

# Analiza pouzdanosti računalne radiografije

---

Lojen, Barbara

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:545782>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-29**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Barbara Lojen**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

**Prof. dr. sc. Damir Markučić, dipl. ing.**

Student:

**Barbara Lojen**

Zagreb, 2017

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

Zahvaljujem se svom mentoru, profesoru Damiru Markučiću, na pomoći, korisnim savjetima i vodstvu prilikom izrade završnog rada te laborantu Tomislavu Kezeleu na pomoći prilikom radiografskog ispitivanja.

Barbara Lojen



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **BARBARA LOJEN** Mat. br.: 0035193711

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA POUZDANOSTI RAČUNALNE RADIOGRAFIJE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **RELIABILITY ASSESSMENT OF COMPUTED RADIOGRAPHY**

Opis zadatka:

Usvajanju primjene neke nove metode ili tehnike nerazornoga ispitivanja u području zrakoplovstva prethodi provjera i dokazivanje učinkovitosti i sposobnosti tog ispitivanja. Jednako tako se provjerava i određeni ispitni postupak s utvrđenim ispitnim parametrima, odnosno utvrđena ispitna tehnologija, u cilju osiguravanja postizanja što vjerodostojnijih rezultata.

Temeljem smjernica i zahtjeva danih priručnikom MIL-HDBK-1823A (*NDE SYSTEM RELIABILITY ASSESSMENT*) potrebno je predložiti i provesti postupak procjene sposobnosti sustava za računalnu radiografiju na odabranome uzorku.

Kako slikovni zapisi računalne radiografije sadrže kvantitativne podatke i rezultate radiografskoga snimanja, analizu ispitnih rezultata potrebno je provesti temeljem usporedbe stvarnih i procijenjenih kvantitativnih značajki referentnih nepravilnosti ( $\alpha$  i  $\hat{\alpha}$ ).

Komentirati dobivene rezultate obzirom na utjecajne čimbenike koji doprinose varijabilnosti rezultata te dati poseban osvrt na nesigurnost procjene parametara pronađenih nepravilnosti.

Uvažavajući ukupan broj dobivenih rezultata, a neovisno o relevantnom zahtjevu priručnika MIL-HDBK-1823A, po mogućnosti konstruirati krivulju vjerojatnosti detekcije (*Probability of Detection Curve*).

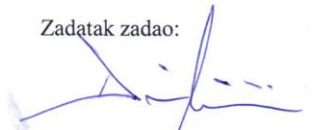
U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

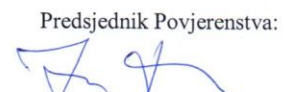
Zadatak zadan:  
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 24. veljače 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.  
**3. rok:** 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 27.2. - 03.03. 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.  
**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Damir Markučić

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Ivica Smojver

**SADRŽAJ:**

1. UVOD.....	1
2. RAČUNALNA RADIOGRAFIJA .....	2
2.1. Općenito .....	2
2.2. Oprema i princip rada.....	2
2.3. Primjena računalne radiografije u zrakoplovnoj industriji.....	5
3. POUZDANOST ISPITNE METODE .....	11
3.1. Smjernice i zahtjevi priručnika MIL-HDBK-1823A .....	11
3.1.1. Općenito .....	11
3.1.2. Definicija sustava i kontrola .....	11
3.1.3. Plan izvedbe .....	11
3.1.3.1 Parametri koji utječu na ispitivanje .....	12
3.1.3.2 Fiksni parametri.....	13
3.1.4. Planiranje tijeka provedbe ispitivanja .....	13
3.1.5. Ispitna matrica.....	14
3.1.6. Referentni uzorak.....	14
3.1.7. Tijek ispitivanja .....	15
3.1.8. Izvještaj o ispitivanju .....	15
3.2. Analiza podataka.....	15
3.2.1. Neočitani podaci .....	16
3.2.2. Prikaz rezultata.....	16
3.2.2.1 Opis NDT metode .....	16
3.2.2.2 Prikaz podataka koji se odnose na provedbu ispitivanja .....	16
3.2.2.3 Pojedinačni rezultati ispitivanja .....	17
3.2.2.4 Ukupni rezultati ispitivanja .....	17
3.2.3. Izvještaj .....	17
4. Statistička analiza NDT podataka.....	18
4.1. Ograničenja .....	18
4.2. Statistička analiza odnosa $a$ i $\hat{a}$ .....	18
4.2.1. Smjernice za dobivanje odnosa $a$ i $\hat{a}$ .....	19
4.3. Dobivanje POD krivulje iz $a$ i $\hat{a}$ .....	20
5. Procjena sposobnosti sustava za računalnu radiografiju.....	22
5.1. Eksperimentalni postav .....	22
5.2. Slikovne ploče.....	26
5.3. Digitalizacija slikovnih ploča.....	27
5.4. Ispitni uzorci .....	28
5.5. GP slikovna ploča .....	29
5.6. Blue slikovna ploča.....	32
5.7. Odnos $a$ i $\hat{a}$ .....	35
6. ZAKLJUČAK.....	40
7. LITERATURA .....	41
8. PRILOZI.....	42

**POPIS SLIKA:**

Slika 1: Prikaz slojeva slikovne ploče [5] .....	3
Slika 2: Princip rada metodom računalne radiografije [5] .....	4
Slika 3: Korozija na oplati krila F-15 [1] .....	6
Slika 4: Jezgre saća lopatice u kojoj se nalazi voda [2] .....	7
Slika 5: Stajni trap zrakoplova Falcon-20 i CR snimka [7].....	8
Slika 6: Pokrov usisnika Fokkera-100 [7].....	8
Slika 7: a) CR radiogram pokrova usisnika b) radiogram dobiven radiografijom na film [7]..	9
Slika 8: B-787 nakon otkrivanja linijskih pukotina na krilima [6].....	10
Slika 9: Četiri prikaza podataka a i $\hat{a}$ [1] .....	19
Slika 10: Rendgenska cijev na nosaču postavljena na 700 mm visine.....	23
Slika 11: Upravljačka jedinica rendgenske cijevi .....	23
Slika 12: Upravljačka ploča s regulatorima za napon, struju i vrijeme.....	24
Slika 13: Blue slikovna ploča na koju su smješteni ispitni uzorci i indikatori.....	24
Slika 14: GP slikovna ploča na kojoj su ispitni uzorci i indikatori .....	25
Slika 15: Duplex indikator prema normi EN 462-5 .....	25
Slika 16: Odnos apsorpcije fotona i energije zračenja .....	27
Slika 17: Skener VMI 5100MS [4] .....	27
Slika 18: Kalibracija veličine piksela temeljem referentne duljine žice .....	30
Slika 19: GP radiogram-mjerenje širine utora Uzorka 1 .....	31
Slika 20: Mjerenje širine utora na odabranom mjernom mjestu Uzorka 2.....	31
Slika 21: Kalibracija piksela pomoću referentne duljine žičanih parova na Blue ploči.....	33
Slika 22: Mjerenje širine utora na Blue ploči Uzorka 1 .....	33
Slika 23: Odnos a i $\hat{a}$ , na pločama GP 100 i Blue 100, kalibracijom duljine žice, Uzorak 1 ...	35
Slika 24: Odnos a i $\hat{a}$ , na pločama GP 100 i Blue 100, kalibracijom duljine žice, Uzorak 2 ...	36
Slika 25: Odnos a i $\hat{a}$ , na pločama GP 100 i Blue 100, Uzorak 1 .....	36
Slika 26: Odnos a i $\hat{a}$ , na pločama GP 100 i Blue 100, Uzorak 2.....	37
Slika 27: Odnos a i $\hat{a}$ , na pločama GP 50 i Blue 50, kalibracijom duljine žice, Uzorak 1 .....	37
Slika 30: Odnos a i $\hat{a}$ , na pločama GP 50 i Blue 50, Uzorak 2.....	39

**POPIS TABLICA:**

Tablica 1: Plan snimanja .....	26
Tablica 2 : Tehničke karakteristike slikovnih ploča.....	26
Tablica 3: Specifikacije skenera VMI 5100MS [4].....	28
Tablica 4: Karakteristike referentnih nepravilnosti na ispitnim uzorcima.....	28
Tablica 5: a) 50 $\mu\text{m}$ , kalibracija za 15mm,      b) 50 $\mu\text{m}$ , piksel 0,05 mm.....	32
Tablica 6: a) 100 $\mu\text{m}$ , kalibracija za 15mm,      b) 100 $\mu\text{m}$ , piksel 0,1 mm.....	32
Tablica 7: a) 50 $\mu\text{m}$ , kalibracija za 15 mm,      b) 50 $\mu\text{m}$ , piksel 0,05 mm.....	34
Tablica 8: a) 100 $\mu\text{m}$ , kalibracija za 15 mm,      b) 100 $\mu\text{m}$ , piksel 0,1 mm.....	34



**POPIS OZNAKA:**

$a$  - stvarna vrijednost mjerne veličine

$\hat{a}$  - izmjerena vrijednost mjerne veličine

$a_{th}$  - najmanja vrijednost koju je moguće snimiti NDT

sustavom pri kojoj se signal jasno razlikuje od šuma

$\beta$  - parametar procjene vjerojatnosti

$X, Y$  - slučajne varijable

$\mu(a)$  - "očekivanje", aritmetička sredina

$F$  - kumulativna razdioba

$POD$  - vjerojatnost detekcije

$p_h$  - vjerojatnost detekcije lažnih indikacija,

$p_m$  - vjerojatnost promašaja indikacije

## SAŽETAK

Računalna radiografija je jedna od novijih metoda nerazornih ispitivanja materijala koja se koristi pri održavanju zrakoplova i njegovih komponenata. Fosforne slikovne ploče zamjenjuju konvencionalnu upotrebu filma te pojednostavljaju rukovanje i skladištenje slikovnih zapisa. Kako bi se dokazala učinkovitost i sposobnost ispitivanja računalnom radiografijom temeljem smjernica i zahtjeva danih priručnikom MIL-HDBK-1823A provedeno je ispitivanje te su se na temelju dobivenih rezultata te odnosa  $a$  i  $\hat{a}$  komentirali utjecajni čimbenici. Obzirom da ukupan broj dobivenih rezultata nije bio dovoljan, nije bilo moguće konstruirati krivulju vjerojatnosti detekcije, *POD*.

Ključne riječi: *računalna radiografija, MIL-HDBK-1823A, a i  $\hat{a}$ , POD*

## SUMMARY

Computed Radiography is one of the latest methods of non-destructive testing of materials used in the maintenance of aircraft and their components. Phosphor imaging plates replace the conventional use of the film, and simplify the handling and storage of image files. To demonstrate the efficiency and the ability to test computer radiography on the basis of guidelines and requirements given manual MIL-HDBK-1823, a survey of these are based on the results of the relationship between  $a$  i  $\hat{a}$  and commented the influential factors. Since the total number of results was not enough, it was not possible to construct a curve of probability of detection, *POD*.

Key words: *computed radiography, MIL-HDBK-1823A, a i  $\hat{a}$ , POD*

## 1. UVOD

Sigurnost je jedan od najbitnijih zahtjeva koji zrakoplovna industrija mora ispuniti, a postiže se pravilnim održavanjem i primjenom odgovarajućih ispitnih metoda ili tehnika nerazornog ispitivanja tijekom uporabnog vijeka zrakoplova.

U svrhu održavanja pouzdanosti zrakoplova ne primjenjuju se metode koje nisu dovoljno provjerene i čija učinkovitost nije dokazana jer postoji veća vjerojatnost otkrivanja lažnih indikacija ili pak ne otkrivanje indikacija u materijalu koje mogu oštetiti zrakoplovne komponente i na taj način narušiti sigurnost leta. Osim izbora ispitne metode, na uspješnost ispitivanja utječu i ispitno osoblje, oprema, etaloni i ispitni objekt.

Računalna radiografija je jedna od novijih metoda koja pokušava afirmirati prednosti u odnosu na filmsku radiografiju koja je davno dokazala svoju pouzdanost. Brzina dobivanja rezultata, digitalna pohrana, jednostavnost rukovanja i mogućnost ponovne upotrebe slikovnih ploča doprinose sve većoj upotrebi računalne radiografije. [2] U ovom radu će se zbog toga provesti postupak procjene sposobnosti sustava za računalnu radiografiju i na temelju dobivenih ispitnih rezultata usporediti stvarne i procijenjene kvantitativne značajke referentnih nepravilnosti (a vs. â). Odabrani su neki od utjecajnih čimbenika koji doprinose varijabilnosti rezultata i njihov utjecaj na pouzdanost sustava računalne radiografije i dan je komentar na njih obzirom na dobivene rezultate.

## 2. RAČUNALNA RADIOGRAFIJA

### 2.1. Općenito

Problem u zrakoplovnim konstrukcijama zadaju oštećenja i pukotine koji ukoliko se ne otkriju na vrijeme, mogu dovesti do katastrofalnih posljedica, od samog uništenja zrakoplovnih dijelova pa sve do nesreća koje uključuju ljudske žrtve. Zbog toga je potrebno provoditi održavanje zrakoplovnih konstrukcija odgovarajućim ispitnim metodama i tehnikama radi učinkovitijih detekcija nepravilnosti i njihovih uklanjanja. Radiografija na film je više od 100 godina u upotrebi, no unapređenjem tehnologije, javila se potreba za bržom, jednostavnijom tehnologijom te se pojavom računalne radiografije pojednostavljuje postupak dobivanja rezultata. Umjesto filma za industrijsku radiografiju koristi se slikovna ploča koja sadrži fosforni sloj debljine 0.1 do 0.3 mm u kojem se stvara latentna slika predmeta koji ispitujemo. Pomoću posebnog laserskog skenera očitavaju se latentne slike sa slikovnih ploča i spremaju se u digitalnom obliku. Vrijeme potrebno za dobivanje slike je kraće nego što je to slučaj kod kemijske obrade filma, a oprema za očitavanje slike lako se može smjestiti i u vozilo te na taj način omogućiti lakše terensko ispitivanje. Dakako, ne smije se zanemariti ni činjenica da za ispitivanje nisu potrebna nikakva kemijska sredstva i time je ispitna metoda ekološki prihvatljivija. U sljedećem podnaslovu detaljnije će biti objašnjen princip rada računalne radiografije. [2]

### 2.2 Oprema i princip rada

Oprema potrebna za ispitivanje sastoji se od:

- slikovne ploče s fosforim slojem (zamjenjuje film)
- posebnog skenera (očitava sliku i zamjenjuje kemijsku obradu)
- monitor koji prikazuje snimljene radiograme te služi i za pregledavanje i ocjenjivanje nalaza na digitalnim radiografskim zapisima

Slikovna ploča sadrži pet slojeva:

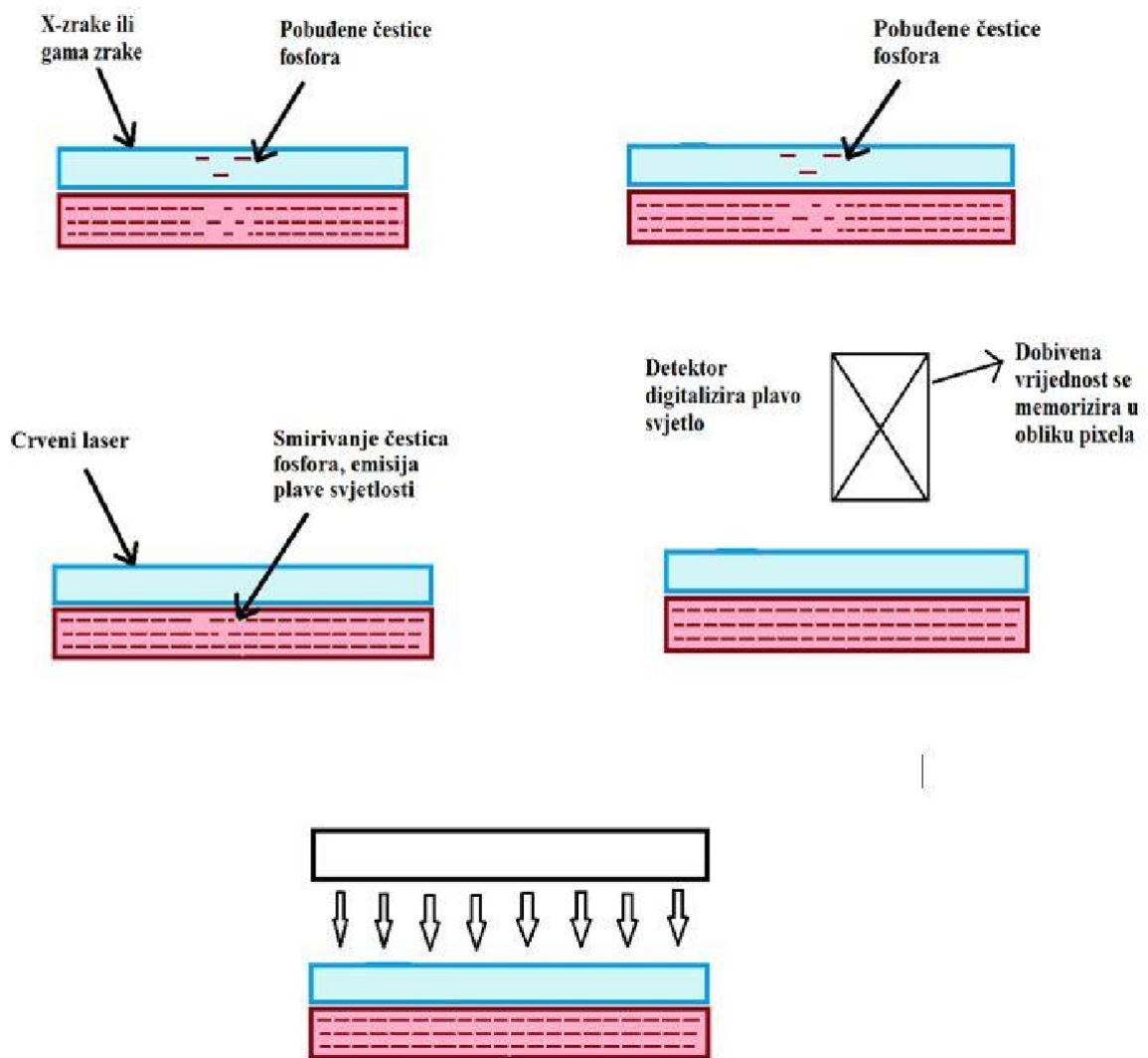
- zaštitni sloj
- fosforni sloj
- reflektirajući sloj
- bazu
- potporni sloj



Slika 1: Prikaz slojeva slikovne ploče [5]

Postupak je sljedeći:

- X- ili  $\gamma$ -zrake pogađaju slikovnu ploču koja je osjetljiva na ionizirajuće zračenje
- čestice fosfora se pobuđuju na viši energetski nivo i stvaraju latentnu sliku
- posebnim laserom koji emitira crvenu svjetlost, čestice fosfora se vraćaju na prethodni niži energetski nivo pri čemu se emitira plava svjetlost
- senzor detektira plavu svjetlost, provodi se A/D pretvorba kako bi se dobila digitalna vrijednost intenziteta za pojedini piksel te se na ekranu prikazuje dobivena slika
- nakon digitalizacije slikovne ploče, skener briše latentnu sliku i slikovna ploča se može koristiti za sljedeće ispitivanje



Slika 2: Princip rada metodom računalne radiografije [5]

### 2.3 Primjena računalne radiografije u zrakoplovnoj industriji

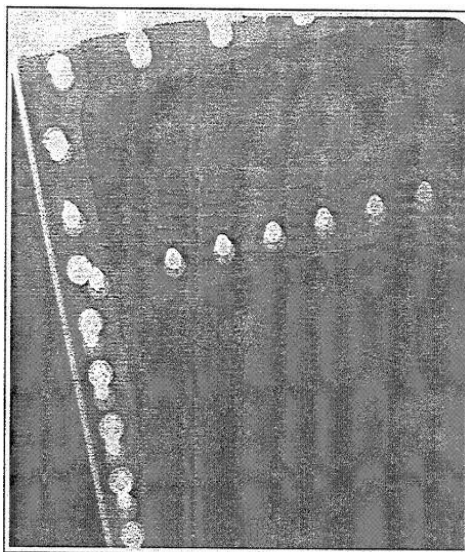
Potencijal fosfora u stvaranju latentnih slika u slikovnim pločama nije prepoznat sve do ranih sedamdesetih godina prošlog stoljeća kada se fosfor napokon počeo koristiti u tehnološke svrhe. [1]

Tvrtka Kodak je prva napravila patent kojim je započela revoluciju u korištenju fosfora za radiografska ispitivanja, dok je tvrtka Fuji 1982. godine razvila prvu komercijalnu tehnologiju koja je koristila fosfor za stvaranje latentnih slika, odnosno računalnu radiografiju i time postala glavni proizvođač slikovnih ploča na tržištu. [1]

Mogućnosti primjene računalne radiografije su najbolje objašnjene na primjeru ispitivanja zrakoplova F-15, T-38 i C-141. Ispitivanje zrakoplovnih komponenti je provedeno 1996.godine u američkom laboratoriju "Wright" gdje se napravila usporedba rezultata primjenom računalne radiografije i radiografije na film te se ocjenjivalo koliko je računalna radiografija primjenjiva u zrakoplovnoj industriji. Ispitivale su se zrakoplovne komponente koje su imale FOD (Foreign Object Debris) tj. strana tijela koja nisu dio zrakoplovne konstrukcije i koja oštećuju zrakoplovne komponente, pukotine, koroziju i unutar čije strukture se nalazila vlaga te su se usporedili troškovi primjene pojedine ispitne metode.

Kod zrakoplova F-15 obje metode su dale jednake rezultate pri otkrivanju FOD-a, ali ispitivanje računalnom radiografijom je rezultate dalo u upola kraćem vremenu eksponiranja slikovnih ploča zračenju. Ispitivanje kormila pravca u čijoj se sačastoj konstrukciji nalazila vlaga je dokazalo jednostavnost rukovanja dobivenim rezultatima; nema potrebe za velikom količinom filma niti problema oko skladištenja podataka, jednostavna digitalna pohrana rješava takve procedure. Prihvatljive rezultate daje i pri pronalasku korozije u oplati krila. [1]





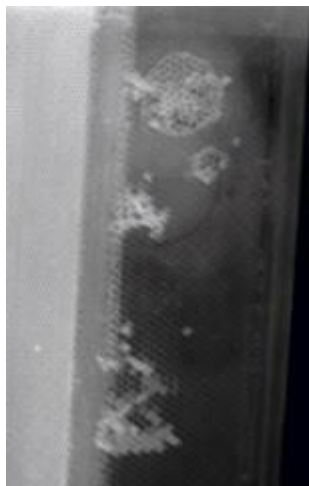
**Slika 3: Korozija na oplati krila F-15 [1]**

Drugi dobar primjer je ispitivanje zrakoplova T-38 koje je dokazalo kako se računalnom radiografijom lako otkrivaju pukotine u pregradama i okvirima zrakoplovnih konstrukcija. Kod zrakoplova C-141, na spoju krila s trupom, radiografija na film je pokazala kako računalna radiografija ne prikazuje sve nepravilnosti u materijalu jer je radiografija na film osjetljivija na malu promjenu geometrije u materijalu. [1]

Zaključak istraživanja je da računalna radiografija daje dobre rezultate pri otkrivanju FOD-a, vlage koja je skrivena u zrakoplovnim komponentama i korozije, no ne daje prihvatljive rezultate kod otkrivanja svih geometrijskih oblika pukotina u materijalu. Kombinacija računalne radiografije i radiografije na film daje prikaz svih oštećenja te se ispitivanje nikada ne bi trebalo ograničiti samo na upotrebu jedne ispitne metode.

Računalna radiografija je u širokoj uporabi u zrakoplovnoj industriji upravo zbog dobivanja brzih rezultata ispitivanja, bez ikakve uporabe kemijskih sredstava u usporedbi sa radiografijom na film kod koje su se za razvoj slika koristile kemikalije koje nisu ekološki prihvatljive. Upravo zbog tih prednosti, američki proizvođač helikoptera za komercijalno, industrijsko i vojno tržište, Sikorsky Aircraft, koristi računalnu radiografiju pri remontu i popravku komponenti zrakoplova, posebice pri testiranju lopatica rotora kod kojih se najviše

pozornosti obraća na pronalazak zaostale vode u jezgrama saća koji je sastavni dio lopatica elise u repu na helikopteru. [2]



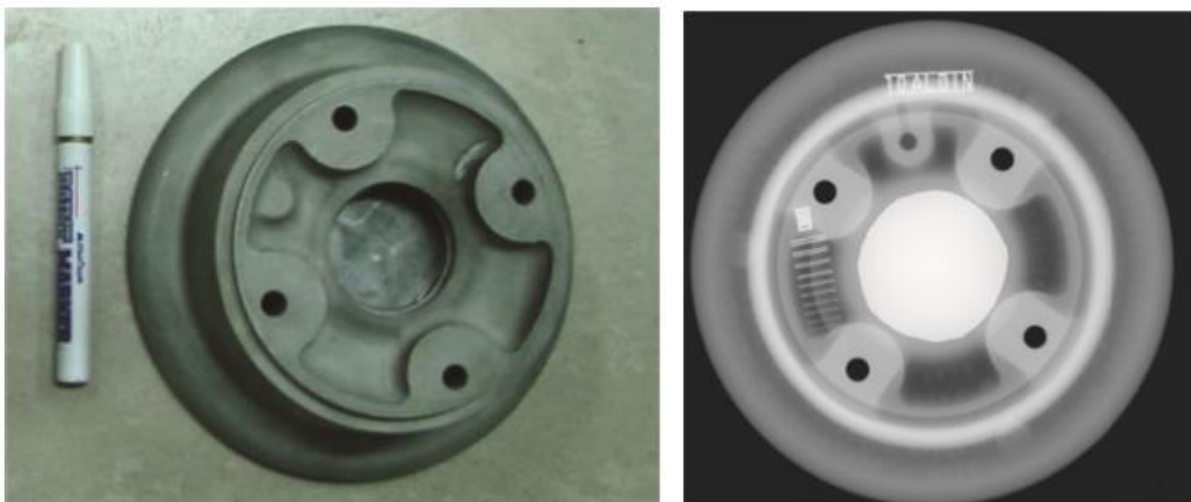
**Slika 4: Jezgre saća lopatice u kojoj se nalazi voda [2]**

Brzina provedbe računalne radiografije je ključan faktor zbog kojeg se sve više koristi ne samo u zrakoplovstvu već i u mnogim drugim granama industrije jer jednostavnost rukovanja slikovnim pločama ubrzava cijeli proces dobivanja latentnih slika. Računalna radiografija se zbog toga koristi i za ispitivanje krila zrakoplova zbog čije se veličine proizvode slikovne ploče s fosforom dugačke čak više od 1,27 metara (50 inča) kako bi lakše prekrile oplatu krila radi dobivanja vjerodostojnijih ispitnih rezultata.

Kao primjer se može navesti aluminijska sendvič konstrukcija krila sa saćastom strukturom između slojeva čiji su rubovi povezani aluminijem U-profila i cijela konstrukcija je zalijepljena. Pomoću računalne radiografije svi dijelovi takve konstrukcije se mogu vidjeti na jednom slikovnom zapisu za razliku od radiografije na film gdje bi se svaki dio konstrukcije zasebno morao snimiti. [2]

Osim navedenog, računalna radiografija se još koristi kod ispitivanja zavarenih spojeva zrakoplovnih konstrukcija. [3]

Još jedno zanimljivo istraživanje je provedeno na zrakoplovima Falcon-20 i Fokker-100 pri čemu su se opet razmatrala ograničenja i prednosti računalne radiografije i radiografije na film. Ispitivao se dio stajnog trapa Falcona-20 te usisnik Fokkera-100. Na donjoj slici se vidi dio stajnog trapa s pripadajućom slikom dobivenom računalnom radiografijom. Iz priloženog se vidi odličan kontrast zbog kojeg su svi dijelovi jasno vidljivi.



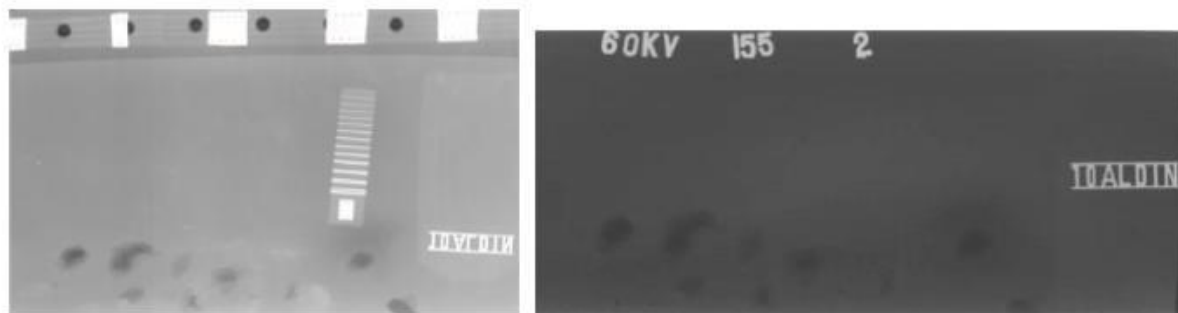
**Slika 5: Stajni trap zrakoplova Falcon-20 i CR snimka [7]**

Drugi ispitni dio je vidljiv na donjoj slici gdje se ispitivala vanjska strana usisnika tj. njegov pokrov pri ulazu u usisnik.



**Slika 6: Pokrov usisnika Fokkera-100 [7]**

Usporedbom oba radiograma na Slici 7 vidi se da računalna radiografija daje dobre rezultate i pri otkrivanju korozije.



**Slika 7: a) CR radiogram pokrova usisnika b) radiogram dobiven radiografijom na film [7]**

Zaključak ispitivanja je da računalna radiografija ima vrlo velik dinamički raspon odnosno mogu se snimati uzorci raznih debljina pri čemu se dobiju zadovoljavajući rezultati te ima dobru prostornu razlučivost. S druge strane, u uvjetima u kojima se koristila izrazito visoka rezolucija, računalna radiografija je dala lošije rezultate u usporedbi s radiografijom na film.

Uzimajući u obzir kontrastni prikaz radiograma, daleko je bolji kod računalne radiografije te se postavke u softveru lako mogu izmijeniti u svrhu poboljšanja prikaza sadržaja slike, dok se kod radiografije na film snimljena slika ne može mijenjati.

Dakle velike su prednosti računalne radiografije kada je riječ o dinamičkom rasponu, kontrastu, odnosu signal-šum uz uvjet da je odabrana primjerena rezolucija i otkrivanju pukotina kod primjene u zrakoplovstvu.

Velik problem u zrakoplovstvu predstavljaju linijske pukotine (eng."hairline cracks") koje su 2014. godine otkrivene na 40 novih B-787. Predstavnici Boeinga su izjavili kako je velik broj pukotina otkriven na rebrima krila. Airbus se pak susreo s problemom pukotina na krilima svojih A380 zrakoplova. [6] Zbog toga se često pri ispitivanju nepravilnosti u strukturi koristi X-zračenje za otkrivanje pukotina i korozije na zrakoplovnim prozorima, krilima i trupu.



**Slika 8: B-787 nakon otkrivanja linijskih pukotina na krilima [6]**

### **3. POUZDANOST ISPITNE METODE**

#### **3.1. Smjernice i zahtjevi priručnika MIL-HDBK-1823A**

Radi lakše procjene uspješnosti odabrane ispitne metode i njezine pouzdanosti, u priručniku MIL-HDBK-1823A su detaljno opisani zahtjevi i smjernice kojima se definira kakva su ograničenja kod pojedinih ispitnih metoda, njezine sposobnosti, način provođenja, zahtijevana oprema i koji parametri utječu na varijabilnost rezultata. Pravilnim odabirom ispitne metode i pravilnim odabirom vrijednosti ispitnih parametara povećava se pouzdanost dobivenih rezultata. U nastavku će biti ukratko opisane pojedine smjernice i zahtjevi spomenutog priručnika.

##### **3.1.1. Općenito**

Osnovni zadatak priručnika je ocjenjivanje sposobnosti i pouzdanosti NDT metoda. Sve točke priručnika općenito su primjenjive na sve metode nerazornog ispitivanja, s naglaskom na pojedine, poput penetrantske, magnetske itd. Uključuju osmišljavanje tijeka provedbe ispitne metode, analize rezultata i izvještaj o pouzdanosti dobivenih rezultata.

##### **3.1.2. Definicija sustava i kontrola**

Prije samog ispitivanja potrebno je odrediti unutar kojih granica se ispitna metoda može primijeniti kako bi dala pouzdane rezultate. Već je u poglavlju 2.3 opisano kod kojih nepravilnosti u materijalu zrakoplovnih konstrukcija daje dobre ili loše rezultate te se tih okvira treba držati. U obzir treba uzeti utjecajne čimbenike ispitivanja i na taj način unaprijed znati što doprinosi varijabilnosti rezultata. Kontrola ispitne metode se provodi uz pomoć statističkih analiza i ocjenjivanja dobivenih rezultata.

##### **3.1.3. Plan izvedbe**

Kako bi se osiguralo da je primijenjena metoda u potpunosti i ispravno provedena, potrebno je definirati sve stavke koje treba slijediti u tijeku ispitivanja. Plan izvedbe sadrži dijelove koji opisuju postupak kojim se metoda provodi, koliko je ta metoda primjenjiva za određeno

ispitivanje i jesu li se osigurali uvjeti kojima bi se održalo sve pod kontrolom. U nastavku će biti predstavljene točke koje se moraju slijediti ukoliko želimo da ispitivanje bude uspješno.

### 3.1.3.1 Parametri koji utječu na ispitivanje

U cilju osiguravanja postizanja što vjerodostojnijih rezultata, potrebno je najprije poznavati parametre koji mogu utjecati na njihovu varijabilnost. Na taj način se može povećati pouzdanost metode jer se parametri koji utječu na varijabilnost ispitivanja lakše mogu držati pod kontrolom. Poznajući mogući uzrok pogreške, odnosno znajući unaprijed što utječe na njihovo nastajanje, smanjuje se vjerojatnost njezina nastanka. Čimbenici koji pridonose varijabilnosti rezultata su sljedeći:

- priprema ispitnog uzorka: čišćenje, stanje površine, oblik-pravilnom pripremom površine prije samog ispitivanja uvelike se doprinosi ispravnosti rezultata
- promjena ispitivača-nepažnjom, smanjenom koncentracijom i umorom se lako može dogoditi pogreška. Bitan je stupanj obrazovanja i kvalificiranost za provedbu ispitne metode te radno iskustvo koji uvelike utječu na pouzdanost ispitivanja
- tijek ispitivanja: trajanje, smjer, raspon. Kod računalne radiografije optimalno je provesti skeniranje slikovnih ploča maksimalno unutar sat vremena, inače kvaliteta slike opada jer fosfor pobuđen X-zrakama iz visokog energetskeg stanja prolaskom vremena prelazi u niže energetske stanje i latentna slika nije jednako dobra kao što je bila odmah nakon eksponiranja.
- podešavanje ispitne opreme- ukoliko nisu svi parametri opreme usklađeni kako treba, vjerojatnost pojave lažne indikacije ili vjerojatnost da se indikacija uopće ne pojavi je velika.
- ponavljanje ispitivanja- nije dovoljno samo jednom provesti ispitivanje, pogotovo u području zrakoplovstva gdje nema mjesta pogreškama. Potrebno je uskladiti broj ponavljanja sa troškovima njihovih provođenja radi uspješnosti ispitivanja.

### 3.1.3.2 Fiksni parametri

Fiksni parametri ispitivanja su sljedeći:

- broj ispitivača
- radijus utora
- tehnika skeniranja
  1. količina unesenih podataka
  2. brzina skeniranja
- stopa digitalizacije
- broj bitova, tj. stupanj kontrastnog prikaza sive boje na slici
- granične vrijednosti rezultata
- vrijednosti filtera, najniže i najviše
- hardverske i softverske značajke (serijski kontrolni brojevi)

### 3.1.4. Planiranje tijekom provedbe ispitivanja

Glavna zadaća ocjenjivanja pouzdanosti NDT metoda je utvrđivanje veze između POD-a i veličine indikacije. Ovisno o dobivenim rezultatima, možemo utvrditi sposobnost sustava. Na varijabilnost rezultata utječu karakteristike same indikacije, ali i parametri koji su spomenuti u ranijim poglavljima. Ukoliko se prije samog ispitivanja detaljno razradi plan, vjerojatnost dobivanja pogrešnih rezultata o provjeri pouzdanosti NDT metode je svedena na minimum. Pravilan odabir parametara uvelike utječe na pouzdanost NDT metoda.

Planiranje obuhvaća:

- prepoznavanje varijabli koje mogu utjecati na otkrivanje indikacije, ali se ne mogu s velikom točnošću provjeravati u stvarnim uvjetima ispitivanja
- detaljan opis varijabli koje mogu u stvarnim uvjetima ispitivanja jamčiti veliku točnost dobivanja rezultata, a utječu na ispitivanje
- korake pojedinih ispitivanja



### 3.1.5. Ispitna matrica

Ispitna matrica služi za ocjenjivanje pouzdanosti izvedbe. Predstavlja niz određenih vrijednosti kojima se ocjenjuju varijable koje su bitne za određeno ispitivanje. Pojedinačna ispitivanja bi se trebala odvijati nasumičnim redom kako bi se smanjio utjecaj svih nekontroliranih čimbenika koji bi mogli utjecati na dobivene rezultate.

- Na primjer, iz grupe ispitivača, nasumičnim odabirom se u pravilu odabiru tri ispitivača ili na primjer dvije sonde iz cijele skupine
- Sama matrica može sadržavati velik broj čimbenika koji utječu na pouzdanost, no bitno je taj broj držati u ravnoteži. Konačan broj je ograničen vremenom, novčanim sredstvima i varijablama koje su nam ključne za pojedino ispitivanje. Prije samog ispitivanja potrebno je sagledati što nam od toga svega ima veći značaj za pojedini slučaj.
- Rjeđe se kao utjecajni čimbenici u obzir uzimaju karakteristike poput vremenskih uvjeta, okoline

### 3.1.6. Referentni uzorak

Referentni uzorak je vrlo značajan u ocjenjivanju nepravilnosti u materijalu i pouzdanosti sustava. Njegova geometrija, materijal, način proizvodnje i stanje površine određuju dobivanje indikacija, kakve će one biti i o čemu ovise takvi rezultati.

Zahtjevi koje svaki ispitni uzorak mora zadovoljiti su sljedeći:

- Potreban je veći broj referentnih uzoraka kako bi se spriječila vjerojatnost pogreške
- Stanje referentnog uzorka (njegova svojstva) mora odgovarati svojstvima stvarnog uzorka u danim uvjetima
- Ukoliko ispitivač ima veliko iskustvo rukovanjem određenim referentnim uzorkom, veća je mogućnost dobivanja pogreške te bi se trebao osigurati dovoljan broj ispitivača koji nisu upoznati s danim uzorkom

### **3.1.7. Tijek ispitivanja**

Prije samog ispitivanja potrebno je osmisliti i podnijeti detaljan plan u kojem je opisan tijek ispitivanja. Koraci sadrže nepromjenjive parametre koji utječu na varijabilnost rezultata, kriterije za odnos signal/šum, softver koji obrađuje dobivene podatke.

Uvjeti ispitivanja moraju osigurati točnost i preciznost rezultata, no na čimbenike poput brzine skeniranja ispitivač ne može utjecati. Svaka NDT metoda ima svoje zahtjeve i oni se moraju ispuniti, inače se ispitivanje ne može smatrati pouzdanim i POD krivulja nije valjana. Dakle, zaključak je da bi se ispitni postupak trebao provesti tako da odgovara radnom okruženju.

### **3.1.8. Izvještaj o ispitivanju**

Svaki izvještaj bi trebao sadržavati:

- Podatke o ispitivaču
- Serijski broj referentnog uzorka
- Datum i vrijeme ispitivanja
- Rezultate ispitivanja
- Mjesto na kojem je primijećena indikacija

## **3.2. Analiza podataka**

Dobiveni rezultati služe za ocjenjivanje pouzdanosti NDT metode. Prikazuju se u obliku POD krivulje i statističkom obradom se dobiva uvid u sposobnosti primjenjene metode. Ispitivanje se može podijeliti u dvije skupine:

- One kod kojih je poznata izlazna vrijednost, odnosno pogodak ili promašaj
- One koje nam daju podatke o veličini nepravilnosti, odnosu  $\hat{a}$  i  $a$

### **3.2.1. Neočitani podaci**

Ispitna matrica sadrži čimbenike koji utječu na pronalazak nepravilnosti i pravilnim baratanjem se ne bi trebali dogoditi propusti. Svakim propustom POD krivulja dobiva oblik koji ne odgovara stvarnim uvjetima i direktno utječe na pouzdanost NDT metode.

### **3.2.2. Prikaz rezultata**

Svako ispitivanje se treba potkrijepiti trajnim zapisima koji sadrže sve podatke ispitivanja kao i sažetak kojim se dokazuje pouzdanost NDT metode. Svi ti podaci su od izuzetne važnosti jer mogu ukazati i na pogreške koje su učinjene i u budućim testiranjima poboljšati provedbu NDT metoda. Podaci se mogu podijeliti u četiri kategorije:

- Opis NDT metode
- Prikaz podataka koji se odnose na provedbu ispitivanja
- Pojedinačni rezultati ispitivanja
- Ukupni rezultati ispitivanja

#### **3.2.2.1 Opis NDT metode**

Ispitivač je dužan spomenuti koji čimbenici utječu na varijabilnost podataka. Svaka promjena parametra mijenja i oblik POD krivulje te se na taj način direktno može zaključiti koji čimbenici više ili manje utječu na pouzdanost ispitivanja.

#### **3.2.2.2 Prikaz podataka koji se odnose na provedbu ispitivanja**

Sadrži sve podatke ispitne matrice, njezine parametre, broj ponavljanja ispitivanja, svaki korak koji je potrebno napraviti je detaljno razrađen radi izbjegavanja pogrešaka.

### 3.2.2.3 Pojedinačni rezultati ispitivanja

Iako se ovi podaci ne unose u sažetak ispitivanja, bitni su kako bi se spriječila mogućnost potkradanja pogreške. Tijekom ispitivanja se pregledavaju pojedinačni rezultati i međusobno uspoređuju kako bi ispitivanje bilo što uspješnije. U ukupne rezultate ispitivanja se ubrajaju samo oni pojedinačni rezultati koji su bitni pri otkrivanju nepravilnosti.

### 3.2.2.4 Ukupni rezultati ispitivanja

Nakon analize svih pojedinačnih rezultata, sabiru se samo oni koji su bitni za kreiranje POD krivulje. Softverskim paketom se kreira krivulja koja prikazuje odnos  $\hat{a}$  i  $a$ . Statističkom analizom se utvrđuje pouzdanost sustava, postavlja se donja i gornja granična vrijednost te se zahtjeva pouzdanost od 95 posto.

### 3.2.3. Izvještaj

Sposobnost sustava se sagleda u izvještaju koji detaljno sadrži sljedeće podatke:

Opis NDT sustava

Utjecajne čimbenike ispitivanja i njihovu ulogu u varijabilnosti podataka

Ukupne rezultate dobivene statističkom nalizom

## 4. Statistička analiza NDT podataka

Za utvrđivanje pouzdanosti sustava za računalnu radiografiju, na temelju rezultata radiografskog snimanja, konstruira se krivulja vjerojatnosti detekcije (*Probability of Detection Curve, POD*) s pouzdanošću od 95 posto. Dobiva se usporedbom stvarnih i procijenjenih kvantitativnih značajki referentnih nepravilnosti ( $a$  i  $\hat{a}$ ) ili metodom pogodak/promasaj.

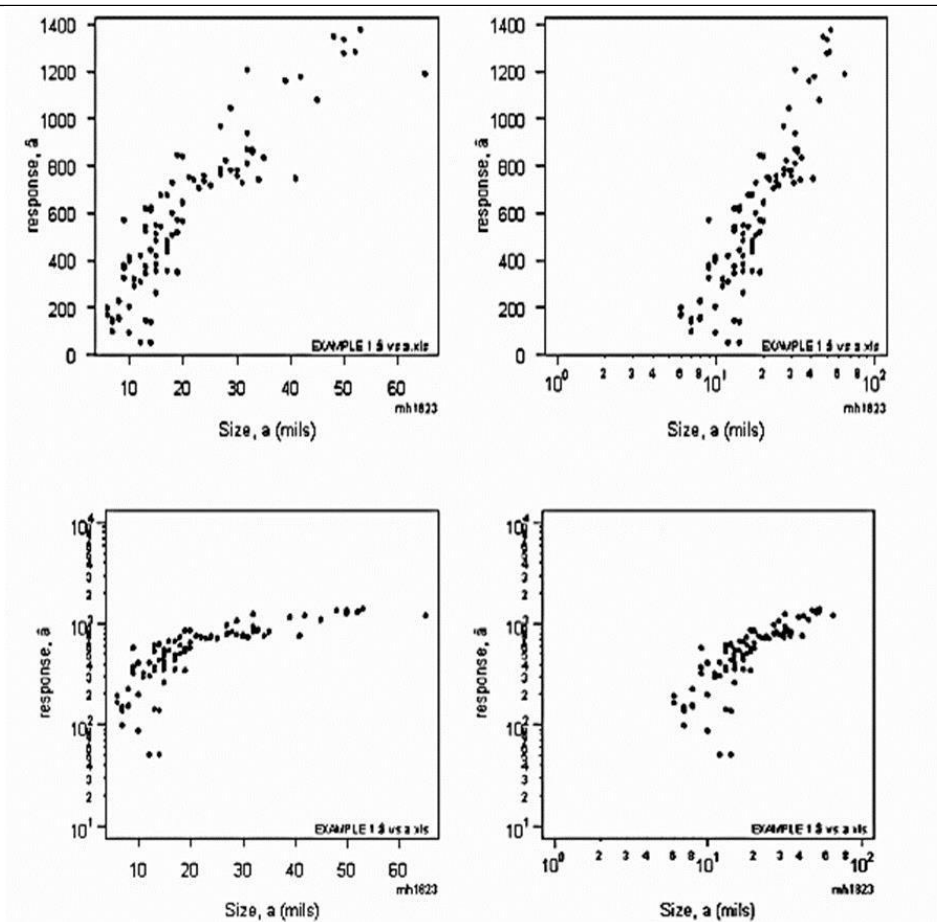
### 4.1. Ograničenja

- Od NDT sustava se očekuje da će dati potrebne podatke za stvaranje krivulje, odnosno  $a$  i  $\hat{a}$  ili podatke dobivene metodom pogodak/promasaj.
- Kako bi se moglo doći do željenih podataka, ispitni uzorak mora na sebi imati područja s mjerljivim karakteristikama, tako da se može izmjeriti primjerice veličina indikacije ili kemijski sastav na tom određenom području koje se ispituje.
- Izmjereni podaci uneseni u softver moraju odgovarati stvarnoj veličini indikacije, kako bi se mogla konstruirati pouzdana krivulja.

### 4.2. Statistička analiza odnosa $a$ i $\hat{a}$

Za statističku analizu odnosa  $a$  i  $\hat{a}$  koriste se četiri vrste prikaza:

- $a$  i  $\hat{a}$
- $\hat{a}$  i  $\log(\hat{a})$
- $\log(\hat{a})$  i  $a$
- $\log(\hat{a})$  i  $\log(a)$

Slika 9: Četiri prikaza podataka  $a$  i  $\hat{a}$  [1]

#### 4.2.1. Smjernice za dobivanje odnosa $a$ i $\hat{a}$

Korištenjem standardnog statističkom nazivlja

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} \quad (1)$$

gdje je  $\mathbf{X}$  vektor retka, a  $\boldsymbol{\beta}$  vektor stupca, tako da bi

$$y = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} \rightarrow y_i = \sum_{k=1}^n x_{ik}\beta_k$$

(2) gdje je  $\mathbf{X}$  vektor retka, a  $\mathbf{y}$  i  $\boldsymbol{\beta}$  vektori stupca,

dobiju se četiri smjernice za statističku analizu.

1. Linearnost parametara  $y_i | X = \mathbf{x}_i \boldsymbol{\beta}$ , pri čemu je  $\mathbf{x}_i$  i-ti red vektora  $\mathbf{X}$ . Važno je primijetiti kako parametar  $\mathbf{x}_i$  može poprimiti oblik funkcije, dok parametar  $\boldsymbol{\beta}$  mora stajati zasebno. To znači da će veza između odziva  $y$  i kontrolnih varijabli  $\mathbf{X}$  biti nelinearna sve dok je veza između  $y$  i  $\boldsymbol{\beta}$  linearna.

2. Uniformnavaianca  $\text{var}(y_i | X) = \sigma^2, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$

3. Nepovezanost:  $\text{cov}(y_i, y_j | X) = 0 (i \neq j)$
4. Greške:  $(y_1, y_2, \dots, y_n) | \mathbf{X}$  imaju normalnu raspodjelu.

Ukoliko je ijedna od ovih pretpostavki netočna, moći će se konstruirati POD krivulja, no ona neće imati valjan prikaz. Stoga je bitno da su sve pretpostavke i ulazni podaci pomoću kojih se konstruira POD krivulja ispravni.

### 4.3. Dobivanje POD krivulje iz $a$ i $\hat{a}$

Pretpostavlja se da postoji linearna veza između odnosa  $a$  i  $\hat{a}$  te se može prikazati na sljedeći način:

$$\ln(\hat{a}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(a) + \varepsilon, \quad (3)$$

gdje je  $\varepsilon$  izraz za pogrešku i odnosi se na normalnu raspodjelu nulte srednje vrijednosti i varijance  $\delta^2$ . Izraz  $\beta_0 + \beta_1 \ln(a)$  je srednja vrijednost funkcije gustoće vjerojatnosti od  $\ln(\hat{a})$ .

Zatim se definira sljedeće:

$$\mu = \frac{y_{th} - \beta_0}{\beta_1}, \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{\delta}{\beta_1}. \quad (5)$$

$y_{th}$  predstavlja granicu unutar koje se može konstruirati POD krivulja.  $y_{th} = \ln(a_{th})$  i ukoliko je vrijednost  $\hat{a}$  veća od  $a_{th}$  moguće je konstruirati POD krivulju.

Odnosno:

$$POD(a) = p_h + 1 - (p_m + p_h)F(a; \mu, \sigma), \quad (6)$$

gdje je:

$POD(a)$  - vjerojatnost detekcije na mjestu stvarne kvantitativne značajke referentne nepravilnosti

$p_h$  - vjerojatnost detekcije lažnih indikacija,

$p_m$  - vjerojatnost promašaja indikacije

$F(a; \mu, \sigma)$ - dvoparametarska logaritamska normalna distribucija

Krajnji izraz za POD krivulju glasi:

$$POD(a) = F \left[ \frac{\ln(a) - \left( \frac{y_{th} - \beta_0}{\beta_1} \right)}{\frac{\delta}{\beta_1}} \right], \quad (7)$$

iz čega slijedi

$$POD(a) = F \left[ \frac{\ln(a) - \mu(a)}{\sigma} \right]. \quad (8)$$



## 5. Procjena sposobnosti sustava za računalnu radiografiju

Temeljem smjernica i zahtjeva danih priručnikom MIL-HDBK-1823A (NDE SYSTEM RELIABILITY ASSESSMENT) bilo je potrebno predložiti i provesti postupak procjene sposobnosti sustava za računalnu radiografiju na odabranome uzorku.

Varirat će se dva utjecajna čimbenika koja utječu na varijabilnost rezultata računalne radiografije:

- Izbor slikovne ploče, GP ili XL Blue
- Rezolucija skeniranja, odnosno veličina piksela slikovnog zapisa

Kod rezolucije su se varirale dvije vrijednosti, 50 i 100  $\mu\text{m}$ . Eksperiment je proveden u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Fiksni parametri snimanja:

- Ispitivač
- Vrijeme ispitivanja
- Napon rendgenske cijevi - 110 kV
- Jakost struje - 4 mA
- Udaljenost izvora zračenja od ispitnog uzorka -700 mm

### 5.1. Eksperimentalni postav

Kao izvor zračenja koristila se rendgenska cijev, pri čemu se napon cijevi nije varirao već se držao konstantnim. Rendgenska cijev se nalazila na udaljenosti od 700 mm od ispitnog uzorka napon 110 kV pri jakosti struje od 4 mA.



**Slika 10: Rendgenska cijev na nosaču postavljena na 700 mm visine**

Nakon postavljanja ispitnog uzorka na slikovnu ploču, rendgenskom cijevi se upravlja izvan prostorije. Razlozi su sigurnosni, odnosno čovjek ne smije biti izložen zračenju pa se upravljačkom jedinicom nadzire ispitivanje izvan prostorije. Proizvođač upravljačke jedinice, tj. rendgenske cijevi je belgijska tvrtka Balteau.

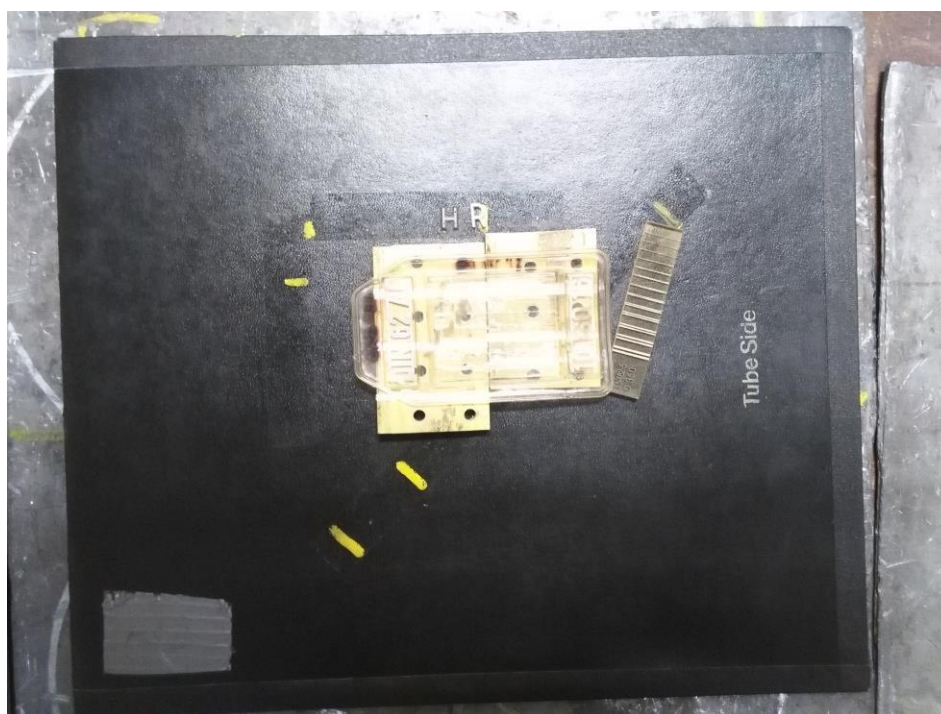


**Slika 11: Upravljačka jedinica rendgenske cijevi**



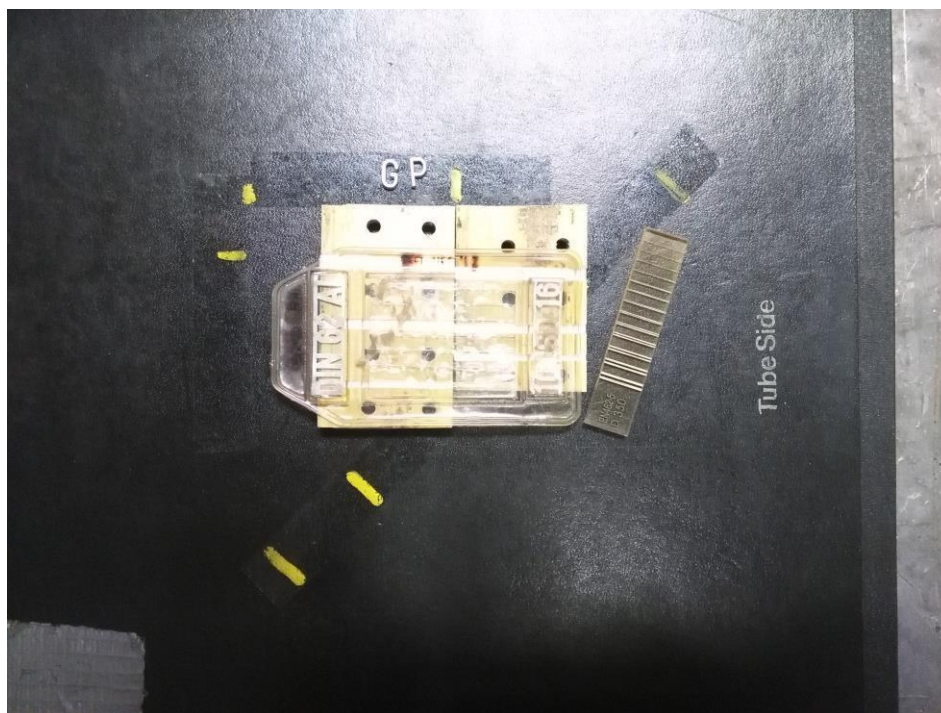
Slika 12: Upravljačka ploča s regulatorima za napon, struju i vrijeme

Ispitni uzorci stavljeni na slikovne ploče, a na svaki od oba uzorka je stavljen žičani indikator aluminija. Pored uzorka je stavljen još i duplex indikator prema normi EN 462-5 kao indikator prostorne rezolucije. Na donjoj slici se može vidjeti način postavljanja indikatora i ispitnih uzoraka na slikovnu ploču. Na isti način su se postavljali za sva četiri snimanja.



Slika 13: Blue slikovna ploča na koju su smješteni ispitni uzorci i indikatori





**Slika 14: GP slikovna ploča na kojoj su ispitni uzorci i indikatori**

Duplex indikator prema normi EN 462-5 sadrži 13 parova žica (od volframa i platine) i prostorna razlučivost se razmatra prema zadnjem vidljivom paru koji se vidi nakon snimanja radiograma. Svaki par žica je razmaknut za određen promjer  $d$ , isti onaj koliki je promjer svake žice.



**Slika 15: Duplex indikator prema normi EN 462-5**

Tablica 1: Plan snimanja

Snimka	Ispitni uzorci	Napon	Struja	Rezolucija	Ekspozicija	Vrsta ploče
1	Uzorak 1 i Uzorak 2	110 kV	4 mA	50 $\mu\text{m}$	45 s	GP
2	Uzorak 1 i Uzorak 2	110 kV	4 mA	100 $\mu\text{m}$	45 s	GP
3	Uzorak 1 i Uzorak 2	110 kV	4 mA	50 $\mu\text{m}$	45 s	Blue
4	Uzorak 1 i Uzorak 2	110 kV	4 mA	100 $\mu\text{m}$	45 s	Blue

U tablici 2 je dan prikaz plana snimanja. Dva ispitna uzorka različitih dubina utora se postavljaju na dvije vrste slikovnih ploča, vrijeme ekspozicije je 45 sekundi te je dalo zadovoljavajuće rezultate snimanja. Kao što je već prije spomenuto, varira se rezolucija i vrsta ploče, dok ekspozicija, napon i struja ostaju konstantni tijekom cijelog ispitivanja.

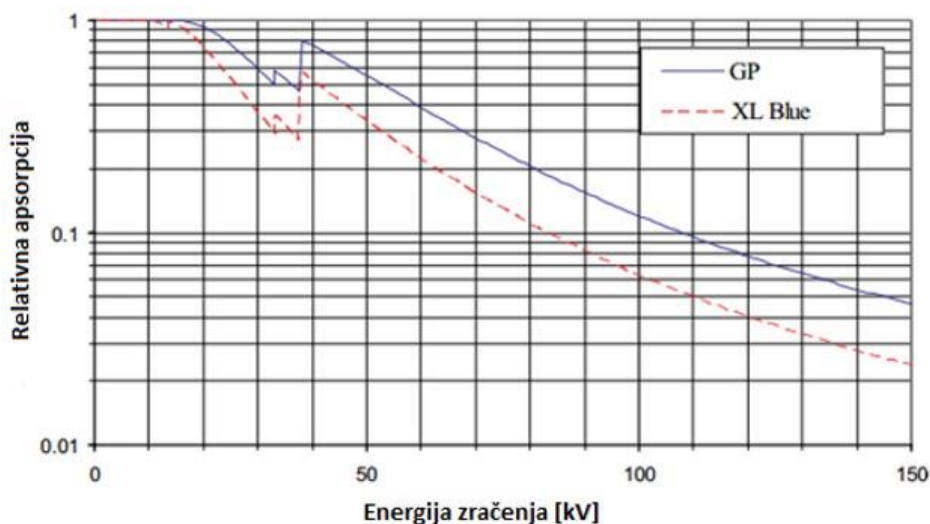
## 5.2. Slikovne ploče

U eksperimentalnom dijelu završnog rada koristile su se dvije različite vrste slikovnih ploča proizvođača Kodak. Obzirom na rezoluciju koristile su se opće namjenska GP ploča (eng. general purpose) i ploče koje imaju najveću rezoluciju odnosno "Blue". Tehničke karakteristike GP i "Blue" ploča dane su u Tablici 2.

Tablica 2 : Tehničke karakteristike slikovnih ploča

Vrsta ploče	Ukupna debljina, $\mu\text{m}$	Debljina sloja fosfora, $\mu\text{m}$	Debljina zaštitnog sloja, $\mu\text{m}$	Debljina potpornog sloja, $\mu\text{m}$
GP	584	290	11	29
Blue	436	160	4	18

Fosforni sloj se sastoji od BaFBr (barijfluorbromjodida) koji je dopiran dvovalentnim europijem i nanesen na poliester debljine 10  $\mu\text{m}$ . Zaštitni sloj se sastoji od polimera nedefiniranog sastava, a potporni sloj je načinjen od polikarbonata crne boje.



Slika 16: Odnos apsorpcije fotona i energije zračenja

XL Blue ploče su manje osjetljive na niže energije zračenja naspram GP ploča.

### 5.3. Digitalizacija slikovnih ploča

Nakon obavljenog ispitivanja, slikovne ploče je potrebno digitalizirati što je i učinjeno skenerom VMI 5100MS i na monitoru se u kratkom roku pojavljuje slika ispitnog predmeta zajedno sa indikatorima.



Slika 17: Skener VMI 5100MS [4]

Postavke skenera:

- rezolucija: 50 i 100  $\mu\text{m}$
- specifična energija lasera: 15  $\text{J}/\text{m}^2$
- napon fotomultiplikatora: 5,25 V

**Tablica 3: Specifikacije skenera VMI 5100MS [4]**

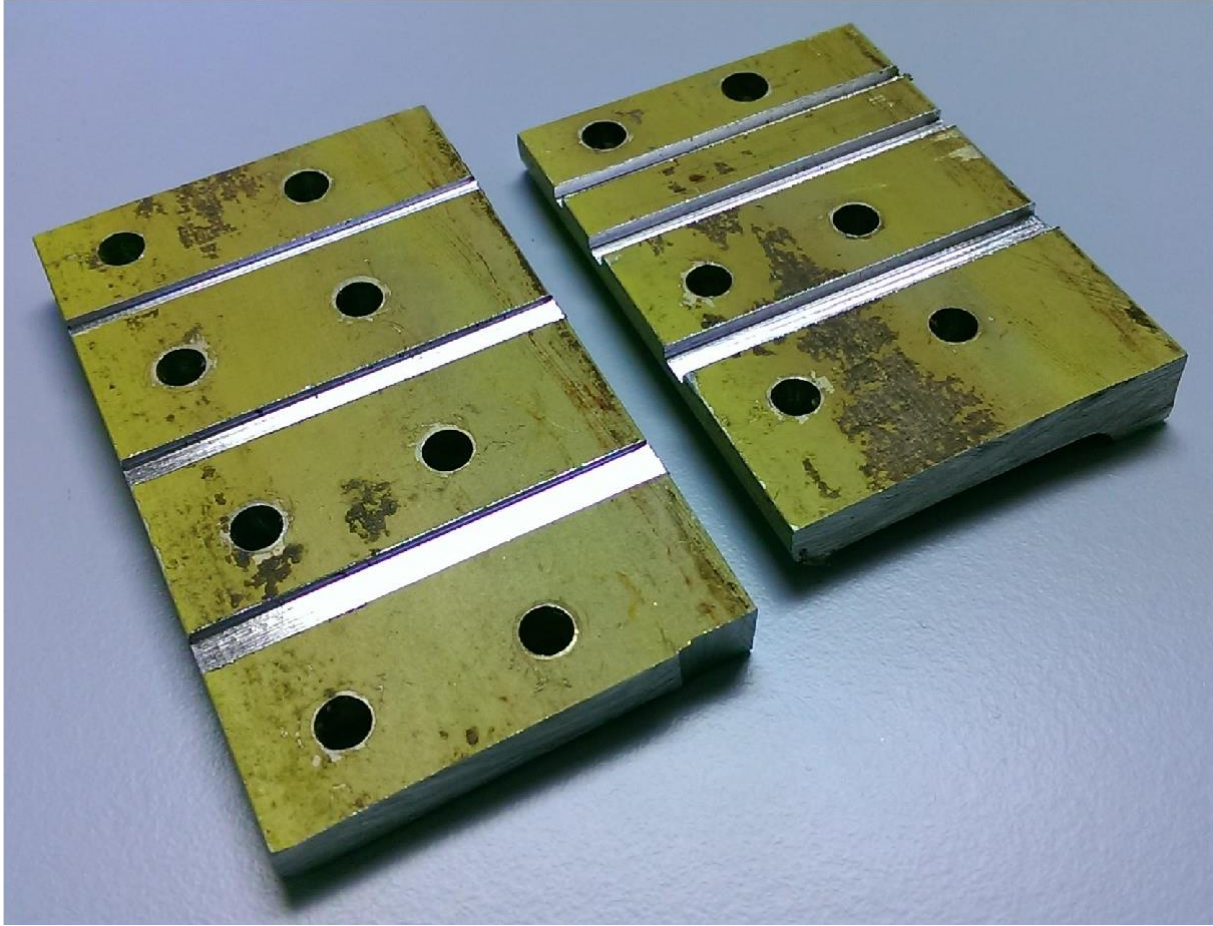
<b>Klasa:</b>	<b>Stolni skener</b>
Masa:	31,75 kg
Mreža:	DICOM/DICONDE
Napajanje:	100-240 V, 2,5A, 47-63 Hz
Operacijski sustav:	Windows XP Professional
Skeniranje / brisanje:	Automatsko, u jednom prolazu, ravno
Transportni mehanizam:	Jednostruki
Dubina piksela:	65000 / 16 bitna datoteka
Izvor svjetlosti:	Laser dioda / fotomultiplikator
Veličina laserskog snopa:	50 $\mu\text{m}$ do 200 $\mu\text{m}$ (u koracima od 10 $\mu\text{m}$ )

#### 5.4. Ispitni uzorci

Za ispitivanje su se koristila dva ispitna uzorka, istog materijala, različitih debljina. Na njima su napravljene utore različitih dubina i širina od dijela ramenjače. Tablica 4 prikazuje karakteristike Uzorka 1 i Uzorka 2 koji su se koristili za ispitivanje računalnom radiografijom.

**Tablica 4: Karakteristike referentnih nepravilnosti na ispitnim uzorcima**

<b>Uzorak</b>	<b>Broj utora</b>	<b>Širina utora, Mm</b>	<b>Dubina utora, mm</b>	<b>Materijal</b>
Uzorak 1	3	2/3/4	1,6	Aluminij
Uzorak 2	3	2/3/4	0,8	Aluminij



Slika 18: Utori ramenjača

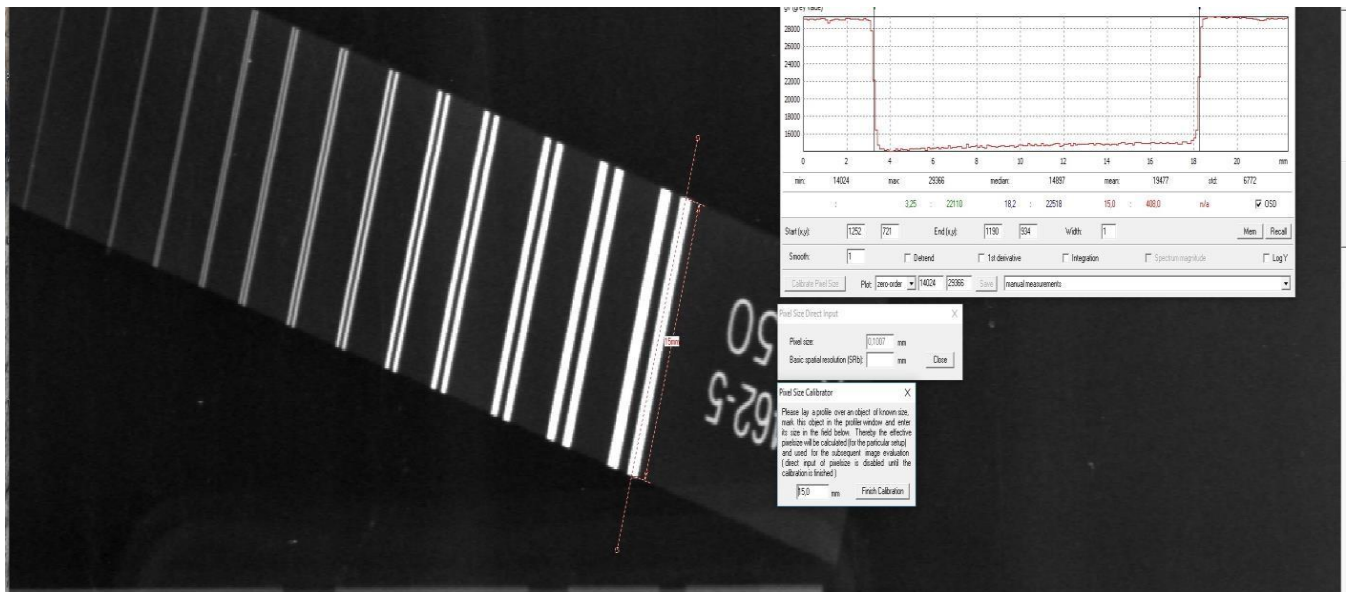
### 5.5. GP slikovna ploča

Nakon skeniranja, slika ispitnih uzoraka se pojavljuje na monitoru. Uočljiva je geometrijska neoštrina dobivenog radiograma, jače je izražena kod GP slikovne ploče u odnosu na Blue ploču, što se najbolje vidi na rubovima utora koji se mjere jer su teže uočljivi. Kako bi se provelo mjerenje, prvo je bilo potrebno provesti kalibraciju. Kalibracija je napravljena na dva načina:

- pomoću dvostrukih žičanih indikatora
- veličinom piksela

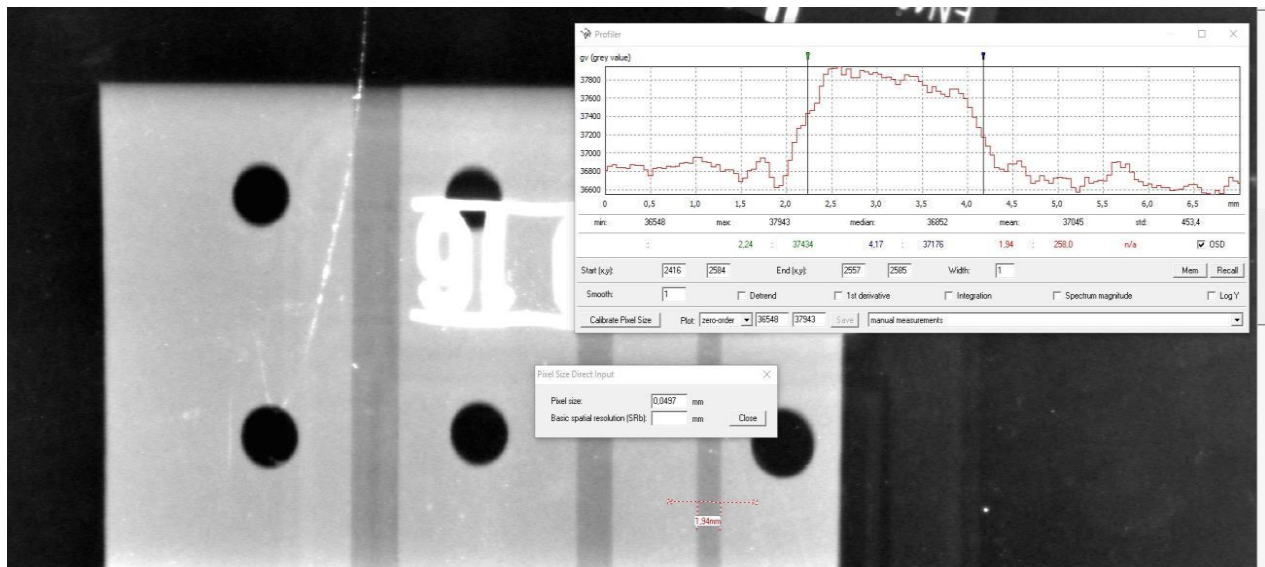
Na donjoj slici se vidi na koji način je provedena kalibracija pomoću žičanog indikatora. U programskom paketu ISee! je najbolje vidljiv zadnji žičani par te se on uzeo kao referentni. Izmjerila se duljina žičanog para i na temelju toga je programski paket ISee! kalibrirao radiogram. Duljina žičanog para iznosila je 15 mm te pri rezoluciji od 50  $\mu\text{m}$  daje veličinu piksela od 0,0497 mm.



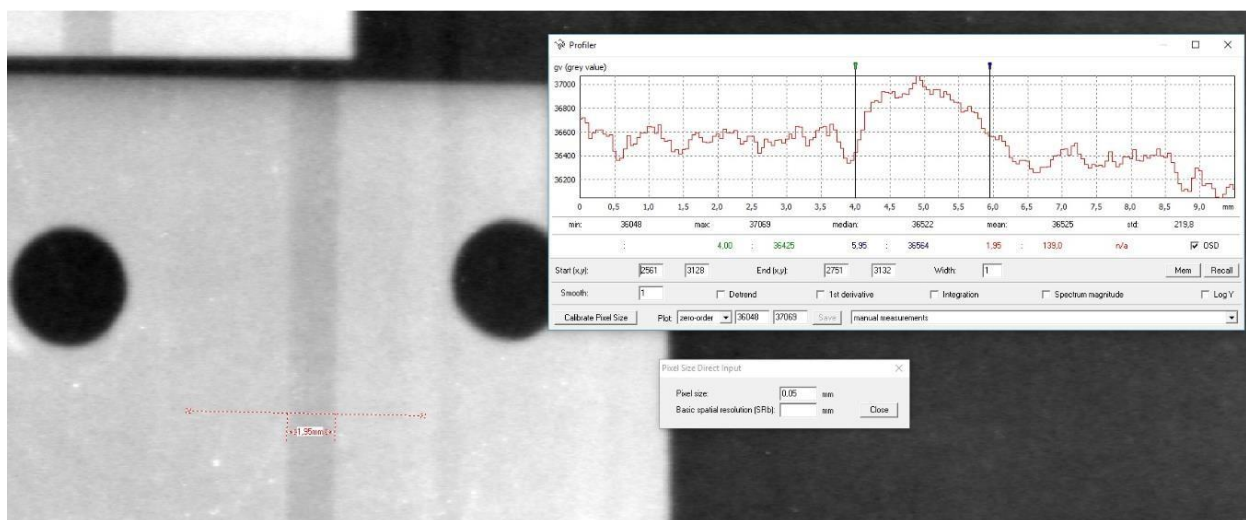


Slika 18: Kalibracija veličine piksela temeljem referentne duljine žice

Sljedeći korak je mjerenje širine utora na uzorcima, odnosno određivanje procijenjenih kvantitativnih vrijednosti,  $\hat{a}$ . Na tri različita mjesta su se provela po tri mjerenja, odnosno 9 mjerenja za svaki uzorak. Na temelju mjerenja mogu se vidjeti odstupanja od stvarnih kvantitativnih vrijednosti,  $a$ , te će se kasnije u radu prikazati odnos  $\hat{a}$  i  $a$ .



**Slika 19: GP radiogram-mjerenje širine utora Uzorka 1**



**Slika 20: Mjerenje širine utora na odabranom mjernom mjestu Uzorka 2**

Dijagrami koji se nalaze na posljednjim dvjema slikama predstavljaju stupanj sive boje na slici na označenom mjestu i pomicanjem mjerila lijevo i desno dobiva se udaljenost koja je označena na slici.

U tablicama su prikazane vrijednosti mjerenja dobivene na GP slikovnoj ploči.

Tablica 5: a) 50  $\mu\text{m}$ , kalibracija za 15mm,b) 50  $\mu\text{m}$ , piksel 0,05 mm

Uzorak	Mjesto, a)	1.utor, mm	2.utor, mm	3.utor, mm	Mjesto, b)	1.utor, mm	2.utor, mm	3.utor, mm
Uzorak 1	1	3,93	2,93	1,94	1	3,90	2,9	1,95
	2	3,83	2,88	1,94	2	3,80	2,85	1,90
	3	3,88	2,83	1,94	3	3,90	2,85	2,00
Uzorak 2	1	3,83	3,03	1,99	1	3,95	3,10	2,00
	2	3,83	3,13	1,89	2	3,90	3,05	1,85
	3	3,83	3,03	1,89	3	3,90	3,15	1,95

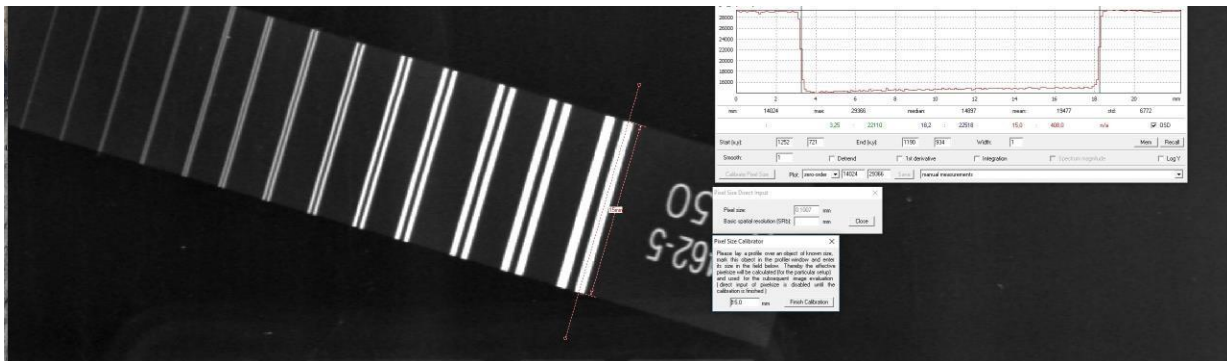
Tablica 6: a) 100  $\mu\text{m}$ , kalibracija za 15mm,b) 100  $\mu\text{m}$ , piksel 0,1 mm

Uzorak	Mjesto, a)	1.utor, mm	2.utor, mm	3.utor, mm	Mjesto, b)	1.utor, mm	2.utor, mm	3.utor, mm
Uzorak 1	1	3,88	2,89	1,89	1	3,80	2,90	1,90
	2	3,88	2,89	1,89	2	3,80	2,90	2,00
	3	3,88	2,79	1,89	3	3,90	2,80	2,00
Uzorak 2	1	3,88	2,89	1,89	1	3,90	3,10	1,90
	2	3,88	3,09	1,99	2	3,90	3,10	2,00
	3	3,78	2,99	1,79	3	3,80	3,20	1,90

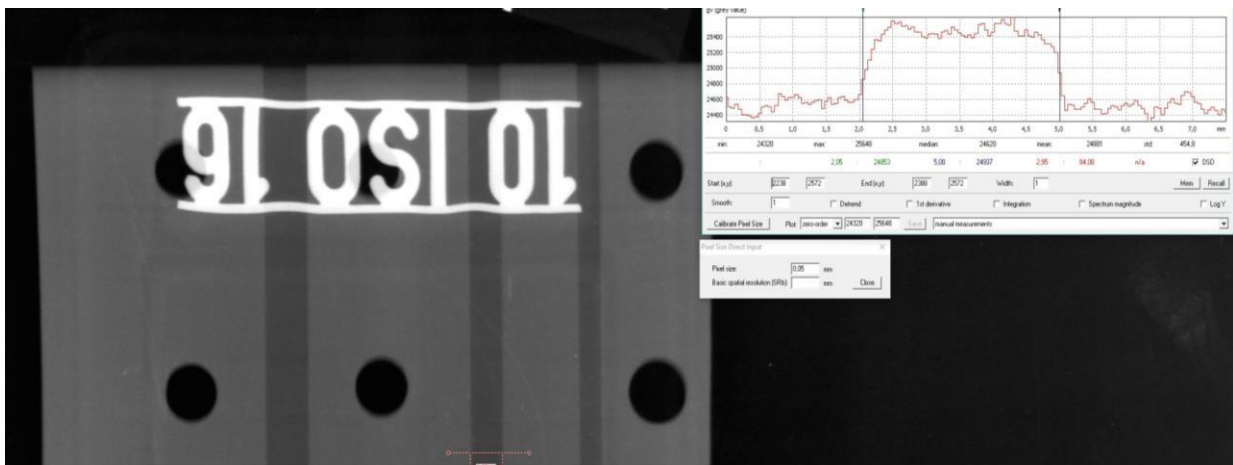
## 5.6. Blue slikovna ploča

Drugo snimanje je provedeno s Blue slikovnom pločom. Žičani indikator je jednako vidljiv na obje slikovne ploče, a rezultati mjerenja su bolji upotrebom spomenute slikovne ploče. Na radiogramu se lakše određuju rezultati mjerenja naspram GP ploče jer je geometrijska oštrina

jače izražena. Opet se vršila kalibracija, mjerenjem duljine žičanog para te drugi put unosom piksela, bilo 0,05 ili 0,1 mm. Postupak mjerenja je isti kao i sa GP slikovnom pločom.



Slika 21: Kalibracija piksela pomoću referentne duljine žičanih parova na Blue ploči



Slika 22: Mjerenje širine utora na Blue ploči Uzorka 1

Rezultati dobiveni na Blue ploči su bliži stvarnim kvantitativnim vrijednostima u odnosu na rezultate dobivene na GP ploči, što se najbolje vidi u donjim tablicama.

Stvarne širine utora:

- 2 mm;
- 3 mm;
- 4 mm.

Tablica 7: a) 50  $\mu\text{m}$ , kalibracija za 15 mm,b) 50  $\mu\text{m}$ , piksel 0,05 mm

Uzorak	Mjesto, a)	1.utor, mm	2.utor, mm	3.utor, mm	Mjesto, b)	1.utor, mm	2.utor, mm	3.utor, mm
Uzorak 1	1	4,01	3,01	2,01	1	3,95	2,95	2,00
	2	3,96	2,96	2,01	2	3,95	2,95	2,00
	3	4,01	2,96	2,01	3	3,95	2,95	2,05
Uzorak 2	1	4,01	3,16	2,00	1	4,00	3,1	2,00
	2	3,96	3,16	1,95	2	4,00	3,05	2,05
	3	4,01	3,11	2,00	3	4,05	3,10	1,95

Tablica 8: a) 100  $\mu\text{m}$ , kalibracija za 15 mm,b) 100  $\mu\text{m}$ , piksel 0,1 mm

Uzorak	Mjesto, a)	1.utor, mm	2.utor, mm	3.utor, mm	Mjesto, b)	1.utor, mm	2.utor, mm	3.utor, mm
Uzorak 1	1	4,03	2,92	2,11	1	3,90	3,10	2,00
	2	4,03	3,02	2,01	2	4,00	3,00	2,00
	3	4,03	3,02	2,11	3	4,00	3,10	2,10
Uzorak 2	1	3,93	3,12	2,01	1	4,00	3,20	2,10
	2	4,03	3,12	2,01	2	4,00	3,10	2,00
	3	4,03	3,12	2,12	3	4,10	3,10	2,10

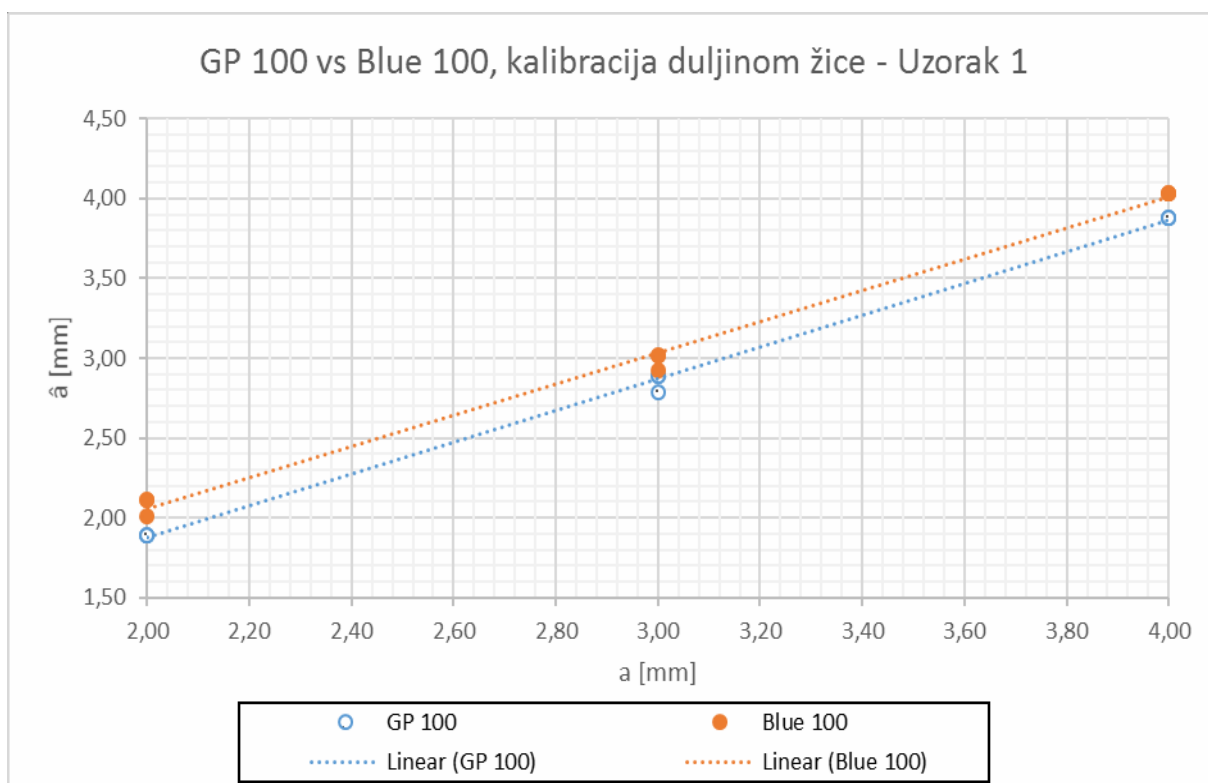
Na temelju svih dobivenih rezultata potrebno je bilo odrediti odnos  $a$  i  $\hat{a}$ .

### 5.7. Odnos $a$ i $\hat{a}$

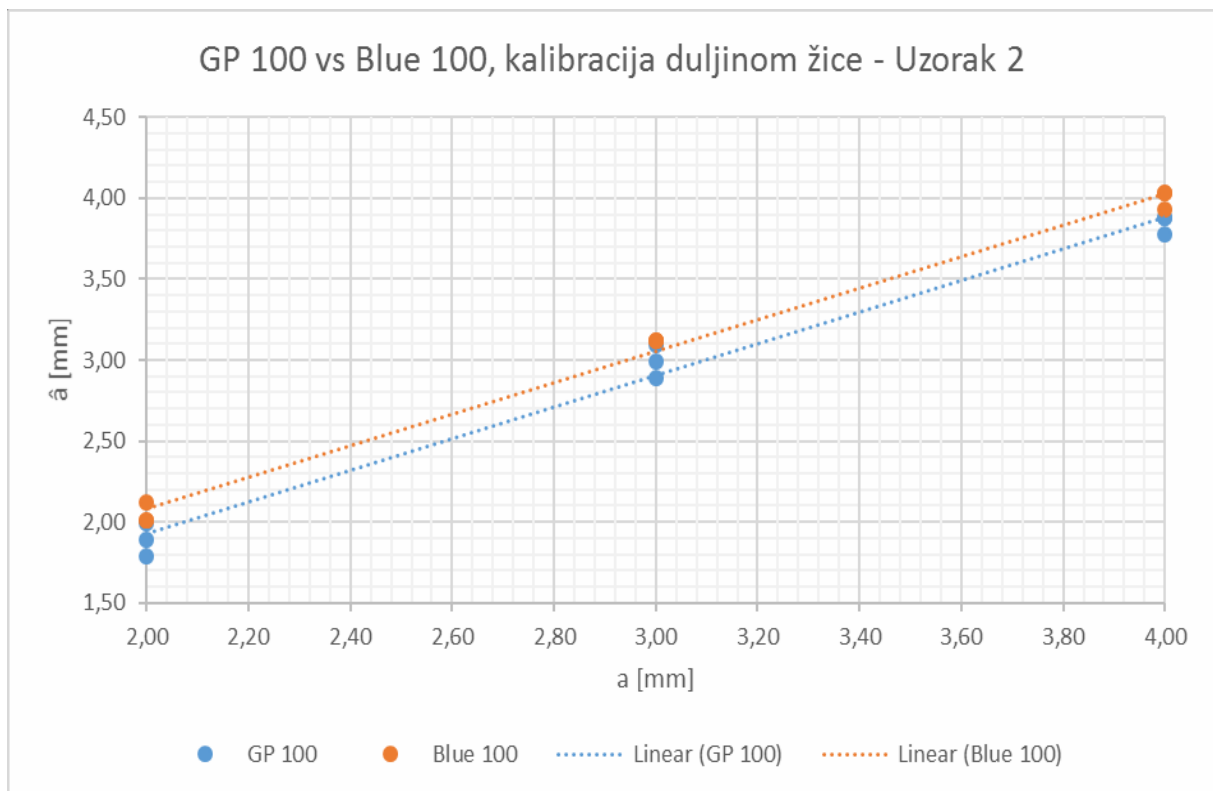
Stvarne kvantitativne značajke referentnih nepravilnosti redom iznose:

- 4 mm,
- 3 mm,
- 2 mm.

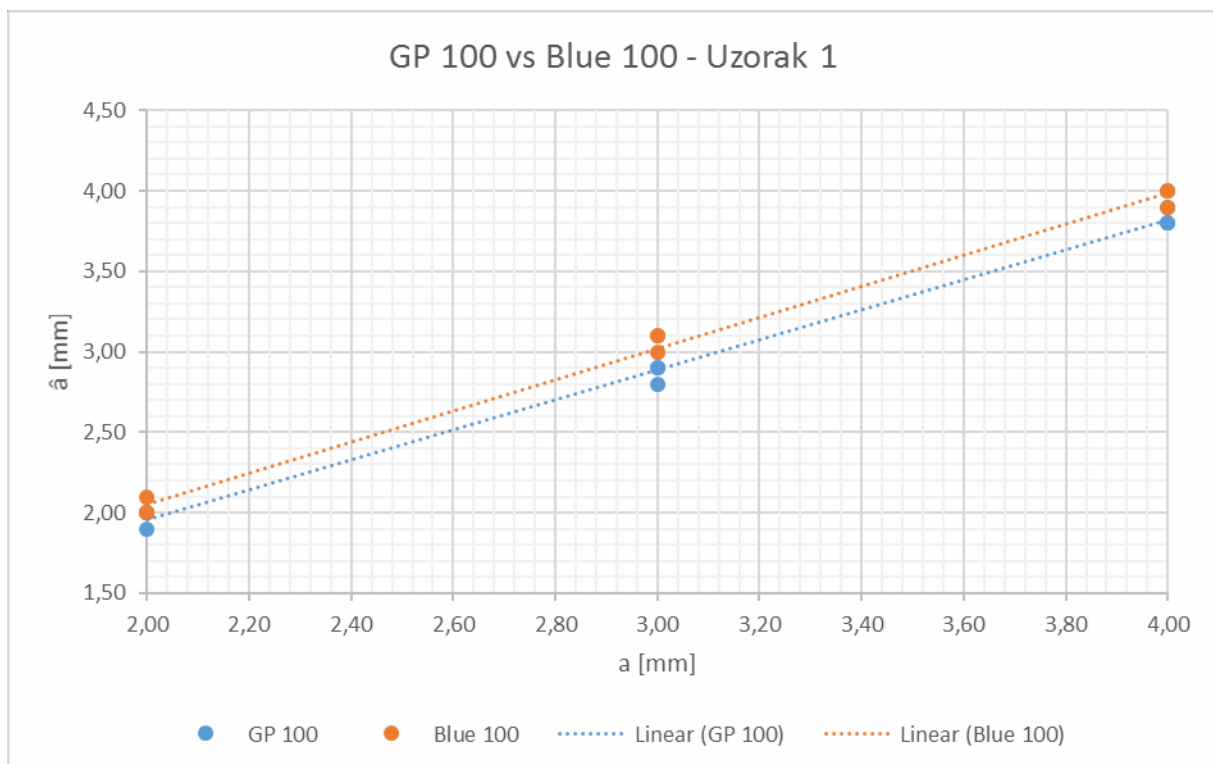
Na dijagramima će biti prikazan odnos  $a$  i  $\hat{a}$  te će rezultati varirati ovisno o izboru ploče, kolika je veličina piksela te o dubini utora na Uzorku 1 i Uzorku 2, obzirom da imaju različite dubine. Pravci na dijagramima prikazuju koliko je odstupanje od stvarne vrijednosti mjerenja. Svaka širina pukotine je mjerena 3 puta, a ako dolazi do ponavljanja istog rezultata, na dijagramu će biti manje iscrtanih i vidljivih točaka.



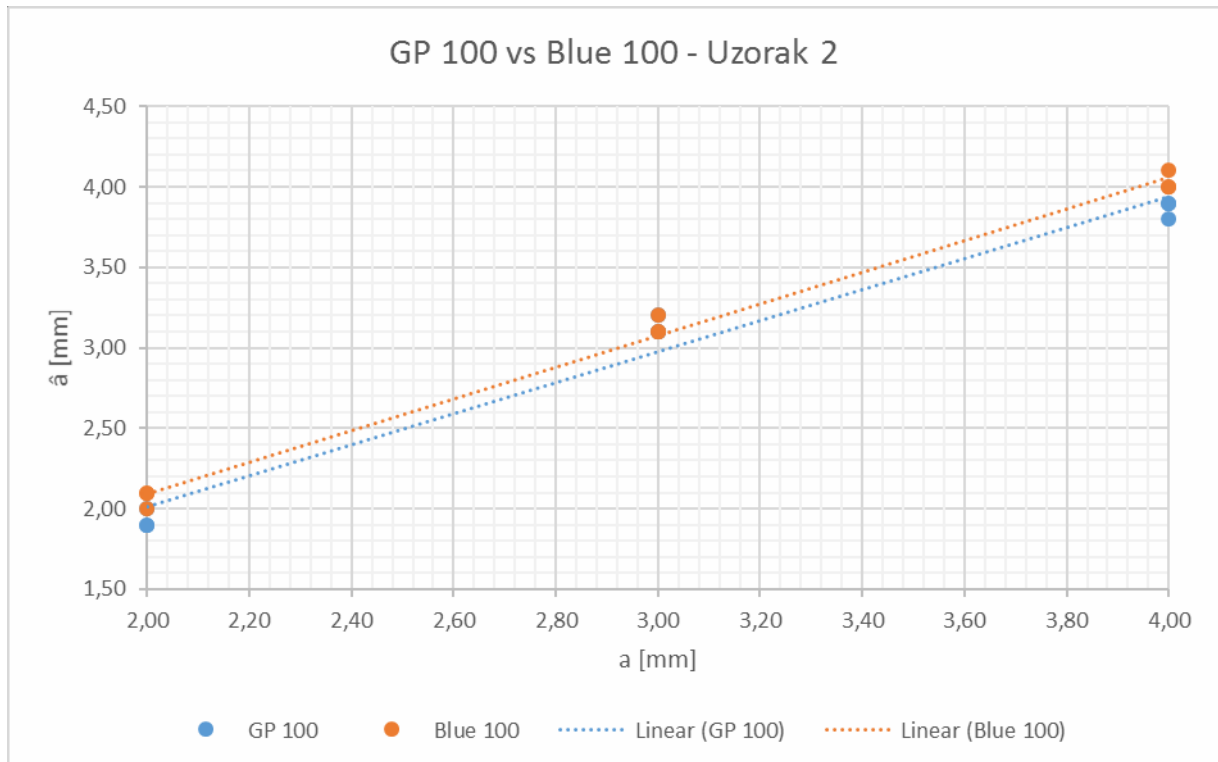
Slika 23: Odnos  $a$  i  $\hat{a}$ , na pločama GP 100 i Blue 100, kalibracijom duljine žice, Uzorak 1



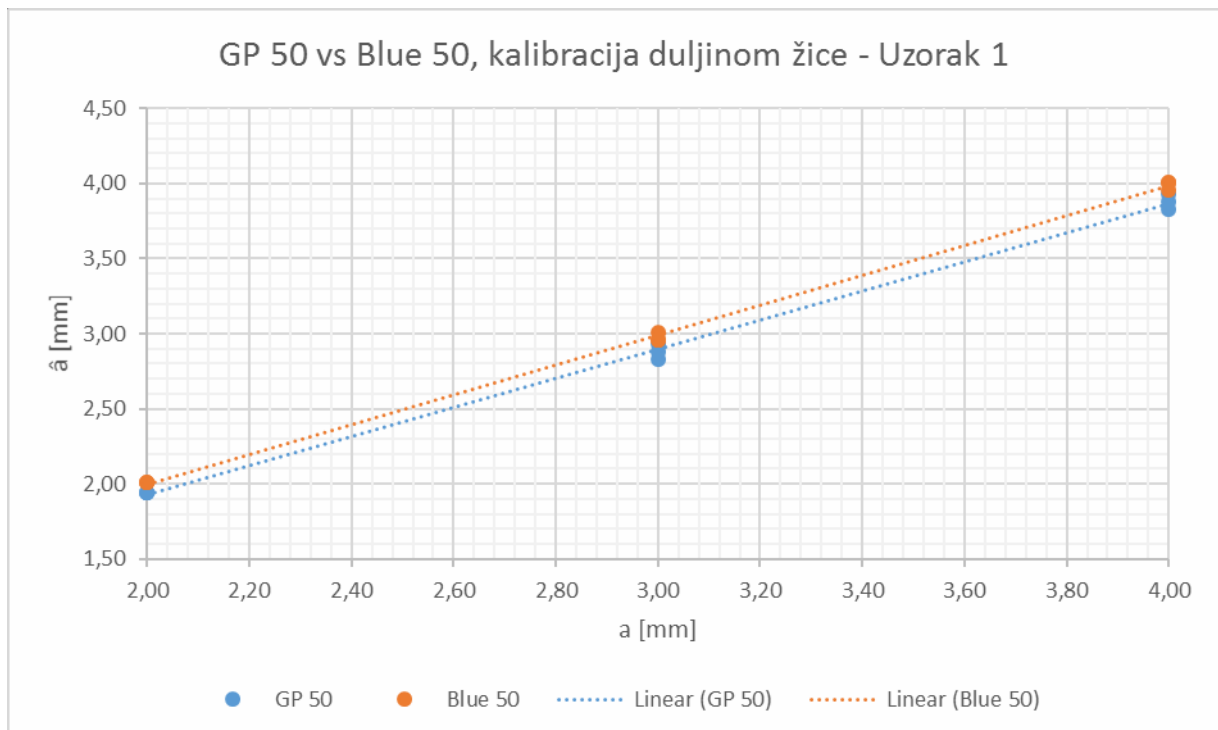
Slika 24: Odnos  $a$  i  $\hat{a}$ , na pločama GP 100 i Blue 100, kalibracijom duljine žice, Uzorak 2



Slika 25: Odnos  $a$  i  $\hat{a}$ , na pločama GP 100 i Blue 100, Uzorak 1

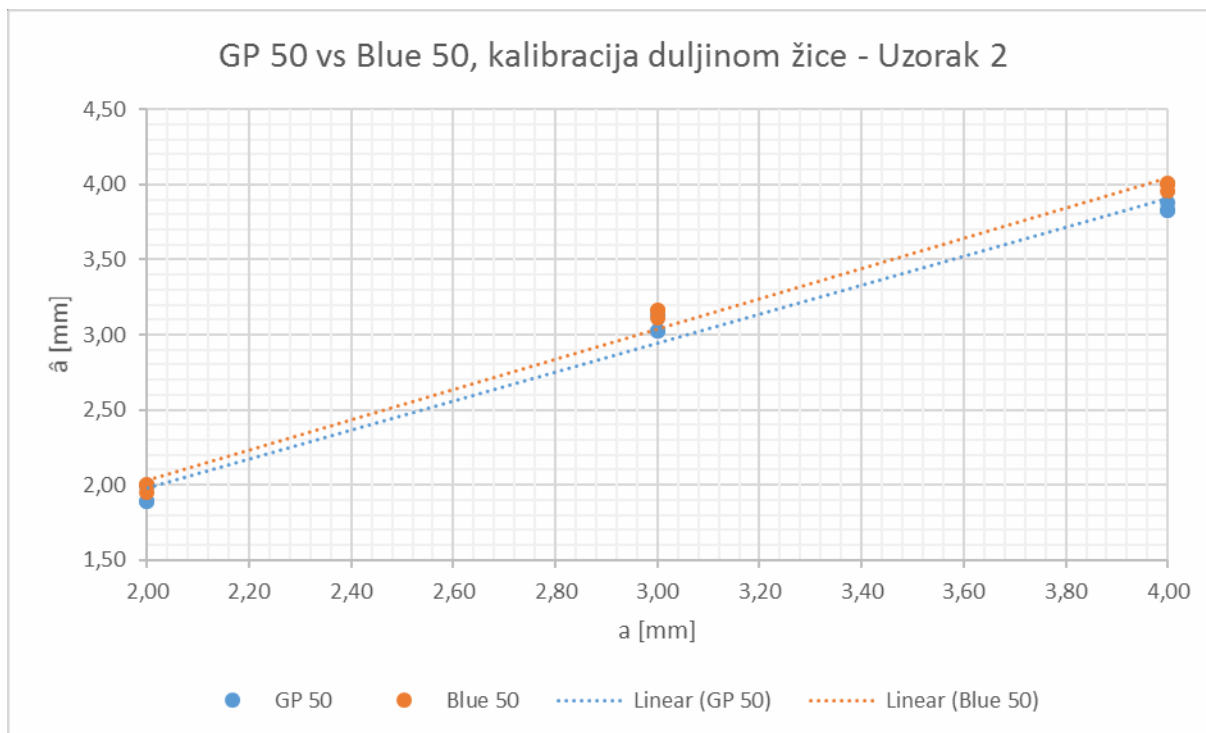


Slika 26: Odnos  $a$  i  $\hat{a}$ , na pločama GP 100 i Blue 100, Uzorak 2

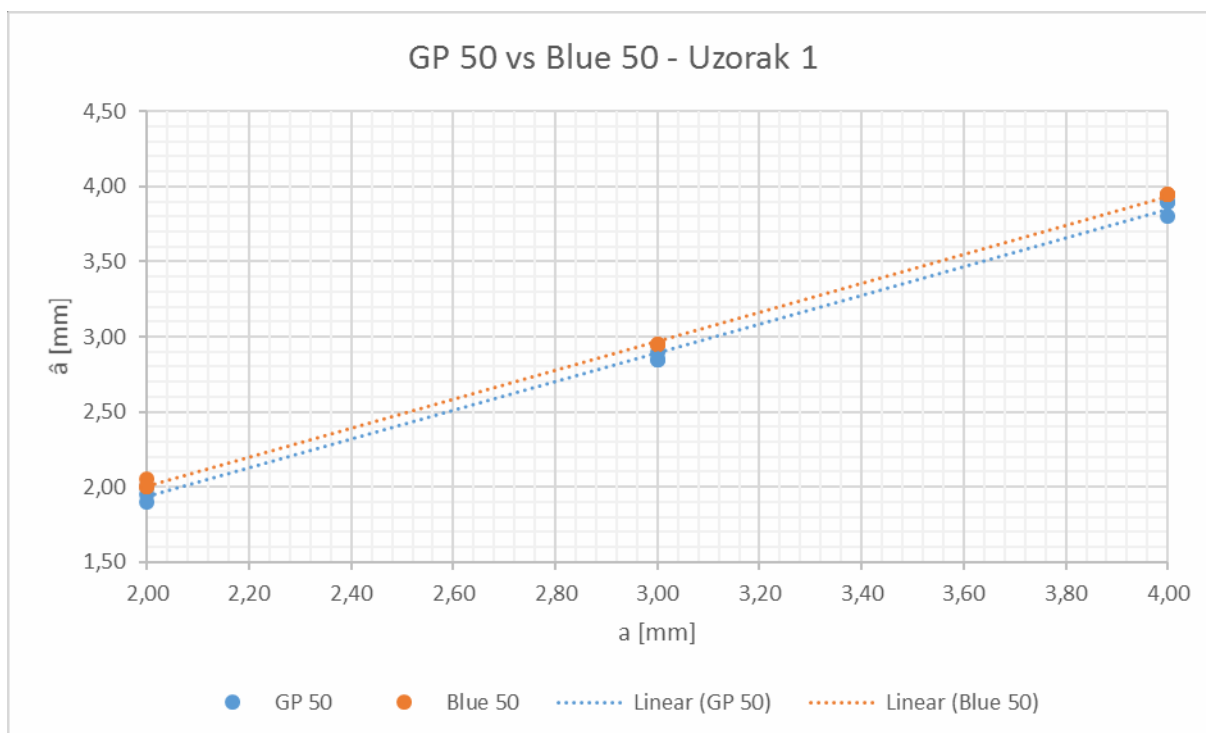


Slika 27: Odnos  $a$  i  $\hat{a}$ , na pločama GP 50 i Blue 50, kalibracijom duljine žice, Uzorak 1

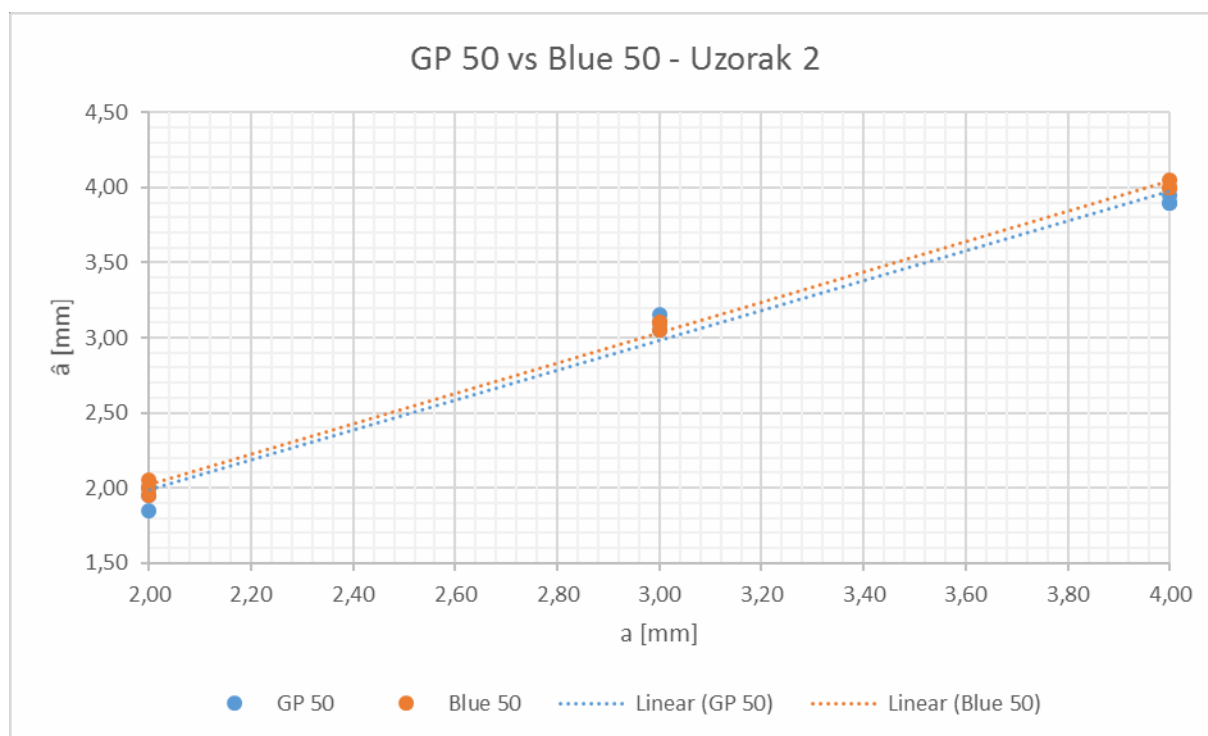




Slika 28: Odnos  $a$  i  $\hat{a}$ , na pločama GP 50 i Blue 50, kalibracijom duljine žice, Uzorak 2



Slika 29: Odnos  $a$  i  $\hat{a}$ , na pločama GP 50 i Blue 50, Uzorak 1



**Slika 28: Odnos  $a$  i  $\hat{a}$ , na pločama GP 50 i Blue 50, Uzorak 2**

Iz dobivenih rezultata se vidi kako oni variraju ovisno o dubini utora, vrsti slikovne ploče te veličini piksela. Ako se usporedba bazira na odabiru slikovne ploče, vidljivo je da je manja varijabilnost rezultata upotrebom Blue slikovne ploče jer dolazi do poklapanja vrijednosti  $a$  i  $\hat{a}$  te je manji broj točaka vidljiv na dijagramu. Lakše su se određivali rezultati mjerenja jer su rubovi bili vidljiviji, geometrijska neoštrina nije izražena kao kod GP slikovne ploče. Detektabilnost oštećenja je bolja upotrebom Blue slikovne ploče. Osjetljivost obiju ploča nema značajne razlike te se može zaključiti da je jednaka u oba slučaja. Što se tiče dubine uzorka, odnosno dubine Uzorka 1 koja je iznosila 1,6 mm te dubine Uzorka 2 od 0,9 mm, vidi se kako i ona utječe na varijabilnost rezultata. Bolji su rezultati dobiveni kod Uzorka 1. Kontrast uzorka se postiže većom razlikom u dubini, te je on bolji u slučaju Uzorka 1 jer je dobiven veći kontrast. S druge strane, ukoliko za istu dubinu uzorka uzmemo različite veličine, veći kontrast će se dobiti pri većem broju piksela jer će se ona lakše apsorbirati u materijal. Kod pojma piksela govori se o pojmu razlučivosti odnosno mogućnosti razdvajanja sitnih detalja kojom se opisuje kakvoća slike. Veća razlučivost omogućuje veće povećanje slike s tim da se oštrina slike ne narušava.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je analizirana pouzdanost računalne radiografije te se temeljem smjernica i zahtjeva priručnika MIL-HDBK-1823A proveo postupak procjene sposobnosti sustava za računalnu radiografiju na dva uzorka. Variranjem dubine uzorka, veličine piksela i odabirom dvije različite vrste slikovnih ploča u rezultatima ispitivanja su vidljive razlike i na koji način se određenom varijacijom utjecajnih čimbenika može doprinijeti održavanju pouzdanosti ispitivanja. Pristup problemu je bio sljedeći:

- na istom radiogramu se veličina piksela određivala pomoću referentnog uzorka, odnosno žičanog para koji je bio najbolje vidljiv na radiogramu kao i uzorak;
- dijagramima odnosa  $a$  i  $\hat{a}$  analizirani su ispitni rezultati te komentirani utjecajni čimbenici koji doprinose varijabilnosti rezultata.

Iz provedene analize dobiveni su sljedeći zaključci:

- veća razlučivost, odnosno veličina piksela daje bolje rezultate te je slika radiograma kvalitetnija i jasnija. Većim brojem točkica se dobije veći raspon boja te je mjerenje jednostavnije i lakše se detektiraju nepravilnosti;
- promjenom debljine ispitnog uzorka različita je apsorpcija energije zračenja. Kod debljeg uzorka se energija zračenja se lakše apsorbira u materijal i slikovni prikaz je precizniji;
- utjecajne čimbenike je lakše razabrati kreiranjem dijagrama odnosa  $a$  i  $\hat{a}$ ;
- pravilnim izborom slikovne ploče, odnosno pri odabiru slikovne ploče treba se obratiti pozornost na njezinu osjetljivost;

U cilju održavanja pouzdanosti potrebno je provesti veći broj ispitivanja kako bi se spriječila mogućnost nastanka pogreške. Na temelju dobivene analize, broj mjerenja nije bio dovoljan za kreiranje krivulje vjerojatnosti detekcije (*POD*) te bi se zato trebalo provesti dodatno ispitivanje s većim brojem mjerenja. Unatoč tome, dobiveni rezultati ukazuju na utjecaj odabranih čimbenika na ispitne rezultate te se stoga pri budućim istraživanjima mogu ukazivati na ograničenja ispitivanja.

## 7. LITERATURA

- [1] Kinsella, Timothy E., and G. Richard Kahley. *Filmless Radiography for Aerospace NDT*. LIBERTY TECHNOLOGIES CONSHOHOCKEN PA, 1996.  
URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a333310.pdf>
- [2] Mango, S. A. "Radiographic Inspection of Aircraft Components." *QUALITY DIGEST*, 2006.  
URL: [http://www.qualitydigest.com/june06/articles/05\\_article.shtml](http://www.qualitydigest.com/june06/articles/05_article.shtml)
- [3] Deprins, Eric. "Computed radiography in NDT applications." *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2004.  
URL: [http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/radiography/367\\_deprins.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/radiography/367_deprins.pdf)
- [4] ATX, NDT, Pearling and Specialized Inspection Systems  
URL: [http://atxndt.com.au/ndt/item/173-vmi-5100ms-cr-scanner#.WKuHRDs1\\_IU](http://atxndt.com.au/ndt/item/173-vmi-5100ms-cr-scanner#.WKuHRDs1_IU)  
(20.02.2017)
- [5] COMPUTED RADIOGRAPHY (CR)  
URL: [https://www.youtube.com/watch?v=UN4vIGXOQ\\_o](https://www.youtube.com/watch?v=UN4vIGXOQ_o) (05.01.2017.)
- [6] Boeing: Wing cracks found on new Dreamliner jets:  
URL: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2576158/Boeing-hit-headaches-Dreamliner-jets-wing-cracks-discovered-new-fleet.html> ( 22.02.2017.)
- [7] Movafeghi, Amir, et al., *Computed Radiography Systems for Radiographic Testing of Commercial Aircrafts*, 2015, Belgium  
URL: [http://www.ndt.net/events/DIR2015/app/content/Paper/105\\_Movafeghi.pdf](http://www.ndt.net/events/DIR2015/app/content/Paper/105_Movafeghi.pdf)

## **8. PRILOZI**

### **I. CD-R disc**