

Mjerenje debljine stijenke računalnom radiografijom

Mijatović, Mirjam

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:564804>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mirjam Mijatović

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Morana Mihaljević, dipl. ing.

Student:

Mirjam Mijatović

Zagreb, 2020

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se svojoj mentorici docentici Morani Mihaljević na stručnoj pomoći i podršci tijekom izrade ovog rada te svim djelatnicima Katedre za nerazorna ispitivanja za izdvojeno vrijeme i pomoć pri pisanju ovog rada.

Mirjam Mijatović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mirjam Mijatović** Mat. br.: 0035209789

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerenje debljine stijenke računalnom radiografijom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wall thickness measurement using Computed Radiography**

Opis zadatka:

Mnoga industrijska postrojenja podložna su utjecajima koji doprinose degradaciji materijala uslijed eksploatacijskih uvjeta i opterećenja (korozija, erozija). Nerazorne metode ispitivanja često su korištene metode za određivanje preostale debljine stijenke. Jedna od primjenjivanih nerazornih metoda u svrhu određivanja debljine stijenke je računalna radiografija pri čemu postoji više različitih tehnika, odnosno principa određivanja debljine stijenke.

U okviru rada potrebno je razmotriti mogućnosti i ograničenja primjene računalne radiografije za određivanje debljine planparalelne geometrije stijenke ispitivane komponente temeljem kontrasta, odnosno temeljem intenziteta piksela digitalnog radiograma.

Na pripremljenim uzorcima provesti odgovarajuće radiografsko snimanje te obradu i analizu dobivenih digitalnih slikovnih zapisa u svrhu procjene debljine stijenke. Povesti brigu o osiguranju sljedivosti tako dobivenih rezultata mjerenja. Usporedno prikazati dobivene rezultate za odabrani raspon debljina te ih komentirati obzirom na utjecaje:

- geometrije radiografskog snimanja
- parametara snimanja i skeniranja slikovnih ploča

Zadatak zadan:
15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Morana Mihaljević

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY	V
1. UVOD.....	1
2. RAČUNALNA RADIOGRAFIJA	2
2.1. Povijest	2
2.2. Princip rada	4
2.3. Slikovne ploče.....	5
2.5. Uređaj za skeniranje slikovnih ploča	6
2.5. Stupanj zacrnjenja	7
2.6. CR hardverski sustav	8
2.7. Mogućnosti i ograničenja primjene.....	9
2.7.1. Prednosti	9
2.7.2. Nedostaci.....	10
2.7.3. Primjena.....	11
3. EKSPERIMENTALNI DIO	12
3.1. Stepeničasti etalon.....	12
3.2. Procjena debljine prvog etalona na temelju intenziteta piksela	14
3.2.1. Mjerenje intenziteta piksela stepenica etalona	14
3.2.2. Procjena debljine prve, treće i pete stepenice etalona	16
3.3. Procjena debljine drugog etalona na temelju intenziteta piksela	18
3.3.1. Mjerenje intenziteta piksela stepenica etalona	18
3.3.2. Procjena debljine šeste, osme i desete stepenice etalona	20
4. ZAKLJUČAK.....	22
POPIS KRATICA	23
LITERATURA.....	24
PRILOZI.....	26

POPIS SLIKA

Slika 1.	Slučajno otkriće X-zraka [4]	2
Slika 2.	Maria i Pierre Curie [5]	2
Slika 3.	Proces čitanja CR slikovne ploče [2]	4
Slika 4.	Struktura slikovne ploče	5
Slika 5.	VMI5100MS skener [10]	6
Slika 6.	Stepeničasti etaloni	12
Slika 7.	Mjerenje intenziteta piksela na prvoj stepenici etalona	14
Slika 8.	Mjerenje intenziteta piksela na drugoj stepenici etalona	14
Slika 9.	Mjerenje intenziteta piksela na trećoj stepenici etalona	15
Slika 10.	Mjerenje intenziteta piksela na četvrtoj stepenici etalona	15
Slika 11.	Mjerenje intenziteta piksela na petoj stepenici etalona	15
Slika 12.	Ovisnost intenziteta piksela o referentnoj debljini materijala prvog etalona	16
Slika 13.	Usporedni prikaz referentne i procijenjene debljine prvog etalona	17
Slika 14.	Mjerenje intenziteta piksela na šestoj stepenici etalona	18
Slika 15.	Mjerenje intenziteta piksela na sedmoj stepenici etalona	18
Slika 16.	Mjerenje intenziteta piksela na osmoj stepenici etalona	19
Slika 17.	Mjerenje intenziteta piksela na devetoj stepenici etalona	19
Slika 18.	Mjerenje intenziteta piksela na desetoj stepenici etalona	19
Slika 19.	Ovisnost intenziteta piksela o referentnoj debljini materijala drugog etalona	20
Slika 20.	Usporedni prikaz referentne i procijenjene debljine prvog etalona	21

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri snimanja stepeničastog etalona.....	12
Tablica 2. Referentne vrijednosti debljina etalona.....	13
Tablica 3. Intenziteti piksela očitani u programu ISee! za prvi etalon.....	16
Tablica 4. Približno određene debljine stepenica etalona pomoću jednadžbe (3)	17
Tablica 5. Usporedni prikaz referentne i procijenjene debljine prvog etalona	17
Tablica 6. Intenziteti piksela očitani u programu ISee! za drugi etalon.....	20
Tablica 7. Približno određene debljine stepenica etalona pomoću jednadžbe (4)	21
Tablica 8. Usporedni prikaz referentne i procijenjene debljine drugog etalona	21

SAŽETAK

Nerazorne metode ispitivanja vrlo su cijenjene u industriji zbog neoštećivanja materijala prilikom mjerenja. Računalna radiografija, koja je ujedno i tema ovoga rada, je jedna od najstarijih, najvažnijih i najsvestranijih metoda nerazornih ispitivanja koja se često koristi za određivanje debljine stijenke. Tehnika snimanja se odvija pomoću rendgenskih zraka kojima se dobiju kvalitetniji radiogrami ili gama zrakama koje imaju veću prodornost pa se koriste za prozračivanje debljih uzoraka. Proces nastajanja slike se od klasične radiografije razlikuje samo u pohrani latentne slike u fosfornom sloju osjetljivom na zračenje, koji se pomoću laserske simulacije mijenja u svjetlost te se zapis pretvara u digitalnu snimku.

U ovom radu bit će prikazane mogućnosti i ograničenja primjene računalne radiografije za određivanje debljine planparalelne geometrije stijenke ispitivane komponente temeljem kontrasta, tj. temeljem intenziteta piksela digitalnog radiograma.

Na dva uzorka stepenica provedeno je radiografsko snimanje te je procijenjena debljina stijenke obradom i analizom dobivenih slikovnih zapisa.

Ključne riječi: računalna radiografija; slikovna ploča; fosforna ploča

SUMMARY

Non – destructive testing methods are highly valued in the industry for non – damaging materials during measurements. Computed radiography, which is also the topic of this paper, is one of the oldest, most important and most versatile methods of non – destructive testing often used to determine wall thickness. Scanning technique is using X - rays to obtain radiograms with better quality or γ - rays that have higher penetration and are used for thicker samples ventilation. The process of image formation differs from classical radiography only in the storage of the latent image in a phosphor layer sensitive to radiation, which is converted into light by laser simulation and the record is converted into a digital image.

In this work the possibilities and limitations of the application of computed radiography will be presented to determine the plane – parallel wall geometry of the examined component based on the contrast, ie. based on the pixel intensity of the digital radiogram.

Radiographic imaging was performed on two samples of stairs and the wall thickness was estimated by processing and analyzing the obtained image records.

Key words: computed radiography; the imaging plate; phosphor imaging plate

1. UVOD

Radiografija je jedna od najstarijih, najvažnijih i najsvestranijih metoda nerazornih ispitivanja (eng. Non - Destructive Testing - NDT), koja se koristi u modernoj industriji. Industrijska radiografija je tehnika snimanja elektromagnetskim zračenjem pomoću rendgenskih zraka (X zraka) ili gama zraka (γ zraka) te ostalih oblika radijacije koji ne oštećuju uzorak. Razlika između različitih oblika elektromagnetske energije povezana je s valnom duljinom, koja je najkraća kod X i γ zraka te omogućuje prodiranje kroz razne materijale poput ugljičnog čelika i drugih metala čime se stvara stvarna slika, tj. radiogram kojim se registrira zračenje. Koristi se u različitim fazama proizvodnje, izrade i programa preventivnog održavanja za početno otkrivanje oštećenja, praćenje korozije i sukladnost proizvoda [1,3].

Rendgensko zračenje nastaje kada ubrzani elektron preda dio svoje energije pri susretu s jezgrom atoma materijala, gdje je došlo do zaustavljanja ubranog elektrona. Gama zračenje je elektromagnetsko zračenje visoke energije koje nastaje u atomskoj jezgri te ima valne duljine manje, a frekvencije veće od onih kod rendgenskog zračenja. Količina zračenja ovisi o vrsti, gustoći i debljini materijala te unutrašnjim nepravilnostima koje se ne vide na površini. Na klasičnom radiografskom filmu to je vidljivo kao razlika u zacrnjenju. Zbog toga se unutrašnje greške mogu otkrivati s pomoću rendgenskog ili gama zračenja.

Konvencionalna radiografija je pomalo zastarjela metoda te se u sve većoj mjeri zamjenjuje računalnom radiografijom (eng. Computed Radiography - CR) koja se izvodi u dva koraka. Prvo se formira latentna slika na fosfornoj ploči, zatim se ta slika pročita (skenira) i pretvori u digitalnu sliku [2].

2. RAČUNALNA RADIOGRAFIJA

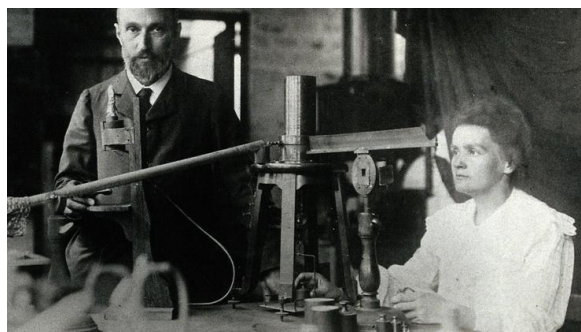
2.1. Povijest

Fizičar Wilhelm Röntgen bavio se istraživanjem osebujnog uređaja, Crookesove vakuumske cijevi (eng. Crookes Tube), koja je davala neobjašnjiv žućkasti sjaj te postala misterija i zbunjivala znanstvenike toga doba [4]. Proučavajući taj uređaj Röntgen je 1895. godine otkrio rendgenske zrake i napravio veliki napredak u medicini kada je snimio ruku svoje žene te otkrio način na koji se može vidjeti unutrašnjost ljudskog tijela, prikazano na slici 1.



Slika 1. Slučajno otkriće X-zraka [4]

Antoine Henri Becquerel, istražujući rad Wilhelma Röntgena 1896. godine, otkrio je prirodnu radioaktivnost koju su nastavili istraživati Maria Curie-Skłodowska i Pierre Curie, prikazani na slici 2, te su 1898. godine otkrili gama zrake.



Slika 2. Maria i Pierre Curie [5]

Rendgenske zrake daju kvalitetnije radiograme, a gama zrake imaju veću prodornost pa se koriste za prozračivanje debljih uzoraka, npr. za čelike deblje od 20 mm.

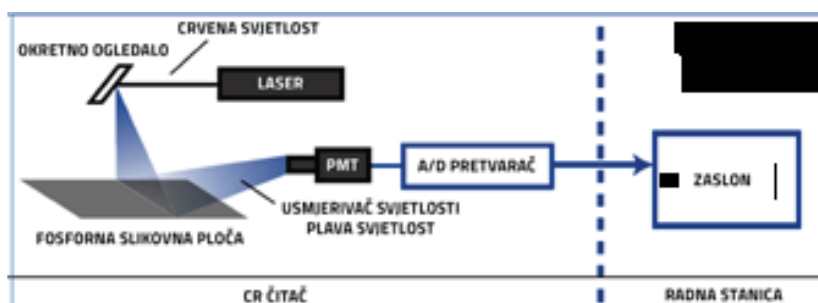
David Krueger je 1977. godine prvi puta opisao digitalnu supstrakcijsku angiografiju, invazivna dijagnostička pretraga prilikom koje se pomoću rendgenskog zračenja i kontrastnog sredstva posebnom tehnikom vrši snimanje krvnih žila. Fujifilm Medical Systems je 1980. godine uveo računalnu radiografiju u kliničku upotrebu kao prvi sustav digitalnog snimanja, koja je u početku bila ograničena na nekoliko odabranih veterinarskih fakulteta i specijalnih privatnih veterinarskih praksi zbog visokih troškova. Razvojem tehnologije, veterinarske prakse su počele mijenjati konvencionalne sustave filmskog ekrana s CR [6].

2.2. Princip rada

Računalna radiografija (CR), kako je definirano u ASTM E1316 (foto-stimulirana luminiscencija), je indirektna tehnologija digitalnog snimanja, što znači da se koriste ploče za snimanje slike prije nego što se slika prenese u računalo [1].

Slikovna ploča kada je izložena rendgenskim zrakama pohranjuje zapis u obliku intenziteta svjetlosti. Nakon ekspozicije slika je zarobljena u fosfornom sloju čime se stvara latentna slika.

Latentna slika čita se skeniranjem ploče laserskim svjetlom te se elektroni vraćaju u svoje prvobitno stanje oslobađajući plavu svjetlost. Zatim fotomultiplikatorska cijev (eng. Photomultiplier Tubes - PMT) pretvara slabu vidljivu svjetlost u električne signale koji prelaze u digitalne signale pomoću analogno-digitalnog pretvarača (eng. Analog to Digital Converter - ADC). Generirana digitalna rendgenska slika tada se može vidjeti na monitoru računala. Nakon što se očita ploča za obradu slike, izvor svjetla visokog intenziteta je briše i može se odmah ponovno upotrijebiti [9].



Slika 3. Proces čitanja CR slikovne ploče [2]

2.3. Slikovne ploče

Računalna radiografija može se smatrati digitalnom zamjenom konvencionalnog rendgenskog filma. Slikovne ploče koriste se istim metodama i tehnikama radiografskih pregleda kao film [9].

Kaseta u kojoj nalazi slikovna ploča sastoji se od aluminijskog ili čeličnog okvira s ugljičnim vlaknima koji služe za slabljenje rendgenskih zraka. Kaseta s pločom za snimanje pozicionira se tako da je strana od ugljičnih vlakana okrenuta prema rendgenskoj cijevi. Kada je fosforna ploča izložena ionizirajućem zračenju, fotostimulirajući fosfor pohranjuje latentnu sliku. Fosfori su tvari koje postaju luminiscentne (emitiraju svjetlost) kada su pobuđene ultraljubičastom svjetlošću ili drugim oblicima zračenja [8].

Na slici 4 prikazana je struktura slikovne ploče, potporni sloj od laganog polimera osigurava mehanička svojstva npr. fleksibilnost, a s gornje je strane fosforni sloj debljine (0,1 do 0,3mm) zaštićen zaštitnom prevlakom. Ploče za obradu slike u pravilu se mogu koristiti i do 1000 puta, ali su podložne fizičkom trošenju.

Zaštitni sloj
Fosforni sloj
Reflektirajući sloj (vraća svjetlost koja je prošla kroz fosforni sloj)
Sloj koji otklanja statički elektricitet
Leđa kasete od laganog polimera

Slika 4. Struktura slikovne ploče

2.5. Uređaj za skeniranje slikovnih ploča

Za čitanje slikovnih ploča primjenjuje se čitač koji sadrži fotomultiplikatorsku cijev (PMT) i svu elektroniku koja digitalizira analogni svjetlosni signal. Postoji više različitih verzija čitača slikovnih ploča. Stacionarni čitači automatski uzimaju slikovnu ploču iz zaštitne kasete, a pri mobilnima se slikovna ploča ručno uzima iz kasete i stavlja u čitač. Nakon završenog skeniranja i brisanja latentne slike, slikovna ploča je pripremljena za ponovnu primjenu. Nakon izlaganja ploče zračenju, pohranjena informacija vremenom se prirodno raspada (atomi se vraćaju u osnovno nepobuđeno stanje), stoga dobivamo najbolje rezultate čitanja ploča u roku jednog sata [2].

U ovom se radu primjenjuje VMI5100MS čitač za skeniranje slikovnih ploča, prikazan na slici 5. Ovaj sustav skenera očitava latentnu sliku s rezolucijom od 50 μ m te može skenirati 60 slika u satu. 16 – bitna rezolucija omogućuje 65,536 nijansi sive boje čime se postiže maksimalni kontrast [10].



Slika 5. VMI5100MS skener [10]

Slikovne ploče i industrijski film slični su u tome što je latentna slika pohranjena i nije vidljiva dok se ne obradi. Latentna slika na filmu se otkriva kada je razvijena, a latentna slika na ploči za obradu slike nije vidljiva dok CR skener ili čitač ne očitaju sliku. Nije potrebna kemikalija za stvaranje latentne slike pohranjene na slikovnoj ploči, kao ni zahtjev za višestrukim filmovima i ekspozicijama filma kako bi se zadovoljio širi raspon debljina [6].

2.5. Stupanj zacrnjenja

Slikovnom pločom moguće je prikazati puno veći broj nijansi crne boje, tj. zacrnjenja u odnosu na radiografski film [2].

Zacrnjenje na prozirnomoj sloju poznato je kao količina svjetlosti koju slika propusti, definirano jednačinom (1):

$$D_T = \log(I_0/I_T) \quad (1).$$

Gdje je D_T količina propuštene svjetlosti, I_0 je intenzitet upadne svjetlosti na radiogramu (od iluminatora), a I_T je intenzitet svjetlosti koja se prenosi putem radiograma [11].

Budući da se ova formula odnosi samo na slike koje propuštaju svjetlost, ne može se primijeniti na neprozirnom slikovnom materijalu. U tom se slučaju koristi količina svjetlosti koju slika reflektira, D_R . Definirana je, jednačinom (2), kao logaritam odnosa intenziteta upadne svjetlosti, I_0 , prema intenzitetu reflektirane svjetlosti iz područja slike, I_R [11].

$$D_R = \log(I_0/I_R) \quad (2).$$

Stupanj zacrnjenja mjeri se refleksijskim denzitometrom za svjetlo koju slika reflektira, a transmisivnim denzitometrom mjeri se svjetlo koje slika propusti tijekom zračenja.

Izloženost zračenju radiograma mjeri se potpuno isto kao i kod rendgenskog filma, ali u daljnjem razvoju slike pojavljuju se razlike. Razlika je u tome što se za rendgenski film koriste vrijednosti propuštene svjetlosti iz jednačine (1), a za radiogram se koriste vrijednosti reflektirane svjetlosti iz jednačine (2). Također karakteristične krivulje (poznate kao krivulje H & D) za radiogram imaju kraći raspon količine svjetlosti i kraću ljestvicu izloženosti zračenju zato je moguće da zacrnjenja pri količini reflektirane svjetlosti 2,0 budu toliko crna da je detalj potpuno zaklonjen pa se i dalje upotrebljava rendgenski film u kojem su detalji slike centrirani oko te vrijednosti [11].

2.6. CR hardverski sustav

Sustavi za računalnu radiografiju (CR) uključuju hardver i softver koji služe za: radiografski prikaz te pohranu ili arhiviranje. CR hardverski sustav se sastoji od: izvora zračenja, slikovne ploče, lasera, skenera, monitora, računala, pisača i programa za obradu slike [1].

Održavanje uključuje redovito čišćenje, brisanjem gazom natopljenom etanolom. Ploče se moraju izbrisati nakon svakog ciklusa izloženosti, tj. čitanja kako bi se uklonila zaostala energija unutar fosfora, što može stvoriti slike duhova. Proces laserskog skeniranja deaktivira samo oko 50% uskladištene energije, tako da preostali dio mora biti obrisani prije ponovnog izlaganja ploča. Također ploče bi trebale biti izložene jakoj svjetlosti najmanje jednom tjedno kako bi se uklonila preostala zaostala energija [1].

Nakon što se slika ploče prenese u skener, digitalne se slike elektronički prenose na računalo. Sustav za arhiviranje i komunikaciju slika (eng. Picture Archiving and Communication System - PACS) predstavlja kombinirani hardver i softver koji se koriste za digitalno snimanje. On omogućuje komunikaciju između računala [1].

2.7. Mogućnosti i ograničenja primjene

2.7.1. Prednosti

Prednosti računalne radiografije [7,12]:

- ista ploča može se koristiti i do 1000 puta
- nije potrebna tamna prostorija za razvijanje slike pa su i potrebne manje prostorije za snimanje
- proizvedena slika je digitalna, može se pohraniti i manipulirati elektroničkim putem
- manje doze zračenja
- sustavi su komercijalno dostupni od dobavljača kao što su Kodak, Fuji i Agfa
- niski troškovi potrebni za početnu ugradnju
- mogu se koristiti kasete u više veličina
- manipulacija slikama pomoću softvera, bez ponavljanja snimanja
- prilikom obrade slike ne postoje kiseline, kemikalije ili otpad koji sadrži teške metale zato su sigurniji za okoliš

Računalna radiografija značajno je napredovala što je vidljivo u poboljšanim i ekološki prihvatljivim radiografskim procesima, smanjenoj izloženosti radijaciji, ekonomičnosti s vremenom te poboljšanoj komunikaciji s današnjim digitalnim alatima [1].

Brzina, ušteda troškova, preciznost, točnost, ponovljivost, jednostavnost arhiviranja, pristupačnost te oprema sigurna za daljnju upotrebu učinili se CR neprocjenjivom imovinom za industriju [13].

2.7.2. Nedostaci

Nedostaci računalne radiografije [1,12]:

- slikovna ploča prvo se mora izvaditi iz kasete, zatim se stavlja u čitač što produljuje vrijeme očitavanja i obrade slike
- slikovna ploča se ne može ponovno koristiti prije nego se stara ploča očisti od zaostalih signala
- kratko kašnjenje (oko 1min) za skeniranjem CR ploča
- moderni CR sustavi koriste čitače ploča koji su integrirani u samu rendgensku opremu, ostavljajući male razlike između računalne i digitalne radiografije (DR)
- za postizanje odgovarajuće razlučivosti slike potrebna veća doza zračenja kod ploča koje se koriste u CR u usporedbi s DR detektorima
- otpornost na promjene
- održavanje fosfornih ploča
- nedostatak specifikacija, potrebna je obuka korisnika

S obzirom na ekonomske i okolišne čimbenike, troškovi konvencionalne radiografije mogu se povećati. Primjena CR programa s čvrstim temeljnim praksama, obveza integriteta, kao i solidan program obuke, nadvladat će nedostatke koji ometaju potpuni prijelaz s filmske radiografije na računalnu [1].

2.7.3. Primjena

Nuklearna, kemijska, naftna i proizvodna industrija smatraju ključnim sposobnost preciznog, pravodobnog i sigurnog otkrivanja nepravilnosti. Nemogućnost otkrivanja nepravilnosti može dovesti do pogrešaka koje rezultiraju izgubljenim prihodom ili u najgorem slučaju izgubljenim životima.

NDT industrija koristi CR tehnologiju za utvrđivanje pukotina, korozije i drugih znakova kvarova [13].

Virtual Media Integration (VMI NDT), jedan je od najvećih dobavljača digitalne radiografske opreme za nerazorna ispitivanja u Sjevernoj Americi. Opskrbljuju kupce na tržištima naftne i plinske industrije, nuklearne, vojne, zrakoplovne, automobilske, ljevačke, proizvodne i mnoge druge [10].

U zrakoplovnoj industriji, kao i u ostalim transportnim industrijama, nerazorna ispitivanja mogu napraviti razliku između života i smrti. Dijelovi zrakoplova pregledavaju se prije nego što su ugrađeni u zrakoplov, a zatim se periodično pregledavaju tijekom cijelog života [10].

Koristi se i u vojsci. U razdoblju 2011. – 2012. godine mornaričke snage zrakoplova su u potpunosti prešle s filma na digitalnu radiografiju [10].

Radiografska oprema u petrokemijskoj industriji koja može podnijeti složenost sustava da se otkriju nedostaci u rafinerijskoj opremi [10].

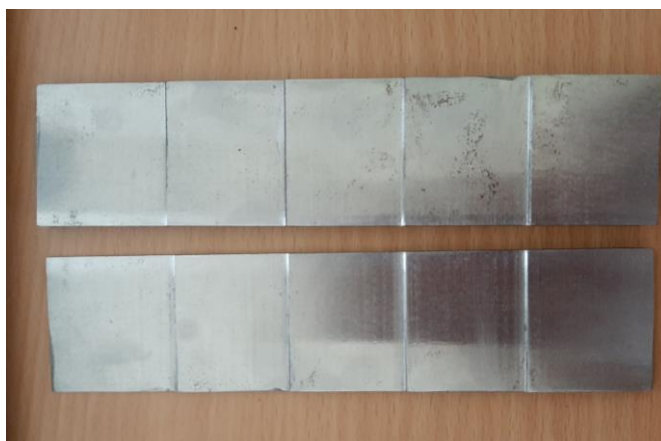
Milijuni kilometara cjevovoda prenose sve od vode do sirove nafte. Kako bi se cjevovodi osigurale, postupak kontrakcije cjevovoda se preispituje pomoću radiografskih aplikacija. Računalna radiografija pruža rješenja za otkrivanje pukotina i nedostataka kako bi se spriječio negativan utjecaj na okoliš [10].

Računalno radiografska rješenja mogu pomoći u ranom otkrivanju pukotina i propadanja konstrukcije u nuklearnim elektranama te igraju ključnu ulogu u ocjeni strukturne cjelovitosti ugrađenih komponenti [10].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Stepeničasti etalon

Etalon je mjerilo, stvarna mjera, mjerni sustav ili referentna tvar koja je utvrđena normom, dogovorom ili zakonom, a namijenjen je za ostvarivanje, određivanje, obnavljanje ili čuvanje jedinice neke veličine. U ovom radu analizirana su dva stepeničasta etalona, prikazana na slici 6, pomoću parametara snimanja opisanih u tablici 1. Na svakom etalonu nalazi se pet stepenica čije su vrijednosti referentnih debljina izmjerene jednoosnim mjernim uređajem prikazane u tablici 2.



Slika 6. Stepeničasti etaloni

Tablica 1. Parametri snimanja stepeničastog etalona

Udaljenost od zračenja, l	1300 mm
Jakost struje, I	4 mA
Napon, U	150 kV
Trajanje ekspozicije, t	4 min

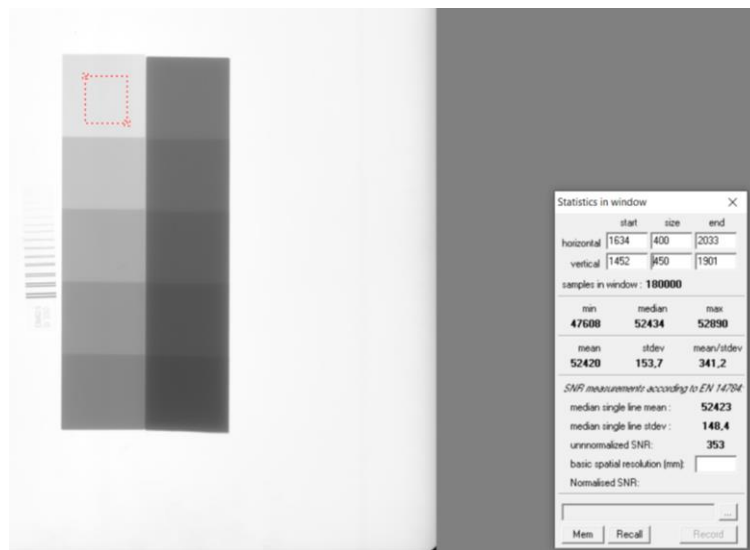
Tablica 2. Referentne vrijednosti debljina etalona

Redni broj stepenice etalona (od najtanje prema najdebljoj)	Referentna debljina [mm]
1.	0,87
2.	1,91
3.	2,93
4.	4,02
5.	5,05
6.	6,27
7.	7,32
8.	8,28
9.	9,33
10.	10,24

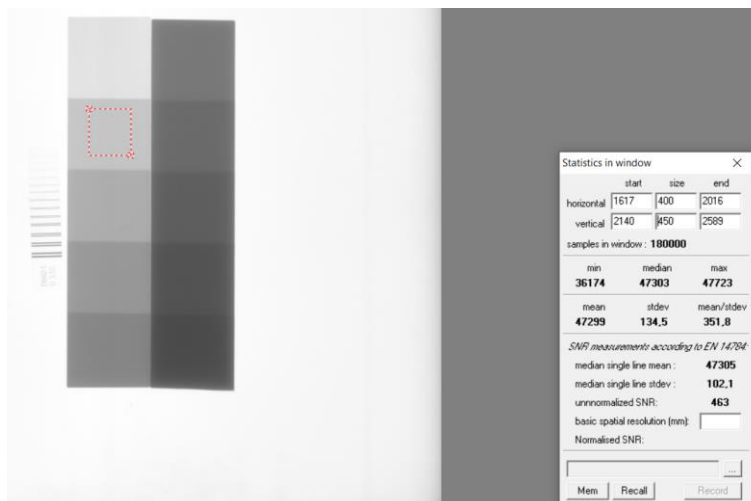
3.2. Procjena debljine prvog etalona na temelju intenziteta piksela

3.2.1. Mjerenje intenziteta piksela stepenica etalona

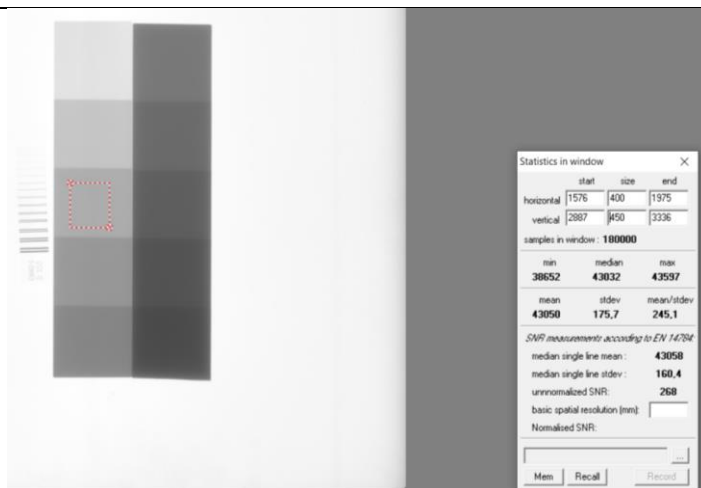
U programu Isee! provedeno je mjerenje intenziteta piksela stepenica prvog etalona, prikazano na slikama 7, 8, 9, 10 i 11.



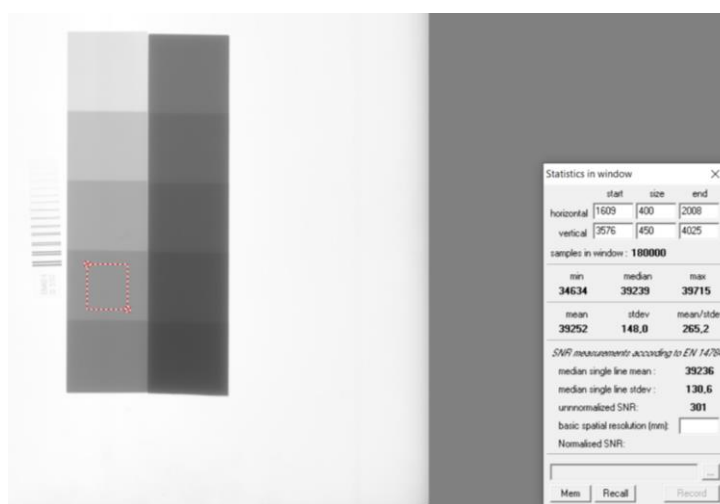
Slika 7. Mjerenje intenziteta piksela na prvoj stepenici etalona



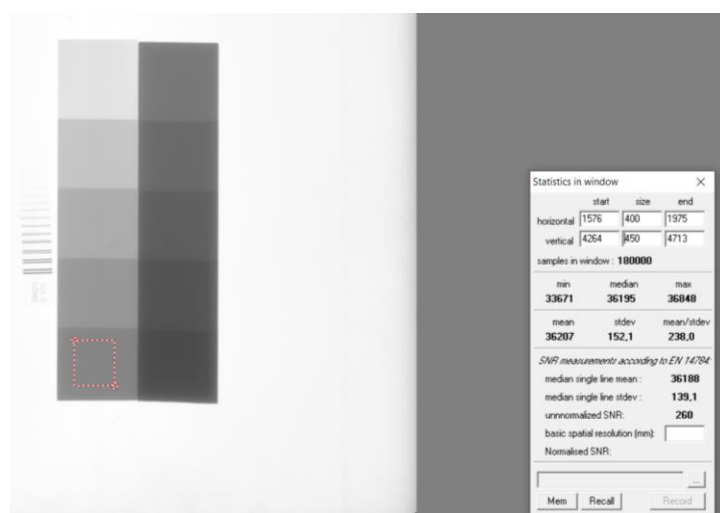
Slika 8. Mjerenje intenziteta piksela na drugoj stepenici etalona



Slika 9. Mjerenje intenziteta piksela na trećoj stepenici etalona



Slika 10. Mjerenje intenziteta piksela na četvrtoj stepenici etalona



Slika 11. Mjerenje intenziteta piksela na petoj stepenici etalona

U tablici 3 prikazani su podaci o referentnim vrijednostima debljina prvog etalona te intenziteti piksela očitani sa slika 7, 8, 9, 10 i 11.

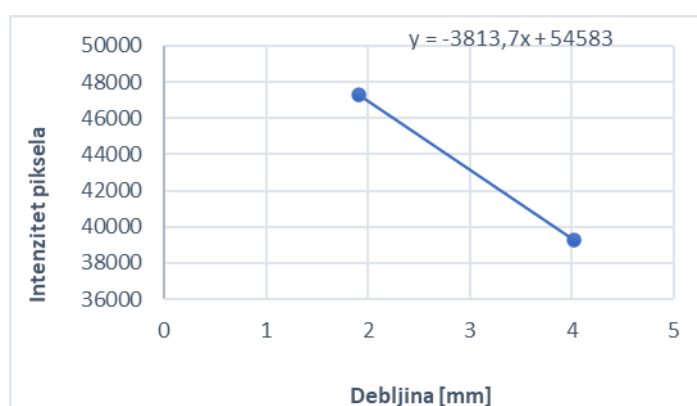
Tablica 3. Intenziteti piksela očitani u programu ISee! za prvi etalon

Redni broj stepenice prvog etalona	Referentna debljina [mm]	Intenzitet piksela očitani sa slike
1.	0,87	52420
2.	1,91	47299
3.	2,93	43050
4.	4,02	39252
5.	5,05	36207

3.2.2. Procjena debljine prve, treće i pete stepenice etalona

Pomoću podataka za drugu i četvrtu stepenicu etalona, iz tablice 3, dobiven je grafički prikaz na slici 12. Linearna funkcija, koja opisuje ovisnost intenziteta piksela o referentnoj debljini materijala, definirana je jednadžbom (3):

$$y = -3813,7x + 54583 \quad (3).$$



Slika 12. Ovisnost intenziteta piksela o referentnoj debljini materijala prvog etalona

Uvrštavanjem intenziteta piksela prve, treće i pete stepenice etalona iz tablice 3 u jednadžbu (3) procijenit će se debljina tih stepenica etalona, prikazano u tablici 4.

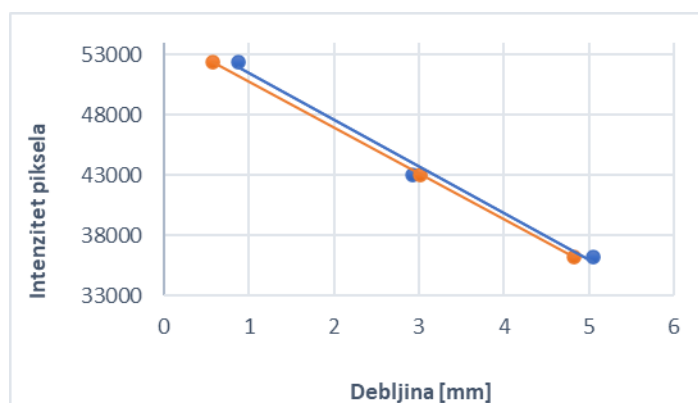
Tablica 4. Približno određene debljine stepenica etalona pomoću jednadžbe (3)

Redni broj stepenice	Intenzitet piksela	Procijenjena debljina [mm]
1.	52420	0,57
3.	43050	3,02
5.	36207	4,82

U tablici 5 prikazana je razlika između referentne procijenjene debljine prve, treće i pete stepenice etalona te grafički prikazana na slici 13.

Tablica 5. Usporedni prikaz referentne i procijenjene debljine prvog etalona

Redni broj stepenice	Referentna debljina [mm]	Procijenjena debljina [mm]
1.	0,87	0,57
3.	2,93	3,02
5.	5,05	4,82

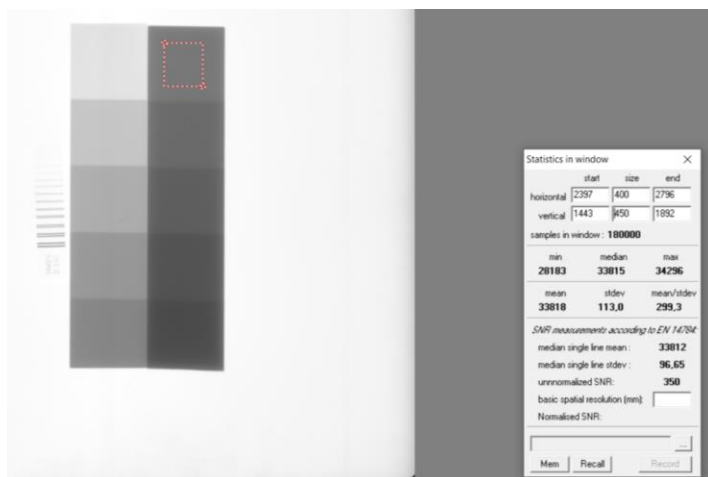


Slika 13. Usporedni prikaz referentne i procijenjene debljine prvog etalona

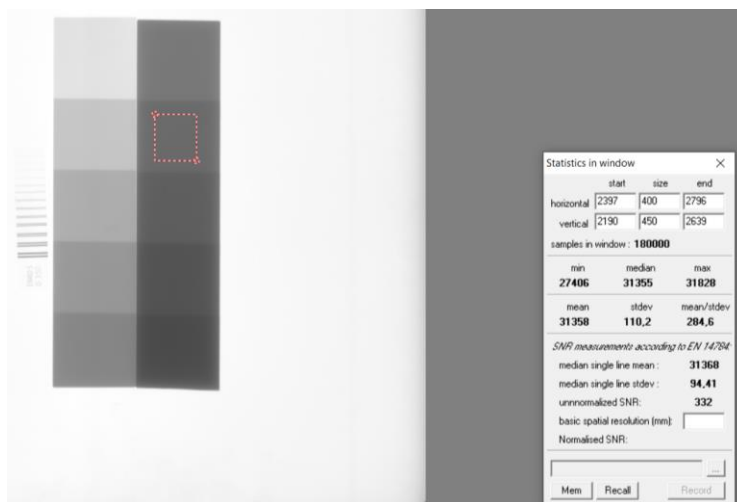
3.3. Procjena debljine drugog etalona na temelju intenziteta piksela

3.3.1. Mjerenje intenziteta piksela stepenica etalona

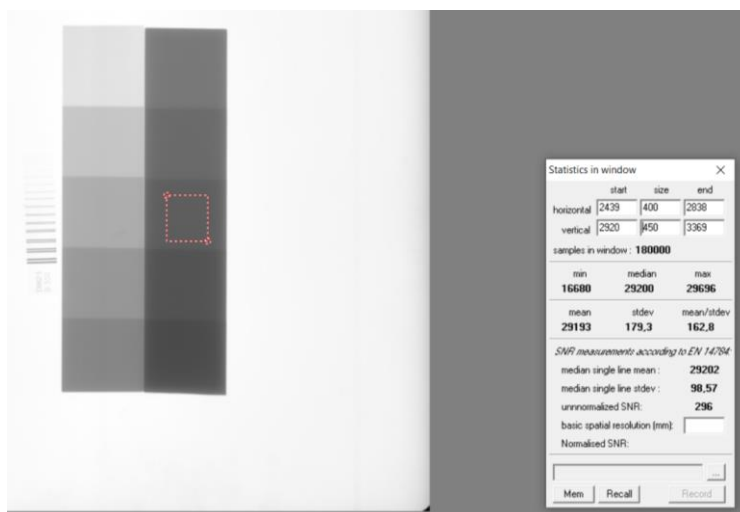
U programu Isee! provedeno je mjerenje intenziteta piksela stepenica drugog etalona, prikazano na slikama 14, 15, 16, 17 i 18.



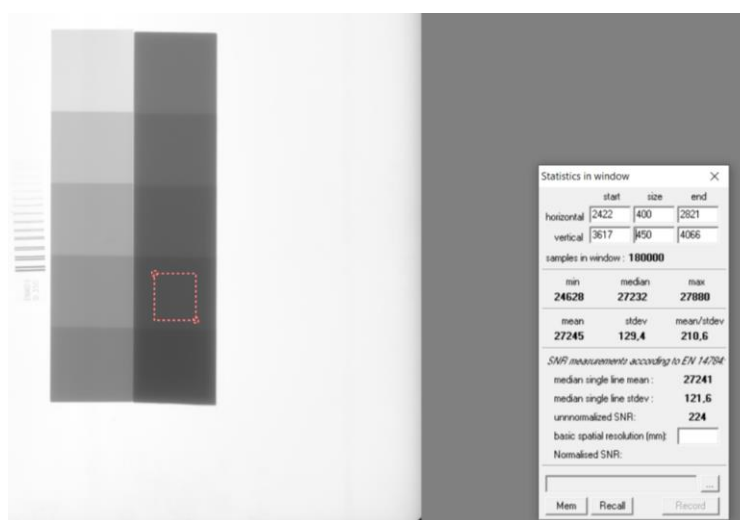
Slika 14. Mjerenje intenziteta piksela na šestoj stepenici etalona



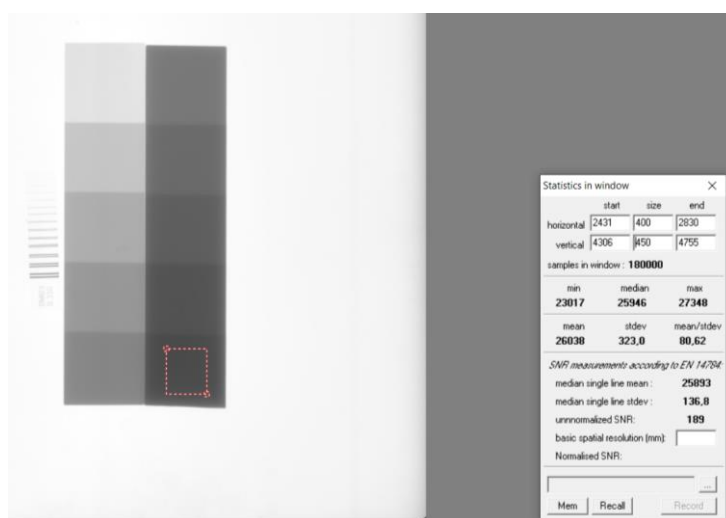
Slika 15. Mjerenje intenziteta piksela na sedmoj stepenici etalona



Slika 16. Mjerenje intenziteta piksela na osmoj stepenici etalona



Slika 17. Mjerenje intenziteta piksela na devetoj stepenici etalona



Slika 18. Mjerenje intenziteta piksela na desetoj stepenici etalona

U tablici 6 prikazani su podaci o referentnim vrijednostima debljina drugog etalona te intenziteti piksela očitani sa slika 14, 15, 16, 17 i 18.

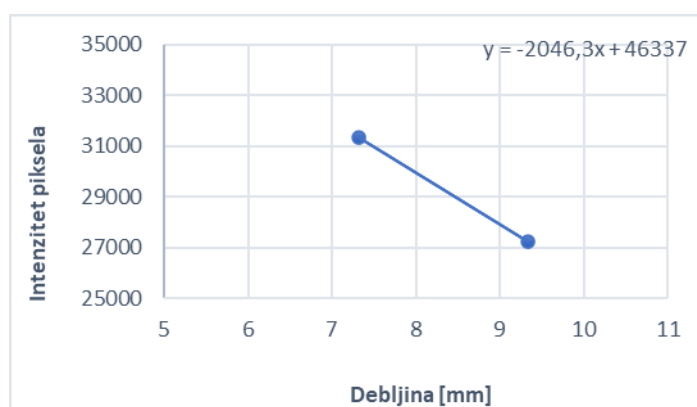
Tablica 6. Intenziteti piksela očitani u programu ISee! za drugi etalon

Redni broj stepenice prvog etalona	Referentna debljina [mm]	Intenzitet piksela očitani sa slike
6.	6,27	33818
7.	7,32	31358
8.	8,28	29193
9.	9,33	27245
10.	10,24	26038

3.3.2. Procjena debljine šeste, osme i desete stepenice etalona

Pomoću podataka za sedmu i devetu stepenicu etalona, iz tablice 6, dobiven je grafički prikaz na slici 19. Linearna funkcija, koja opisuje ovisnost intenziteta piksela o referentnoj debljini materijala, definirana je jednadžbom (4):

$$y = -2046,3x + 46337 \quad (4).$$



Slika 19. Ovisnost intenziteta piksela o referentnoj debljini materijala drugog etalona

Uvrštavanjem intenziteta piksela šeste, osme i desete stepenice etalona iz tablice 6 u jednadžbu (4) procijenit će se debljina tih stepenica etalona, prikazano u tablici 7.

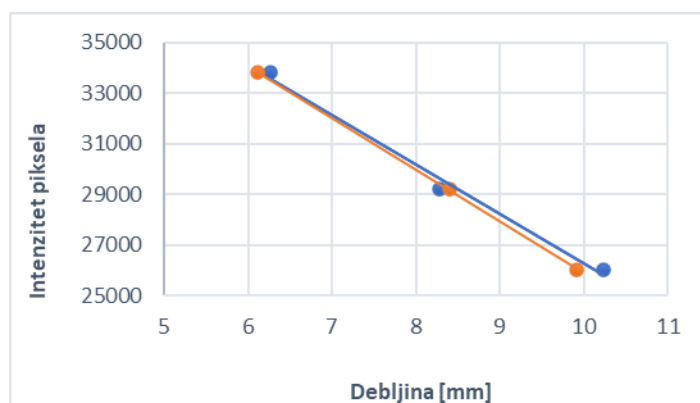
Tablica 7. Približno određene debljine stepenica etalona pomoću jednadžbe (4)

Redni broj stepenice	Intenzitet piksela	Procijenjena debljina [mm]
6.	33818	6,12
8.	29193	8,40
10.	26038	9,92

U tablici 8 prikazana je razlika između referentne procijenjene debljine šeste, osme i desete stepenice etalona te grafički prikazana na slici 20.

Tablica 8. Usporedni prikaz referentne i procijenjene debljine drugog etalona

Redni broj stepenice	Referentna debljina [mm]	Procijenjena debljina [mm]
6.	6,27	6,12
8.	8,28	8,40
10.	10,24	9,92



Slika 20. Usporedni prikaz referentne i procijenjene debljine prvog etalona

4. ZAKLJUČAK

Računalna radiografija ima brojne prednosti u odnosu na konvencionalnu radiografiju najviše zbog mogućnosti digitalnog zapisa i pohrane slike te veće produktivnosti jer nema kemijske obrade slike. Značajan napredak računalne radiografije vidljiv je u poboljšanim i ekološki prihvatljivim radiografskim procesima, smanjenoj izloženosti radijaciji, ekonomičnosti s vremenom te poboljšanoj komunikaciji s današnjim digitalnim alatima. Primjena programa s temeljnom praksom, kao i solidan program obuke, nadvladat će nedostatke koji ometaju potpuni prijelaz s konvencionalne radiografije na računalnu.

U radu su razrađene mogućnosti mjerenja debljine stepeničastog etalona. Provedeno je radiografsko snimanje dva etalona te su očitani intenziteti piksela u programu ISee!

Za određene točke procijenjena je debljina etalona preko jednadžbe pravca te uspoređena s referentnom debljinom etalona. Na temelju provedene usporedbe rezultata na grafičkom prikazu vidljive su razlike u debljinama te je poželjno svaku stepenicu izmjeriti jednoosnim uređajem da bi se dobila što veća točnost rezultata.

POPIS KRATICA

ADC (Analog to Digital Converter) analogno – digitalni pretvarač

CR (Computed Radiography) računalna radiografija

DR (Digital Radiography) digitalna radiografija

NDT (Non - Destructive Testing) nerazorne metode ispitivanja

PACS (Picture Archiving and Communication System) sustav za arhiviranje i komunikaciju slika

PMT (Photomultiplier Tubes) fotomultiplikatorska cijev

VMI NDT (Virtual Media Integration)

LITERATURA

- [1] Culbertson L, May C, Pupcheck G. Computed Radiography: Keep it Short and Simple, 2011. Preuzeto s: <https://www.qualitymag.com/articles/89848-computed-radiography-keep-it-short-and-simple> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [2] Andrejaš M, Palčić I, Jerman J, Lešnjak A. Konvencionalna i digitalna radiografija u farmaceutskoj industriji, 2018. Preuzeto s: <https://www.irt3000.si/hr/vijesti/2018052908292863/Konvencionalna-i-digitalna-radiografija-u-farmaceutskoj-industriji/> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [3] Wikipedia. Preuzeto s: <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiography> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [4] Levi R. How X-Rays were discovered – by mistake, 2016. Preuzeto s: <https://medium.com/@ranlevi/how-x-rays-were-discovered-by-mistake-aea9c4a83c4a> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [5] Mariecurie.org.uk. Preuzeto s: <https://www.mariecurie.org.uk/who/our-history/marie-curie-the-scientist> [Pristupljeno: rujan 2020.].
- [6] Körner M, Weber CH, Wirth S, Pfeifer KJ, Reiser MF, Treitl M. Advances in Digital radiography: Physical Principles and System Overview, 2007. Preuzeto s: <https://pubs.rsna.org/doi/full/10.1148/rg.273065075> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [7] Chandra M. Burman PhD, in Leibel and Phillips Textbook of Radiation Oncology (Third Edition), 2010. Preuzeto s: <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/computed-radiography> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [8] Encyclopedia.com. Preuzeto s: <https://www.encyclopedia.com/medicine/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/computed-radiography> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [9] Duerr-ndt.com. Preuzeto s: <https://www.duerr-ndt.com/products/computed-radiography/what-is-cr-technology.html> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [10] Vmindt.com. Preuzeto s: <https://www.vmindt.com/solutions/ndtserviceproviders>
<https://www.vmindt.com/products/computed-radiography/5100MS> [Pristupljeno: rujan 2020.].

- [11] Radiography in Modern Industry. Preuzeto s:
<http://www.kodak.com/eknec/documents/87/0900688a802b3c87/Radiography-in-Modern-Industry.pdf> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [12] Thomas L. Digital Radiography versus Computed Radiography, 2018.
Preuzeto s: <https://www.news-medical.net/health/Digital-Radiography-versus-Computed-Radiography.aspx> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].
- [13] Caccamise B. Computed Radiography, 2016. Preuzeto s:
<https://blog.applus.com/computed-radiography/> [Pristupljeno: kolovoz 2020.].

PRILOZI

I. CD-R disc