\frac{\Delta Y_r}{\Delta Y_i} = \frac{FDD - FOD}{FOD}, \quad (3)$$

gdje su:  $\Delta Y_r$  - pomak projekcije u smjeru osi Y,

$\Delta Y_i$  - pomak žarišne točke u smjeru osi Y.



**Slika 34 Pomak izvora zračenja u smjeru Z osi**

Slika 34 pokazuje pomak izvora zračenja u pozitivnom smjeru osi Z (prema desno), što rezultira pomakom projekcije na detektoru, odnosno njenim uvećanjem. Pomak u pozitivnom smjeru (u smjeru detektora) ima rezultat većeg geometrijskog povećanja u odnosu na onog danog u jednadžbi (1), jer dolazi do smanjenja duljina FDD i FOD. Pa novo geometrijsko povećanje glasi:

$$M' = \frac{FDD - \Delta Z_i}{FOD - \Delta Z_i} \quad (4)$$

Iz izraza za konusni kut dobiva se odnos pomaka izvora zračenja i pomaka projekcije na detektoru, sukladan onome iz jednadžbi za X i Y osi:

$$\frac{\Delta Z_r}{\Delta Z_i} = \frac{r}{2} \times \left( \frac{FDD - \Delta Z_i}{FOD - \Delta Z_i} - \frac{FDD}{FOD} \right) = \frac{d}{2} \times (M' - M) \quad (5)$$

gdje su:  $M'$  - geometrijsko povećanje nakon pomaka žarišne točke prema detektoru,

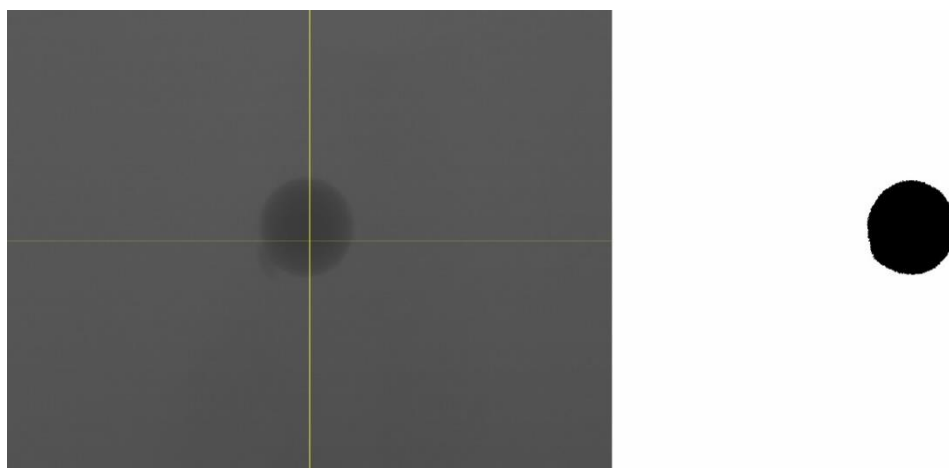
$\Delta Z_r$  - pomak projekcije u smjeru osi Z,

$\Delta Z_i$  - pomak žarišne točke u smjeru osi Z,

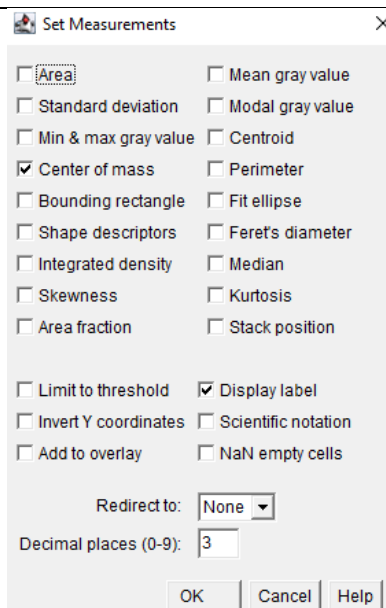
d - promjer mjernog uzorka (kuglice).

### 4.3. Snimanje temperature i pomaka

Tijekom mjerenja temperature i pomaka, za sva mjerenja korištena je ista precizna kuglica promjera 100  $\mu\text{m}$ . Također, za svako mjerenje primijenjen bakreni filter iznosa 1 mm. Za svaku snagu snimana je serija fotografija u određenim vremenskim intervalima, što je i zabilježeno, te će u sljedećim sekcijama biti dani prikazi promjena temperature i pomaka kroz grafičke prikaze, posebno za svaku od snaga. Dobiveni radiogrami obrađivani su u programskom paketu „FIJI“, i njegovoj inačici „ImageJ“. Na svim slikama je primijenjen algoritam detekcije rubova kako je prikazano na slici 35, pri čemu su radiogrami također prebacivani u binarni oblik (matrica sa nulama i jedinicama, crno - bijelo), te je u softveru traženo središte kruga kuglice (centar mase, u izborniku prikazanog na slici 36) pomoću kojeg su rađeni proračuni odnosa pomaka po X i Y osi radiograma.



**Slika 35 Prikaz primjene algoritma detekcije rubova kod radiograma (lijevo snimljeni radiogram, desno slika nakon primjene algoritma)**



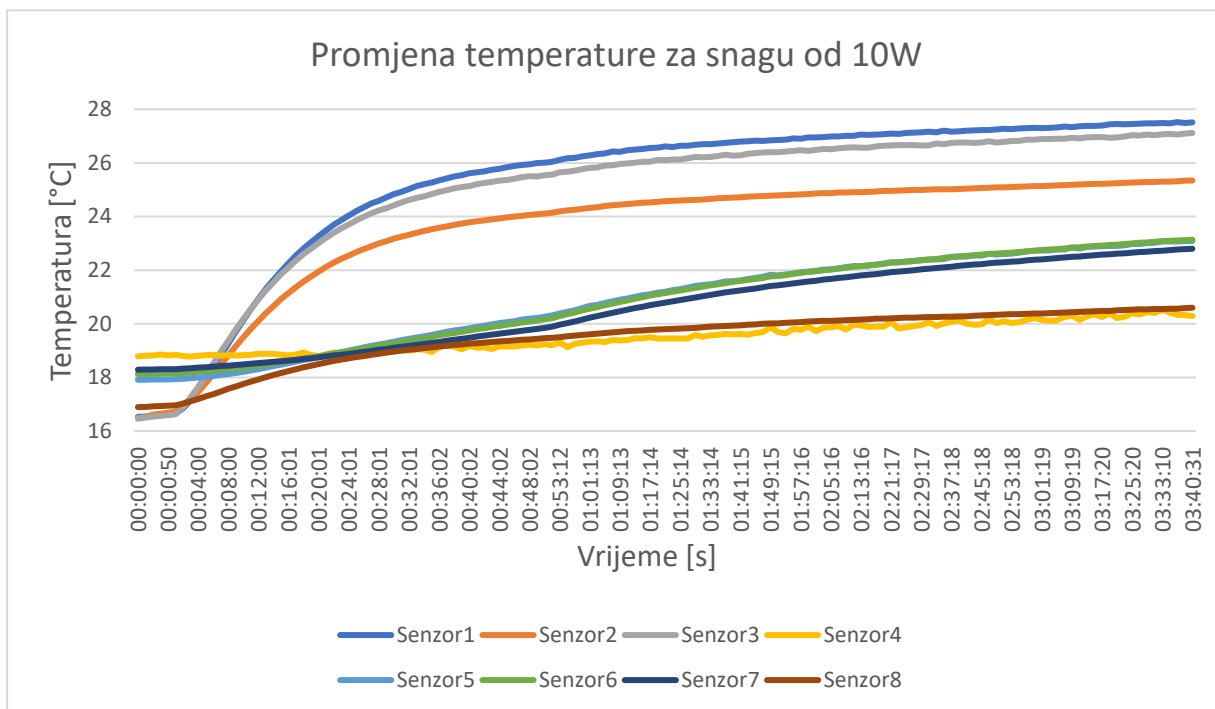
Slika 36 Izbornik za postavljanje mjerenja u softverskom paketu „Fiji“

#### 4.3.1. Temperaturne promjene

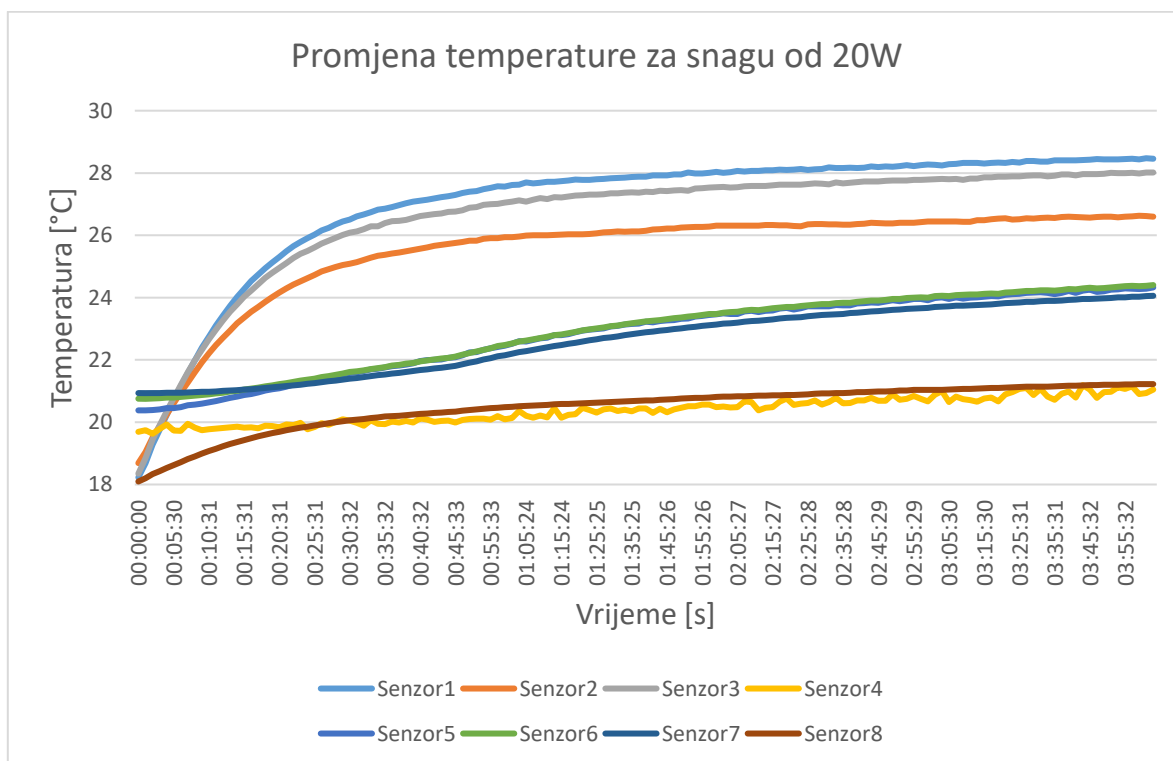
Kako je shematski prikazano na slici 31, tako su postavljeni senzori (termistori) na CT uređaj, te se pratila promjena temperature za četiri razine snage. Temperatura je mjerena i izražena u jedinici °C (celzijevi stupnjevi). Slike 37, 38, 39 i 40 pokazuju promjene za svaki od postavljenih senzora. Na grafovima se mogu jasno uočiti sljedeće činjenice. Promjena temperature raste sa povećanjem radne snage CT uređaja, stoga se može zaključiti da postoji ovisnost između radne snage i razine temperature u uređaju. Također, najveće promjene temperature uočene su na početku praćenja temperaturnog stanja, te su poslije promjene sve manje. Nadalje, najveće promjene temperature pokazuju senzori 1, 2 i 3, iz čega proizlazi da je zagrijavanje veće što je točka bliža žarišnoj točki. Senzori 5, 6 i 7 imaju relativno slične krivulje zagrijavanja i to je bilo za pretpostaviti, pokazuju niže temperature nego senzori bliži žarišnoj točki, te imaju relativno slične temperaturne promjene. Senzor 4 je postavljen nešto udaljenije od glave uređaja i nema nikakvog kontakta sa metalnim dijelovima, za razliku od ostalih senzora, te pokazuje unutarnju temperaturu uređaja, koja također raste, ali može se reći srazmjerno s obzirom na zagrijavanje metalnih dijelova spojenih na izvor zračenja. Također kod grafičkog prikaza mjernih podataka senzora 4 može se uočiti konstantno variranje temperature (gore-dole), ali to je sasvim razumljivo, jer hladni zrak iz ventilatora koji služi za hlađenje uređaja dolazi u ciklusima, te tako pokušava održavati temperaturu stabilnom. Senzor 8 je postavljen u unutrašnjost glave izvora zračenja, te pokazuje promjene relativno jako slične promjenama senzora 4, što bi značilo da hlađenje izvan glave ulazi kroz utor i da u tom dijelu



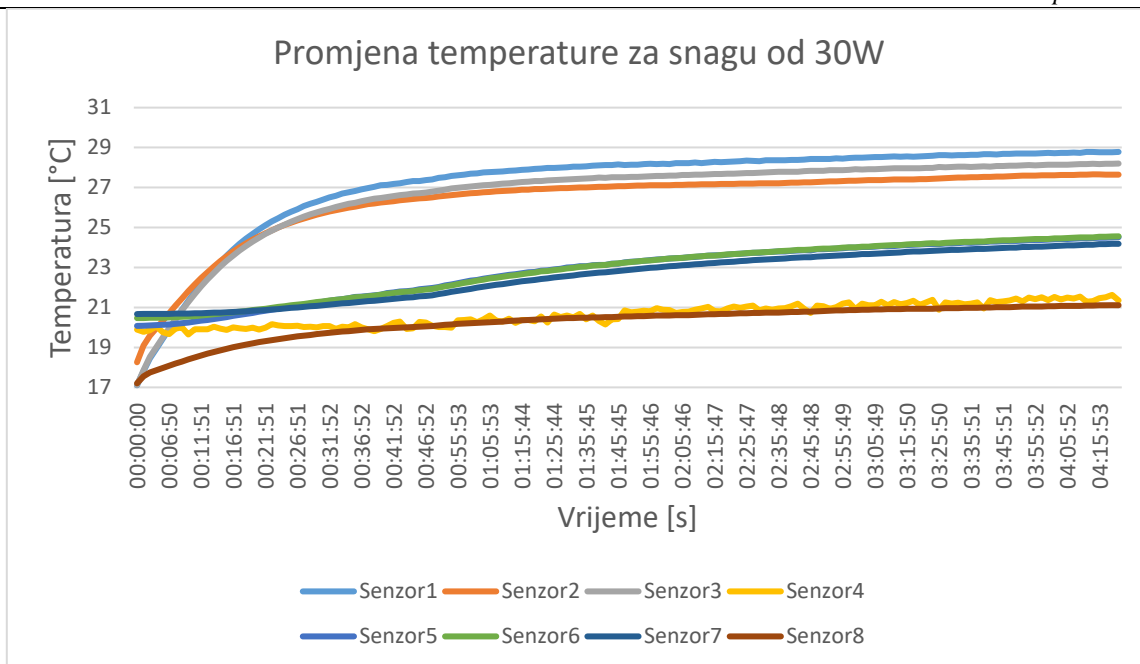
nema značajnijih temperaturnih promjena. Ovakvi grafički prikazi mogu uvelike pomoći u analizi promatranja ponašanja industrijskih CT uređaja, te povezivanje temperature sa pomacima na radiogramima može povećati mjeriteljsku točnost.



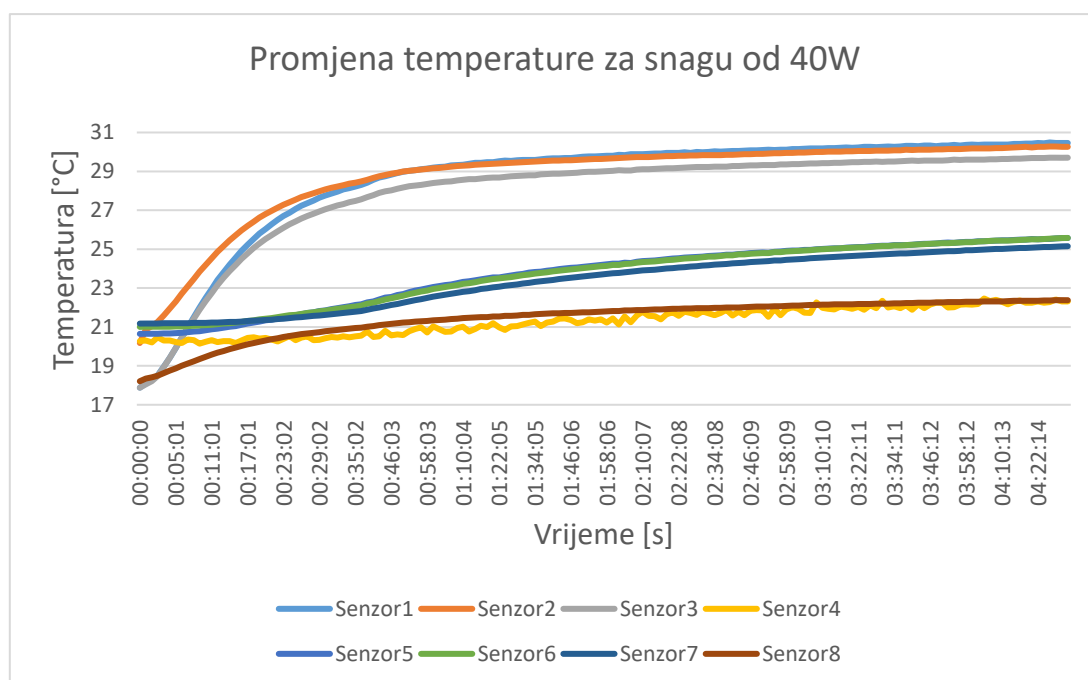
Slika 37 Mjerenje temperature na snazi od 10W



Slika 38 Mjerenje temperature na snazi od 20W



Slika 39 Mjerenje temperature za snagu od 30W

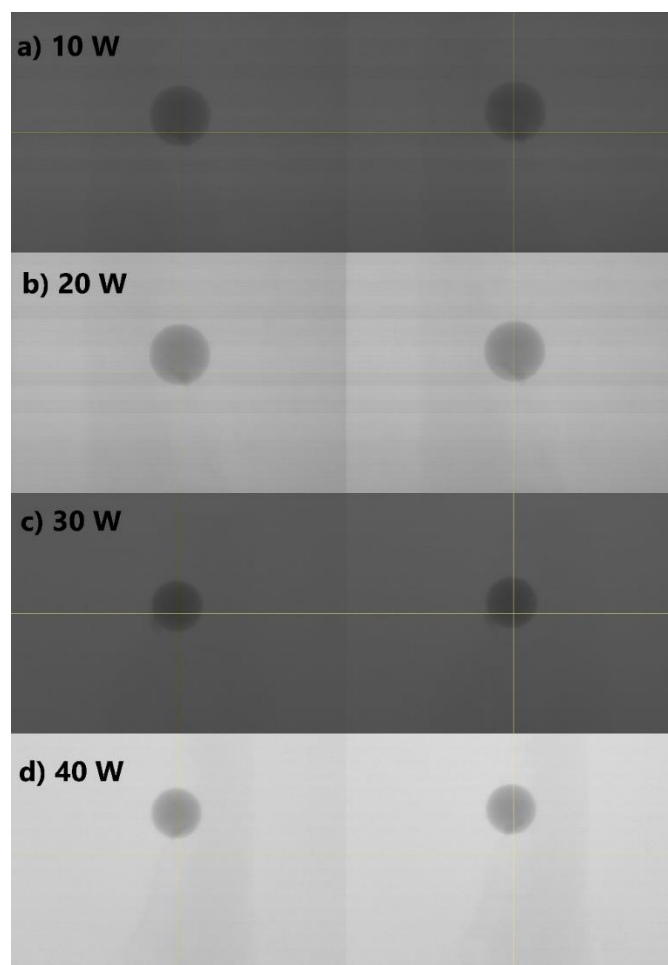


Slika 40 Mjerenje temperature za snagu od 40W

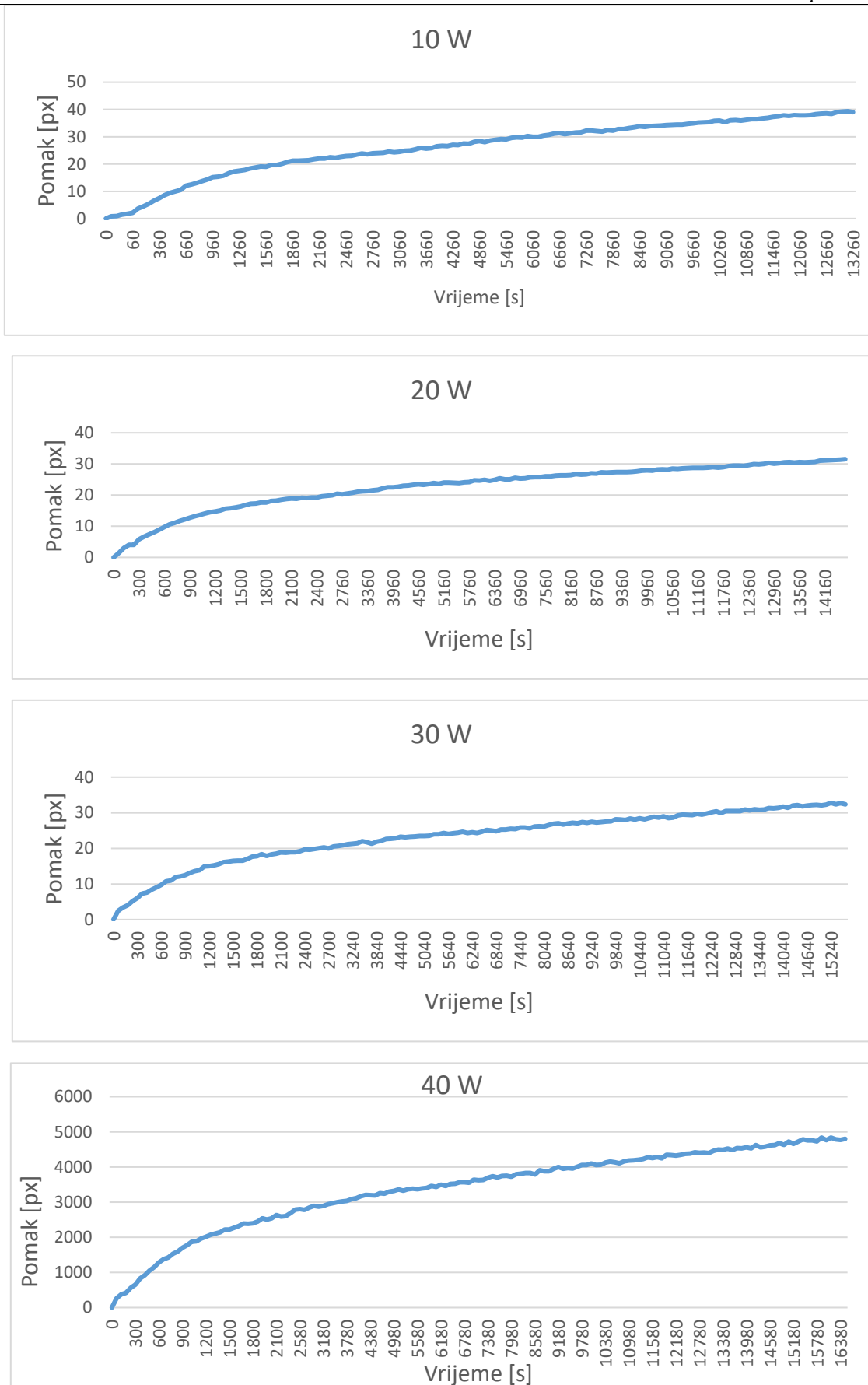
#### 4.3.2. Prikaz pomaka

Za ovaj izračun, ali i sve ostale i prikaz podataka u ovom poglavlju važno je naglasiti da je iznos jednog piksela (eng. pixel, px) jednak duljini od 127  $\mu\text{m}$ . Broj piksela na dobivenim radiogramima jednak je broju piksela na detektoru. Prikaz projekcija na slici 41 dokazuje evidentan pomak kuglice na projekciji očitanoj na detektoru CT uređaja, također su na slici prikazani početni i posljednji snimljeni radiogram na četiri snage uređaja – 10W, 20W, 30W i

40W. Lijevi radiogram je snimak uzet na početku mjerenja, dok je desni radiogram snimljen na kraju mjerenja, nakon 13260 sekundi, odnosno nakon 221 minute, za slučaj pod a) na slici. Ukupni pomak u smjeru Y osi iznosi 38,981 piksela, što pretvoreno u mikrometre daje pomak od 4950  $\mu\text{m}$  na projekciji. Kada se uzme u obzir da je početni promjer kuglice na radiogramu 584  $\mu\text{m}$ , pomak od približno 39  $\mu\text{m}$  je postotak od 6,678 %, što u dosta slučajeva može biti značajan iznos za visoko precizna mjerenja i umjeravanja. Za slučaj b) za snagu od 20W konačni pomak iznosi 30,5 piksela za isto vrijeme kao i kod snage 10 W, čega bi postotak pomaka u odnosu na promjer kuglice bio 5,222%. Kod snage 30 W pomak za isto vrijeme iznosi 30,9 piksela i postotak promjene je 5,291%, dok je za snagu 40 W izmjeren pomak od 59,5 piksela i postotak promjene je 10,188%, što je značajno u odnosu na veličinu kuglice, ali i puno veći pomak nego kod ostalih snaga uređaja. Na slici 42 su prikazani pomaci za sve četiri razine snage i sa uračunatim svim točkama na kojima su uzimani radiogrami tijekom ispitivanja precizne kuglice. Ovakva mjerenja su dugotrajna i sadrže velike količine podataka koje treba pažljivo analizirati i preraditi da bi se dobila jasnija slika ponašanja uređaja pri zagrijavanju.



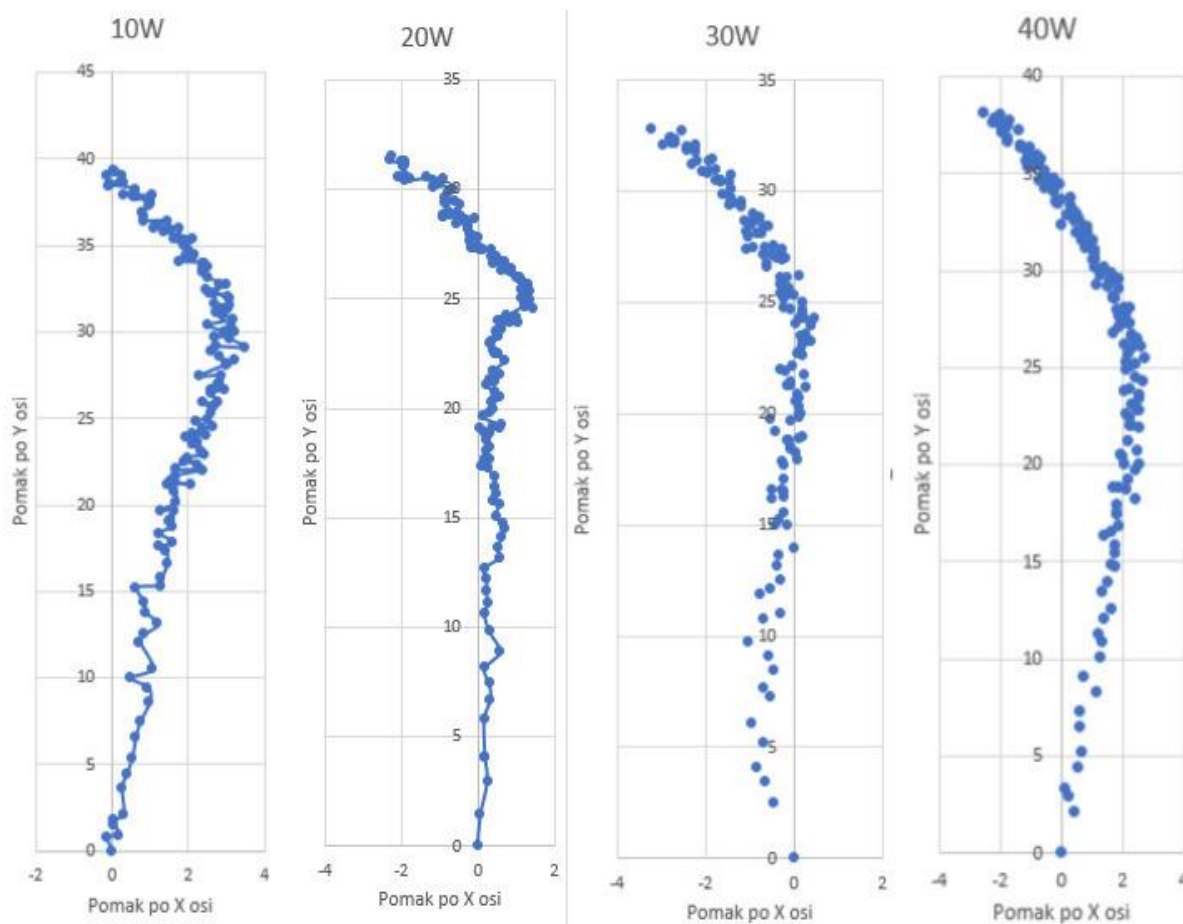
**Slika 41** Prikaz početnih i krajnjih radiograma ( a) za snagu od 10W, b) za snagu od 20W, c) za snagu od 30W, d) za snagu od 40W)



Slika 42 Pomak projekcije po Y osi za četiri snage

### 4.3.3. X – Y koordinate pomaka

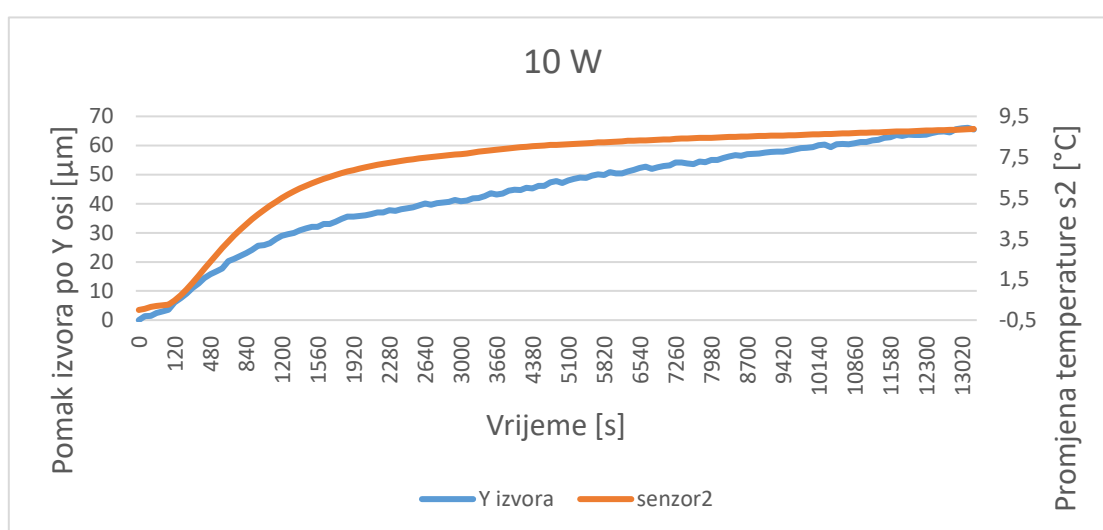
Slika 43 prikazuje pomak projekcije po X i Y osi, za odgovarajuće vrijeme snimanja radiograma. Može se vidjeti da maksimalni pomak po X osi iznosi nešto manje od 5 piksela, ali da se ne povećava s vremenom, nego ima specifična odstupanja, pa je zaključak da temperatura nema značajan utjecaj na pomak radiograma po X osi. Uzroke za ovakva odstupanja trebalo bi tražiti u pomacima elektronskog snopa tijekom rada uređaja ili utjecajem magnetskog, odnosno elektromagnetskog polja koje se stvara u glavi uređaja u kojoj je smješten izvor X – zraka. Za usporedbu su na slici 43 prikazane koordinate središta precizne mjerne kuglice koja su ovisne o vremenu, te se početak mjerenja gleda odozdo prema gore gledajući sliku, tj. od ishodišta prema pozitivnom smjeru osi Y. Također se može uočiti da nema jasne poveznice ili linearne ovisnosti u smjeru osi X, koje bi se moglo pripisati utjecaju temperature. Ali se može vidjeti da je kroz mjerenje prvo vidljiv pomak u pozitivnom smjeru osi X, tako se sam izvor zračenja pomiče u desno, do određenog trenutka kada kreće prema negativnoj strani osi X (u lijevo).



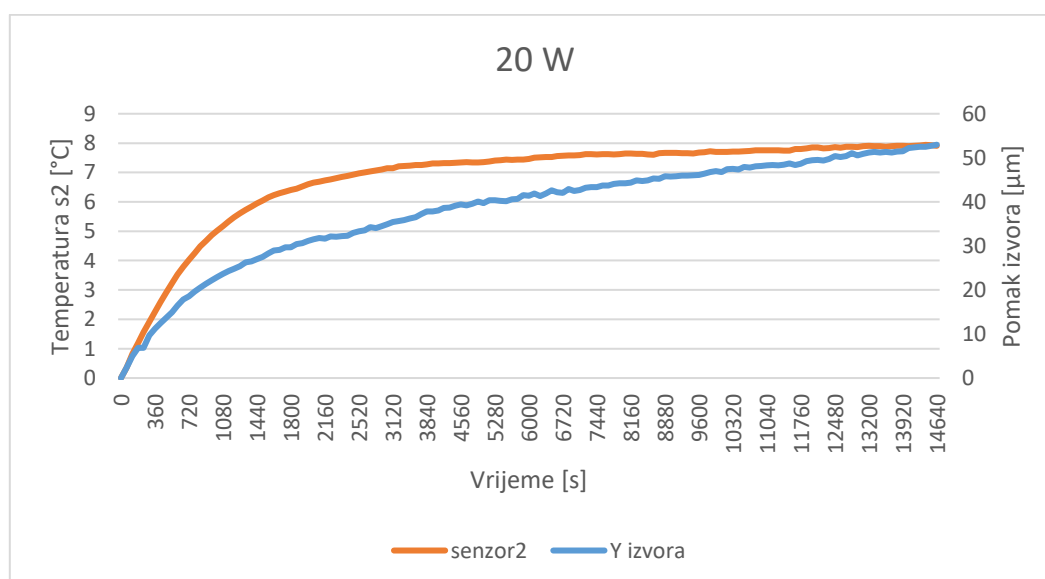
Slika 43 Pomaci središta kuglice za različite razine snage

#### 4.3.4. Veza temperature i pomaka

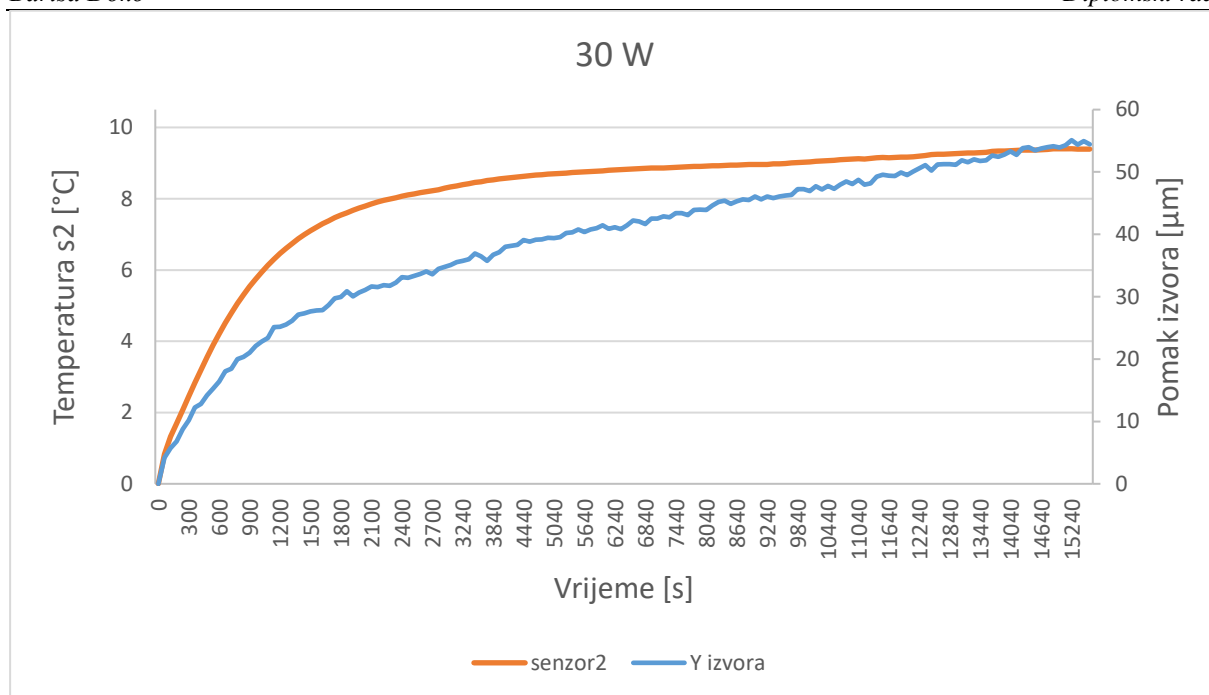
Na slikama 44, 45, 46 i 47 su prikazani odnosi pomaka po Y osi i promjena temperature na senzoru 2, koji je uzet kao referentna mjera za temperaturu jer se smatra da se uz pomoć tih podataka može najpreciznije promatrati stanje uređaja. Također, na slikama je označeno ponašanje za sve četiri razine snage na kojima su rađena mjerenja. Za izračun pomaka izvora korištene su geometrijske transformacije kako je to napisano u sekciji 4.2. To su pojednostavljeni matematički izrazi koji nisu maksimalno pouzdani, ali su dovoljni za izraziti ovisnosti pomaka i temperature. Iz grafova se može vidjeti poprilično poklapanje rasta pomaka po Y osi i rasta temperature. Iako pomak sporije raste za razliku od temperature, može se reći da je većinski uzrok za pomak projekcije na detektoru upravo temperatura.



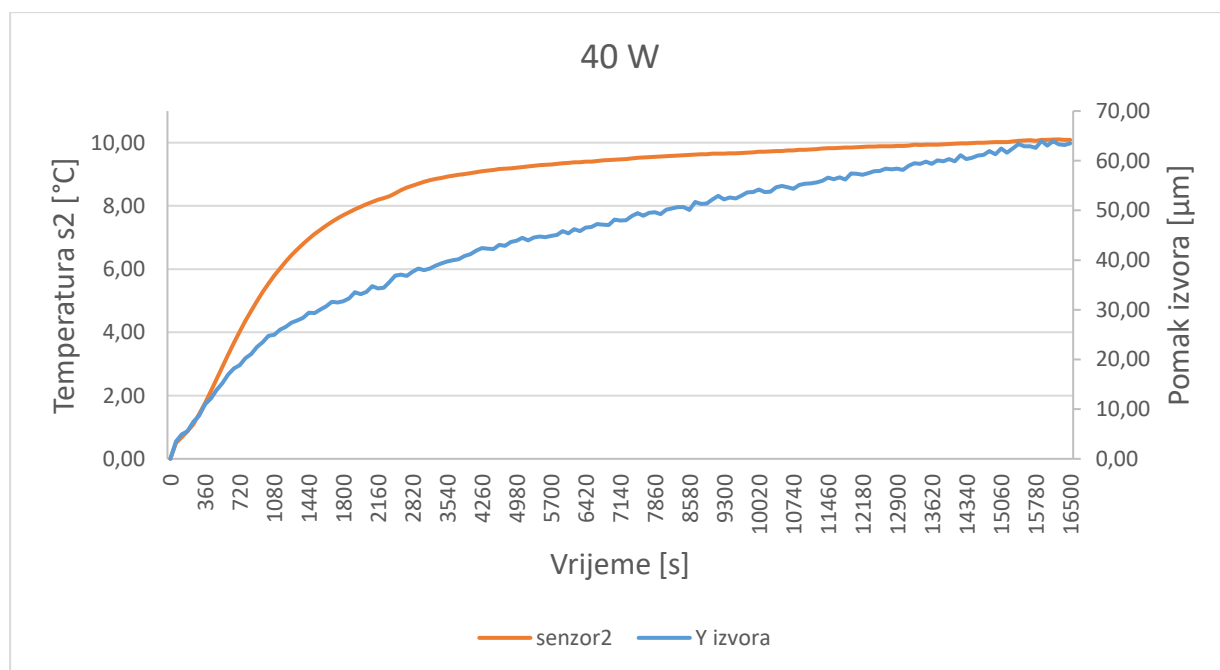
Slika 44 Usporedba promjene temperature senzora 2 i pomaka izvora po Y osi



Slika 45 Usporedba promjene temperature senzora 2 i pomaka izvora po Y osi



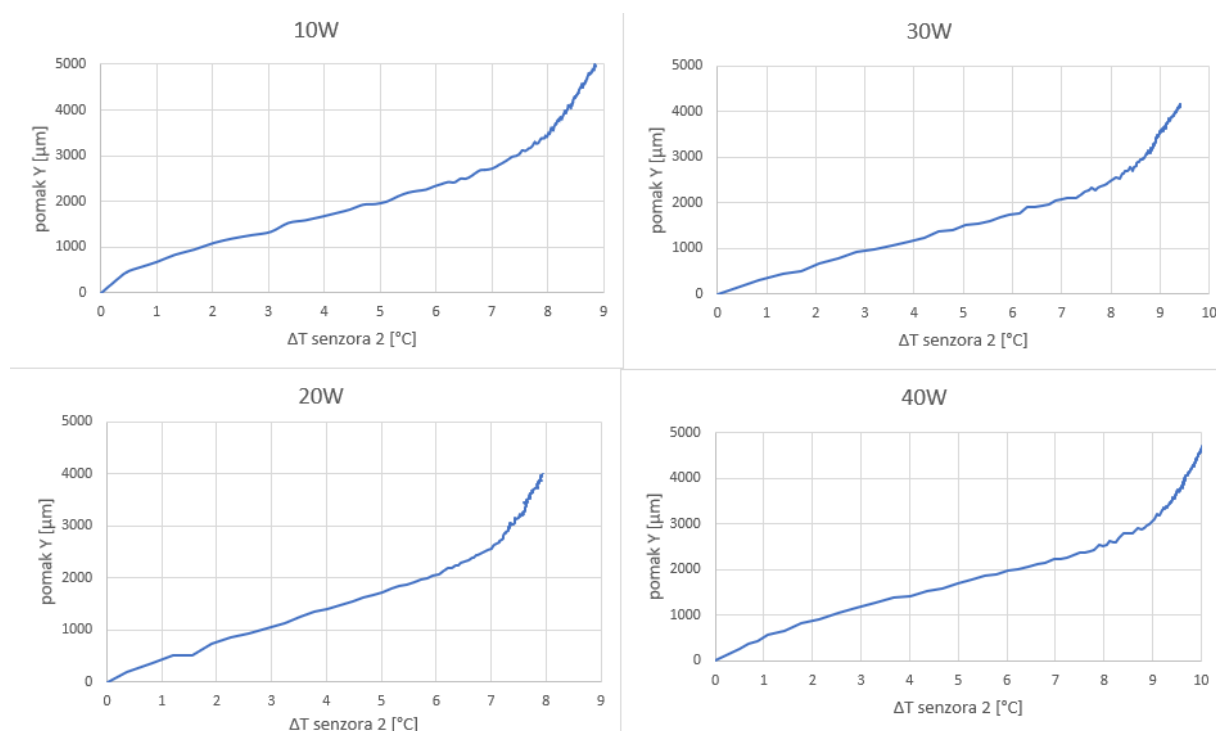
Slika 46 Usporedba promjene temperature senzora 2 i pomaka izvora po Y osi



Slika 47 Usporedba promjene temperature senzora 2 i pomaka izvora po Y osi

Najveća temperatura je vidljiva kod snage iznosa 40 W, što je također slučaj i za pomak, te se ne može reći da postoji linearna ovisnost sa padom razine snage uređaja, nego se ponašaju prema drugačijim uzorcima. Na slici 48 je napravljena analiza odnosa promjene temperature ( $\Delta T$ ) senzora 2 i pomaka po Y osi (izražen u  $\mu\text{m}$  za veličinu na projekciji) za iste vremenske točke tijekom mjerenja, te su napravljeni grafički prikazi iz kojih se može vidjeti da ovisnost

nije potpuno linearna. Međutim, lako je uočljivo da za sve četiri razine snage do točke  $\Delta T = 7$  °C krivulja teče gotovo linearno, te se može zaključiti da se do te razine promjene temperature pomak može promatrati kao linearna promjena ovisna o temperaturi. Ukoliko bi za potrebe nekih daljnjih mjerenja i ispitivanja bilo potrebno, ovo se može uzeti kao neka početna točka, ukoliko su mjerenja kratkotrajna. Za dugotrajna mjerenja je veći  $\Delta T$ , pa će i pomak rasti. Naknadni rast pomaka iza točke  $\Delta T = 7$  °C može se pripisati većim magnetskim utjecajima koja također mogu biti ovisna o prevelikoj temperaturi.



**Slika 48** Ovisnost pomaka i temperature za četiri razine snage

#### 4.4. Vremenske konstante

Promatranjem promjena temperature i pomaka kroz prethodne dijelove ovog rada, može se vidjeti povezanost priloženih grafova sa grafovima vremenskih konstanti, stoga će u ovom dijelu biti urađena usporedba izmjerenih vrijednosti na uređaju i izračunatih funkcija pomoću izraza za temperaturu. Analogno tome će se slično primijeniti i na pomak u svrhu daljnje analize promjena koje su uočene.

##### 4.4.1. Toplinske konstante

Za tijelo koje se hladi ili grije, toplinska (temperaturna) vremenska konstanta je vrijeme za postizanje temperaturnog gradijenta (promjene) koji je jednak 63,21 % početnog temperaturnog



gradijenta. Odnosno, ukoliko se temperatura za određeni iznos vremena promijeni za 100 jedinica, toplinska konstanta  $\tau$  te promjene biti će iznosa 63,21 jedinice. Jednadžba za izračun toplinske vremenske konstante  $\tau$  glasi:

$$T(t) = T_k + (T_p - T_k) e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (6)$$

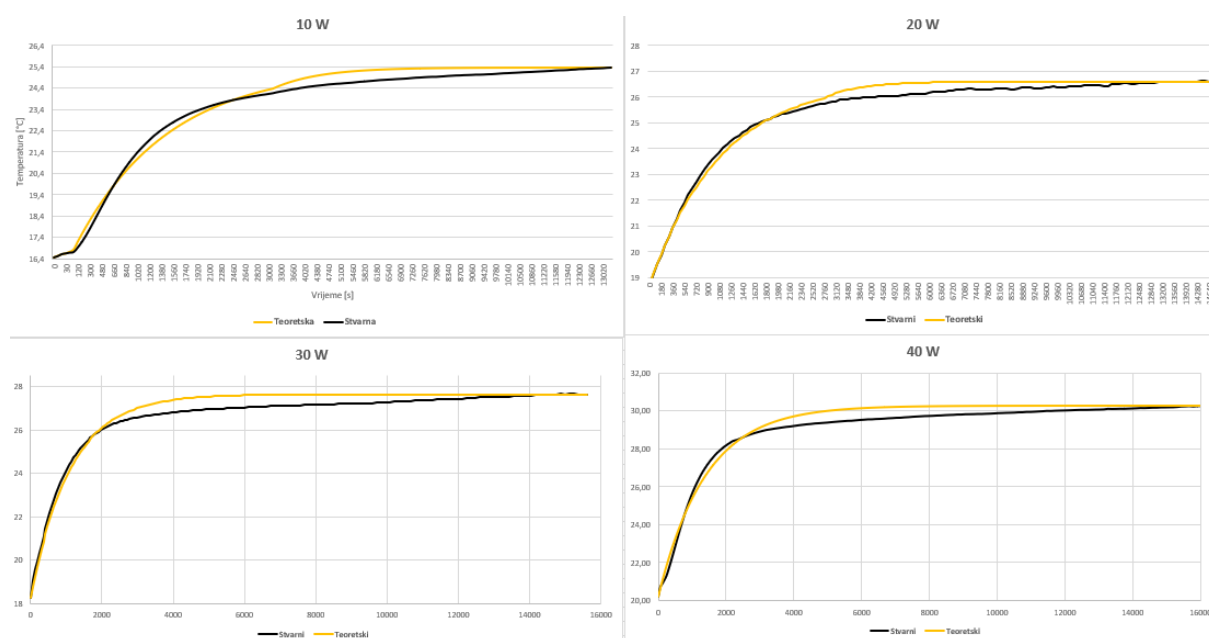
gdje je:  $t$  – vrijeme izraženo u sekundama tijekom promjene [s],

$T(t)$  – temperatura u trenutku  $t$  [°C],

$T_p$  – početna temperatura u trenutku  $t = 0$  s [°C],

$T_k$  – temperatura u posljednjoj točki mjerenja [°C],

$\tau$  – vremenska toplinska konstanta [s].



**Slika 49** Usporedba stvarne i teoretske krivulje senzora 2 za 4 razine snage

Na slici 49 su dani grafovi za svaku mjerenu razinu snage uređaja, te krivulje za izmjerene (stvarni) i teoretski (izračunat iz jednadžbe (6))  $\tau$ . Izračunom uz pomoć izmjerenih vrijednosti i jednadžbe (6) dobivene su vrijednosti za toplinski  $\tau$ , te su izračunati također stvarni  $\tau$  za svaku razinu snage uređaja pomoću izraza za 63,21% promjene temperature. Ta promjena temperature je uspoređena sa izmjerenim vrijednostima temperature senzora 2, te su dobiveni podaci kako su prikazani u tablici 3. Postoje određena odstupanja, ali do otprilike dvije minute, što je s obzirom na dugotrajnost mjerenja poprilično točno. Također važno je naglasiti da iznos  $\tau$  pomnožen sa 5 ( $5\tau$ ), u teoriji, predstavlja 99% promjene, odnosno  $\tau$  vrijednost pomnožena sa 6

( $6\tau$ ) daje 99,9% promjene. Tako se sa ovim vrijednostima mogu dobiti korisni podaci uz pomoć kojih će se moći lakše promatrati i druge promjene na uređaju.

	10 W	20 W	30 W	40 W
<b>Teoretski <math>\tau</math>, s</b>	1393	1090	1112	1385
<b>Stvarni (izmjereni) <math>\tau</math>, s</b>	1255	1015	1110	1250

**Tablica 3 Usporedba izmjerenih i izračunatih vrijednosti  $\tau$**

#### 4.4.2. Konstante pomaka

Analogno toplinskim konstantama za ovaj rad su napravljeni i proračuni vrijednosti za vremenske konstante pomaka po Y osi, budući da je taj pomak u jako uskoj korelaciji sa promjenom temperature. Jednadžba kojom su izračunate vremenske konstante pomaka glasi:

$$Y(t) = Y_k + (Y_p - Y_k) \frac{t}{\tau_Y}, \quad (7)$$

gdje je:  $t$  – vrijeme izraženo u sekundama tijekom promjene [s],

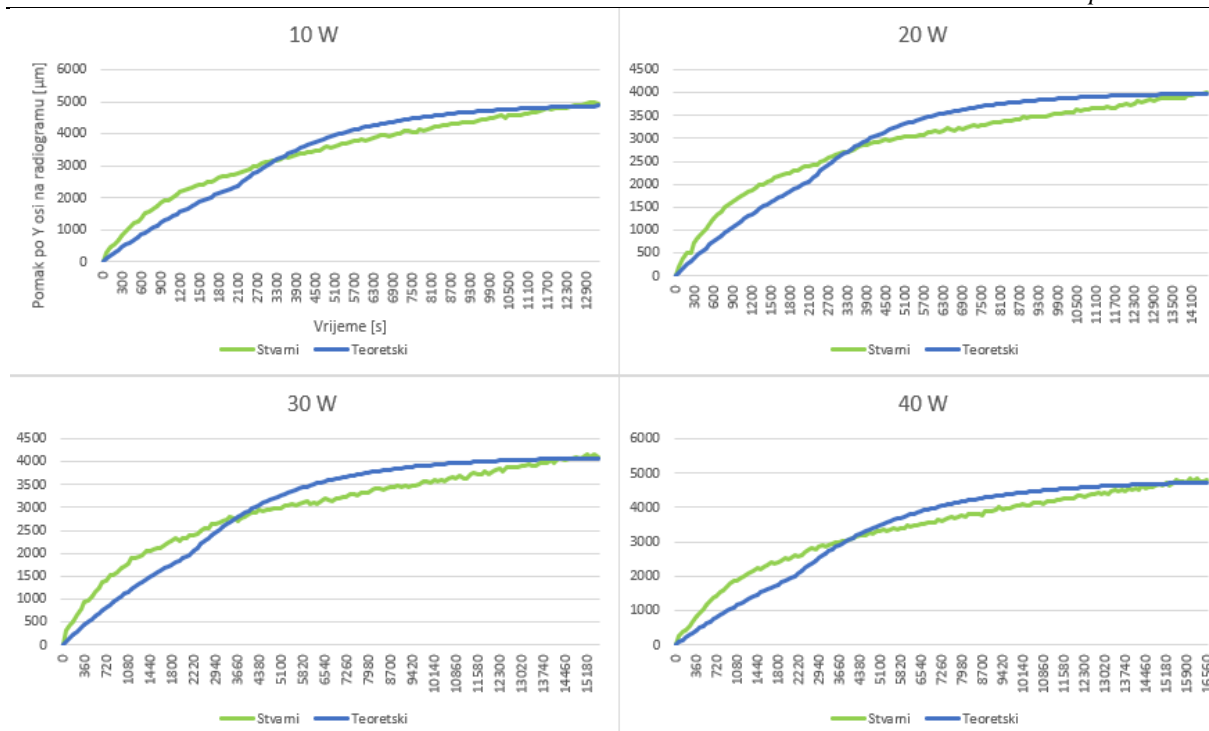
$Y(t)$  – pomak u trenutku  $t$  [ $\mu\text{m}$ ],

$Y_p$  - početni pomak u trenutku  $t = 0$  s [ $\mu\text{m}$ ],

$Y_k$  – pomak u posljednjoj točki mjerenja [ $\mu\text{m}$ ],

$\tau_Y$  – vremenska konstanta pomaka [s].

Na slici 50 su prikazi stvarnih i izračunatih vrijednosti. Na grafu za svaku snagu na Y osi je računat pomak po Y osi na radiogramu u mjernim jedinicama mikrometrima. Iz oblika krivulja može se primijetiti znatna odstupanja. S obzirom da je nagib krivulja koje su rađene iz stvarnih podataka uvelike manji nego nagib kod izračunatih krivulja uz pomoć jednadžbe (7), može se doći do zaključka da je trebalo provesti dugotrajnije mjerenje da bi se dobile točke pomaka iza onih koje se u ovom slučaju uzimane kao krajnje točke promjene pomaka po Y osi. Metoda korištena za preciznije mjerenje teoretskih krivulja je metoda najmanje sume kvadrata svih grešaka između izmjerenih i izračunatih vrijednosti, te je iteracijom nađen najoptimalniji  $\tau_Y$ . Također, vrijednost izračunatih konstanti pomaka rastu pojačanjem razine snage CT uređaja, posebno pri 30 W i 40 W, stoga se može očekivati i veći pomak nakon dugotrajnijeg rada uređaja. Iako, rijetka mjerenja koja se vrše na ovakvim uređajima su trajanja većeg od 15000 - 16000 sekundi, odnosno približno nešto duže od 4 sata konstantnog mjerenja. U tablici 4 su dani točni podaci za prikaz vrijednosti konstanti pomaka koje su izračunate i izmjerene. Na slici 50. se mogu vidjeti i točke infleksije iz čega se može zaključiti da krivulje konvergiraju.

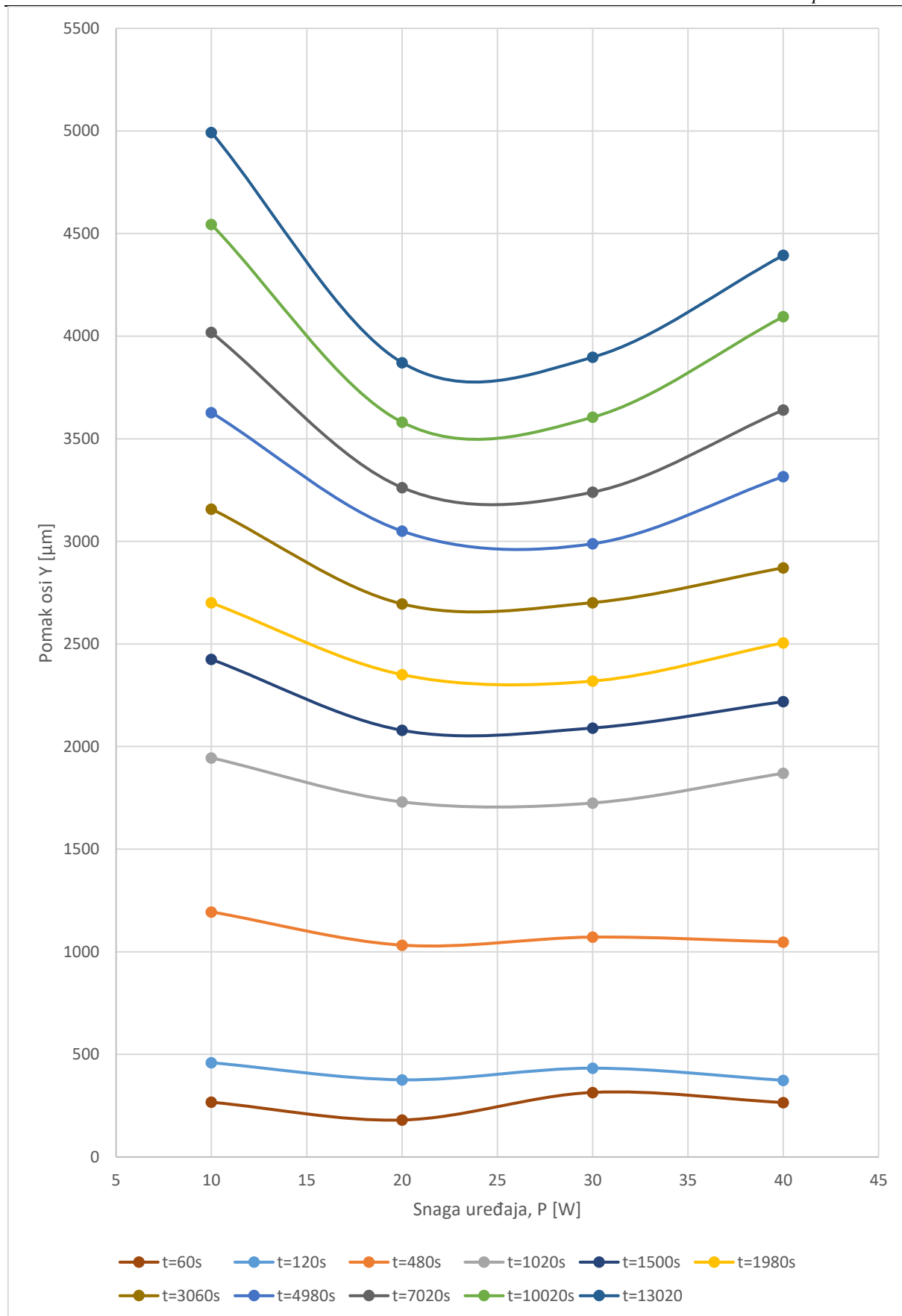
Slika 50 Usporedba stvarnog i teoretskog  $\tau_Y$  za razine snage

	10 W	20 W	30 W	40 W
<b>Teoretski <math>\tau_Y</math>, s</b>	3190	2903	3227	3933
<b>Stvarni (izmjereni) <math>\tau_Y</math>, s</b>	3128	2508	2519	2921

Tablica 4 Usporedba vrijednosti  $\tau_Y$  za pomak Y osi

#### 4.5. Odnosi pomaka i snage

Sve ono što je dosad u radu prikazano vodi do pitanja ovisnosti pomaka na projekciji uređaja i razine snage uređaja na kojoj se provodi mjerenje. Nelinearna ovisnost između rasta temperature i pomaka po Y osi dodatno otežava izračune koji bi mogli dati jednostavne funkcije kao rješenja za izračun pomaka uz vrijeme i snagu. Kroz ovo poglavlje su analizirani razni aspekti podataka koji su dobiveni na osnovu radiograma snimljenih na uređaju tijekom snimanja, te temperatura na osam termistora postavljenih na uređaj. Djelomična ovisnost parametara korištenih u ovom radu daju dodatnu težinu određivanju pomaka i temperatura uz pomoć simulacija ili funkcija bez stvarnog mjerenja na stroju. Međutim, podaci koji su analizirani dovoljni su za daljnje grafičke prikaze i analize, uz pomoć kojih se zapravo mogu i odrediti pomaci za određenu snagu i vrijeme promatranja.



Slika 51 Grafički prikaz funkcija pomaka i snage uređaja

Na slici 51 je grafički prikazana ovisnost snage, pomaka po Y osi, koji je izražen u mikrometrima i predstavlja pomak na projekciji. Taj pomak kako je u prethodnom poglavlju napisano je pomak središta promatrane kuglice izražen u pikselima i pomnožen sa 127, budući da jedan piksel na radiogramu predstavlja 127  $\mu\text{m}$  duljine. Na X osi grafa su snage uređaja na kojima su rađena mjerenja. Vremena krivulja su izražena u sekundama. Krivulje koje su prikazane su iscrtane iz stvarnih mjernih podataka koji su dobiveni za vrijeme ispitivanja termistorima, te nisu korištene jednažbe. Ti podaci su ubačeni u zajednički graf na slici 51. Za određena vremena su na slici 51 povezani podaci pomaka za sve četiri snage uređaja na kojima su provedena mjerenja. Zanimljivo je promatrati različita ponašanja krivulja rastom vremena. Također, ovaj prikaz potvrđuje nelinearnost promjena temperature i pomaka. Kada se pogleda krivulja za  $t = 60\text{s}$  može se vidjeti valoviti oblik, dok na krivulji  $t = 13020\text{s}$  je oblik slova V i pomak je veći kod snage iznosa 10 W, nego kod snage od 40 W. Također, teoretski, ukoliko bi snagu prilikom snimanja postavili na 100 W, prema izloženim podacima možemo zaključiti, pomak bi premašio vrijednosti za snagu od 40 W, ali i vrijednosti pomaka za snagu uređaja od 10 W. Pomoću grafa na slici 51 može se očitavati i iznos pomaka za sve snage između 10 i 40 W, budući da su prikazane funkcije, za određeno vrijeme u sekundama. Vrijeme, naravno, može biti samo ono za koje su prikazane funkcije, ali ukoliko je potrebno moguće je iz mjernih podataka dodavati točke vremena, ili ako za to vrijeme nisu dostupni podaci, linearnom interpolacijom se dobiju potrebne vrijednosti koje se ubacuju u ovaj dijagram. Sve ovo prikazano dokazuje spektar mogućnosti analize podataka za ovakva i slična mjerenja, ali i mogućnosti greške ukoliko se podaci interpretiraju na krivi način, budući da je rad sa nelinearnim promjenama dosta dinamičan i na neki način nezahvalan.

## 5. ZAKLJUČAK

Napredak i razvoj primjene X -zračenja u posljednjih trideset godina je doživio streloviti uspon. Osim medicinske primjene CT uređaja, sve je veća primjena i kod prehrambene znanosti, paleontologije, forenzike i za očekivati je da će se taj rast nastaviti i u budućnosti, te da će obuhvaćati sve širi spektar primjena i da će ući i u mnoge druge znanstvene sfere. U ovom radu je analiziran dio primjene CT uređaja u industriji i strojarstvu. Ovakvi uređaji mogu uvelike olakšati i poboljšati kontrolu kvalitete proizvoda, ali i same proizvode budući da je računalna tomografija nerazorna metoda ispitivanja materijala i povećanjem mogućnosti mogu se analizirati jako složeni objekti, njihove deformacije, pukotine, struktura materijala i ostale pojave važne za optimiziranje kvalitete proizvoda i njegovog životnog vijeka. Također, razvojem tehnologije i uvođenjem novih softverskih poboljšanja danas se vrlo lako mogu dobivati 3D rekonstrukcije modela pomoću radiograma koji se snimaju na industrijskim CT uređajima. Takvi modeli se koriste za kasnije simulacije koje mogu dati vrlo važne informacije o promatranom objektu i njegovom fizičkom stanju.

Međutim, kao što je u ovom radu i prikazano, industrijski CT uređaji nisu savršeni i postoji još puno mjesta za napredak i poboljšanje. Veliki problem nastaje prilikom generiranja samih X – zračka u izvoru uređaja, jer se samo 1% oslobođene energije pretvara u zračenje, dok ostali dio otpada na toplinu. Upravo ta oslobođena toplina dovodi do značajnog zagrijavanja metalnih dijelova oko izvora X – zračka i temperatura raste što je točka bliže izvoru zračenja. Ova činjenica je dokazana u radu mjerenjima temperature na glavi CT uređaja u kojoj je smješten izvor zračenja, tako što je postavljeno osam termistora na različite pozicije u uređaju. Kada je utvrđeno da su promjene temperature zaista značajne, na rotacijski stol je postavljena precizna kuglica promjera 100  $\mu\text{m}$ , koja je snimana u stabilnim uvjetima (bez rotacije stola i pomicanja izvora zračenja ili detektora). Snimani su radiogrami za četiri snage uređaja (10W, 20W, 30W i 40W), te je utvrđena veza između promjene temperature i pomaka kuglice na radiogramima, posebno po Y osi. Obrada radiograma temeljila se na metodi detekcije rubova uz pomoć koje se određivalo središte promatrane kuglice, i na osnovu kojeg su rađeni svi izračuni. Također, pretpostavljeno je da će se temperatura povećavati što uređaj radi na većoj razini snage, te je to dokazano i potkrijepljeno grafičkim prikazima koji su napravljeni na osnovu odrađenih mjerenja.

Nadalje, utvrđeno je da povećanje temperature uzrokuje pomake kuglice na radiogramima u pozitivnom smjeru Y osi (prema gore) iz čega se dolazi do zaključka da se izvor zračenja pomiče prema dole, odnosno da se metalno kućište u kojem je smješten izvor zračenja izdužuje.

Ova činjenica može dovesti do grešaka na radiogramima, a posljedično i do pogrešne interpretacije promatranih slika tj. mjernih uzoraka. Tako su u ovom radu prikazane grafičke promjene uz pomoć mjernih podataka dobivenih prilikom snimanja radiograma. Ovakvi grafički ali i matematički prikazi mogu uvelike pomoći pri analizi slika, jer uzevši u obzir pomake mogu se korigirati pozicije snimljenih objekata. Da bi se ispravno odredili uzroci pojava pomaka po osima uređaja i promjena temperature nužno je imati potrebna znanja, jer su CT uređaji jako kompleksni i sastoje se od mnoštva različitih dijelova, koji su ovisni jedan od drugom. Također je u radu izložena veza između računskih i stvarnih vrijednosti kod pomaka i temperatura, te njihovih konstanti, na što uvijek treba obratiti pozornost prilikom 3D rekonstrukcija i simulacija, jer je vidljivo da postoje u nekim slučajevima i značajnija odstupanja.

Konačno, može se zaključiti da su temperaturni utjecaji na točnost mjerenja industrijskih CT uređaja značajni, te da postoji izravna veza između pomaka i temperature. Korištenjem različitih matematičkih modela, algoritama i grafičkih prikaza mogu se dobiti potrebni podaci koji će u budućnosti optimizirati korištenje i točnost mjerenja. Za daljnje potrebe ispitivanja mogu se predložiti ponovljena ispitivanja u svrhu utvrđivanja ponovljivosti, ali i dugotrajnija mjerenja za preciznija određivanja promjena i lakše izračunavanje njima pripadajućih funkcija.

**LITERATURA**

- [1] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., (pristupljeno 25. 5. 2022.)
- [2] Markučić D., Predavanje iz kolegija Nerazorna ispitivanja: Metode nerazornih ispitivanja, [https://www.fsb.unizg.hr/ndt/download/teh3\\_2003-04pred.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/ndt/download/teh3_2003-04pred.pdf) , Zagreb, (pristupljeno 2. 6. 2022.)
- [3] Kruth J.P., Bartscher M., Carmignato S., Schmitt R., De Chiffre L., Weckenmann A. „*Computed Tomography for Dimensional Metrology*“, 60/2:821-842., 2012.
- [4] Sun, W., Brown, S., Leach, R., "An overview of industrial X-ray computed tomography", National Physical Laboratory, 2012.
- [5] <https://www.smithsonianmag.com/innovation/fifty-years-ago-the-first-ct-scan-let-doctors-see-inside-a-living-skull-180978792/> (pristupljeno, 4. 6. 2022.)
- [6] Evans, Li M., Margetts, L., Casalegno, V., Lever, L. M., Bushell, J., Lowe, T., Wallwork, A.; Young, P., Lindemann, A., "Transient thermal finite element analysis of CFC–Cu ITER monoblock using X-ray tomography data"., Fusion Engineering and Design., 100: 100–111., 2015.
- [7] Villarraga-Gómez H., „*Seeing is believing: X-ray Computed Tomography for Quality Control*“, 2016
- [8] <https://www.lumitex.com/blog/visible-light-spectrum> , ( pristupljeno 8. 6. 2022.)
- [9] <https://industry.nikon.com/en-gb/products/x-ray-ct/> , ( pristupljeno 9. 6. 2022.)
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Flat-panel\\_detector#Indirect\\_detectors](https://en.wikipedia.org/wiki/Flat-panel_detector#Indirect_detectors) , (pristupljeno 9. 6. 2022.)
- [11] Kump, K; Grantors, P; Pla, F; Gobert, P., "Digital X-ray detector technology", 1998.
- [12] Zhao, W.; Rowlands, J.A., "Digital radiology using active matrix readout of amorphous selenium: theoretical analysis of detective quantum efficiency", 1995.
- [13] Yaffe M. J., Rowlands J. A., „X-ray detectors for digital radiography“, 1997., str. 1-39
- [14] Hofmann, J., Flisch, A., Obrist, A., „*Adaptive CT scanning-mesh based optimisation methods for industrial X-ray computer tomography applications*“, 2004., str. 271-278
- [15] Yang M., Li X., Meng F., Zhang J., „*Extra projection data identification method for fast-continuous-rotation industrial cone-beam CT*“, 2013.
- [16] Withers P.J., Bouman C., Carmignato S., Cnudde V., Grimaldi D., Hagen C.K., Maire E., Manley M., Du Plessis A., Stock S.R., „*X-ray computed tomography*“, 2021.



- 
- [17] De Chiffre L., Carmignato S., Kruth J.P., Schmitt R., Weckenmann A., “*Industrial applications of computed tomography*”, 2014.
- [18] Runje, B. : Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, Zagreb, 2013
- [19] Borges de Oliveira F., de Campos Porath M., Camargo Nardelli V., Augusto Arenhart F., Daniel Donatell G., „*Characterization and Correction of Geometric Errors Induced by Thermal Drift in CT Measurements*“, 2014.
- [20] Umbaugh S. E., Snyder J., Fedorovskaya E. A., „*Digital Image Processing and Analysis: Human and Computer Vision Applications with CVIPtools, Second Edition*“, J Electron. Imaging, 2011.
- [21] Stipančić T., Predavanja iz kolegija Vizijski sustavi, Zagreb, 2022.

---

**PRILOZI**

I. CD-R disk