Pouzdanost karakterizacije ekspandiranoga polistirena pomoću računalne radiografije

Hrman, Danijela

Doctoral thesis / Disertacija

2015

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:235:911228

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Danijela Hrman

POUZDANOST KARAKTERIZACIJE EKSPANDIRANOGA POLISTIRENA POMOĆU RAČUNALNE RADIOGRAFIJE

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2015.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE

Danijela Hrman

RELIABILITY OF CHARACTERIZATION OF EXPANDED POLYSTYRENE USING COMPUTED RADIOGRAPHY

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2015.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Danijela Hrman

POUZDANOST KARAKTERIZACIJE EKSPANDIRANOGA POLISTIRENA POMOĆU RAČUNALNE RADIOGRAFIJE

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof. dr. sc. Damir Markučič

Zagreb, 2015.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE

Danijela Hrman

RELIABILITY OF CHARACTERIZATION OF EXPANDED POLYSTYRENE USING COMPUTED RADIOGRAPHY

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Prof. Damir Markučič, PhD

Zagreb, 2015.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK:	620.179.15:678.746.2
Ključne riječi:	tehnika računalne radiografije, karakterizacija ekspandiranoga polistirena, optimiranje parametara eksponiranja i očitanja, modeliranje odzivne funkcije karakterizacijskog niza
Znanstveno područje:	Tehničke znanosti
Znanstveno polje:	Industrijsko inženjerstvo i menadžment
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
Mentor rada:	prof. dr.sc. Damir Markučič
Broj stranica:	231
Broj tablica:	32
Broj slika:	90
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	175
Datum obrane:	5. ožujak 2015.
Povjerenstvo:	dr.sc. Josip Stepanić, izvanredni profesor dr.sc. Damir Markučič, redoviti profesor dr.sc. Mladen Crneković, redoviti profesor dr.sc. Zdravko Schauperl, izvanredni profesor dr.sc. Ivica Kušević, Institut IGH, d.d.
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Damiru Markučiču na vođenju, pruženoj podršci, velikoj upornosti i vjerovanju u moje sposobnosti, te brojnim savjetima dobivenim tijekom izrade ovog rada.

Dr. sc. Ivici Kuševiću na razumijevanju i olakšavanju izrade doktorskog rada preuzimanjem dijela mojih obveza kao djelatnika Laboratorija za građevinsku fiziku.

Dr. sc. Josipu Stepaniću, dr. sc. Mladenu Crnekoviću i dr. sc. Zdravku Schauperlu na korisnim savjetima i pomoći tijekom izrade ovoga rada.

Prof. dr.sc Nikoli Šakiću na izuzetnom doprinosu u postavljanju plana pokusa kao i sudjelovanju s nebrojenim savjetima u analizi rezultata.

Znanstvenom novaku Marku Rakvinu na nesebičnoj pomoći, brojnim savjetima, odvojenom vremenu i velikom angažmanu tijekom izvođenja eksperimentalnog dijela rada.

Djelatnicima Katedre za nerazorna Ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, kao i kolegama Laboratorija za građevinsku fiziku Instituta IGH.

Zahvaljujem djelatnicima Zrakoplovno tehničkog zavoda, Velika Gorica, na ustupljenoj opremi neophodnoj za provedbu eksperimentalnog dijela rada.

Posebno zahvaljujem suprugu Miljenku na dugogodišnjoj potpori, velikom strpljenju, zalaganju, odricanju, toleranciji i bezgraničnoj potpori.

Veliko hvala prijateljicama Gorani i Vlasti što su izdržale sa mnom ovu „našu godinu“, slušale me danju i noću i pomagale kada god je to bilo potrebno.

Velika i najveća zahvala mojim kćerima Loreni i Sari na svim satima koje su provele odrastajući uz čekanje kada će mama napokon imati vremena za igru.

Svim prijateljima jedno veliko hvala.

Don't walk in front of me; I may not follow.
Don't walk behind me; I may not lead.
Just walk beside me and be my friend.

For You

SADRŽAJ

Popis kratica VI
Popis slika I
Popis tablica VII
Predgovor X
Sažetak XII
Summary XIII
1. Uvod 1
1.1 Definicija problema 1
1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja 2
1.3 Materijal, ispitanici, metodologija i plan istraživanja 6
1.4 Hipoteza 9
1.5 Očekivani znanstveni doprinos 9
2. Računalna radiografija 11
2.1 Razvoj, princip, nomenklatura i taksonomija bezfilmnih tehnika 11
2.2 Računalna radiografija 13
2.2.1 Princip cRT tehnike 14
2.2.2 Izvor zračenja 15
2.2.2.1 Fokus rendgenske cijevi 15
2.2.2.2 Kontrola emisije X zračenja 16
2.2.3 Slikovne ploče 17
2.2.3.1 Aktivni sloj slikovne ploče 18
2.2.3.2 Slojevi za optimizaciju optičkih i mehaničkih karakteristika slikovnih ploča 20
2.2.3.3 Proces apsorpcije energije X zračenja 20
2.2.3.4 Sposobnost zadržavanja latentne slike 21
2.2.4 Laserski skeneri slikovnih ploča 22

2.2.4.1 Laserski skeneri – proces pobude i emisije 23
2.2.4.2 Komponente laserskog sustava za očitanje fosfornih slikovnih ploča 24
2.2.4.3 Svojstva laserske zrake 25
2.2.4.4 Brzina očitanja 27
2.2.4.5 Proces prikupljanja PSL odziva 28
2.2.4.6 Izolacija PSL odziva od signala pobude 28
2.2.4.7 Digitalizacija analognog signala 29
2.2.4.8 Proces brisanja zaostale slike 31
2.3 Aspekti kvalitete slike 32
2.3.1 Dinamički raspon 33
2.3.2 Modulacijska funkcija za prijenos kontrasta (MTF) 34
2.3.3 Osjetljivost otkrivanja (detekcije) zračenja (DQE) 35
2.3.4 Razlučivost i oštrina 37
2.3.4.1.1 Razlučivost slikovnih ploča 38
2.3.4.1.2 Utjecaj veličine zrna fosforescentnog materijala 38
2.3.4.1.3 Utjecaj faktora slaganja 38
2.3.4.1.4 Utjecaj debljine aktivnog sloja 38
2.3.4.2 Utjecaj očitanja i interakcija sa stražnjim slojem slikovne ploče 38
2.3.4.3 Utjecaj rendgenskog uređaja na oštrinu 40
2.3.5 Šum 42
3. Ekspandirani polistiren 45
3.1 Razvoj i značaj ekspandiranoga polistirena 45
3.2 Postupak proizvodnje 46
3.2.1 Proces proizvodnje polistirenskog zrnja 47
3.2.2 Proces proizvodnje ekspandiranoga polistirena 49
3.3 Značajke EPS-a – gustoća 53
3.3.1 Ovisnost gustoće ekspandiranoga polistirena o značajkama zrnja 54
3.3.2 Ovisnost gustoće ekspandiranoga polistirena o udjelu pentana 54
3.3.3 Ovisnost gustoće ekspandiranoga polistirena o vremenu provedenom u ekspanderu 55
3.3.4 Značajke ekspandiranoga polistirena – ovisnost svojstava o gustoći 55
4. Metodologija analize slike 59
4.1 Format slike 60
4.2 Mjerljive značajke elementa slike 62

4.2.1 Momenti distribucije frekvencija 62
4.2.1.1 Momenti oko ishodišta 63
4.2.1.2 Centralni momenti 63
4.2.1.2.1 Prvi centralni momenti 64
4.2.1.2.2 Drugi centralni moment 64
4.2.1.2.3 Treći centralni moment 64
4.2.1.2.4 Četvrti centralni moment 65
4.2.1.3 Izdvojene mjerljive značajke 66
4.3 Intenzitet zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike 67
4.4 Kriterij dobrote 69
5. Tehnika provedbe eksperimenta 72
5.1 Rendgenski uređaj 73
5.2 Skener slikovnih ploča 75
5.3 Slikovne ploče 77
5.4 Ispitni uzorci ekspandiranoga polistirena 79
5.5 Metodologija karakterizacije komponenata karakterizacijskog niza 84
6. Optimalni parametri eksponiranja 86
6.1 Plan pokusa za karakterizaciju komponenata sustava eksponiranja 87
6.1.1 Oblikovanje plana pokusa za karakterizaciju komponenata sustava eksponiranja 88
6.1.2 Provedba pokusa za karakterizaciju komponenata sustava eksponiranja 88
6.2 Rezultati određivanja intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike 92
6.3 Rezultati određivanja dobrote digitalnog zapisa radiografske slike 95
6.4 Analiza rezultata ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote o parametrima eksponiranja 98
6.5 Parametarska optimizacija 103
7. Optimalni parametri očitanja 106
7.1 Plan pokusa za karakterizaciju komponenata sustava očitanja 107
7.1.1 Oblikovanje plana pokusa za karakterizaciju komponenata sustava očitanja 107
7.1.2 Provedba pokusa karakterizacije komponenata sustava očitanja 110
7.2 Utjecaj parametara očitanja na odziv intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike 112

7.2.1 Metodologija određivanja odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike 113
7.2.2 Izrada i vrednovanje matematičkog modela odziva intenziteta zacrnjenja piksela . 113
7.2.3 Statistička obrada rezultata odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiogramske slike 115
7.2.4 Analiza utjecaja parametara komponenata sustava očitanja na odziv intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike ekspandiranoga polistirena124
7.3 Utjecaj parametara očitanja na odziv dobrote digitalnog zapisa radiografske slike 127
7.3.1 Metodologija određivanja odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike..... 127
7.3.2 Statistička obrada rezultata odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike.... 128
7.3.3 Analiza utjecaja parametara komponenata sustava očitanja na odziv dobrote digitalnog zapisa radiografske slike ekspandiranoga polistirena 135
7.4 Parametarska optimizacija 139
8. Odzivni model karakterizacijskog niza 144
8.1 Koeficijent prigušenja 145
8.2 Odzivni model karakterizacijskog niza 147
8.3 Utjecaj odabira područja od interesa na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena..... 153
8.3.1 Metodologija određivanja utjecaja odabira područja od interesa na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena..... 154
8.3.2 Evaluacija utjecaja odabira područja od interesa na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena..... 156
8.4 Utjecaj strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena..... 161
8.4.1 Metodologija određivanja utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće..... 161
8.4.2 Evaluacija utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće..... 165
8.4.2.1 Evaluacija utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena debljine 60 mm na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće 165
8.4.2.2 Evaluacija utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena debljine 100 mm na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće 169
9. Karakterizacija ekspandiranoga polistirena cRT metodom 173

9.1 Metodologija određivanja strukturne gustoće slijepih uzoraka 174
9.2 Evaluacija modelom određenih vrijednosti strukturnih gustoća slijepih uzoraka ekspandiranoga polistirena 176
10. Zaključak 184
10.1 Optimiranje parametara eksponiranja i očitanja 185
10.2 Vrednovanje modela obzirom na odabir područja od interesa 189
10.3 Vrednovanje modela obzirom na varijabilnost strukture EPS-a 190
10.4 Potvrda modela 191
10.5 Znanstveni doprinosi disertacije 192
10.6 Hipoteze 192
10.7 Smjernice daljnjeg istraživanja 193
11. Literatura 195
12. Prilozi 203
Prilog 1 – Izmjerene vrijednosti gustoća ispitnih uzoraka metodom HRN EN 1602 204
Prilog 2 – Parametri intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote kod određivanja optimalnih parametara eksponiranja 208
Prilog 3 - Stistički podaci analiziranog matematičkog modela za izračunavanje (predviđanje) odziva intenziteta zacrnjenja piksela u ovisnosti o parametrima komponenata sustava očitanja 211
Prilog 4 - Stistički podaci analiziranog matematičkog modela za izračunavanje (predviđanje) vrijednosti dobrote u ovisnosti o parametrima komponenata sustava očitanja 213
Kratki životopis 216
Short Biography 217

POPIS KRATICA

cRT	*Tehnika računalne radiografije*
DQE	*Osjetljivost otkrivanja (detekcije) zračenja*
DR	*Digitalna radiografija*
EPS	*Ekspandirani polistiren*
EUMEPS	*Udruženje EU proizvođača ekspandiranoga polistirena*
FFD	*Udaljenost fokus-film*
GR	*Standardna razlučivost (slikovnih ploča)*
HR	*Visoka razlučivost (slikovnih ploča)*
IP	*Slikovna ploča*
LP	*Gustoća snage (intezitet zračenja lasera)*
MTF	*Modulacijska funkcija prijenosa*
PSL	*Fotoluminiscencija*
PSP	*Fotoosjetljivi fosforescentni sloj*
PMT	*Fotomultiplikatorska cijev*
ROI	*Područje od interesa*
RT	*Metoda radiografije*
ST	*Standardna razlučivost (slikovnih ploča)*

POPIS SLIKA

Sl.- 1. Proces eksponiranja, očitanja i brisanja slikovnih ploča [34]. 13
Sl.- 2. Shematski prikaz rendgenske cijevi s položajem anode. 15
Sl.- 3. Stvarna i efektivna veličina fokusa. 16
Sl.- 4. Proces stimulirane luminiscencije [34]. 17
Sl.- 5. Aktivni sloj slikovne ploče neusmjerene strukture (gore) i usmjerene strukture (dolje). 19
Sl.- 6. Energijska razina aktivatora Eu^{2+}. 20
Sl.- 7. Zadržavanje latentne slike u vremenu $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovnih ploča [43]. 22
Sl.- 8. Spektar pobude i emisije za $BaFBr:Eu^{2+}$ i $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovne ploče, te vrijednosti valnih duljina pobude laserima [34]. 24
Sl.- 9. Komponente laserskog sustava s pomičnom slikovnom pločom tijekom procesa očitavanja [34]. 25
Sl.- 10. Gaussov profil intenziteta laserske zrake promjera $d = 2 \cdot r_1$ [10]. 25
Sl.- 11. Krivulja odziva nakon pobude laserom [7]. 27
Sl.- 12. Koncept digitalizacije analognog signal [47]. 30
Sl.- 13. Dinamički raspon [27]. 33
Sl.- 14. Definiranje osjetljivosti otkrivanja (detekcije) zračenja, DQE. 35
Sl.- 15. Omjer signal-šum. 35
Sl.- 16. DQE detektora [51]. 36
Sl.- 17. Pojave na optičkoj granici slikovne ploče: a) refleksija i b) apsorpcija pobudne laserske zrake [5]. 39
Sl.- 18. Utjecaj veličine fokusa rendgenskog uređaja na oštrinu: a) veličina fokusa 10 μm, b) veličina fokusa 5 μm i c) veličina fokusa 10 μm. 41
Sl.- 19. Postupak proizvodnje ekspandiranoga polistirena [58]. 46
Sl.- 20. Iz stirena u polistiren postupkom suspenzijske polimerizacije [62]. 47

Sl.- 21. Proces proizvodnje ekspandiranoga polistirena [65]. 49
Sl.- 22. Proces proizvodnje ekspandiranoga polistirena s odvojenom fazom sušenja [66]. 50
Sl.- 23. Ilustrirani prikaz predekspandiranih zrna polistirena promjera: a) Ø = 2,5 - 3 mm, b) Ø = 3 mm i c) Ø = 4 mm [66]. 51
Sl.- 24. Treća faza proizvodnje ekspandiranoga polistirena u metalnim kalupima [67]. 52
Sl.- 25. Ovisnost prividne gustoće o veličini ćelija [15]. 54
Sl.- 26. Ovisnost prividne gustoće o vremenu ekspanzije zrna ekspandiranoga polistirena [67]. 55
Sl.- 27. Toplinsko-izolacijske ploče ekspandiranoga polistirena. 56
Sl.- 28. Koeficijent relativne zaobljenosti vrha distribucije. 66
Sl.- 29. Rasterska slika. 68
Sl.- 30. Histogram područja od interesa. 69
Sl.- 31. Određivanje funkcije dobrote eksponiranja i očitanja. 70
Sl.- 32. Rendgenski uređaj ISOVOLT mobil s rendgenskom cijevi ISOVOLT 160 M2 0.4/1.5 (lijevo) s upravljačkom jedinicom (desno). 73
Sl.- 33. Ovisnost napona o struji za promjere fokusa 1 mm (donja) i 3 mm (gornja) rendgenske cijevi uređaja ISOVOLT mobil [81]. 74
Sl.- 34. Rendgenska cijev ISOVOLT 160 M2 0.4/1.5 uređaja ISOVOLT mobil [81]. 75
Sl.- 35. Skener slikovnih ploča sustava računalne radiografije VMI 5100MS [73]. 76
Sl.- 36. Prikaz elementa skenera slikovnih ploča sustava računalne radiografije VMI 5100MS u koji je umetnuta slikovna ploča i StarrView radna stanica. 76
Sl.- 37. Spektar PSL odziva slikovnih ploča KODAK INDUSTREX Flex s $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ fotoosjetljivim slojem [43]. 79
Sl.- 38. Spektar pobude i emisije PSL svjetla slikovnih ploča [43]. 79
Sl.- 39. Ekspandirana zrna u gotovom proizvodu toplinsko-izolacijske ploče ekspandiranoga polistirena. 80
Sl.- 40. Makrostruktura ekspandiranoga polistirena tlačnih čvrstoća 50, 70, 100, 150, 200 kPa. 82
Sl.- 41. Mikrostruktura tipičnog ekspandiranoga polistirena. 83
Sl.- 42. Postav ispitnih uzoraka i rendgenska cijev. 89
Sl.- 43. Postav uzoraka na slikovnoj ploči tijekom karakterizacije komponenata sustava eksponiranja. 90

Sl.- 44. Digitalni zapis radiografske snimke s vrijednostima intenziteta zacrnjenja piksela u donjem području dinamičkog raspona slikovnih ploča (parametri eksponiranja su napon na rendgenskoj cijevi 10 kV, vrijeme 40 s, struja na rendgenskoj cijevi 1 mA). 91

Sl.- 45. Digitalni zapis radiografske snimke s vrijednostima intenziteta zacrnjenja u gornjem području dinamičkog raspona slikovnih ploča (parametri eksponiranja su: napon na rendgenskoj cijevi 40 kV, vrijeme 20 s, struja na rendgenskoj cijevi 4 mA). 92

Sl.- 46. Digitalni zapis radiografske slike s vrijednostima intenziteta zacrnjenja piksela unutar odabranog područja dinamičkog raspona slikovnih ploča (parametri eksponiranja su napon na rendgenskoj cijevi 15 kV, vrijeme 120 s, struja na rendgenskoj cijevi 3,5 mA)..... 92

Sl.- 47. Ovisnost intenziteta zacrnjenja piksela o parametrima eksponiranja pri različitim vrijednostima napona na rendgenskoj cijevi: a) 10 kV, b) 15 kV i c) 40 kV..... 95

Sl.- 48. Ovisnost dobrote o parametrima eksponiranja uz konstantnu vrijednost napona rendgenske cijevi: a) 10 kV, b) 15 kV i c) 40 kV. 98

Sl.- 49. Grafički prikaz ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote o parametrima pokusa za stanja pokusa 1 - 4 (uz napon na rendgenskoj cijevi 10 kV i deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće 100 kPa)..... 99

Sl.- 50. Grafički prikaz ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote o parametrima pokusa za stanja pokusa 5 - 8 (uz napon na rendgenskoj cijevi 15 kV i deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće 100 kPa)..... 101

Sl.- 51. Grafički prikaz ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote o parametrima pokusa za stanja pokusa 9 - 12 (uz napon 40 kV i deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće 100 kPa). 103

Sl.- 52. Grafički prikaz ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela o parametrima eksponiranja za stanja pokusa 1 - 12..... 104

Sl.- 53. Grafički prikaz ovisnosti dobrote o parametrima eksponiranja za stanja pokusa od 1 do 12 s naznačenom maksimalnom vrijednošću dobrote za stanje pokusa 8..... 105

Sl.- 54. Postav ispitnih uzoraka na slikovnu ploču za pokus karakterizacije komponenata sustava očitanja. 111

Sl.- 55. Digitalni zapis radiografske snimke (parametri eksponiranja: napon na rendgenskoj cijevi 15 kV, vrijeme 120 s, struja 3,5 mA i parametri očitanja: napon pojačanja PMT 4,25 V, gustoća snage (intezitet zračenja lasera) 10 W/m^2 i razlučivost 50 μm)..... 112

Sl.- 56. Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za reducirani kvadratni matematički model odziva intenziteta zacrnjenja piksela. 118
Sl.- 57. Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa. 119
Sl.- 58. Odnos modelom izračunatog odziva i stvarnog odziva. 120
Sl.- 59. Konturni prikaz matematičkog modela ovisnosti odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su C:Res = 150 μm i D:EPS = 200 kPa). 121
Sl.- 60. 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su C:Res = 150 μm i D:EPS = 200 kPa). 122
Sl.- 61. Konturni prikaz matematičkog modela ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su B:LP = 20 W/m^2 i C:Res = 50 μm). 122
Sl.- 62. Konturni prikaz matematičkog modela ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su A:PMT = 6,25 V i D:EPS = 150 kPa). 123
Sl.- 63. Dijagram perturbacije matematičkog modela odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike. 124
Sl.- 64. Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za reducirani kvadratni matematički model odziva dobrote. 131
Sl.- 65. Slučajno rasipanje ostataka u ovisnosti o redoslijedu izvođenja plana pokusa. 132
Sl.- 66. Odnos modelom izračunatog odziva i stvarnog odziva. 133
Sl.- 67. Konturni prikaz matematičkog modela ovisnosti odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su A:PMT = 6,25 V i B:LP = 15 W/m^2). 133
Sl.- 68. 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su A:PMT = 6,25 V i B:LP = 20 W/m^2). 134
Sl.- 69. Konturni prikaz matematičkog modela ovisnosti odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su B:LP = 20 W/m^2 i C:Res = 100 μm). 134
Sl.- 70. Dijagram perturbacije matematičkog modela za predviđanje dobrote digitalnog zapisa radiografske snimke. 135

Sl.- 71. Prikaz ponašanja odziva dobrote u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći uzorka (konstantni su A:PMT= 5,25 V, B:LP = 15 W/m^2 i C:Res = 125 μm)..... 136
Sl.- 72. Prikaz ponašanja odziva dobrote u ovisnosti o razlučivosti (konstantni su A:PMT= 5,25 V, B:LP = 15 W/m^2 i D:EPS = 117 kPa). 137
Sl.- 73. Grafički prikaz položaja modelom određenih optimalnih parametara očitanja u odnosu na postavljene raspone i ograničenja za ekspandirani polistiren deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće od 180 kPa do 190 kPa. 141
Sl.- 74. Konturni prikaz dobrote u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći (D:EPS) i pojačanju fotomultiplikatorske cijevi (A:PMT) (stvarne vrijednosti snage laserske zrake B: LP = 19,63 W/m^2 i razlučivosti C: Res = 50 μm). 141
Sl.- 75. Konturni prikaz dobrote u ovisnosti o razlučivosti (C:Res) i pojačanju fotomultiplikatorske cijevi (A:PMT) (stvarne vrijednosti snage laserske zrake B: LP = 19,63 W/m^2 i tlačne čvrstoće D:EPS = 190 kPa). 142
Sl.- 76. Eksponencijalna ovisnost broja fotona koji prođu kroz materijal o debljini [89]. 146
Sl.- 77. Shematski prikaz modeliranja odzivnog modela karakterizacijskog niza: a) eksponiranje, b) očitanje i A/D pretvorba i c) analiza ROI na digitalnom zapisu radiografske slike. 150
Sl.- 78. Odzivni model karakterizacijskog niza. 152
Sl.- 79. Digitalni zapis radiografske slike (jedna radiografska ekspozicija) pokusa za određivanje utjecaja odabira područja od interesa na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena. 156
Sl.- 80. Relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, uzorka oznake 100/60/1 od gustoće izmjerene normiranom metodom HRN EN 1602, $\rho_{prividno}$, za ukupno pet eksponiranja..... 159
Sl.- 81. Usporedivost za razinu povjerenja od 95 % modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, na pet područja od interesa i prividne gustoće $\rho_{prividno}$, dobivene konvencionalnom metodom za ispitni uzorak ekspandiranoga polistirena oznake 100/60/1..... 160
Sl.- 82. Digitalni zapis radiografske slike (jedna radiografska ekspozicija) pokusa za određivanje utjecaja strukture EPS-a na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena..... 165
Sl.- 83. Relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, uzoraka oznake 100/60/n, gdje je n = 1 do 5, dobivenih za pet eksponiranja, od prividnih gustoća dobivenih normiranom metodom HRN EN 1602, $\rho_{prividno}$. 168

Sl.- 84. Usporedivost za razinu povjerenja od 95 % modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, za pet eksponiranja i prividnih gustoća, $\rho_{prividno}$, dobivenih konvencionalnom metodom, za ispitne uzorke ekspandiranoga polistirena oznaka 100/60/n, gdje je n = 1 do 5. 168

Sl.- 85. Relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, uzoraka oznake 100/100/n, gdje je n = 1 do 5, dobivenih za pet eksponiranja, od prividnih gustoća dobivenih normiranom metodom HRN EN 1602, $\rho_{prividno}$. 171

Sl.- 86. Usporedivost za razinu povjerenja od 95 % modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, za pet eksponiranja i prividnih gustoća, $\rho_{prividno}$, dobivenih konvencionalnom metodom, za ispitne uzorke ekspandiranoga polistirena oznaka 100/100/n, gdje je n = 1 do 5. 171

Sl.- 87. Digitalni zapis radiografske slike pri karakterizaciji materijala cRT metodom. 176

Sl.- 88. Modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, za ispitni uzorak oznake 70/60/3, na razini povjerenja od 95 %. 178

Sl.- 89. Prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, za ispitne uzorke oznake 70/60/n, gdje je n = 1 do 5, uz pridružene vrijednosti mjernih nesigurnosti ± 1U. 179

Sl.- 90. Modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, za ispitni uzorak oznake 200/60/3, na razini povjerenja od 95 %. 181

Sl.- 91. Prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, za ispitne uzorke oznake 200/60/n, gdje je n = 1 do 5, uz pridružene vrijednosti mjernih nesigurnosti ± 1U. 182

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna svojstva komercijalno dostupnih fotoosjetljivih slojeva [5]. 21
Tablica 2. Sistematizacija potencijalnih izvora šuma u cRT. 44
Tablica 3. Pregled primjene ekspandiranoga polistirena u građevinarstvu obzirom na tlačnu čvrstoću [71]. 57
Tablica 4. Osnovna svojstva EPS-a opće namjene [72]. 58
Tablica 5. Debljine i vrste slojeva $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovnih ploča [43]. 77
Tablica 6. Fizikalna svojstva $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ fotoosjetljivog sloja [5]. 78
Tablica 7. Odabrani parametri za provedbu eksperimenta. 84
Tablica 8. Oznaka stanja pokusa, članovi modela: napon na rendgenskoj cijevi u kV, struja na rendgenskoj cijevi u mA, vrijeme u s i radiografska ekspozicija u mAs. 88
Tablica 9. Vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti radiografske ekspozicije uz konstantan napon 10 kV. 93
Tablica 10. Vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti radiografske ekspozicije uz konstantan napon 15 kV. 93
Tablica 11. Vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti radiografske ekspozicije uz konstantan napon 40 kV. 93
Tablica 12. Izračunate vrijednosti dobrote na temelju analize digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti rad. eksp. pri konstantnom naponu rendgenske cijevi od 10 kV. 96
Tablica 13. Izračunate vrijednosti dobrote na temelju analize digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti rad. eksp. pri konstantnom naponu rendgenske cijevi od 15 kV. 96

Tablica 14. Izračunate vrijednosti dobrote na temelju analize digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti rad. eksp. pri konstantnom naponu rendgenske cijevi od 40 kV. 97

Tablica 15. Postavljena ograničenja za optimizaciju parametara eksponiranja uzoraka tlačne čvrstoće 100 kPa unutar raspona debljine od 60 mm do 100 mm. 103

Tablica 16. Odabrani članovi modela za provedbu eksperimenta za karakterizaciju sustava očitanja. 107

Tablica 17. Stanja pokusa za reducirani kvadratni matematički model vrijednosti odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike. 108

Tablica 18. Analiza varijance za reducirani kvadratni matematički model odziva intenziteta zacrnjenja piksela. 116

Tablica 19. Veličine koje opisuju kvalitetu reduciranog kvadratnog modela odziva intenziteta zacrnjenja piksela. 117

Tablica 20. Procjena koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjeno standardno odstupanje koeficijenata (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance za svaki član reduciranog kvadratnog matematičkog modela odziva zacrnjenja digitalnog zapisa radiografske slike. 117

Tablica 21. Analiza varijance za reducirani kvadratni matematički model odziva dobrote. 129

Tablica 22. Veličine koje opisuju kvalitetu reduciranog kvadratnog modela odziva dobrote. 129

Tablica 23. Procjena koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjeno standardno odstupanje koeficijenata (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance za svaki član reduciranog kvadratnog matematičkog modela odziva dobrote. 130

Tablica 24. Postavljena ograničenja za optimizaciju parametara očitanja uzoraka tlačne čvrstoće unutar raspona od 180 kPa do 190 kPa. 139

Tablica 25. Prikaz modelom određenih optimalnih parametara očitanja nakon provedene parametarske optimizacije za ekspandirani polistiren deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće u rasponu od 180 kPa do 190 kPa. 140

Tablica 26. Optimalni parametri eksponiranja i očitanja, te značajke ispitnih uzoraka: tlačna čvrstoća, debljina i gustoća uzoraka koji su korišteni pri modeliranju odzivnog modela karakterizacijskog niza. 151

Tablica 27. Modelom (36) određene strukturne gustoće, ρ_n, za uzorak oznake 100/60/1 i relativna odstupanja izračunatih vrijednosti strukturnih gustoća, $\Delta\rho_{rel}$, od prividne gustoće izračunate prema normiranoj metodi, $\rho_{prividno}$, za ukupno pet radiografskih ekspozicija. 157

Tablica 28. Kombinacija ispitnih uzoraka pri izvođenju pokusa za evaluaciju utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće. 162

Tablica 29. Modelom (36) određene vrijednosti strukturne gustoće, ρ_n, za uzorke oznake 100/60/n gdje je n = 1 do 5 i relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, vrijednosti strukturnih gustoća kao srednjih vrijednosti za pet područja od interesa, ρ_n, od stvarnih vrijednosti izračunatih prema normiranoj metodi, $\rho_{prividno}$. 166

Tablica 30. Modelom (36) određene vrijednosti strukturne gustoće, ρ_n, za uzorke oznake 100/100/n gdje je n = 1 do 5 i relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, vrijednosti strukturnih gustoća kao srednjih vrijednosti za pet područja od interesa, ρ_n, od stvarnih vrijednosti izračunatih prema normiranoj metodi, $\rho_{prividno}$. 169

Tablica 31. Vrijednosti modelom (36) određenih strukturnih gustoća, ρ_n, za uzorak oznake 70/60/3, njihove aritmetičke sredine, te standardna odstupanja. 177

Tablica 32. Vrijednosti modelom (36) određenih strukturnih gustoća, ρ_n, za uzorak oznake 200/60/3, njihove aritmetičke sredine, te standardna odstupanja. 180

PREDGOVOR

Ovo istraživanje je motivirano spoznajom da ne postoji razvijena metoda za karakterizaciju materijala ćelijaste strukture računalnom radiografijom. Dodatna motivacija je potencijal implementacije računalne radiografije u području građevinske industrije.

Za razliku od konvencionalnih metoda, predložena metoda za karakterizaciju materijala ćelijaste strukture je nerazorna metoda evaluacije (od eng. *Non Destructive Evaluation*). Po samoj definiciji to znači da ne rezultira trajnim promjenama u ispitivanom materijalu te je moguće određivanje svojstava bez utjecaja na buduću korisnost predmeta ispitivanja.

Konvencionalnim metodama se dobiva prosječna vrijednost gustoće ekspandiranoga polistirena bez saznanja o nehomogenostima unutar cijele toplinsko-izolacijske ploče. Predložena metoda predstavlja značajan doprinos u tom smislu što izravno omogućuje dobivanje informacije o varijabilnosti gustoće ispitivane toplinsko-izolacijske ploče.

Optimiranje parametara procesa svih faza transformacije signala odziva u primjeni tehnike računalne radiografije omogućava da varijabilnosti odziva, koje su svojstvene karakterizacijskom nizu u cijelosti, budu manje od varijabilnosti strukturnih značajki ispitivanog materijala i pripadajućih odziva. Navedeno doprinosi razumijevanju utjecaja parametara procesa eksponiranja slikovnih ploča rendgenskim zračenjem u području malih energija zračenja te analogno-digitalne konverzije latentnog zapisa slikovnih ploča kod procesa očitavanja u skeneru slikovnih ploča.

Nadalje, provedeno je kvantificiranje pojedinačnih doprinosa elemenata karakterizacijskog niza te tumačenje njihova sinergijskog djelovanja na varijabilnost rezultata ispitivanja.

Analizom i evaluacijom odabranih mjerljivih značajki digitalnog zapisa radiografske slike na promatranom području moguće je kvantitativno i preciznije procijeniti strukturne značajke ekspandiranoga polistirena točnije i preciznije nego konvencionalnim metodama. Izdvajanje mjerljivih značajki u procesu analize digitalnog zapisa radiografske slike doprinosi procesu utvrđivanja varijabilnosti tražene strukturne karakteristike na promatranom području.

SAŽETAK

Tijekom posljednjeg desetljeća bilježi se intenzivan razvoj tehnike računalne radiografije, cRT (od eng. *Computed Radiography Technique*), uz istovremeno globalno prihvaćanje tehnologije i u području industrijske radiografije.

Implementacija u polje građevinske industrije može se u najvećoj mjeri zahvaliti potencijalnoj primjeni cRT sustava u svrhu karakterizacije materijala u procjenama kvalitete proizvodnje. Obzirom na karakteristike toplinsko izolacijskih materijala ćelijaste strukture koji se koriste u građevinarstvu, kao na primjer ekspandirani polistiren, kvantifikacija pouzdanosti računalne radiografije postaje imperativ.

Spoznaja da nema razvijene metodologije računalne radiografije za karakterizaciju nemetalnih materijala kao niti ćelijastih struktura predstavlja motivaciju istraživanja. Da bi se sagledao sadržaj radiografskog slikovnog zapisa, a potom sadržaj i vjerodostojno interpretirao i evaluirao, nužno je poznavati utjecaj pojedinih komponenti karakterizacijskog niza na kvalitetu digitalnog zapisa radiografske slike.

Stoga, cilj ove doktorske disertacije je razvoj nove metode karakterizacije materijala ćelijastih struktura, poput ekspandiranoga polistirena, pomoću tehnike računalne radiografije.

Ključne riječi: tehnika računalne radiografije, karakterizacija ekspandiranoga polistirena, optimiranje parametara eksponiranja i očitanja, modeliranje odzivne funkcije karakterizacijskog niza.

SUMMARY

Over the last decade there has been an intensive development of computed radiography technique, cRT, and at the same time there is an acceptance of technology in the field of industrial radiography.

Implementation in the field of building industry may be largely due to the potential application of cRT systems for the purpose of the characterization of materials assessment of production quality. Due to the characteristics of thermal insulation materials with cellular structures used in the building industry, such as expanded polystyrene, quantification of the reliability of computed radiography becomes an imperative.

The realization, that there is no developed methodology of characterization of non-metallic materials and materials with cellular structures, represents motivation for this research. In order to grasp the content of digital radiographic image, and then to credibly interprete and evaluate it, it is necessary to understand the influence of all individual components of characterization series on the quality of digital radiographic image.

Following that, the aim of this dissertation is to develop new method for the characterization of materials with cell structures, like expanded polystyrene, using computed radiography technique.

Key words: computed radiography technique, characterization of expanded polystyrene, optimizing scanning and exposure parameteres, modeling of response function of characterization series.

1. UVOD

1.1 Definicija problema

Sustavi računalne radiografije uvedeni su u medicinsku radiološku dijagnostiku prije otprilike dva desetljeća i učinili su pionirski korak u digitalnoj radiografiji. Sustavi računalne radiografije koriste fotostimulirajući zaslon koji tijekom eksponiranja energiju rendgenskog zračenja dijelom pretvara odmah u svjetlost, a dijelom pohranjuje kao latentnu sliku koja se naknadno očitava pomoću skenera slikovnih ploča čija je uloga pretvorba latentne slike u digitalni zapis.

Implementacija sustava računalne radiografije u području industrijske radiografije intenzivira se tijekom posljednjeg desetljeća. Njena primjena u području građevinske industrije danas još nije uobičajena. Posljedica je to ponajprije karakteristika toplinsko-izolacijskih materijala koji se koriste u građevinarstvu, kao što je to primjerice ekspandirani polistiren, a koji se ponajviše koriste kao toplinska izolacija u suvremenim građevinama gdje se inzistira na energetski učinkovitoj, a ujedno jeftinijoj gradnji.

Mehanička i toplinska svojstva ekspandiranoga polistirena u korelaciji su s njegovom strukturnom gustoćom. Prema tome, karakterizaciju ekspandiranoga polistirena moguće je provesti indirektno određivanjem mjerljivih značajki njegove strukture. U cilju praćenja i

optimizacije procesa proizvodnje potrebno je analizirati mala područja volumena toplinsko izolacijskih ploča. Na malim područjima volumena moguće je ustanoviti varijacije promatrane značajke, dok se one na većem volumenu značajno uprosječuju. Analizom pravilno odabranih mjerljivih značajki digitalnog zapisa radiografske slike ovih područja od interesa, ROI (od eng. *Region of Ineterest*), pretpostavlja se da je moguće dobiti podatke o varijacijama traženih karakteristika na promatranom području (na primjer varijacija gustoće).

Pri korištenju sustava računalne radiografije u svrhu karakterizacije materijala prethodno je potrebno utvrditi mogućnosti i ograničenja sustava. Istraživanje značajki cRT sustava u karakterizaciji ekspandiranoga polistirena, koji je plastomerni materijal ćelijaste strukture niske gustoće i malog masenog koeficijenta prigušenja X zračenja, još nije zabilježeno.

Digitalni zapis radiografske slike uzorka materijala konačni je rezultat sveukupnog procesa koji se događa u „karakterizacijskom nizu“:

- proces eksponiranja slikovnih ploča X zračenjem,
- analogno-digitalna konverzija latentnog zapisa slikovne ploče u skeneru i
- analiza digitalnog zapisa radiografske slike.

Tijekom procesa eksponiranja X zračenjem i analogno-digitalne konverzije latentnog zapisa slikovne ploče u skeneru događa se pretvorba (transformacija) signala odziva.

Upravo zbog potencijalne primjene u karakterizaciji navedenih materijala u procjenama kontrole kvalitete proizvodnje ekspandiranoga polistirena, kvantifikacija pouzdanosti računalne radiografije predstavlja imperativ. To uključuje definiranje svojstvenih odziva elemenata karakterizacijskog niza te brojčano određivanje u kolikoj mjeri i na koji način postavljeni parametri procesa transformacije signala odziva utječu na pouzdanost rezultata ispitivanja.

1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja

Iako se, najšire govoreći, načelo primjene tehnike računalne radiografije odnosi i na neinvazivnu medicinsku dijagnostiku, uporaba računalne radiografije u ovoj disertaciji isključivo je ograničena na industrijsku radiografiju.

Metodologija primjene računalne radiografije na metalima u intenzivnom je razvoju još od 1980-tih godina, dok metodologija primjene računalne radiografije na nemetalima nije pratila taj razvoj jednakim intenzitetom [1]. Također, njena primjena u području građevinske industrije u današnje vrijeme još nije uobičajena. Razlog tome su obilježja strukture građevinskih materijala, što čini metodu kompleksnijom u načinu njene provedbe, kao i u otežanoj interpretaciji rezultata. Nadalje, svojstvo apsorpcije X zračenja materijala ćelijaste strukture kao i međudjelovanje između X zračenja i građevinskih materijala (većinom nemetalnih), su nedovoljno istraženi. Navedeno predstavlja jednu od motivacija istraživanja.

Ekspandirani polistiren se ponajviše koristi kao toplinska izolacija u suvremenim građevinama. Norma HRN EN 13163 [2] daje zahtjeve koje mora ispuniti ekspandirani polistiren koji se koristi kao toplinska izolacija. Njegova mehanička i toplinska svojstva u korelaciji su s njegovom prividnom gustoćom[1]. Analizom pravilno odabranih mjerljivih značajki digitalnog zapisa radiografske slike za područja od interesa postavlja se hipoteza da je moguće dobiti podatke o varijacijama traženih karakteristika na promatranom području s odredivom i dostatnom razinom signifikantnosti.

Značajke računalne radiografije u karakterizaciji ekspandiranoga polistirena, koji je plastomerni materijal ćelijaste strukture niske gustoće i malog masenog koeficijenta prigušenja X zračenja, još nisu istražene. Za korištenje računalne radiografije potrebno je utvrditi mogućnosti i ograničenja što podrazumijeva kvantitativno određivanje u kolikoj mjeri i na koji način postavljeni parametri procesa kontinuirane transformacije signala odziva utječu na pouzdanost rezultata ispitivanja.

M. B. Williams [3] smatra da je primarni šum svojstven slikovnim pločama. Primarni šum predstavlja unutrašnji šum definiran u odnosu na položaj na slikovnoj ploči, te se naziva i šum fiksnog uzorka. Kao uzrok autor navodi prostornu varijaciju u debljini slikovne ploče i efikasnost očitanja fotoluminiscentnog signala ovisnog o položaju na slikovnoj ploči. Za potrebe ove disertacije smatrat će se da se prostorna varijacija u debljini slikovne ploče može zanemariti.

[1] Kad se govori o gustoći ekspandiranog polistirena mora se napomenuti da se radi o takozvanoj prividnoj gustoći, odnosno masi po jedinici volumena materijala, uključujući i volumen praznina inherentnih materijalu.

Odabirom slikovnih ploča visoke razlučivosti (HR) sa $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ fotoosjetljivim slojem osigurati će se kompatibilnost valne duljine na koju reagiraju kristali fotoosjetljivog sloja tijekom pobude ploče s valnom duljinom pobudne zrake korištenog lasera u skeneru.

R. H. Miettunen i O. A. Korhola [4] u svojem radu naglasak stavljaju na problematiku raspršenja emitiranog svjetlosnog zračenja vezanu direktno na dinamičku karakteristiku detektora X zračenja. Određeni gubitak signala u odnosu na šum događa se kod očitavanja slikovnih ploča u skeneru slikovnih ploča kada tijekom procesa očitanja dolazi do pojave raspršenja emitiranog svjetlosnog zračenja koje se očitava. Smanjenje ovog gubitka rezultira povećanjem odnosa signal-šum.

J. A. Rowlands [5] i R. K. Swank [6] svoja istraživanja usmjeravaju prema analizi svojstvenih utjecaja detektora X zračenja preko funkcije učinkovitosti digitalnog detektora X zračenja. Predlažu uvođenje korekcijskog faktora za niz utjecajnih parametra vezanih za raspodjelu apsorbirane energije, poboljšanje optičkih svojstava slikovnih ploča i slično.

Svoje osobno viđenje doprinosa elemenata ispitnog sustava na rezultate ispitivanja u tehnici računalne radiografije izlaže R. Schaetzing [7]. Kao elemente ispitnog sustava razmatra izvor zračenja, slikovnu ploču i skener. Šum povezan sa slikovnim pločama dijeli na čimbenike povezane s fizikalnom strukturom slikovnih ploča kao što su raspodjela zrna, nejednolika veličina zrna, dodatni slojevi i faktore vezane za učinak slikovnih ploča kao što su sposobnost i učinkovitost apsorpcije rendgenskog zračenja, raspršenje prikupljenog rendgenskog zračenja unutar slikovnih ploča uslijed strukture fotoosjetljivog sloja te efikasnost pretvorbe rendgenskog zračenja u svjetlosni signal. U slučaju očitanja slikovnih ploča, smatra da gotovo svaka njegova komponenta utječe na pojavu šuma. Za razliku od prethodno navedenih autora, R. Schaetzing determinira sinergijsko djelovanje komponenti sustava na varijabilnost rezultata očitanja.

Metode nerazornih ispitivanja koje se koriste u građevinarstvu su po svom osnovnom principu jednake metodama u strojarstvu, području u kojem se najčešće primjenjuju. Međutim, zbog karakteristika strukture i dimenzija materijala koji se koriste u građevinarstvu ove su metode kompleksnije u načinu njihove provedbe i interpretacije rezultata [8].

Dobar je primjer ekspandirani polistiren kao vrlo raširen građevinski materijal čija je osnovna uloga toplinska i zvučna izolacija. Njegova karakteristična struktura ograničava primjenu metoda nerazornih ispitivanja. Postizanje zadovoljavajuće osjetljivosti i pouzdanosti uvjetovano je pravilnim odabirom tehnike, parametara ispitivanja, opreme i uvjeta ispitivanja.

Ekspandirani polistiren namijenjen za toplinsku izolaciju je plastomerni materijal ćelijaste strukture i niske prividne gustoće, najčešće u rasponu od 15 kg/m^3 do 40 kg/m^3 ([9], [10]). Osnovni pokazatelj svojstava ekspandiranog polistirena je njegova prividna gustoća, koja definira njegova toplinska i mehanička svojstva ([11], [12]).

Konvencionalnom metodom mjerenja gustoće prema HRN EN 1602 dobiva se prosječna vrijednost prividne gustoće za cijelu toplinsko-izolacijsku ploču bez saznanja o nehomogenostima unutar toplinsko-izolacijske ploče pa se sukladno tome toplinska i mehanička svojstva ekspandiranoga polistirena ne mogu dovoljno precizno procijeniti. Hipotetski, moguća je i situacija da je prividna gustoća jednolika po cijeloj toplinsko-izolacijskoj ploči, no zbog različite strukture moguće su varijacije u mehaničkim svojstvima toplinsko-izolacijske ploče.

Do sličnog je zaključka u svom radu došao i N. J. Mills [13]. Na temelju istraživanja moguće je zaključiti da će predložena metoda u ovoj disertaciji značajno doprinijeti u tom smislu što će izravno omogućiti dobivanje informacije o varijabilnosti prividne gustoće ispitivane toplinsko-izolacijske ploče kao i varijabilnosti strukture uz istu prividnu gustoću.

R. Michaels [14] u svom radu primjenjuje modificirani digitalni radiografski sustav za analizu Low Foam Casting (LFC) postupka. Iako je primarno cilj istraživanja bio analiza LFC postupaka također je provedena i analiza ekspandiranoga polistirena. U radu je opisan prototip uređaja, osnovni dijelovi uređaja, princip rada te mogućnosti određivanja strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena. Doprinos rada R. Michaels [14] je u postavljanju parametara potrebnih za radiografsko eksponiranje ekspandiranoga polistirena. U svom radu R. Michaels koristi rendgenski uređaj konstruiran za rad na energijama od 4 kV do 50 kV pri struji od 1 mA uz promjer fokusa od 60 μm. U eksperimentalnom dijelu istraživanja u okviru disertacije bit će korišten dostupan komercijalni rendgenski uređaj u cilju dobivanja digitalnog zapisa radiografske slike na energijama manjim od 40 kV. Energija od 40 kV utvrđena je kao gornja granica za eksponiranje ekspandiranoga polistirena pri kojoj intenzitet zacrnjenja piksela

digitalnog zapisa radiografske snimke nije u području zasićenja na dinamičkoj karakteristici radiograma.

Z. Janović, K. Sarić, A. Jukić i S. Jurjašević [15], te G. Salejova i J. Kosek [16] određuju međuovisnost prividne gustoće i veličine ćelija ekspandiranoga polistirena. Analizom rezultata utvrđeno da se 79,2 % varijacije u gustoći ploča ekspandiranoga polistirena može pripisati varijacijama u promjeru ekspandiranih zrna [17]. Također, mehanička svojstva ploča od ekspandiranoga polistirena najvećim dijelom ovise upravo o strukturi materijala na mikro razini (ćelije unutar zrna) i makro razini (razina zrna), prividnoj gustoći te primijenjenom opterećenju [17].

1.3 Materijal, ispitanici, metodologija i plan istraživanja

Ovo istraživanje je motivirano spoznajom da ne postoji razvijena metoda za karakterizaciju materijala ćelijaste strukture računalnom radiografijom. Dodatna motivacija je potencijal implementacije računalne radiografije u polju građevinske industrije.

Za razliku od konvencionalne metode, istraživana metoda za karakterizaciju materijala ćelijaste strukture je nerazorna metoda ispitivanja. Po samoj definiciji to znači da ne unosi trajne promjene u ispitivani materijal te je moguće određivanje svojstava bez utjecaja na buduću upotrebljivost predmeta ispitivanja.

Konvencionalnom metodom se dobiva prosječna vrijednost gustoće bez saznanja o nehomogenostima unutar cijele toplinsko-izolacijske ploče. Predložena metoda predstavlja značajan doprinos u tom smislu što izravno omogućuje dobivanje informacije o varijabilnosti gustoće ispitivane toplinsko-izolacijske ploče.

Za provedbu eksperimentalnog dijela rada koristit će se komercijalno dostupne ploče ekspandiranoga polistirena. Oprema za provedbu postupka izlaganja rendgenskom zračenju dostupna je u Zrakoplovno-tehničkom centru, Velika Gorica. Glavna karakteristika ovog rendgena je stabilnost rendgenskih zraka u području malih energija zračenja. Sustav računalne radiografije VMI 5100MS dostupan je i u funkciji u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja, pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Osnovni element sustava je skener slikovnih ploča. Karakterizira ga pomični sustav koji u jednom prolazu laserom stimulira latentni zapis radiografske snimke i provodi proces očitanja svjetlosnog signala.

Promjer laserskog snopa podesiv je između 50 μm i 200 μm. Brisanje latentnog zapisa slike odvija se u povratu lasera u prvobitni položaj.

Drugi element sustava računalne radiografije je $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovna ploča potrebnog svojstva visoke razlučivosti [18]. Osim aktivnog sloja ova slikovna ploča sadrži i dodatne slojeve čija je svrha optimiranje mehaničkih i optičkih karakteristika slikovne ploče ([19], [20]).

Treći element sustava je monitor razlučivosti 2048 × 1536 piksela. Osnovna karakteristika monitora je mogućnost prikaza digitalnog zapisa radiografske snimke u 10-bitnoj rezoluciji (1024 nijansi sive). Integrirani računalni program ima mogućnost i 16-bitnog zapisa. Da bi se iskoristila mogućnost obrade digitalnog zapisa radiografske slike u visokoj razlučivosti, koristit će se dostupni komercijalni programski paketi koji omogućuju analizu bez gubitka podataka njihovom kompresijom. Također, programska podrška postojećeg sustava omogućava obradu digitalnog zapisa radiografske slike po odabranoj liniji. Za izradu programa za analizu digitalnog zapisa radiografske slike po odabranoj površini također će se koristiti dostupni komercijalni programski paketi.

U prvom dijelu istraživanja biti će provedeno optimiranje parametara u procesu kontinuirane pretvorbe (transformacije) signala odziva. Identificirati će se pojedini elementi karakterizacijskog niza. To se odnosi na proces eksponiranja rendgenskom zračenju i analogno-digitalnu konverziju latentnog zapisa slikovne ploče u skeneru. Za definiranje metode karakterizacije materijala ćelijaste strukture potrebno je odrediti slijedeće parametare eksponiranja: udaljenost izvora zračenja od slikovne ploče, relativni položaj uzorka u odnosu na slikovnu ploču i izvor rendgenskog zračenja, napon u kilovoltima, struju u miliamperima, vrijeme u sekundama, te način filtriranja energije rendgenskog zračenja.

Za provedbu eksperimentalnog dijela rada koristiti će se toplinsko-izolacijske ploče ekspandiranoga polistirena dimenzija 1000 mm x 500 mm. Proizvedene su u 3 različite debljine (60 mm, 80 mm i 100 mm) i 5 različitih vrijednosti tlačnog naprezanja (od 50 kPa do 200 kPa). Sukladno tome, toplinsko-izolacijske ploče imaju 5 različitih vrijednosti gustoća (od 12 kg/m^3 do 40 kg/m^3).

Obzirom da gustoća nije jednolika po cijeloj toplinsko-izolacijskoj ploči, za ispitivanje i analizu će biti pripremljen statistički relevantan skup uzoraka. Iz svake toplinsko-izolacijske

ploče bit će nasumično izrezano pet ispitnih uzoraka, za svaku debljinu i deklariranu vrijednost tlačnog naprezanja. Obzirom da je cilj dobiti podatke o varijacijama značajke od interesa unutar manjeg volumena, odabrane su dimenzije ispitnih uzoraka 200 mm x 200 mm x *d*, gdje je *d* - debljina ploče u milimetrima. Ispitivanje će bit provedeno varijacijom utjecajnih parametara procesa eksponiranja X zračenjem i očitanjem u skeneru slikovnih ploča.

Metodologija očitanja slikovnih ploča također mora biti konzistentna. Pri tome će naročita pažnja biti posvećena vremenskom periodu između radiografske ekspozicije i očitanja slike. Manje vremenske periode između radiografske ekspozicije i očitanja slike potrebno je držati konstantnima da bi se smanjila varijacija u rezultatima nastala uslijed gubitka latentnog zapisa na slikovnoj ploči [21]. Prisutan spontani proces fosforescencije dovodi do gubitaka latentne slike tijekom vremena. Odmah nakon eksponiranja slikovnih ploča X zračenjem uobičajene slikovne ploče izgube i do 25 % zarobljenog odziva unutar 8 minuta od trenutka izlaganja X zračenju ([22], [23]). U istraživanju će se osigurati jednolik vremenski razmak između eksponiranja i očitanja u skeneru slikovnih ploča čime će se efekt gubitka latentne slike svesti na istu razinu gubitka informacije.

Efikasnost laserskog skenera slikovnih ploča predstavlja efikasnost pretvorbe latentnog zapisa sa slikovne ploče. Efikasnost pretvorbe definirana je količinom energije koja se ekstrahira procesom laserske pobude [24]. Količina energije pretvorena u korisni signal ovisna je o nizu parametara, među kojima su analizu utjecaja na odziv odabrani slijedeći: efektivni promjer laserske zrake koji je podesiv od 50 μm do 200 μm u koracima od 10 μm [25], gustoća snage (intezitet zračenja lasera) (LP, od eng. *laser power*) i napon pojačanja PMT, to jest pojačanje očitanog svjetlosnog odziva sa slikovne ploče nakon pobude laserom.

Korištenjem odgovarajućih statističkih metoda provesti će se kvantificiranje svih pojedinačnih doprinosa nabrojanih elemenata karakterizacijskog niza. Također će se provesti analiza njihova sinergijskog djelovanja na varijabilnost rezultata ispitivanja.

U drugom dijelu istraživanja biti će identificirane i odabrane mjerljive značajke u procesu analize digitalnog zapisa radiografske slike u svrhu pouzdanog utvrđivanja varijabilnosti tražene značajke na promatranom području. Značajke slike se mogu utvrditi vizualnom interpretacijom, ali i izvesti računskim operacijama odnosno obradama izravno iz vrijednosti pojedinih piksela. Iskoristivost informacija sadržanih u digitalnom zapisu ovisna je

o načinu pristupa informaciji, načinu pretraživanja, ali prije svega o postupku određivanja korisnih značajki slika. Prema tome, potrebno je odabrati one značajke digitalnog zapisa radiografske slike na osnovu kojih se sadržaj slike može opisati, pravilno interpretirati ili „razumijeti“. Predložena metoda obuhvatit će proces spremanja slike bez gubitka korisne informacije, postupak ekstrakcije mjerljivih značajki i odabir veličine područja od interesa. Nadalje, predložit će se i provesti postupak analize ekstrahiranih vrijednosti iz 16-bitnog digitalnog zapisa radiografske slike odabranog volumena pomoću deskriptivne statistike.

U trećem dijelu istraživanja provesti će se eksperimentalno potvrđivanje predložene metode za karakterizaciju ekspandiranoga polistirena. Verifikacija rezultata provesti će se usporedbom rezultata gustoće dobivene konvencionalnom metodom prema normi ispitivanja HRN EN 1602 [26] s rezultatima mjerenja strukturne gustoće dobivene predloženom metodom. Potvrđivanjem metode ostvarit će se preduvjet za implementaciju računalne radiografije u područje kontrole i praćenja kvalitete procesa proizvodnje ekspandiranoga polistirena.

1.4 Hipoteza

Cilj istraživanja je razvoj nove metode karakterizacije materijala ćelijaste strukture pomoću računalne radiografije. Na temelju navedenog postavljaju se slijedeće hipoteze istraživanja:

- Optimiranjem parametara procesa svih faza transformacije signala odziva moguće je postići da varijabilnosti odziva koje su svojstvene karakterizacijskom nizu u cijelosti budu manje od varijabilnosti strukturnih značajki ispitivanog materijala i pripadajućih odziva.
- Analizom i evaluacijom odabranih mjerljivih značajki digitalnog zapisa radiografske slike na promatranom području moguće je kvantitativno procijeniti strukturne značajke ekspandiranoga polistirena točnije i preciznije nego drugim metodama.

1.5 Očekivani znanstveni doprinos

Očekivani znanstveni doprinosi ove disertacije su slijedeći:

- Razvoj nove metodologije karakterizacije materijala ćelijaste strukture računalnom radiografijom.
- Doprinos razumijevanju pojedinačnih utjecaja parametara procesa eksponiranja slikovnih ploča rendgenskim zračenjem, te analogno-digitalne konverzije latentnog zapisa slikovnih ploča kod procesa očitanja.
- Karakterizacija sinergijskog djelovanja elemenata karakterizacijskog niza na varijabilnost rezultata ispitivanja.
- Izdvajanje mjerljivih značajki u procesu analize digitalnog zapisa radiografske slike u svrhu utvrđivanja varijabilnosti tražene strukturne značajke na promatranom području.

2. RAČUNALNA RADIOGRAFIJA

Metoda radiografije (RT) temelji se na sposobnosti elektromagnetskog zračenja velikih energija i malih valnih duljina da prodire kroz različite materijale. Osnovna joj je značajka mogućnost ispitivanja ispitnih uzoraka po cijelom volumenu neovisno o njegovoj geometrijskoj složenosti. U industrijskoj primjeni poznata je i pod nazivom industrijska radiografija.

2.1 Razvoj, princip, nomenklatura i taksonomija bezfilmnih tehnika

Era digitalne radiografije započinje 1975. godine, kada kompanija Eastman Kodak patentira prvu bezfilmnu tehniku. Ovim je prestala vrijediti paradigma o industrijskom filmu kao jedinom mediju za prikupljanje, prikaz i analizu slike.

Tijekom 80-tih godina pojavilo se nekoliko tehnika koje se zasnivaju na digitalnim detektorima, te postaju održiva alternativa uobičajenoj radiografskoj tehnici s filmom. Ove sustave paralelno razvijaju velike kompanije poput 3M, Agfa, Fujistu, Siemens i Toshiba. U medicinsku uporabu ulaze tek kasnih 80-tih kada globalno tržište medicinske dijagnostike počinje prihvaćati ovu novu tehnologiju.

Tek 2004. godine pojavljuju se potpuni sustavi s integriranim računalnim programom za prikaz i analizu slike u području industrijske radiografije.

Osnovni fizikalni principi tehnike temeljene na filmu i tehnike temeljene na digitalnim detektorima su jednaki. Jedina je razlika medij koji služi za prikupljanje (prolaznog) zračenja i stvaranje slike. Tako, konvencionalni industrijski film služi i kao detektor i kao medij za spremanje informacija o stanju ispitnog uzorka koji se ispituje, dok se digitalni detektori upotrebljavaju isključivo za generiranje slike u digitalnom zapisu.

Neovisno o vrsti digitalnog detektora, većina autora ([7], [27], [28], [29], [30]) suglasna je da se tehnologija razvijena za stvaranje slike u digitalnom zapisu temelji na ovom slijedu:

1. eksponiranje objekta ispitivanja X zračenjem i apsorpcija X zračenja ovisno o karakteristikama ispitnog uzorka,
2. stvaranje latentne slike (međudjelovanje između prolaznog zračenja i materijala aktivnog sloja digitalnog detektora),
3. konverzija latentne slike u digitalni signal.

Budući da je digitalna radiografija novo tehničko i znanstveno područje, nije neuobičajeno da u literaturi ([27], [28], [29], [30]) postoji čitav niz različitih taksonomija, ali i nomenklatura. M.B. Williams [28], i McKnight [30] navode da je CR (od eng. *Computed Radiography*) akronim za računalnu radiografiju i DR (ovisno o autoru, od eng. *Digital Radiography* ili *Direct Radiography*) je akronim za digitalnu radiografiju.

Zbog brzog razvoja tehnologije, isti autori navode da jasna klasifikacija u jednu ili drugu tehniku više nije moguća. Predlažu kategorizaciju na temelju: a) oblika (sustavi temeljeni na kazeti ili sustavi koji se temelje na tehnologiji bez kazete), b) vremena potrebnog za akviziciju slike i c) metodologije konverzije signala.

Drugi način kategorizacije tehnika digitalne radiografije objašnjavaju Ramesh J. Patel [29] i Markus Körner i ostali [27]. Oni navode da se tehnika digitalne radiografije dijeli na računalnu radiografiju (akronim CR) i direktnu radiografiju (akronim DR). Nadalje, pojedini autori smatraju da se razlike između pojedinih tehnika temelje upravo na postojanju ili nedostatku potrebe za naknadnim procesiranjem nastale slike ([31], [32], [33]). Nastavak ove disertacije temeljen je upravo na ovoj taksonomiji. Na temelju usvojene taksonomije, može se

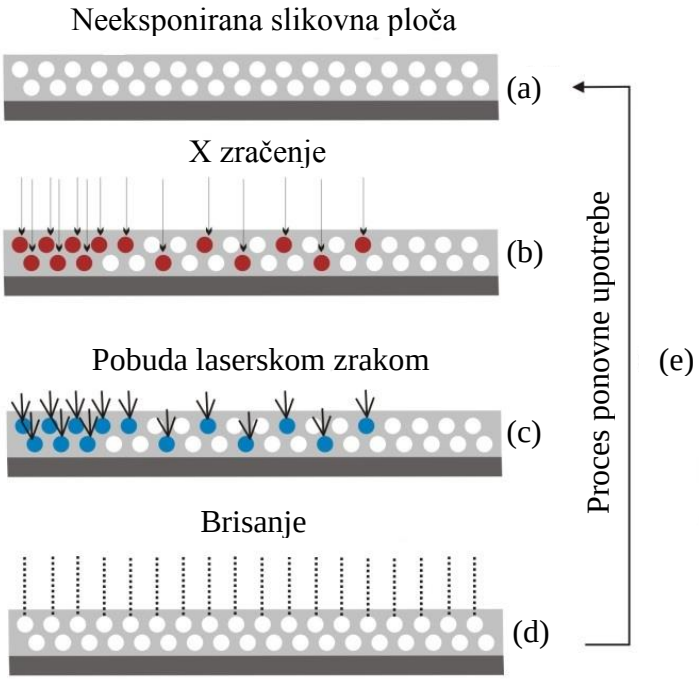
reći da CR sustavi koriste slikovne ploče koje zahtijevaju odvojen sustav za naknadno očitanje latentne slike. S druge strane, DR sustavi ne zahtijevaju naknadno procesiranje slike. DR se nadalje može podijeliti na direktne i indirektne načine pretvorbe, ovisno o vrsti digitalnih detektora.

Obzirom da je u provedbi eksperimentalnog dijela rada korištena oprema temeljena na slikovnim pločama i posebnom sustavu za provedbu postupka digitalizacije latentne slike, u nastavku rada naglasak će biti upravo na tehnici računalne radiografije.

2.2 Računalna radiografija

Posebnost sustava tehnike računalne radiografije, u daljnjem tekstu cRT, je upotreba slikovnih ploča, IP (od eng. *Imaging Plate*).

Kako je prikazano na slici **Sl.- 1.** karakteristika ovog sustava je intermedijarni stadij pretvorbe energije X zračenja u svjetlosni zapis slikovne ploče – latentnu sliku, nakon čega slijedi očitanje i konverzija svjetlosne informacije u digitalni zapis slike. Slikovna ploča kao detektor X zračenja, pohranjuje „dobivenu“ energiju rendgenskog zračenja u fosforescentom sloju (**Sl.- 1 a**).



Sl.- 1. Proces eksponiranja, očitanja i brisanja slikovnih ploča [34].

Djelovanje X zračenja pobuđuje elektrone pa ioni prelaze na višu energijsku razinu u pojedinim dijelovima fosforescentnog sloja, a međusobni raspored elektrona na višoj energijskoj razini čini latentnu sliku (**Sl.- 1 b**).

Slijedi optička pobuda pokretnom laserskom zrakom koja pobuđuje fosforescentni materijal točku po točku (**Sl.- 1 c**) pri čemu se elektroni s više energijske razine vraćaju na nižu energijsku razinu. Time se oslobađa višak energije u obliku svjetlosti koja se detektira fotodetektorom i pretvara u električni signal, te u A/D konverteru u digitalni zapis slike. Latentni zapis slike se briše i slikovna ploča se ponovo upotrebljava (**Sl.- 1 d** i **e**) [34].

2.2.1 Princip cRT tehnike

Tijekom eksponiranja, energija rendgenskog zračenja koja nije apsorbirana u ispitnom uzorku biva apsorbirana i privremeno spremljena u aktivnom sloju slikovne ploče ([35], [36]). Aktivni sloj slikovne ploče predstavlja fotoosjetljivi fosforescentni materijal u kojem elektroni prelaze na višu energijsku razinu.

Na taj način nastaje latentna slika u obliku pobuđenih elektrona. Elektroni na višoj energijskoj razini ostaju i do nekoliko sati, ovisno o fizikalnim svojstvima korištenog materijala.

Proces očitanja slikovnih ploča predstavlja poseban korak. Nužno ga je provesti u razumno kratkom roku nakon eksponiranja iz razloga što se broj elektrona na višoj energijskoj razini smanjuje s vremenom. Procesom pobude fosforescentnog materijala laserskom zrakom određene valne duljine elektroni prelaze na početnu energijsku razinu, pri čemu dolazi do emisije svjetlosti.

Valna duljina emitirane svjetlosti je različita od valne duljine pobudnog laserskog snopa. Obzirom da se nalazi u vidljivom dijelu spektra, može se registrirati fotomultiplikatorom, te dobiveni napon konvertirati u digitalni signal. Navedeni se proces odvija u skeneru slikovnih ploča.

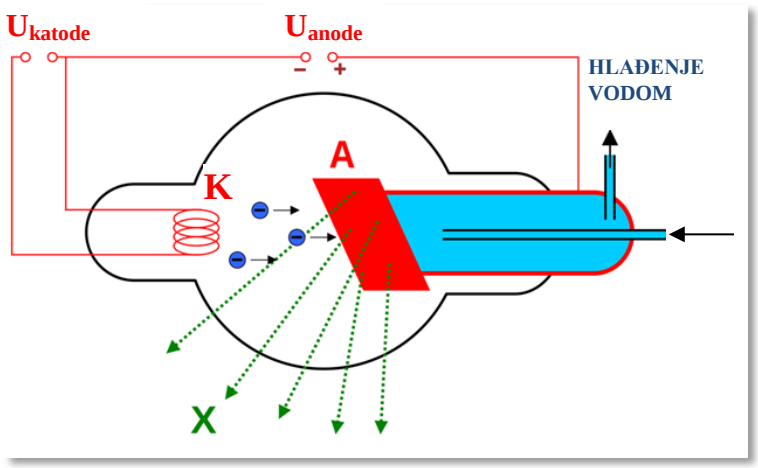
Svjetlom visokog intenziteta uklanja se zaostali latentni zapis, odnosno preostali elektroni u fosforescentnom materijalu koji su na višoj energijskoj razini. Taj proces nazivamo brisanjem slikovnih ploča. Nakon brisanja slikovne ploče su spremne za ponovnu upotrebu, odnosno eksponiranje [7].

2.2.2 Izvor zračenja

U eksperimentalnom dijelu rada kao izvor zračenja korišten je rendgenski uređaj. U ovom poglavlju ukratko je opisana anoda rendgenskog uređaja s fokusom, te način kontrole emisije X zraka.

2.2.2.1 Fokus rendgenske cijevi

Dio rendgenskog uređaja kojemu je primarna uloga stvaranje X zraka je rendgenska cijev prikazana slikom **Sl.- 2**. Na slici su označeni U_{katode} – napon na katodi, U_{anode} – napon na anodi, K – oznaka katode, A – oznaka anode i X – rendgenske zrake s anode. Anoda je postavljena pod kutom da bi se osigurala što manja efektivna veličina fokusa [37].

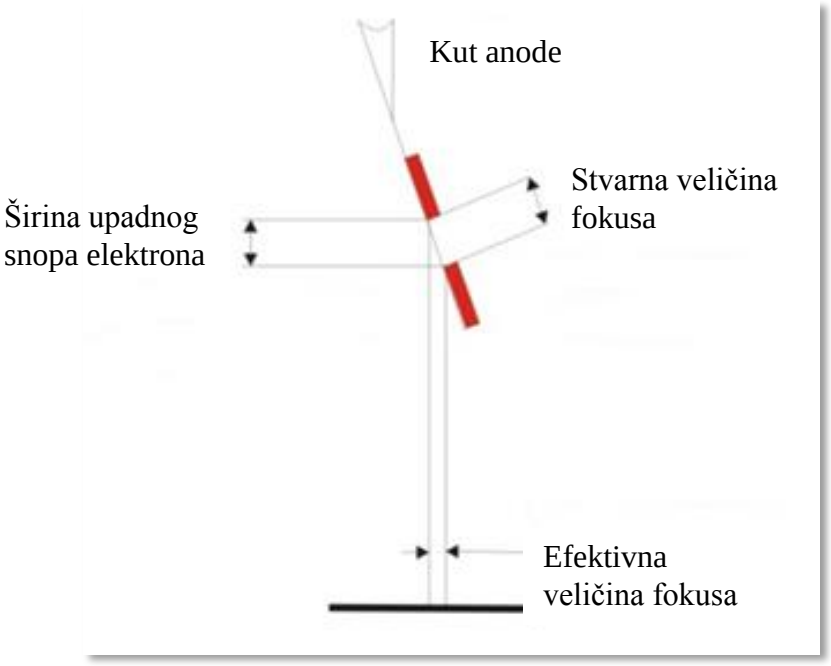


Sl.- 2. Shematski prikaz rendgenske cijevi s položajem anode.

Kako je vidljivo sa slike **Sl.- 3** postoje dvije veličine fokusa.

- Stvarna veličina fokusa je površina na anodi u koju je usmjeren snop elektrona iz katode.
- Efektivna veličina fokusa je projekcija stvarne veličine na ravninu okomitu na centralnu zraku snopa.

Slika **Sl.- 3** prikazuje stvarnu veličinu fokusa. Vidljivo je da je stvarna veličina fokusa značajno veća od efektivne veličine fokusa. Utjecaj veličine fokusa na razlučivost detaljnije je opisan u poglavlju 2.3.4 ove disertacije.



Sl.- 3. Stvarna i efektivna veličina fokusa.

2.2.2.2 Kontrola emisije X zračenja

Valna duljina i karakteristika prodornosti X zračenja kontroliraju se pomoću dvije varijable ([37], [38], [39]):

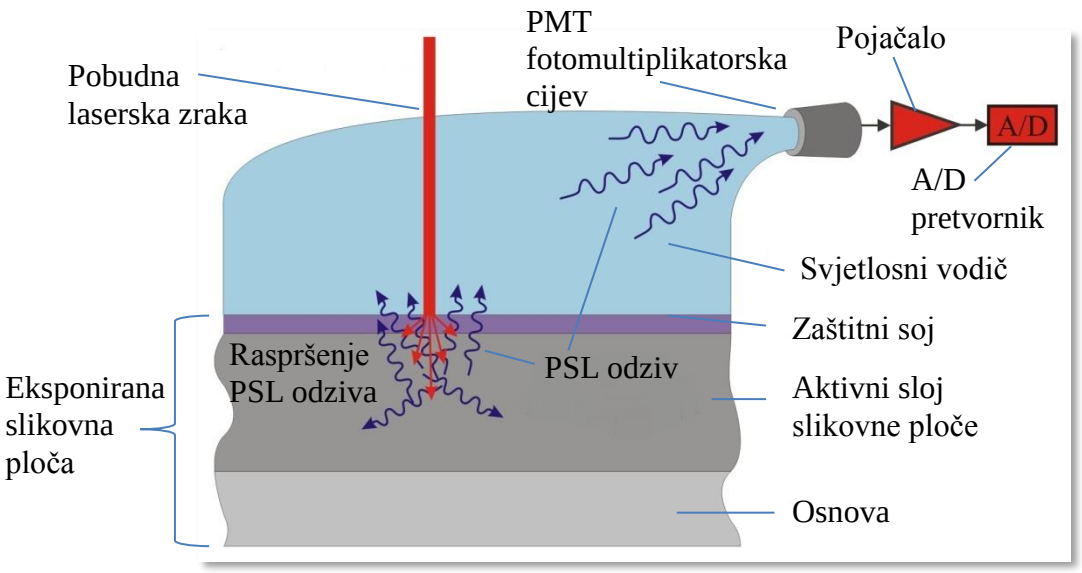
- *temperaturom katode*. Kroz katodu koja je izvedena kao zavojnica teče struja niskog napona, jakosti nekoliko ampera. Katoda se grije na temperaturu i do 2600 ˚C. Povećanjem jakosti struje povećava se i broj elektrona otpuštenih s katode. Sukladno tome povećava se intenzitet snopa. Minimalna valna duljina i maksimalna valna duljina X zraka se ne mijenja.
- *naponom*. Napon između negativno nabijene katode i pozitivno nabijene anode se izražava kao vršni napon u kilovoltima. Povećanjem napona povećava se brzina elektrona koji udaraju u anodu, te se proizvode X zrake manjih valnih duljina, odnosno većih energija. Prodornost zraka ovih karakteristika je veća nego kod X zraka većih valnih duljina.

2.2.3 Slikovne ploče

Princip rada slikovnih ploča, odnosno njihovog fotoosjetljivog fosforescentnog sloja, u daljnjem tekstu PSP sloj (od eng. *Photo-Stimulable Phosphor*), temelji se na procesu fotoluminiscencije, u daljnjem tekstu PSL (od eng. *Photostimulated Luminiscence*) ([5], [21]).

Pretvorba apsorbirane energije X zračenja u PSP sloju odvija se trima fizikalnim principima ([5], [40]):

1. ***Fluorescencija*** je proces koji započinje kad i proces eksponiranja zračenju i predstavlja brzo oslobađanje zarobljene energije u vidu svjetlosti.
2. PSP sloj apsorbira i akumulira energiju u takozvane klopke unutar kristalne rešetke. Površinska distribucija zarobljene energije unutar praznina kristalne rešetke predstavlja latentnu sliku. Ova latentna slika s vremenom spontano nestaje procesom ***fosforescencije***. Sposobnost zadržavanja latentne slike detaljnije je objašnjena u poglavlju 2.2.3.4 i slikom **Sl.- 7**.
3. Kada se PSP sloj pobudi svjetlošću odgovarajuće valne duljine, procesom ***stimulirane luminiscencije*** oslobađa se dio akumulirane energije. Emitirana svjetlost predstavlja signal koji se očitava u skeneru, te se na temelju toga stvara digitalna slika (slika **Sl.- 4**).



Sl.- 4. Proces stimulirane luminiscencije [34].

2.2.3.1 Aktivni sloj slikovne ploče

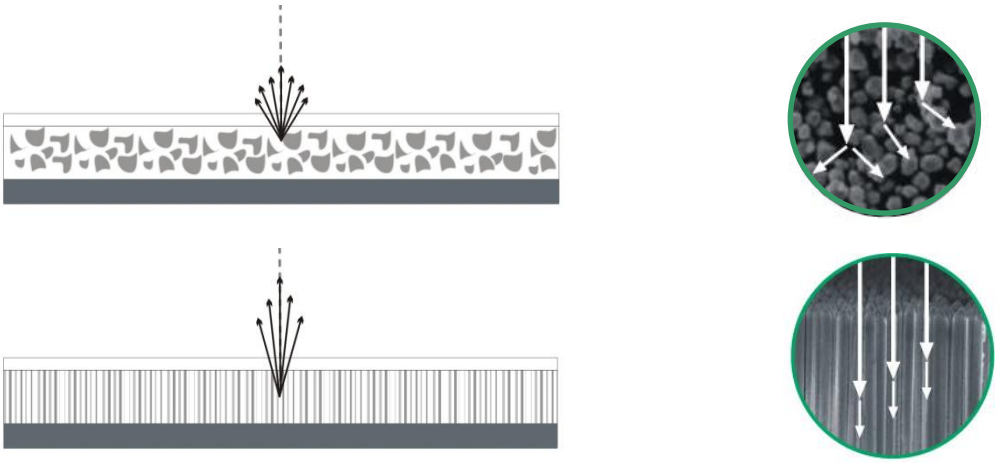
Aktivni dio slikovnih ploča je fotoosjetljivi sloj u kojemu se apsorbiraju X zrake, stvara i pohranjuje latentna slika i odvija stimulirana emisija svjetlosti. Sastoji se od granula fosforescentnog materijala suspendiranog u vezivnoj tvari, najčešće organskom vezivu [5].

Fotoosjetljiv sloj postavljen je na fleksibilni polimerni nosač. Granule su kombinacija različitih halogenih elementa[2]. Samo neke kombinacije granula halogenih elemenata imaju karakteristike pogodne za primjenu u metodi industrijske radiografije. Najčešća grupa fosforescentnog materijala ima oznaku $BaFX:Eu^{2+}$ gdje oznaka X predstavlja halogeni element. Najčešći halogeni elementi su brom (Br), klor (Cl) i jod (I) ili njihova proizvoljna kombinacija. Eu^{2+} predstavlja namjerno dodanu nečistoću ili dopand. Glavni razlog zbog kojeg se tijekom proizvodnje dodaju neznatne količine nečistoća je mogućnost mijenjanja svojstava primarnog elementa u kontroliranom smjeru. Osnovna svojstva na koja se utječe kod slikovnih ploča su svojstvo skladištenja energije rendgenskog zračenja i raspon spektra emitirane svjetlosti nakon pobude laserom. Eu^{2+} ima ulogu aktivatora. U navedenoj grupi fosforescentnog materijala $BaFBr:Eu^{2+}$ ima dobru sposobnost zadržavanja latentne slike.

Osim $BaFX:Eu^{2+}$ shema postoje i drugi fotoosjetljivi slojevi kristala, kao na primjer $RbBr:Tl^{+}$ i $CsBr:Eu^{2+}$ [41]. Jedna od njihovih prednosti je u tome što ih je moguće proizvesti s igličastom (usmjerenom) strukturom, slika **Sl.- 5**. Zahvaljujući ovakvoj strukturi i kod većih debljina aktivnih slojeva postiže se zadovoljavajuća razlučivost. Navedeno se može pripisati olakšanom usmjerenom vođenju emitirane svjetlosti nakon pobude. No brzi gubitak latentne slike $RbBr:Tl^{+}$ fosforescentnog materijala je veliko ograničenje u njihovoj upotrebi.

Posljednjih nekoliko godina proizvođači slikovnih ploča, posebice Kodak i Fuji, počinju intenzivnije upotrebljavati fotoosjetljivi materijal $BaF(Br_xI_{1-x}):Eu^{2+}$ gdje je dodana frakcija (1-x) zapravo ion joda [5]. Jedna od komercijalnih inačica je i $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ od kojeg je napravljen fotoosjetljivi sloj slikovnih ploča koje će biti korištene za provedbu eksperimentalnog dijela doktorskog rada.

[2] Halogeni elementi se nalaze se u 7. skupini elemenata. U periodnom sustavu oni su fluor (F), klor (Cl), brom (Br), jod (I) i astat (At).



Sl.- 5. Aktivni sloj slikovne ploče neusmjerene strukture (gore) i usmjerene strukture (dolje).

Prednost $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ aktivnog sloja je slijedeća:

- valna duljina potrebna za stimulaciju odgovara valnoj duljini pobudne zrake najčešćih komercijalnih lasera,
- sposobnost zadržavanja latentne slike bez značajnijeg gubitka signala, u razumno kratkom vremenu do očitanja, zbog spontanog gubitka uzrokovanog trenutnom emisijom.

Još neki od potencijalnih kandidata za uporabu u cRT su $Ba_2B_5O_9Br:Eu^{2+}$, $Ba_5GeO_4Br_6:Eu^{2+}$, $Y_2SiO_5:Ce^{3+}$ i Sm^{+} [42].

Debljina aktivnog sloja slikovnih ploča definira radi li se o slikovnim pločama visoke razlučivosti oznake HR (od eng. *High Resolution*) ili standardne razlučivosti oznake ST [5] ili GP (od eng. *General Purpose*) [43]. Na primjer, slikovne ploče $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ visoke razlučivosti imaju debljinu aktivnog sloja u rasponu od 140 μm do 150 μm [43]. Slikovne ploče standardne razlučivosti imaju debljinu aktivnog sloja od 230 μm do 300 μm. Ponekad se umjesto debljine izražava plošna masa aktivnog sloja, pa tako na primjer, za debljinu od 140 μm plošna masa aktivnog sloja iznosi 40 mg/cm^2, dok za debljinu od 230 μm plošna masa aktivnog sloja iznosi 70 mg/cm^2 ([5], [44], [45]).

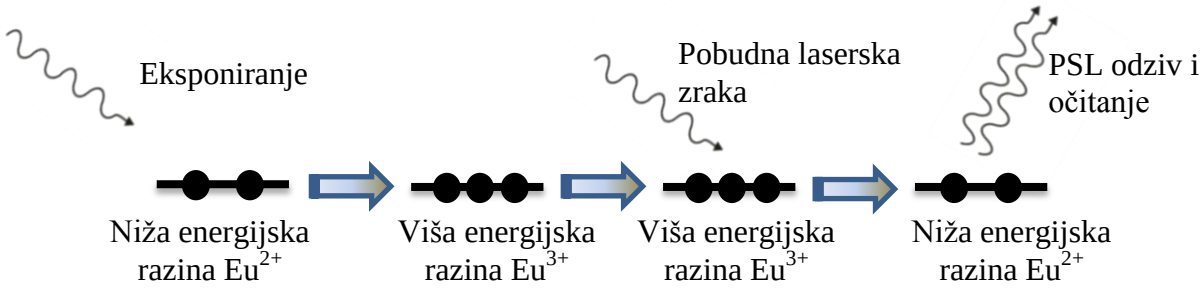
Faktor slaganja predstavlja volumni odnos između količine granula fosforescentnog materijala i količine veziva u ukupnom volumenu aktivnog sloja [36]. Faktor slaganja iznosi 0,56, odnosno 56% za slikovne ploče visoke razlučivosti, i 0,60, odnosno 60 % za standardne slikovne ploče, što je ujedno i maksimalna vrijednost koju je moguće postići [5].

2.2.3.2 Slojevi za optimizaciju optičkih i mehaničkih karakteristika slikovnih ploča

Osim opisanog aktivnog sloja, slikovne se ploče sastoje i od drugih slojeva. Njihov se broj razlikuje ovisno o proizvođaču. Primarno se dodaju radi optimiziranja mehaničkih i optičkih karakteristika slikovnih ploča. Tako na primjer, polimerni površinski sloj debljine od 150 μm do 300 μm ima funkciju zaštite od otisaka prstiju i vlage [43]. S druge strane stražnji sloj, na primjer crni polikarbonatni, debljine od 25 μm do 50 μm, predstavlja istovremeno i optičku granicu i mehaničku zaštitu [43]. Uloga optičkih granica u obliku apsorpcijskog (crnog) sloja i reflektirajućeg (bijelog) sloja, te njihov utjecaj na razlučivost, detaljnije je opisana u poglavlju 2.3.4.

2.2.3.3 Proces apsorpcije energije X zračenja

Trenutno postoje dvije glavne teorije mehanizma apsorpcije energije X zračenja. Prvu predlaže Takahashi [36] i temelji se na biomolekularnom rekombinacijskom modelu, dok drugu predlaže von Seggent [35] i temelji se na PSLC modelu, odnosno modelu metastabilnog fotoluminiscencijskog centra. Apsorpcijom energije X zračenja aktivator Eu^{2+} prelazi na višu energijsku razinu, te postaje Eu^{3+} čime nastaje luminiscentni centar (slika **Sl.-6**) [34].



Sl.- 6. Energijska razina aktivatora Eu^{2+}.

Broj aktiviranih metastabilnih centara odgovara broju elektrona više energijske razine na metastabilnom mjestu i proporcionalan je energiji X zračenja lokalno apsorbiranoj u fotoosjetljivom sloju. Elektrone više energijske razine moguće je vratiti na početnu energijsku razinu pobudnom zrakom odgovarajuće valne duljine. Oslobađanje elektrona odvija se uz emisiju fotona valne duljine u vidljivom djelu spektra. Emisijom fotona elektroni prelaze na početnu energijsku razinu i ion postaje Eu^{2+}.

Učinkovitost apsorpcije slikovnih ploča je definirana srednjom vrijednosti apsorbirane energije X zračenja *W* [5]. To je energija potrebna da bi se oslobodio jedan foton. **Tablica 1** daje usporedbu svojstava najčešćih komercijalnih fotoosjetljivih slojeva. Žutom bojom označen je $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ fotoosjetljivi sloj koji će se koristiti za provedbu eksperimentalnog dijela doktorskog rada.

Tablica 1. Fizikalna svojstva komercijalno dostupnih fotoosjetljivih slojeva [5].

Korištene kratice u tablici su:

- *W* – učinkovitost apsorpcije,
- *G* – emitirani fotoni za 50 kV apsorbirane energije X zračenja,
- VI – vrijeme PSL odziva,
- MVD – maksimalna valna duljina emisije, i
- VDP – valna duljina pobude.

Fotoosjetljivi sloj	Gustoća [g/cm^3]	*W* [eV]	*G* [fotona/50 kV]	VI [μs]	MVD [nm]	VDP [nm]
$BaFBr:Eu^{2+}$	5,1	360	140	0,7	390	500-650
$BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$	5,1	360	140	0,7	390	550-700
$BaFI:Eu^{2+}$	~5,6	-	-	0,6	405	550-700
$CsBr:Eu^{2+}$	4,45	20	2500	0,7	440	685
$RbBr:Tl^{2+}$	3,35	250	200	0,35	433	735

2.2.3.4 Sposobnost zadržavanja latentne slike

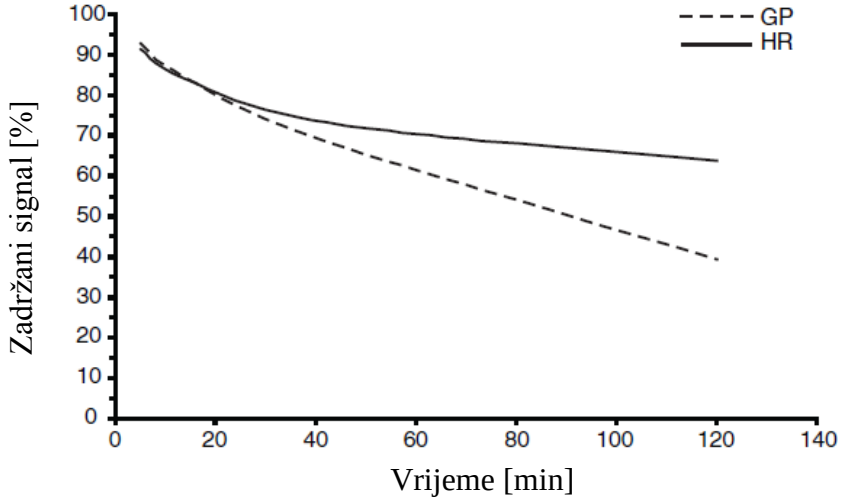
Fosforescencija je proces kojim se gubi zarobljena energija, odnosno latentna slika. Nastupa odmah nakon eksponiranja slikovnih ploča X zračenju. Kako je vidljivo sa slike **Sl.- 7** slikovne ploče izgube i do 20 % signala (elektrona na višoj energijskoj razini) unutar 20 minuta od trenutka izlaganja X zračenju [34].

Sposobnost zadržavanja latentne slike za pojedini aktivni sloj ovisi o :

- debljini aktivnog sloja,
- veličini granula fosforescentnog materijala i faktoru slaganja, te
- temperaturi.

Sposobnost zadržavanja latentne slike u ovisnosti o debljini aktivnog sloja prikazana je na primjeru $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ GP i HR slikovnih ploča na slici **Sl.- 7**. Ovisnost je

prikazana za prva dva sata od trenutka eksponiranja $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovnih ploča (pri sobnoj temperaturi uz napon rendgenske cijevi od 80 kV).



Sl.- 7. Zadržavanje latentne slike u vremenu $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovnih ploča [43].

Na temelju slike **Sl.- 7** može se zaključiti da što je debljina aktivnog sloja manja, to je postotak zadržane latentne slike tijekom vremena veći ([27], [43]). Osim o debljini aktivnog sloja, sposobnost zadržavanja latentne slike ovisi i o veličini granula fosforescentnog materijala, te faktoru slaganja. Što je faktor slaganja veći, a veličina granula manja, dobivaju se slike visoke razlučivosti pa je i sposobnost zadržavanja signala veća [27].

Sposobnost zadržavanja latentne slike ovisi i o *temperaturi*, pri čemu sposobnost opada s povećanjem temperature. U slučajevima kada je vremenski period između eksponiranja i očitanja slikovnih ploča velik, potrebno je provesti kompenzaciju radi gubitka signala. Ovo se postiže povećanjem radiografske ekspozicije (povećanje mAs).

2.2.4 Laserski skeneri slikovnih ploča

Laserski skeneri slikovnih ploča služe za očitanje latentne slike. Intenzitet i valna duljina pobudne laserske zrake ovisna je o vrsti lasera koji se koristi za pobudu.

U skeneru slikovnih ploča odvija se niz aktivnosti. Dvije kritične aktivnosti su:

1. pobuda fotoosjetljivog materijala i
2. očitanje emitirane svjetlosti nakon pobude.

Stoga se valna duljina pobude mora razlikovati od valne duljine emitirane svjetlosti. Aktivni sloj slikovne ploče se pobuđuje svjetlosnim snopom valnih duljina koje odgovaraju vidljivom dijelu spektra crvene boje, a emitirana svjetlost fosforescentnog materijala u dijelu je vidljivog spektra plave boje. Emitirana svjetlost valne duljine koja odgovara plavoj boji detektira se uz pomoć fotomultiplikatorske cijevi, te konvertira u električni signal. Ovaj se signal elektronički pojačava i A/D pretvaračem pretvara u digitalnu sliku [7].

Komponentama sustava očitanja eksponirane slikovne ploče generira se cjelokupna slika u digitalnom zapisu. Efikasnost pretvorbe definirana je količinom energije koja se ekstrahira nakon procesa pobude laserskom zrakom.

Količina energije pretvorena u korisni signal ovisna je o slijedećim značajkama:

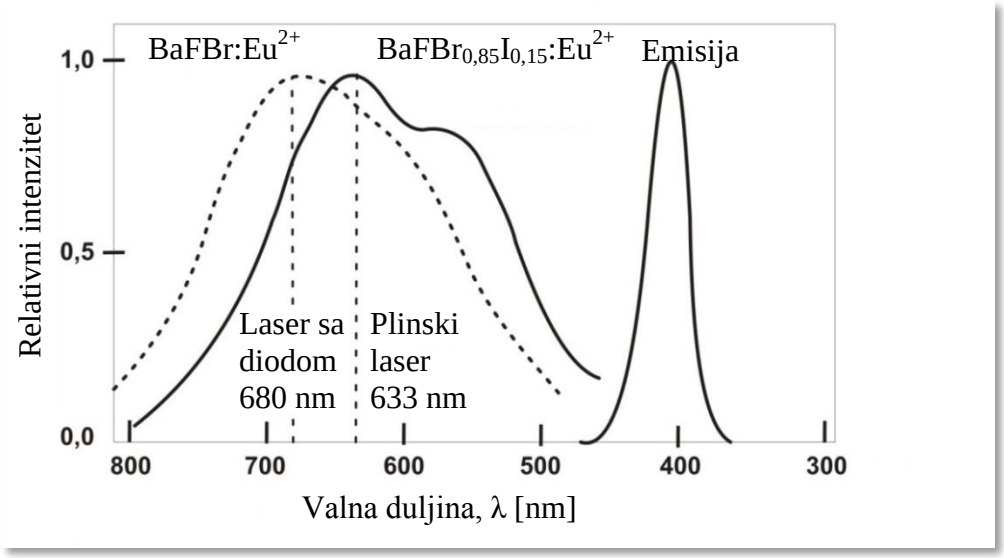
- trajanju pobude laserskom zrakom,
- efektivnom promjeru laserske zrake,
- dubini prodiranja laserske zrake u aktivni fotoosjetljivi sloj,
- efikasnosti digitalizacije signala.

2.2.4.1 Laserski skeneri – proces pobude i emisije

U računalnoj radiografiji koriste se laserski skeneri snage približno 30 mW. Postoje dva tipa laserskih skenera: laser sa čvrstom jezgrom i sustavom dioda za pobuđivanje lasera (s valnom duljinom pobudne svjetlosti λ = 670 - 690 nm) i plinski laser (na primjer HeNe s valnom duljinom pobudne svjetlosti λ = 633 nm) ([5], [7]).

Prednost lasera sa čvrstom jezgrom je u tome što je intenzitet laserske zrake ovisan o snazi pobudnog lasera i može se kontrolirati električnim putem. S druge strane, kod HeNe lasera potreban je dodatni vanjski uređaj kao što je elektro-optički ili elektro-akustični modulator. Laseri sa čvrstom jezgrom su kompaktniji, energetski učinkovitiji i imaju dulje vrijeme uporabe nego plinski laseri kontinuirane snage [5].

Na slici **Sl.- 8** prikazan je spektar pobude i emisije $BaFBr:Eu^{2+}$ i $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovnih fosfornih ploča, te vrijednosti valnih duljina pobude laserima.



Sl.- 8. Spektar pobude i emisije za $BaFBr:Eu^{2+}$ i $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovne ploče, te vrijednosti valnih duljina pobude laserima [34].

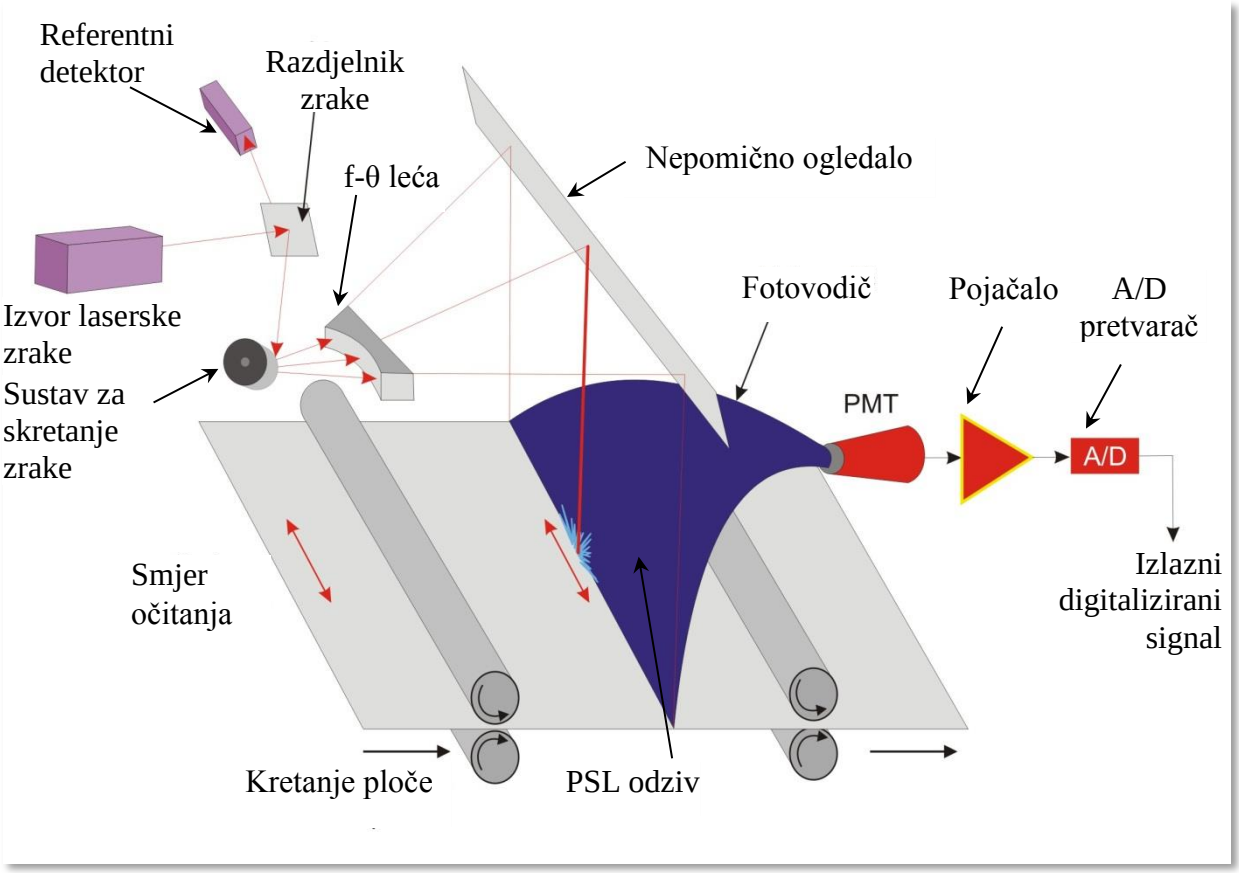
2.2.4.2 Komponente laserskog sustava za očitanje fosfornih slikovnih ploča

Osnovne komponente laserskog sustava za očitanje slikovnih ploča prikazane su na slici **Sl.- 9**.

Prije očitanja fokusirana laserska zraka se provodi kroz nekoliko optičkih komponenti. Uz pomoć *razdjelnika zrake* dio pobudne laserske zrake se odvodi do *referentnog detektora* za kontrolu odstupanja intenziteta ulazne laserske zrake. Do odstupanja intenziteta ulazne laserske zrake za pobudu slikovnih ploča kod očitanja dolazi i uslijed odstupanja u snazi lasera [34].

Sustav za skretanje zrake (najčešće rotirajuće poligonalno ogledalo ili oscilirajući ravni reflektor) usmjerava najveći dio pobudne zrake prema *f – θ leći* do *nepomičnog ogledala (najčešće kombinacija cilindričnog i ravnog ogledala)*. Ovime se osigurava sinkronizirana pobudna zraka, a i jednolika brzina prelaska pobudne zrake preko slikovne ploče tijekom očitanja.

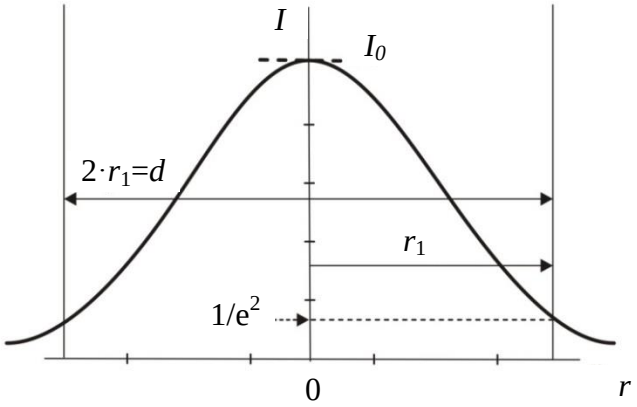
Nakon pobude, PSL odziv se prikuplja i provodi *fotovodičem* do fotodetektora - *fotomultiplikatorske cijevi*, u daljnjem tekstu PMT (od eng. *Photomultiplier Tube*). *Pojačalo* pojačava signal koji se u *analogno-digitalnom pretvaraču* (A/D pretvarač) iz analognog pretvara u digitalni zapis.



Sl.- 9. Komponente laserskog sustava s pomičnom slikovnom pločom tijekom procesa očitavanja [34].

2.2.4.3 Svojstva laserske zrake

Presjek pobudne laserske zrake je kružnog oblika. Slikom **Sl.- 10** prikazan je profil intenziteta pobudne zrake u ovisnosti o promjeru [34].



Sl.- 10. Gaussov profil intenziteta laserske zrake promjera $d = 2 \cdot r_1$ [10].

Ovisnost profila intenziteta pobudne zrake o promjeru odgovara Gaussovoj krivulji prema izrazu (1).

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/r_1^2) \quad (1)$$

U izrazu (1) r_1 je polumjer laserske zrake na mjestu pada intenziteta zrake s maksimalne vrijednost I_0 na vrijednost $1/e^2$.

Efektivni promjer laserske zrake, $d = 2 \cdot r_1$, u računalnoj radiografiji iznosi od 50 μm do 200 μm. Ovaj se efektivni promjer utvrđuje na mjestu ulaska pobudne laserske zrake u slikovnu ploču.

Za razliku od plinskih lasera kojima je presjek pobudne zrake kružnog oblika, kod lasera s čvrstom jezgrom zraka ima presjek eliptičnog oblika, pa su potrebne posebne leće kojima se dobiva pogodan oblik. Jednom kad se postigne zraka kojoj se intenzitet mijenja prema prostornoj Gaussovoj formi, promjer zrake se može prilagođavati uporabom ekspandera laserske zrake.

U cRT sustavima koriste se koherentne zrake većeg promjera koje se potom fokusiraju na malu površinu slikovne ploče. Promjer koherentnih zraka W_1 na mjestu gdje ulaze u fokusirajuću leću žarišne duljine f je povezana s promjerom zrake na mjestu ulaza u fotoosjetljivi sloj W_f preko izraza (2) [5].

$$W_1 W_f = f\,\lambda/\pi \quad (2)$$

Iz izraza (2) može se zaključiti da je za smanjenje promjera pobudne laserske zrake na površini slikovne ploče potrebno povećati promjer zrake na ulazu u leće [5]. cRT sustav koji će se koristiti u eksperimentalnom dijelu doktorskog rada ima slijedeće karakteristike: f = 50 cm i vidno polje FOV = 35 cm.

Primjenom izraza (2) promjer W_f = 100 μm mjeren u točkama intenziteta vrijednosti $1/e^2$ dobiva se postavljanjem vrijednosti W_1 na približno 1 mm. Ovako stvorena laserska zraka nema značajnijeg skretanja do mjesta pobude elektrona na višoj energijskoj razini [5].

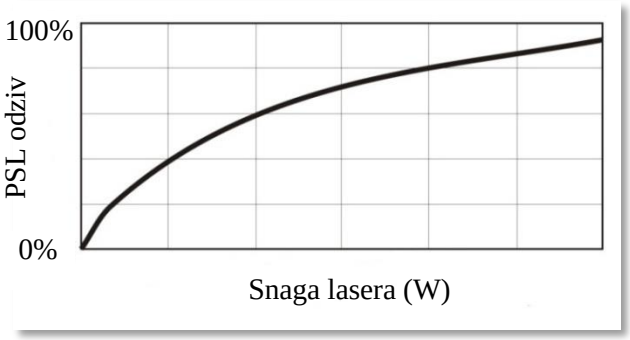
2.2.4.4 Brzina očitanja

Brzina kretanja laserske zrake preko eksponirane slikovne ploče tijekom očitanja u skeneru slikovnih ploča usklađena je s vremenom trajanja PSL odziva (vremenom isijavanja). Na primjer, za $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovne ploče vrijeme isijavanja iznosi približno 0,7 μs i za $BaFBr:Eu^{2+}$ slikovne ploče vrijeme PSL odziva iznosi približno 0,8 μs [5].

Vrijeme isijavanja je konstanta i predstavlja karakteristiku aktivnog sloja slikovne ploče. To je vrijeme koje elektron, kada prelazi s više energijske razine u nižu, emitira svjetlost. Kada bi se proces očitanja odvijao prebrzo ne bi došlo do potpunog isijavanja iz „točke“ očitanja prije nego li se pokrene proces stimulirane emisije iz druge „točke“ očitanja. Posljedica ovoga efekta je prostorno zamućenje. Jedna „točka“ očitanja u konačnici predstavlja 1 piksel na digitalnoj slici. Dakle, potreban je dovoljan vremenski odmak od trenutka čitanja iz jednog piksela do trenutka čitanja iz drugoga piksela. To je vrijeme najčešće jednako pet vremena isijavanja, odnosno približno 4 μs po „točki“ očitanja. Prema tome zao rezoluciju čitanja od 2000 x 2000 piksela najkraće vrijeme za čitanje iznosi 16 s [5].

Druga karakteristika koja ograničava brzinu očitavanja je *snaga laserskog skenera*. Na slici **Sl.- 11** može se vidjeti da se odnos PSL odziva koji se očitava nakon pobude slikovne ploče laserom može prikazati nelinearnom ovisnošću.

Kako je vidljivo sa slike, zbog te nelinearne ovisnosti, potrebna je manja snaga lasera za očitanje prvih 50 % latentne slike (informacije zapisane na cijeloj ploči) nego drugih 50%. Naime, potpuno očitanje slikovne ploče trajalo bi beskonačno dugo i zahtjevalo bi lasere velike snage.



Sl.- 11. Krivulja odziva nakon pobude laserom [7].

Količina PSL odziva koji se u stvarnosti očitava nakon pobude laserom ovisi o ukupnoj količini energije koju unosi izvor pobude. Ova energija jednaka je umnošku snage lasera i vremena trajanja pobude. Vrijeme trajanja pobude predstavlja vrijeme zadržavanja laserske zrake na elektronu na višoj energijskoj razini (od eng. *dwell time*).

2.2.4.5 Proces prikupljanja PSL odziva

Optički sustav za prikupljanje svjetlosti nastale PSL procesom nalazi se u neposrednoj blizini slikovne ploče. O ovoj udaljenost ovisi i efikasnost prikupljanja PSL odziva. Iako je pobudna laserska zraka izrazito usmjerena, emitirana svjetlost PSL procesom širi se u svim smjerovima [46]. Kako bismo mogli razlikovati ovaj od niza „ostalih" signala, svjetlo koje dolazi na ulaz svjetlosnog vodiča mora se prihvatiti pod kutom koji osigurava potpunu refleksiju unutar zakrivljenog svjetlosnog vodiča. Potpunom unutrašnjom refleksijom, svjetlosni vodič kanalizira emitiranu svjetlost prema fotokatodi PMT cijevi. Fotoelektroni emitirani s fotokatode se ubrzavaju i pojačavaju kroz seriju dinoda[3] unutar PMT cijevi.

Tijekom prikupljanja PSL signala važno je spriječiti refleksiju laserskog svjetla s vrha svjetlosnog vodiča natrag na slikovnu ploču. Ovakva refleksija uzrokuje ponovno aktiviranje procesa fotoluminiscencije, odnosno degradiranje izvornog zapisa na ploči. Ovaj efekt se manifestira kao neželjeni bljesak (od eng. *flare*).

Srodan efekt, svjetlosne mrlje (od eng. *halation*), može se pojaviti zbog refleksije oslobođene svjetlosti unutar gornjeg zaštitnog sloja slikovnih ploča. Kontrolom debljine ovog sloja, ovaj se efekt reducira do točke kada stvaranje svjetlosnih mrlja postaje zanemarivo.

2.2.4.6 Izolacija PSL odziva od signala pobude

PSL signal (λ = 390 nm) i pobudni laserski signal (λ = 680 nm) različitih su valnih duljina što omogućuje njihovo odvajanje. Omjer emitiranih fotona u crvenom dijelu spektra i

[3] Dinode su elektrode priključene na električni izvor tako da je svaka na većem pozitivnom naponu u odnosu na prethodnu. Elektroni se ubrzavaju u električnom polju i kad dođu do dinode imaju dovoljno energije da iz nje izbiju dodatne elektrone. Proces se nastavlja između slijedećih parova dinoda. Kad snop elektrona stigne do anode on sadrži veliki broj elektrona, pa se električni impuls koji naprave dolaskom na anodu može detektirati elektroničkim sklopom.

PSL fotona u plavom dijelu spektra u slučaju minimalnog izlaganja X zračenju je približno 10^8:1 [5].

Da bi se osiguralo prikupljanje samo PSL odziva, PMT cijevi ima smanjenu osjetljivost u dijelu spektra koji odgovara valnim duljinama crvene svjetlosti. Fotokatoda PMT cijevi ima učinkovitost približno 25 % u plavom i približno 0,1 % u crvenom dijelu spektra [5]. Ova se karakteristika učinkovito iskorištava kao dodatan filtar za odvajanje pobudne svjetlosti od PSL signala. Drugi način odvajanja ovih signala je uporabom optičkih filtra koji učinkovito propuštaju svjetlost u plavom dijelu spektra, a apsorbiraju svjetlost u crvenom dijelu spektra.

2.2.4.7 Digitalizacija analognog signala

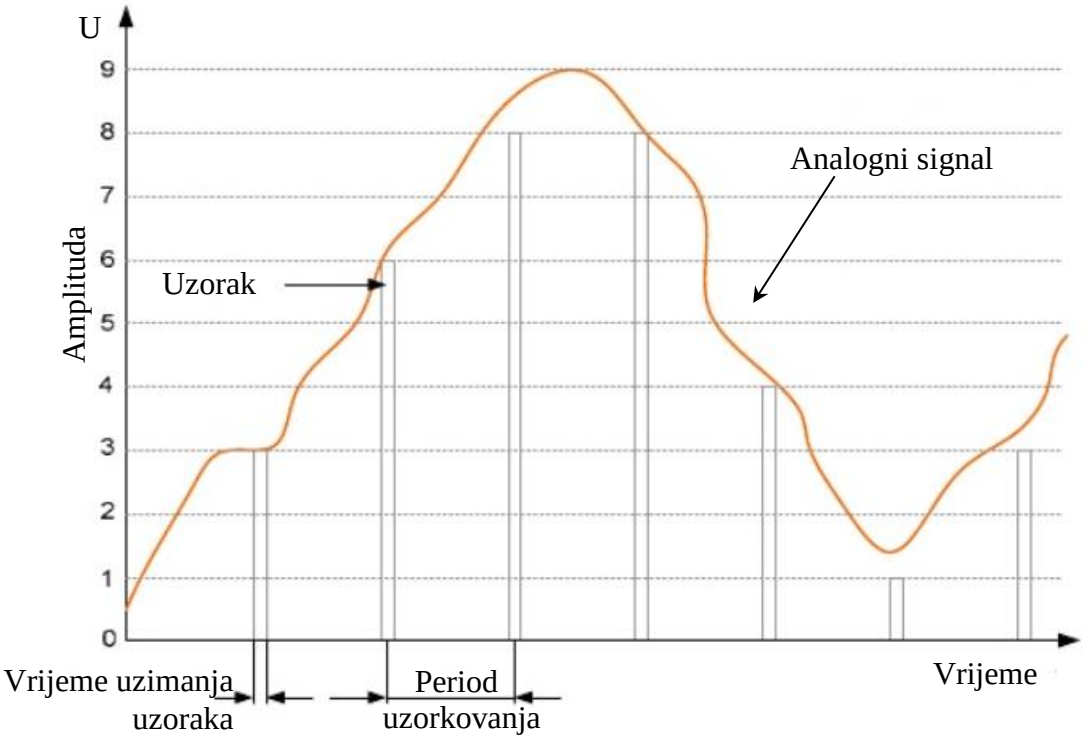
Fotodetektor, u ovom slučaju PMT cijev, pretvara PSL odziv u električni signal. Svjetlosni signal predstavlja varijacije u latentnoj slici i prema tome varijacije u eksponiranosti slikovne ploče.

Proces konverzije kontinuiranog analognog signala u seriju diskretnih digitalnih vrijednosti se odvija u analogno-digitalnom pretvaraču. Analogno-digitalni pretvarač ne pretvara u digitalnu vrijednost kontinuirano cjelokupni analogni signal, već vrijednosti određenih uzoraka u određenim vremenskim trenucima.

Digitalizacija se odvija u dva koraka, *uzorkovanje* i *pridjeljivanje vrijednosti (kvantizacija)* [47]. Uzorkovanje određuje poziciju i amplitudu PSL odziva s određenog mjesta na slikovnoj ploči. Kvantizacija određuje srednju vrijednost amplitude PSL odziva unutar određene pozicije.

Da se signal ne bi izobličio A/D pretvorbom, potrebno je provesti diskretizaciju. To znači da koraci kojima se uzima signal kod diskretizacije moraju biti učestaliji u vremenu da se ne izgubi ni jedan harmonik ulaznog signala, a po amplitudi treba imati dovoljnu veliku razlučivost da bi se razlikovale male promjene amplitude. A/D pretvorba je povremeno mjerenje vrijednosti signala ako se promatra kao proces.

Na slici **Sl.- 12** prikazan je koncept digitalizacije analognog signala.



Sl.- 12. Koncept digitalizacije analognog signal [47].

U postupku uzorkovanja ne uzimaju se stvarne vrijednosti analognog signala, već najbliža moguća vrijednost od raspoloživih razina. Dio poruke se gubi. Gubitak je manji ako je raspoloživi broj razina uzorkovanja veći i frekvencija uzorkovanja veća. Ovaj proces pretvaranja kontinuiranih vrijednosti analognog signala u diskontinuirane vrijednosti naziva se kvantizacija. Zaokruživanjem stvarne vrijednosti analognog signala prilikom kvantizacije na višu ili nižu vrijednost prema zadanim razinama nastaje šum koji se naziva kvantizacijski šum.

U izboru između kvalitete i stvarne potrebe treba u praktičnoj primjeni uporabiti zadovoljavajuće parametre adekvatne zadaći i potrebama korisnika. Dakle, veći broj uzoraka u jedinici vremena i više razina uzorkovanja daje manje odstupanje u odnosu na stvarne analogne vrijednosti signala i pretvorba je kvalitetnija.

Odstupanje regeneriranog digitalnog signala, odnosno rekonstruiranog analognog signala na osnovu digitalnih zapisa u odnosu na originalni analogni signal, uzrok je takozvanog šuma kvantizacije.

2.2.4.8 Proces brisanja zaostale slike

Proces očitanja ne uklanja u potpunosti latentnu sliku sa slikovnih ploča, nego jedan dio apsorbiranog rendgenskog zračenja ostaje nepobuđen u fosforescentnom sloju slikovnih ploča i nakon očitanja. Prije ponovne uporabe slikovnih ploča preostalu energiju je potrebno ukloniti jer bi pri slijedećem očitanju uzrokovala stvaranje lažne slike (od eng. *ghost image*). Navedeno se provodi izlaganjem slikovne ploče izvoru bijele ili polikromatske svjetlosti visokog intenziteta. Izlaganjem bijeloj svjetlosti preostali elektroni na višoj energijskoj razini prevode se u početno stanje bez skokova novih elektrona na višu energijsku razinu.

Vrijeme brisanja ovisno je o eksponiranosti slikovnih ploča. Osim u slučaju većih eksponiranja, preostali latentni zapis biva izbrisan tijekom samo jednog ciklusa brisanja. Vrijeme brisanja iznosi od 20 s do 50 s. Kod intenzivno eksponiranih slikovnih ploča, vrijeme brisanja može biti i do 3 puta dulje od vremena očitanja.

2.3 Aspekti kvalitete slike

Tehnika računalne radiografije sa slikovnim pločama ima širi dinamički raspon od tehnike radiografije s konvencionalnim filmom. Zbog te činjenice, a i zbog toga što se broj bitova skale sivih tonova u tehnici računalne radiografije sa slikovnim pločama može povećati, kvaliteta slike nije toliko ograničena kontrastom. Kao rezultat, udio šuma u slici je taj koji ograničava percepciju detalja, a time i kvalitetu slike.

Uobičajeni način kojim se kvantitativno definira razina šuma u slici je određivanje odnosa signal-šum, SNR (od eng. *signal-to-noise-ratio*). Treba napomenuti da je signal u detektoru, u ovom slučaju slikovnoj ploči, proporcionalan broju fotona koji dolaze na njega. Prema tome SNR, a time i kvalitetu slike moguće je poboljšati većom radiografskom ekspozicijom ([41], [48], [49]).

Slikovne karakteristike moguće je izraziti preko različitih mjerljivih veličina koje nisu nužno međusobno neovisne.

Mjerljive značajke su:

- prostorna razlučivost,
- kontrastna razlučivost,
- oštrina,
- modulacijska funkcija prijenosa (MTF),
- dinamički raspon,
- osjetljivost otkrivanja (detekcije) zračenja (DQE)
- šum.

Digitalni se detektori mogu najbolje okarakterizirati pomoću dva parametra. To su modulacijska funkcija prijenosa (MTF, od eng. *Modulation Transfer Function*) i osjetljivost otkrivanja (detekcije) zračenja (DQE, od eng. *Detection Quantum Efficiency*). Veličine MTF i DQE biti će objašnjene u poglavljima 2.3.2 i 2.3.3.

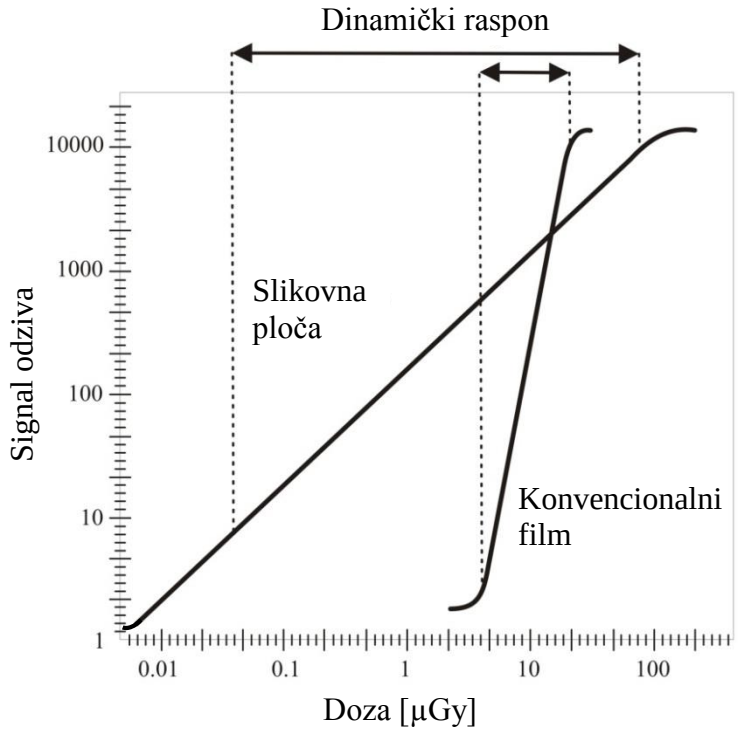
Također će biti objašnjen odnos signala odziva i doze zračenja kod tehnike radiografije s konvencionalnim filmom i računalne radiografije sa slikovnim pločama kao detektorima zračenja (poglavlje 2.3.1).

Izvori šuma kao slučajne varijacije nekog izlaznog signala oko nazivne vrijednosti predviđene ulazno-izlaznim karakteristikama sustava objašnjeni su u poglavlju 2.3.5 gdje će biti prikazan sistematizirani pregled izvora šumova u cRT.

2.3.1 Dinamički raspon

Dinamički raspon je karakteristika detektora kojom se opisuje raspon doza zračenja koje rezultiraju određenim odzivom ([27], [45]).

Na slici **Sl.- 13** prikazana je odnos signala odziva i doze zračenja kod tehnike radiografije s konvencionalnim filmom i računalne radiografije sa slikovnim pločama kao detektorima zračenja. Mjerilo je isto za obje „krivulje“. „Krivulje“ su linearne u *log-log* dijagramu u svom korisnom/radnom području, no kako je prikazano ta su dva područja različita. Linearnost je očuvana i u linearnoj skali na dovoljno uskom području.



Sl.- 13. Dinamički raspon [27].

Kako je vidljivo sa slike **Sl.- 13** kod tehnike radiografije s konvencionalnim filmom, odnos signala odziva i doze zračenja je prikazan krivuljom u obliku slova S. Obzirom da je krivulja strma, može se zaključiti da klasičan industrijski film ima malu toleranciju na

promjene u radiografskoj ekspoziciji. U slučaju da je radiografska ekspozicija manja ili veća od potrebne, film će biti preeksponiran ili podeksponiran, odnosno slika će biti nezadovoljavajuće kvalitete.

U računalnoj radiografiji, dinamički raspon slikovnih ploča iznosi i do 1:40000 [45]. Za usporedbu, klasični film ima dinamički raspon 1:50 [50].

Prednost linearnog ponašanja slikovnih ploča (u *log-log* skali) je manja osjetljivost na parametre eksponiranja. Širokim dinamičkim rasponom slikovnih ploča značajno je eliminiran rizik od pogrešnog eksponiranja uslijed pogrešno odabranih parametara eksponiranja. Također, za povećanje radiografske ekspozicije linearno će se povećati i kontrast. Nadalje, velika prednost slikovnih ploča sustava računalne radiografije je u tome što omogućuju da se tijekom jednog eksponiranja obuhvati ispitivanje objekata velikog raspona debljina i različitih materijala.

2.3.2 Modulacijska funkcija za prijenos kontrasta (MTF)

Modulacijska funkcija za prijenos kontrasta (u daljnjem tekstu MTF) je mjera sposobnosti detektora da prenese ulazni signal određene prostorne razlučivosti u izlazni signal. U metodi radiografije, objekti koji imaju različite debljine i svojstvo apsorpcije X zračenja, na slici imaju različite vrijednosti nijansi sivoga na skali sivih tonova. Prema tome, MTF je odgovorna za prijenos kontrasta objekta različite debljine i svojstva apsorpcije X zračenja u različite vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela na slici [27].

Prostorna razlučivost izražava učestalost ponavljanja neke forme u prostoru. Ovisi o fizikalnim karakteristikama detektora. Veličina piksela u detektoru definira maksimalnu prostornu razlučivost. Frekvencija koja definira ovu graničnu prostornu razlučivost naziva se Nyquist-ova frekvencija i računa se kao $1/(2a)$, gdje je a veličina piksela. Prema tome, što je veća Nyquist-ova frekvencija i modulacijska funkcija za prijenos kontrasta to je omogućena vizualizacija finijih detalja na digitalnom zapisu. Pojednostavljeno, visoka frekvencija predstavlja područje na objektu s puno detalja i njihovih ponavljanja, srednja frekvencija označava područje s nešto manje detalja na objektu, dok niska prostorna frekvencija predstavlja objekt s malo detalja i njihovih ponavljanja. U računalnoj radiografiji dominantna su područja sa prostornim frekvencijama u rasponu od 0 do 2,5 ciklusa/mm ([28], [50], [51]).

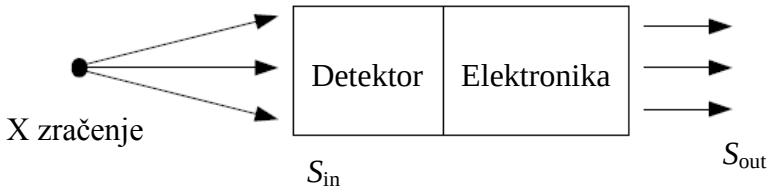
Prema tome, modulacijska funkcija za prijenos kontrasta mora biti upravo takva da u navedenom rasponu frekvencija ima značajno veće vrijednosti.

2.3.3 Osjetljivost otkrivanja (detekcije) zračenja (DQE)

Osjetljivost otkrivanja (detekcije) zračenja, u daljnjem tekstu DQE (od eng. *Detection Quantum Efficiency*), predstavlja mjeru učinkovitosti detektora X zračenja u pretvorbi apsorbirane energije X zračenja u kvantitativnu informaciju ([27], [52]).

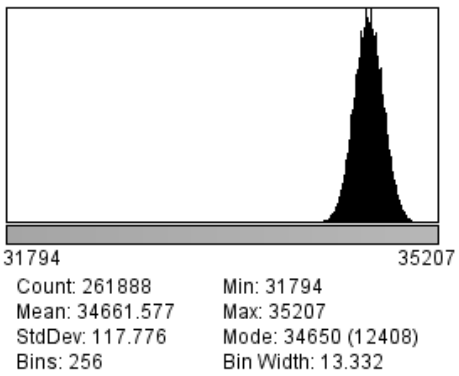
DQE je efikasnost s kojom detektor zračenja „hvata“ informaciju tijekom radiografske ekspozicije i pretvara je u odziv [41].

Na temelju slike **Sl.- 14** definira se DQE. Prema slici, S_{in} je ulazni signal (broj fotona na ulazu), a S_{out} je izlazni signal. Omjer signal-šum, SNR (od eng. *Signal to Noise Ratio*), predstavlja odnos srednje vrijednosti signala i njegovog standardnog odstupanja, slika **Sl.- 15**.



Sl.- 14. Definiranje osjetljivosti otkrivanja (detekcije) zračenja, DQE.

$$SNR = \frac{\bar{S}}{\sigma}$$



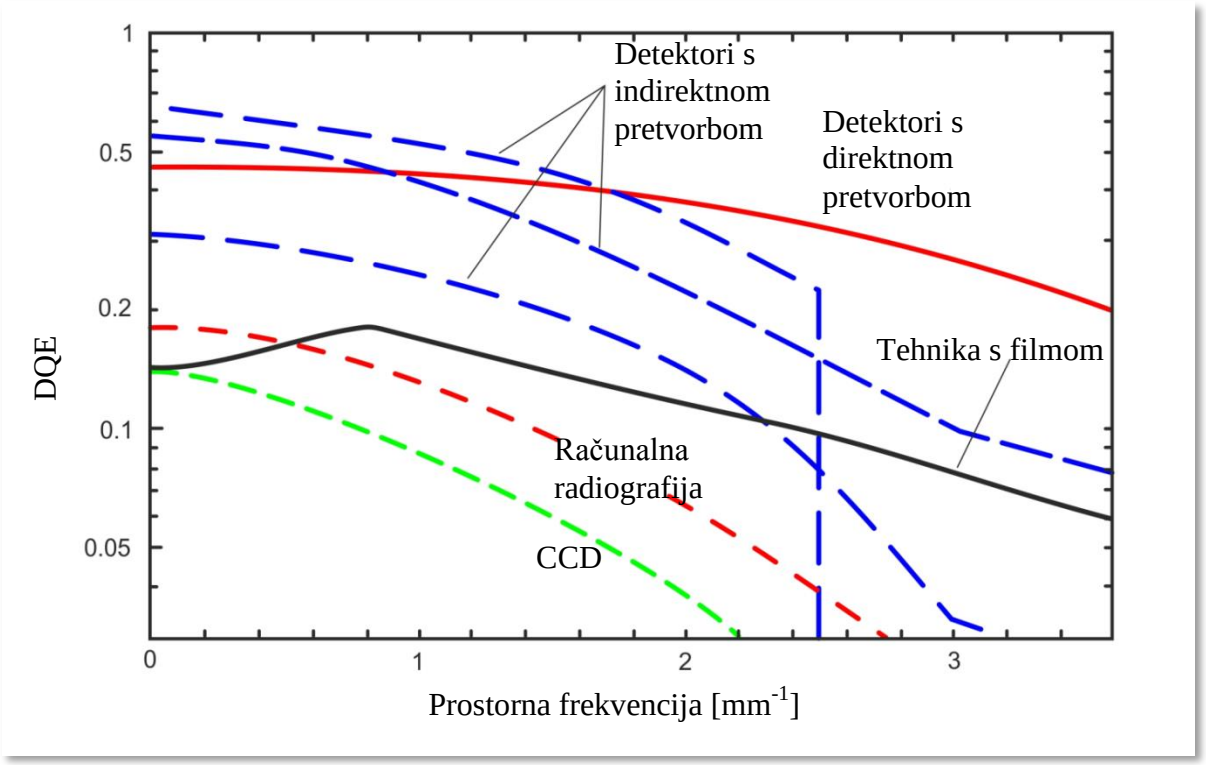
Sl.- 15. Omjer signal-šum.

DQE se računa usporedbom vrijednosti omjera signal-šum na ulazu u detektor i vrijednosti omjera signal-šum na izlazu iz detektora prema izrazu (3) [53]:

$$\mathrm{DQE}=\frac{\mathrm{SNR}_{\mathrm{out}}^2}{\mathrm{SNR}_{\mathrm{in}}^2}=\frac{S_{out}^2/\sigma_{out}^2}{S_{in}^2/\sigma_{in}^2} \tag{3}$$

gdje je $\mathrm{SNR}_{\mathrm{out}}$ odnos signal-šum na izlazu iz detektora, $\mathrm{SNR}_{\mathrm{in}}$ odnos signal-šum na ulazu u detektor, S_{in} srednja vrijednost signala na ulazu, S_{out} srednja vrijednost signala na izlazu, σ_{in} standardna devijacija na ulazu, σ_{out} standardna devijacija na izlazu.

Navedeni se odnos prikazuje grafički u ovisnosti o prostornoj frekvenciji, DQE(*f*) [28]. DQE(*f*) različitih detektora X zračenja prikazan je na slici **Sl.- 16**.



Sl.- 16. DQE detektora [51].

Idealan detektor bi imao DQE jednaku 1 (DQE iznosa 100 % na svim prostornim frekvencijama) što bi značilo da je cjelokupno X zračenje apsorbirano detektorom pretvoreno u korisnu informaciju [5]. No zbog neefikasnosti detektora X zračenja u detektiranju ulaznog X zračenja, kao i prisutnog unutarnjeg šuma detektora, DQE nikada ne iznosi 1 [46].

DQE nije konstantna vrijednost za pojedini detektor, već je ovisan o prostornoj frekvenciji i opada porastom prostorne frekvencije, odnosno učinkovitost pretvorbe detektiranog ulaznog zračenja u koristan signal na izlazu opada.

U praksi, maksimalna DQE vrijednost detektora ograničena je na vrijednosti prostornih frekvencija od 0,45 mm^{-1} do 0,5 mm^{-1}. Kako je vidljivo sa slike **Sl.- 16**, digitalni detektori sa direktnom i indirektnom pretvorbom na ovim nižim vrijednostima prostornih frekvencija (malo detalja na objektu ispitivanja) postižu DQE vrijednosti u prosjeku od 40 % do 50 %. Također, zadržavaju DQE vrijednost na vrijednostima prostorne frekvencije i do 3,5 ciklusa/min, što nije slučaj kod slikovnih ploča.

U usporedbi s digitalnim detektorima s direktnom i indirektnom pretvorbom, slikovne ploče imaju DQE vrijednost od 15 % do 20 % [51].

Veća DQE vrijednost znači da je potrebna niža doza zračenja da bi se postigla identična kvaliteta slike. Također povećanje DQE vrijednosti, uz konstantnu dozu zračenja, rezultira boljom kvalitetom slike (signal veći, a šum manji).

Mjerenje DQE veličine za različite detektore standardizirano je da bi se omogućila njihova učinkovita usporedba, posebice usporedba različitih proizvođača. Metoda mjerenja DQE veličine kao funkcije radiografske ekspozicije i prostorne frekvencije definirana je normom HRN EN 62220-1 ([54], [55]).

2.3.4 Razlučivost i oštrina

Razlučivost i oštrina često se koriste kao srodni pojmovi prilikom opisivanja kvalitete slike, iako su to dvije različite karakteristike. Razlučivost i oštrina su međusobno povezane značajke i predstavljaju fizičke osobine koje je u strogo kontroliranim uvjetima moguće mjeriti senzitometrijskim metodama i u potpunosti kvantitativno izraziti na digitalnim radiogramima.

Razlučivost je veličina kojom se definira mogućnost opažanja sitnih detalja kojom se opisuje kakvoća slike. Postoji nekoliko načina na koje je moguće prezentirati rezultate mjerenja, najčešći su razlučivost u linijama po milimetru, parovima linija po milimetru i prikazom prijenosne modulacijske funkcije.

Oštrina je, koliko objektivna, toliko i subjektivna odrednica. Ukupan dojam oštrine ovisi o lokalnom kontrastu, kontrastu boje, definiciji ruba i nizu drugih čimbenika koje nije jednostavno izmjeriti, niti predvidjeti njihovo međusobno djelovanje na konačni dojam.

U narednim poglavljima biti će ukratko objašnjen utjecaj pojedinih komponenata sustava računalne radiografije na razlučivost i oštrinu.

2.3.4.1.1 Razlučivost slikovnih ploča

Razlučivost slikovnih ploča definirana je u procesu proizvodnje i ovisi o: veličini zrna aktivnog sloja slikovnih ploča, faktoru slaganja aktivnog sloja, debljini aktivnog sloja i slojevima unutar slikovne ploče.

2.3.4.1.2 Utjecaj veličine zrna fosforescentnog materijala

Prosječna veličina granula fosforescentnog materijala slikovnih ploča iznosi 5 μm. Manje zrno znači efikasniju fotoluminiscenciju. Nadalje, veće zrno uzrokuje nejednolikost emisije svjetlosti nakon pobude laserskom zrakom. Kod slikovnih ploča većeg zrna biti će veće raspršenje svjetlosti, što utječe na smanjenje prostorne razlučivosti ([5], [34]).

2.3.4.1.3 Utjecaj faktora slaganja

Faktor slaganja naziva se još i gustoća pakiranja. Predstavlja volumni odnos između fosforescentnog materijala i veziva u ukupnom volumenu aktivnog sloja. Što je faktor slaganja veći, veća je i razlučivost slikovnih ploča.

2.3.4.1.4 Utjecaj debljine aktivnog sloja

Deblji slojevi fosforescentnog materijala su osjetljiviji, ali daju manju oštrinu zbog povećanja raspršenja pobudnog zračenja. Stoga se podešavanjem debljine fosforescentnog sloja traži kompromis između oštrine i osjetljivosti ([5], [34]).

Slikovne ploče veće debljine fosforescentnog materijala imaju bolje svojstvo apsorpcije X zračenja, ali u konačnici rezultiraju manjom razlučivošću. To je posljedica povećanog raspršenja pobudnog zračenja i PSL odziva s debljinom ploče. Može se zaključiti da se tanji slojevi koriste u aplikacijama koje zahtijevaju veću razlučivost, a slojevi veće debljine aktivnog sloja tamo gdje je važno smanjenje doze zračenja.

2.3.4.2 Utjecaj očitanja i interakcija sa stražnjim slojem slikovne ploče

Unutar fosforescentnog sloja apsorbirano X zračenje se raspršuje. Posljedica je to razlike u indeksima loma između granula fosforescentnog materijala i polimernog veziva.

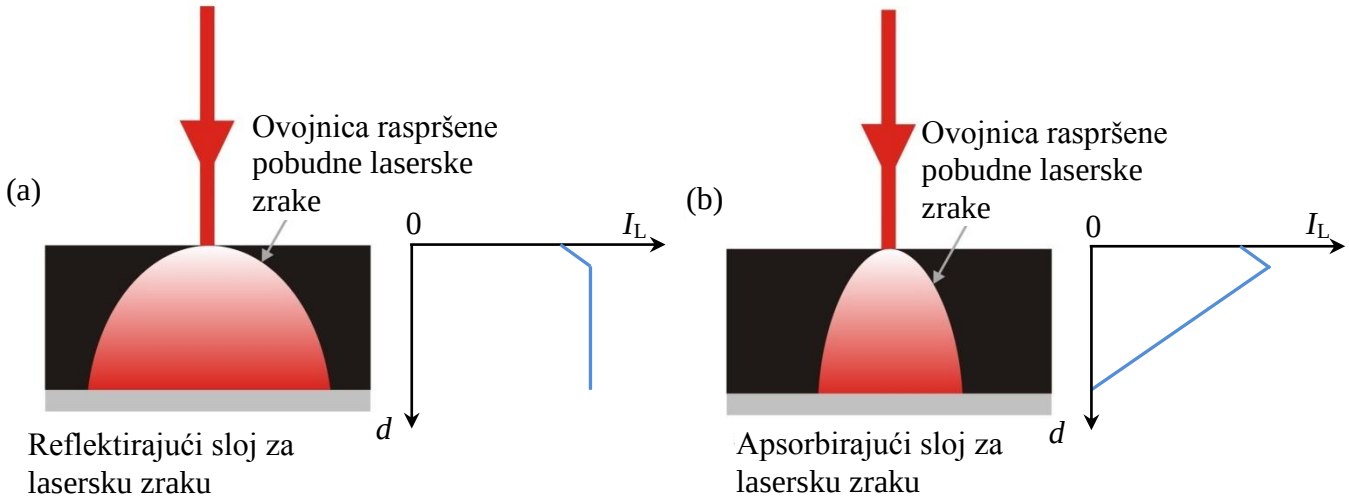
Zbog toga pobudna laserska zraka koja ulazi u aktivni sloj i PSL odziv imaju tendenciju širenja u svim smjerovima.

Širenje pobudne laserske zrake nakon ulaska u aktivni sloj eksponirane slikovne ploče ilustrirano je na slici **Sl.- 17**. Udaljenost od mjesta ulaza pobudne laserske zrake do stražnjeg sloja predstavlja debljinu aktivnog dijela slikovnih ploča. Kako je prikazano slikom **Sl.- 17. a** i **b**, širenje je manje ako stražnji sloj apsorbira pobudnu lasersku zraku.

Pojave na optičkoj granici slikovne pločesu:

a) refleksija pobudne laserske (bijela granica) (**Sl.- 17**. a), ili

b) apsorpcija pobudne laserske zrake (crna granica) (**Sl.- 17**. b).



Sl.- 17. Pojave na optičkoj granici slikovne ploče: a) refleksija i b) apsorpcija pobudne laserske zrake [5].

Na slici **Sl.- 17**. I_L predstavlja ukupan intenzitet svjetlosti pobudne laserske zrake na dubini *d*. Za reflektirajući stražnji sloj I_L je neovisan o dubini prodiranja pobudne laserske zrake, *d*. Nasuprot tome, za apsorbirajući sloj I_L opada linearno od ulazne površine u slikovnu ploču do vrijednosti blizu nule na stražnjoj strani slikovne ploče [5].

Na ulaznoj površini aktivnog sloja manji je intenzitet pobudne laserske zrake nego dublje u fotoosjetljivom sloju. Ovo je posljedica raspršenja upadne laserske svjetlosti koja zbog blizine površine lako „bježi“ iz aktivnog sloja.

Neovisno o vrsti optičke granice, tijekom očitanja pobudna je laserska zraka usko fokusirana na ulasku u slikovnu ploču. Širina snopa laserske zrake raste prodiranjem po dubini aktivnog sloja stimulirajući PSL odziv. To uzrokuje pobudu većeg volumena latentne slike od onoga koji bi odgovarao teorijskom volumenu. Teorijski volumen je određen efektivnim promjerom pobudne laserske zrake mjeren u točkama intenziteta vrijednosti $1/e^2$ i debljini aktivnog sloja slikovne ploče. Posljedica pobude većeg volumena od teorijskog je gubitak razlučivosti.

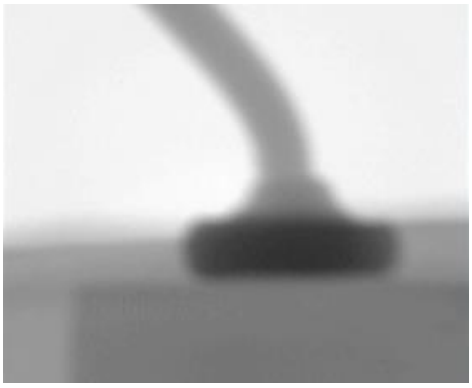
Slikovne ploče moraju biti optimizirane tako da zadovolje dva osnovna zahtjeva. Prvo, moraju omogućiti prijenos što veće količine emitirane svjetlosti nastalog PSL procesom prema površini aktivnog sloja. Drugo, istovremeno moraju onemogućiti širenje pobudne svjetlosti lasera tijekom procesa pobude. Kompromis između ova dva zahtjeva, postavljena na slikovne ploče, ostvaruje optimalnu razlučivosti.

Fenomen gubitka oštrine uzrokovan širenjem svjetlosti naglašava potrebu za ostvarivanje kompromisa između apsorpcije i razlučivosti. Raspršenje svjetlosti manje je u slučaju kada stražnji sloj crne boje i apsorbira pobudnu lasersku zraku, nego kada je stražnji sloj bijele boje i reflektira lasersku zraku.

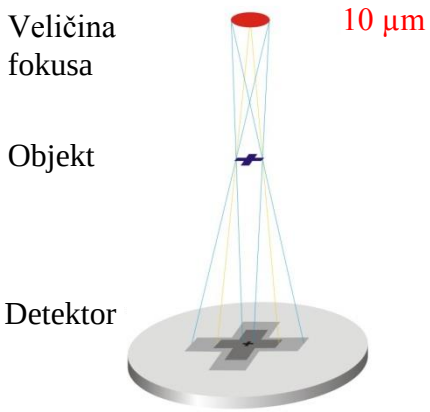
2.3.4.3 Utjecaj rendgenskog uređaja na oštrinu

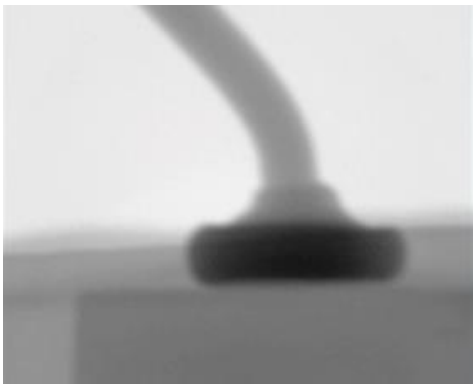
Na oštrinu značajno utječe i rendgenski uređaj i to prvenstvenom svojom stabilnošću, te veličinom fokusa ([35], [36], [37]). Smanjenjem veličine fokusa, razlučivost i mogućnost raspoznavanja detalja se povećavaju te je moguće geometrijsko povećanje bez pojave perifernih sjena.

Periferne sjene se nazivaju i geometrijska neoštrina (od eng. *penumbra*). U idealnom slučaju, promjer fokusa je blizu nule. U praksi, najbolja su rješenja rendgenskih uređaja s takozvanim mikrofokusom kako je prikazano na slici **Sl.- 18**. Kod njih je veličina fokusa manja od 1 μm.

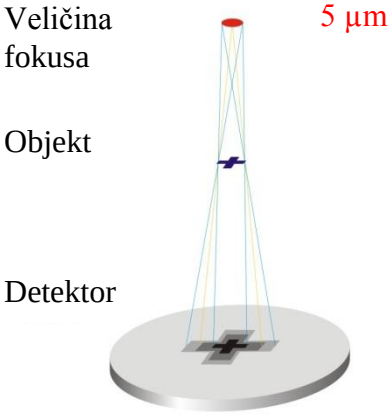


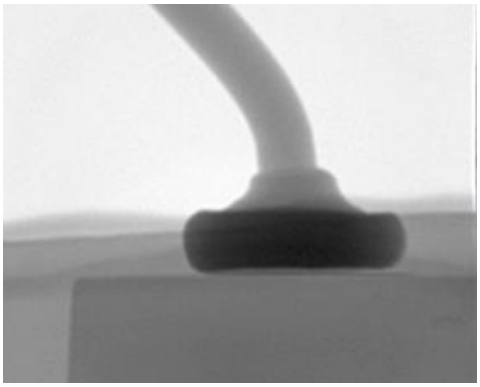
a) veličina fokusa 10 µm



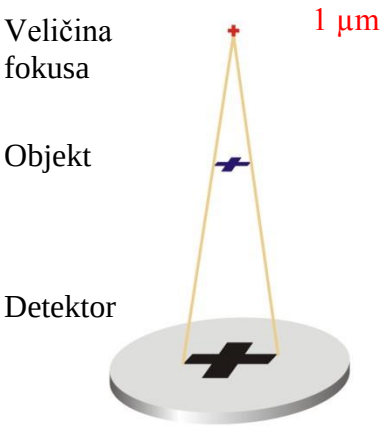


b) veličina fokusa 5 µm





c) veličina fokusa 1 µm



Sl.- 18. Utjecaj veličine fokusa rendgenskog uređaja na oštrinu: a) veličina fokusa 10 µm, b) veličina fokusa 5 µm i c) veličina fokusa 10 µm.

2.3.5 Šum

Šum je slučajna varijacija nekog izlaznog signala oko nazivne vrijednosti predviđene ulazno-izlaznim karakteristikama sustava. U cRT tehnici šum se može definirati kao bilo koja promjena u slici koja ne odgovara prigušenju X zračenja prolaskom kroz objekt ispitivanja.

Prema M.B. Williams [5] idealan je slučaj predstavljen kada dominira samo šum svojstven X zrakama. No, uz navedeni šum važan utjecaj ima i šum koji uzrokuju detektor zračenja i proces kvantificiranja. Detektori zračenja sadrže i unutarnje šumove. Obzirom da nisu u korelaciji s određenim mjestom na slikovnoj ploči nazivaju se i slučajnim šumovima i nije ih moguće eliminirati. S druge strane, unutrašnji šum koji ima fiksnu korelaciju s mjestom na slikovnoj ploči se naziva šum fiksnog uzorka. Ovu vrstu šuma moguće je naknadnom obradom slike izuzeti iz korisnog signala. Kao primjer navodi se prostorna varijacija u debljini slikovne ploče i efikasnost prikupljanja PSL odziva ovisnog o položaju. Šum kvantificiranja pripisuje se procesu digitalizacije.

Nedovoljan broj koraka u procesu kvantificiranja uvodi grešku kodiranja signala i povećava ovu vrstu šuma. Sustavi s 10-bitnim do 14-bitnim procesom kodiranja značajno smanjuju ovu vrstu šuma uz dodatno nelinearno pojačanje signala (na primjer logaritamsko) prije digitalizacije.

Miettunen i Korhola [4] u svojem radu pažnju posvećuju ponajviše raspršenju zračenja kao dominantnom izvoru šuma. Prema njima, raspršeno X zračenje ne daje korisnu informaciju te proizvodi efekt zamagljenja koji smanjuje razlučivost. Smanjenje ovog izvora šuma rezultira povećanjem odnosa signal-šum. Međutim, preveliko umanjenje raspršenog zračenja ima utjecaj na pojavu takozvanih „pjega“ te se slika doima zrnato.

Rowlands [5] i Swank [6] svoja istraživanja usmjeravaju prema analizi šuma detektora preko DQE značajka. Predlažu uvođenje dodatnog parametra koji predstavljaju korekciju za šumove. Ovaj se parametar naziva Swank parametar i sastoji se od slijedećih komponenata: korekcijskog parametra raspodjele energije A_{XED} (od eng. *X ray energy distribution*), korekcijskog parametra raspodjele apsorbirane energije A_{AED} (od eng. *absorbed energy distribution*), korekcijskog parametra vezanog za pojave na optičkoj granici slikovnih ploča (reflektrajući ili apsorbirajući sloj) A_{OPD} (od eng. *optical pulse distribution*), korekcijskog parametra vezanog za šum nastao kao posljedica fizikalne strukture slikovnih ploča A_{struct}

(eng. *structural noise*) i korekcijskog parametra šuma luminiscencije A_{SQ} (od eng. *secundary quantum noise*).

Rowlands [5] smatra da se drugi izvori šumova, poput šuma koji unosi pobudna laserska zraka, šuma u elektroničkom pojačalu i šuma kvantiziranja, mogu zanemariti.

Sistematizaciju potencijalnih izvora šumova u CR tehnici dao je Schaetzing [7]. Za razliku od prethodno navedenih autora, on sustav za računalnu radiografiju sagledava u cijelosti ne stavljajući naglasak niti na jednu komponentu sustava posebno. Ova je razlika rezultat toga što je svaki od autora iznio problematiku šumova isključivo u svom uskom području rada. Schaetzing šumove pripisuje izvoru zračenja, slikovnim pločama i skeneru.

Poveznica između Schaetzinga [7] i M.B. Williams [3] je u tome što oni smatraju da se šum povezan s izvorom zračenja može pripisati kvantnom šumu koji je svojstven X zrakama. On je dominantan u ukupnom šumu. Šum povezan sa slikovnim pločama dijeli na faktore povezane s fizikalnom strukturom slikovnih ploča kao što su raspodjela zrna u aktivnom sloju, nejednolika veličina zrna, dodatni slojevi i faktore vezane za učinak slikovnih ploča kao što su sposobnost i učinkovitost apsorpcije X zračenja, raspršenje i efikasnost pretvorbe. U slučaju laserskog skenera slikovnih ploča, Schaetzing smatra da gotovo svaka njegova komponenta utječe na pojavu šuma što nije u skladu sa stajalištem Rowlandsa [5].

Na temelju navedenog u disertaciji će značajan dio eksperimentalnog dijela rada biti posvećen istraživanju utjecaja očitanja kao elementa karakterizacijskog niza.

Temeljem sistematizacije podataka iz literature, u tablici 2, dan je pregled potencijalnih izvora šumova**.**

Tablica 2. Sistematizacija potencijalnih izvora šuma u cRT.

Šum pripisiv izvoru zračenja	
▫ Energija X zračenja	
▫ Nestabilnost struje izvora zračenja	
Šum pripisiv objektu ispitivanja	
▫ Nehomogenost strukture	
▫ Anizotropnost	
Šum pripisiv slikovnoj ploči	
▫ Kolebanje u količini X zračenja apsorbiranog slikovnom pločom	Šum nastao kao posljedica neefikasnosti pretvorbe X zračenja u latentnu sliku
▫ Kolebanje u količini X zračenja raspršenog unutar slikovne ploče	
▫ Broj elektrona na višoj energijskoj razini u odnosu na apsorbirano X zračenje	
▫ Trenutno gubljenje latentne slike	
▫ Aktivni sloj slikovne ploče (debljina aktivnog sloja, varijacija u debljini)	Šum unutar slikovne ploče ovisan o fizikalnim svojstvima fosforescentnog materijala
▫ Zaštitni sloj i stražnji apsorpcijski ili reflektirajući sloj	
▫ Veličina zrna fosforescentnog materijala aktivnog sloja slikovne ploče	
▫ Faktor ili gustoća slaganja odnosno udio veziva	
Šum pripisiv skeneru slikovnih ploča	
▫ Neujednačenost brzine kretanja dijelova skenera tijekom procesa očitanja	
▫ Varijacija u intenzitetu laserske zrake	
▫ Širenje ili raspršenje laserske zrake	
▫ Broj prikupljenih fotona nastalih PSL odzivom	
▫ Varijabilnost A/D pretvarača u procesu uzorkovanja i kvantifikacije	
▫ Neujednačenost procesa brisanja slikovnih ploča	

3. EKSPANDIRANI POLISTIREN

Obzirom da je jedan od očekivanih znanstvenih doprinosa ovog doktorskog rada razvoj nove metode karakterizacije materijala ćelijaste strukture sustavom računalne radiografije, u poglavlju 3 opisan je postupak proizvodnje, te značajke odabranog ćelijastog materijala - ekspandiranoga polistirena. Na uporabna svojstva ekspandiranoga polistirena kao dominantna varijabla utječe njegova gustoća, a usko vezano sa time i sam proces proizvodnje ekspandiranoga polistirena. Stoga će naglasak biti stavljen na gustoću EPS-a te ovisnost o značajkama zrnja, udjelu pentana i vremenu provedenom u ekspanderu za vrijeme procesa ekspanzije. U poglavlju 3.3.4 stavljen je naglasak na ovisnost svojstava ekspandiranoga polistirena o gustoći.

3.1 Razvoj i značaj ekspandiranoga polistirena

Potreba za bržom, jednostavnijom, energetski učinkovitijom, a ujedno jeftinijom gradnjom, dovodi do uporabe novih materijala. 1949. godine inženjer kemije Fritz Stastny razvija predekspandirana polistirenska zrna s ugrađenim ugljikovodicima kao što je pentan. Kemijski koncern BASF iste godine dobiva patent, te započinje proizvodnju ekspandirajućih zrna polistirena pod trgovačkim nazivom Styropor®.

Proces izrade blokova ekspandiranoga polistirena u kalupima demonstriran je 1952. godine u Düsseldorf-u. Kompanija Koppers 1959. godine razvija ekspandirani polistiren poznat pod nazivom EPS (u daljnjem tekstu EPS od eng. *Expanded Polystyrene*) [15]. Arhitekti su na taj način dobili građevinski materijal niske toplinske vodljivosti i male mase, što je omogućilo izradu tanjih i lakših konstrukcija. Proizvodnja ekspandiranoga polistirena u stalnom je porastu diljem svijeta, s prosječnim porastom od oko 6 % godišnje.

Na uporabna svojstva ekspandiranoga polistirena kao dominantna varijabla utječe njegova gustoća, a usko vezano sa time i sam proces proizvodnje ekspandiranoga polistirena [57]. Ako je poznata gustoća ekspandiranoga polistirena, toplinska i mehanička svojstva toplinsko-izolacijskih ploča (gotov proizvod) mogu se predvidjeti [17]. U daljnjem tekstu biti će ukratko opisan postupak dobivanja ekspandiranoga polistirena.

3.2 Postupak proizvodnje

Kao osnovna sirovina za izradu ekspandiranoga polistirena služi tvrdo kuglasto zrnje polistirena [15]. Postupak dobivanja zrna poznat je pod nazivom *suspenzijska polimerizacija slobodnim radikalima* [58].

Slijed postupaka proizvodnje ekspandiranoga polistirena od suspenzijske polimerizacije stirena do gotovog proizvoda prikazan je slikom **Sl.- 19**.

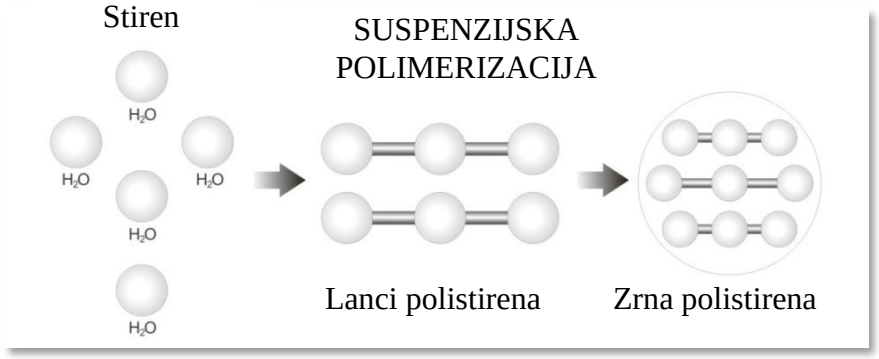


Sl.- 19. Postupak proizvodnje ekspandiranoga polistirena [58].

3.2.1 Proces proizvodnje polistirenskog zrnja

Suspenzijska polimerizacija predstavlja proces u kojem se polimerizacija odvija u monomerima dispergiranim u vodenom mediju, slika **Sl.- 20**. Drugim riječima, stiren[4] monomer (suspendirana organska faza) je pomiješan sa vodenim medijem (vodena faza).

Maseni omjer miješanja iznosi monomer/voda = 0,1 - 0,5 ([59], [60], [61]). Nakon završetka reakcije dobiva se polistirensko zrnje.



Sl.- 20. Iz stirena u polistiren postupkom suspenzijske polimerizacije [62].

U prvom stupnju proizvodnje dobivaju se polistirenske čestice odgovarajućeg granulometrijskog sastava, dok se u drugom stupnju ugrađuje pogodno pjenilo. Impregniranje se provodi na dva načina: *jednostupanjski postupak* i *dvostupanjski postupak.*

Proces polimerizacije započinje na temperaturi od oko 90 °C. U reaktor se dodaje voda, stiren te različiti inicijatori[5] (pokretači) procesa polimerizacije kao i stabilizatori[6] suspenzije, nukleatori i pjenila[7] ([15], [59]).

[4] Stiren (C_8H_8) dobiva se reakcijom između etilena (C_2H_4) i benzena (C_6H_6) uz prisustvo katalizatora kao što je aluminij-klorid. Na temperaturi od 600 °C do 650 °C provodi se stvaranje stirena.

[5] Monofunkcionalni inicijatori: dibenzoil peroksid (C_6H_5-COO-OOC- C_6H_5), azobisizobutironitril ($C_8H_{12}N_4$) ili njihove smjese: dibenzoil peroksid i terc-butil perbenzoat ($C_{11}H_{14}O_3$).

[6] Vodotopivi prirodni i sintetički polimeri kao što su poli(vinil-alkohol), poli(vinil-pirolidon) i metilceluloza, i skupina netopivih soli: kalcijevi, magnezijevi i barijevi fosfati, sulfati i karbonati.

Dodavanje stabilizatora suspenzije provodi se u trenutku kada je polimerizirano oko 67 % stirena u polistiren. Stabilizacijom se postiže stvaranje takozvane ljuske koja povećava stabilnost suspenzije. Također se osigurava ujednačenost veličine zrna gdje je više od 85 % iste granulometrije. Dodavanjem nukleacijskih sredstava definira se jednolikost strukture ćelija, uska raspodjela, njihov broj i veličina[8], čime se direktno utječe na karakteristike gotovog proizvoda kao što su dimenzijska postojanost i toplinska svojstva. U trenutku kada je 95 – 97 % stirena polimeriziralo u polistiren dodaje se pjenilo, najčešće izomeri pentana. Ovaj se dio procesa naziva impregnacija i odvija se pri temperaturama od 100 ˚C i tlaku od 7 bara. Vrsta i koncentracija pjenila određuju svojstva gustoće, čvrstoće i izolacijska svojstva. Povećanjem temperature na 120 ˚C u vrlo kratkom vremenu postiže se da smjesa pentana prodre i do jezgre zrna. Smanjenjem količine pentana povećava se gustoća polistirena. Optimalna masena količina pentana u polistirenu je od 6,3 % do 7,3 % ([15], [61], [62], [63]). Višak pentana izaziva povećanje promjera ćelija ili uništenje ćelijaste strukture. Veličina zrna dobivenog procesom suspenzijske polimerizacije ovisna je o promjeru i obliku reaktora i uspješnosti postupka miješanja. Navedenu ovisnost postavlja H. Hopff [64] u svom radu i prikazana je izrazom (4).

$$\bar{d} = \left(\frac{D}{d_{\mathrm{m}}}, \Theta, \frac{\eta_{\mathrm{m}}}{\eta_{\mathrm{w}}}, \frac{\rho_{\mathrm{m}}}{\rho_{\mathrm{w}}}, Re, Fr, We\right) \tag{4}$$

gdje je $\bar{d}$ veličina zrna dobivena postupkom suspenzijske polimerizacije, D promjer reaktora, d_{m} promjer miješalice, Θ omjer faza monomer-voda, η_{m} početna viskoznost, η_{w} viskoznost vodene faze, ρ_{m} gustoća monomera, ρ_{w} gustoća vode, Re Reynoldsov broj, Fr Frouedov broj i We Weberov broj.

Nakon završetka procesa polimerizacije odvaja se zrnje od vode, te se provodi sušenje. Prolaskom kroz sita zrnje se odvaja po tipovima te se odvodi u miješalice gdje se dodaju sredstva za obradu površine zrna. Zrna se pakiraju u kutije, takozvane oktobine.

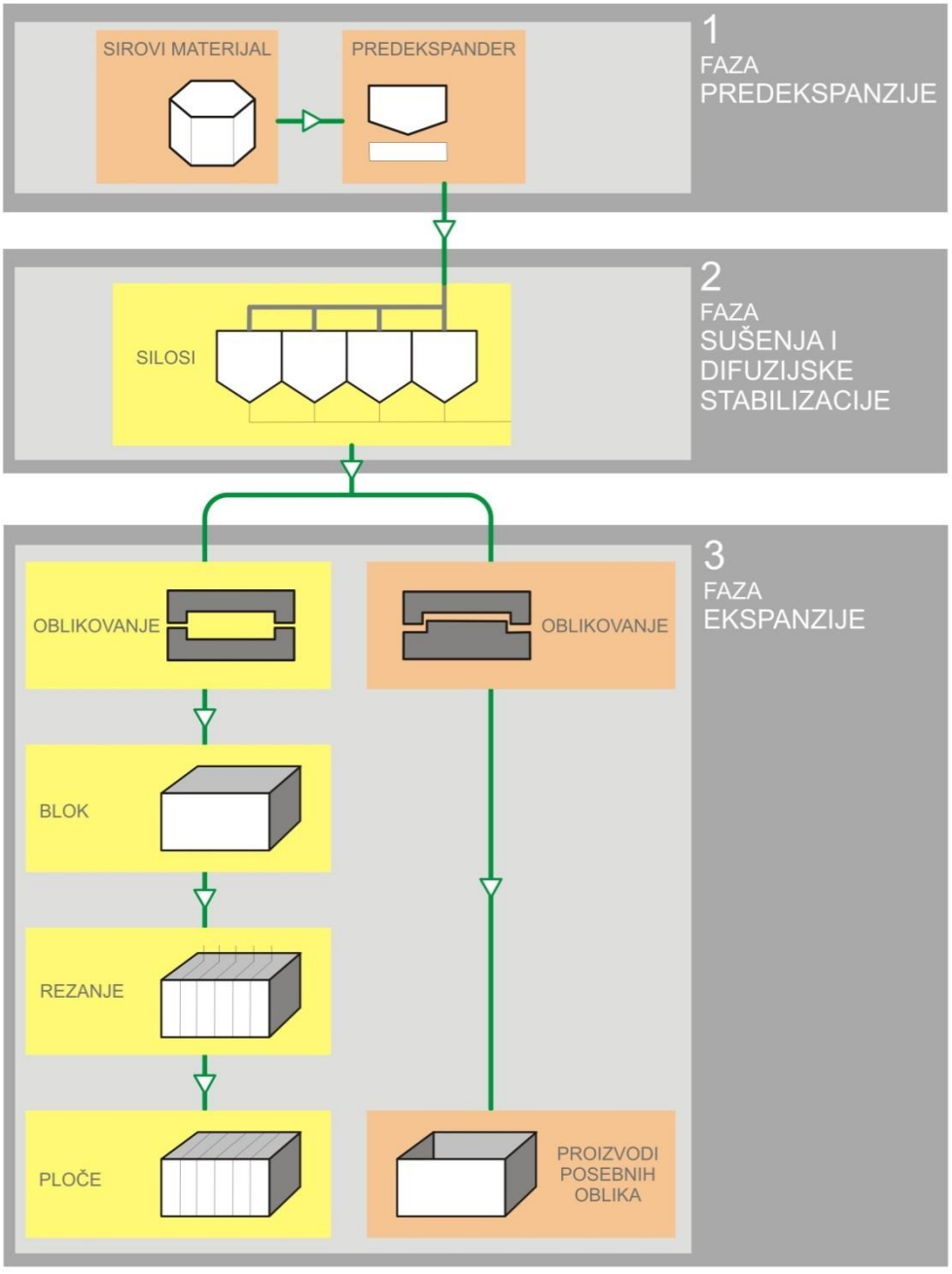
[7] Izomeri pentana (nedostatak im je laka zapaljivost), heksan, metilen-klorid, klor-fluor ugljikovodici (napušten zbog štetnog djelovanja na okoliš) i CO_2 (inertni plin male učinkovitosti zbog slabe topivosti u polistirenskoj osnovi).

[8] Dodavanjem ugljikovodikovih nanovlakana tijekom polimerizacije polistirena dobiva se tzv. mikroćelijski ekspandirani polistiren s veličinom ćelija 10 μm.

3.2.2 Proces proizvodnje ekspandiranoga polistirena

Proces proizvodnje ekspandiranoga polistirena odvija se u tri međusobno ovisne faze kako je prikazano slikom **Sl.- 21** [65]:

- prva faza – predekspanzija,
- druga faza – sušenje i difuzijska stabilizacija i
- treća faza – ekspanzija.

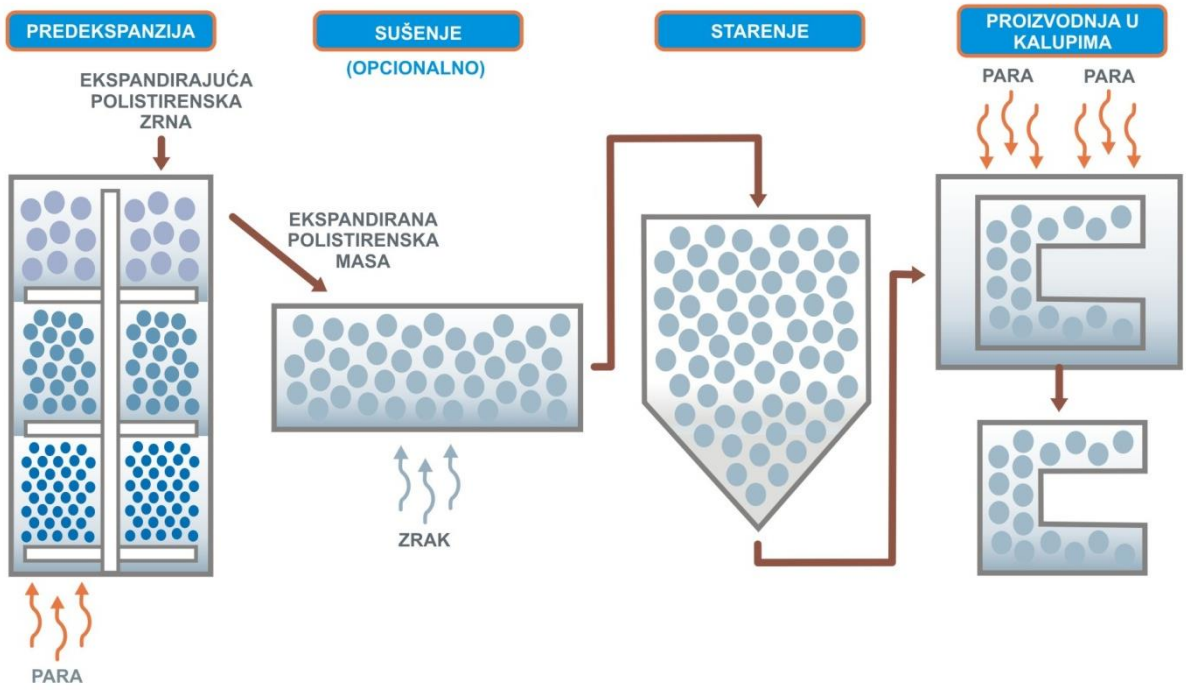


Sl.- 21. Proces proizvodnje ekspandiranoga polistirena [65].

U *prvoj fazi* sirovina – zrna polistirena, u obliku tvrdog prozirnog granulata promjera od 0,5 mm do 1,4 mm (manji promjer zrnja, veća gustoća EPS), ekspandiraju u predekspanderima. Proces predekspanzije se odvija pri temperaturama od 80 °C do 100 °C uporabom pare (najčešće korištena metoda) ili vrućeg zraka (kod proizvoda visoke gustoće). Fenomen omekšavanja stijenki zrna polistirena uz povećanje tlaka uzrokuje da lako hlapljivi pentan u zrnu prelazi u plinovito stanje i „napuhuje“ zrna do tražene gustoće.

Ekspanzijom se povećava volumen za 20 do 50 puta u odnosu na volumen sirovine prije ekspanzije. Gustoća se smanji sa oko 600 kg/m^3 na 10 kg/m^3 do 40 kg/m^3. U unutrašnjosti zrna nastaje pjenasta struktura u koju prodire vodena para. Tlakovi se u posudi izjednače, a ekspandirano zrnje se prebacuju u sušare. Kondenzirana vodena para ispari s površine predekspandiranih zrna. Postupak traje oko 4 minute.

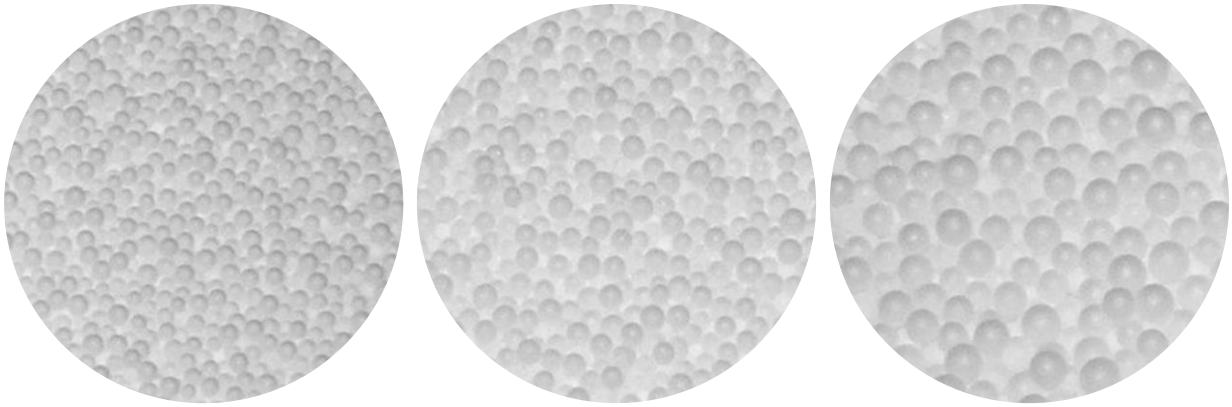
U *drugoj fazi* predekspandirane granule se prenose u prozračne, paropropusne silose gdje započinje proces dozrijevanja. Moguć je i odvojen proces sušenja kako je prikazano slikom **Sl.- 22** [66]. Unutar granula nalazi se vakuum te je potrebno provesti izjednačavanje tlakova sa okolinom. Uz izjednačavanje tlakova sa okolinom provodi se istovremeno hlađenje.



Sl.- 22. Proces proizvodnje ekspandiranoga polistirena s odvojenom fazom sušenja [66].

Tijekom hlađenja dolazi do difundiranja vodene pare i zaostalog pentana iz zrna, te kondenzacije vodene pare pa je potrebno provesti i sušenje. Istovremeno izjednačavanje tlakova, hlađenje i sušenje omogućava stabilizaciju čvrste ćelijaste strukture. Ova faza traje između 6 sata i 24 sata. Tako stabilizirane granule pogodne su za dalju obradu.

Prikaz granulacije predekspandiranoga zrna koje se koristi za proizvodnju ekspandiranoga polistirna tri različite vrijednosti tlačne čvrstoće, σ, prikazan je na slici **Sl.- 23** [66]. Na slici **Sl.- 23** σ je tlačna čvrstoća gotovog proizvoda u kPa, ρ je gustoća u kg/m^3 i Ø je promjer predekspandiranoga zrna u mm.



σ = 150-200 kPa,
ρ = 25-30 kg/m^3

σ = 100 kPa,
ρ = 20 kg/m^3

σ = 70 kPa,
ρ = 15 kg/m^3

Sl.- 23. Ilustrirani prikaz predekspandiranih zrna polistirena promjera: a) Ø = 2,5 - 3 mm, b) Ø = 3 mm i c) Ø = 4 mm [66].

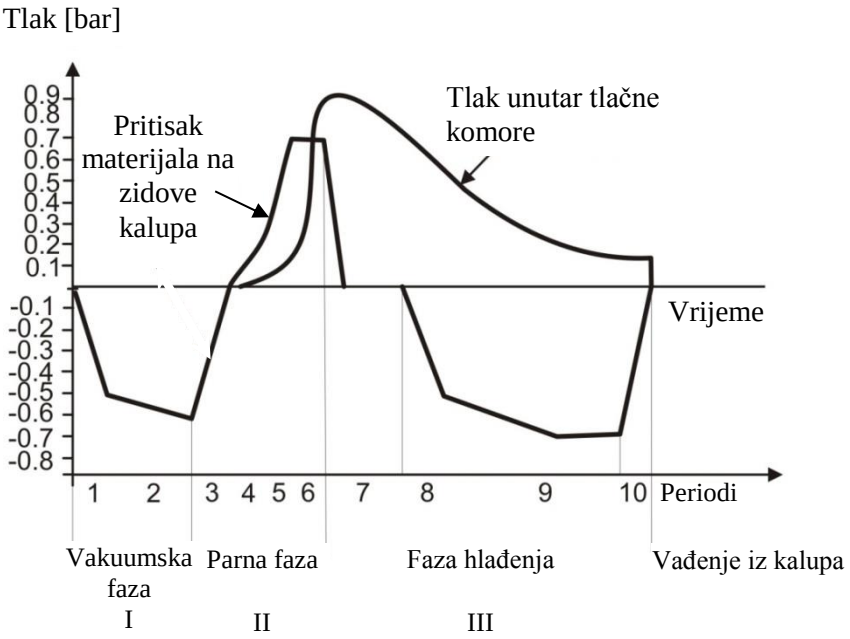
U *trećoj fazi* stabilizirana predekspandirana zrna uvode se u zatvorene metalne kalupe takozvane blok forme. Cijeli proces oblikovanja u kalupima traje od 3 minute do 15 minuta ovisno prvenstveno o gustoći predekspandiranih zrna i prikazan je dijagramom na slici **Sl.- 24**.

Neovisno o trajanju, treća faza u procesu proizvodnje se sastoji od [67]:

- *faze punjenja*, dovođenje stabiliziranih zrna u kalup.
- *vakuumske faze*, eliminiranje zraka i vode koji je ušao u kalup sa stabiliziranim zrnima.

- *parne faze*, nakon postizanja nultog tlaka u kalupu, dolazi do upuhivanja vodene pare. Započinje proces konačne ekspanzije. Granule ponovno omekšavaju i ekspandiraju. Obzirom da u kalupima nije moguće daljnje povećanje volumena, zrna se slijepe tvoreći kompaktni materijal zatvorenih ćelija. Potpunim zatvaranjem sustava, para se nastavlja upuhivati u trajanju od 3 do 10 sekundi, što rezultira konačnim lijepljenjem i spajanjem ekspandiranih zrna.
- *faze hlađenja*, sva zaostala voda uklanja se iz kalupa procesom uspostavljanja tlaka do iznosa 0,1 bar. Istovremeno se provodi postupak hlađenja. Nakon hlađenja kao poluproizvod dobiva se kompaktni materijal zatvorenih ćelija, takozvani blok. Blokovi se vade iz kalupa te ponovno odležavaju najmanje tjedan dana u svrhu ispuštanja zaostale vlage.

  Prevelika količina zaostale vlage dovesti će do nejednolikog procesa rezanja, usporavanja procesa rezanja kao i do pucanja vruće žice kojom se blokovi režu na ploče. Nakon rezanja, ploče ekspandiranoga polistirena moraju odležati još najmanje 3 tjedna. Postupak odležavanja u blok formi i pločama naziva se proces kemijske stabilizacije.



Sl.- 24. Treća faza proizvodnje ekspandiranoga polistirena u metalnim kalupima [67].

Na slici **Sl.- 24** proces prikazano je 10 perioda u trećoj fazi proizvodnje [67]. To su:

- *Period 1:* brzi pad tlaka.
- *Period 2:* daljnji pad tlaka.
- *Period 3:* zatvaranje kondenzacijskog odvoda i dovođenje pare do postizanja atmosferskog tlaka.
- *Period 4:* otvaranje kondenzacijskih ventila pri atmosferskom tlaku.
- *Period 5:* povećanje tlaka pare uz otvoren kondenzacijski ventil.
- *Period 6:* stabilizacija, kondenzacijski ventili su zatvoreni i tlak pare se održava 3-10 sekundi.
- *Period 7:* hlađenje, otvoren je kondenzacijski ventil i pada tlak unutar kalupa.
- *Period 8 i 9:* ventili se ponovo zatvaraju te se stvara vakuum radi odvođenja zaostale vlage.
- *Period 10:* postizanje tlaka od 0,1 bar.

3.3 Značajke EPS-a – gustoća

Osnovni pokazatelj svojstava ekspandiranoga polistirena je njegova gustoća, odnosno prividna gustoća. Ona definira toplinska i mehanička svojstva toplinsko-izolacijske ploče od ekspandiranoga polistirena.

Gledajući na makrorazini, to je homogeni materijal, dok je na mikrorazini to ćelijasti materijal. Sastavljen je od polistirenske ovojnice koja čini 2 % ukupnog volumena, dok je ostalo zrak.

Gustoća ekspandiranoga polistirena koji se koristi kao toplinsko-izolacijski proizvod iznosi od 15 kg/m^3 do 40 kg/m^3. Željena gustoća postiže se ekspandiranjem polistirenskog zrnja za 30 puta do 40 puta u odnosu na početni volumen.

Gustoća ekspandiranoga polistirena ovisna je o:

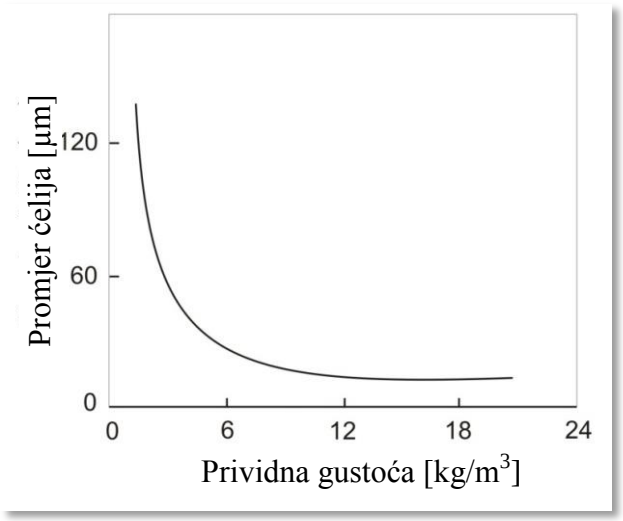
- značajkama zrnja (promjeru ćelija ekspandiranoga zrnja, ujednačenosti strukture ćelija, debljini ovojnice, promjeru zrna),
- udjelu pentana,
- vremenu provedenom u ekspanderu i
- količini zaostale vlage nakon kemijske stabilizacije.

3.3.1 Ovisnost gustoće ekspandiranoga polistirena o značajkama zrnja

U 1 m^3 ekspandiranoga polistirena nalazi se i do $6 \cdot 10^9$ zatvorenih ćelija oblika nepravilnog poliedra sa 12 stranica, promjera od 50 μm do 500 μm. Ćelije sadržavaju od 90 % do 98 % plinovite faze, a ostatak čini polistirenska ovojnica debljine od 1,5 μm do 5 μm. Kod ekspandiranoga polistirena čija je namjena toplinska izolacija, udio plinovite faze je 98 %.

Gustoća ekspandiranoga polistirena se definira kao odnos između udjela čvrste faze i plinovite faze. Gustoća se određuje na temelju gustoće polimera i pjenila te ovisi o poroznosti materijala ([15], [68]). Gustoća polimera definirana je kao omjer mase materijala i razlike volumena materijala i volumena ćelija, dok je poroznost definirana kao omjer volumena ćelija prisutnih u materijalu i volumena materijala.

Prividna gustoća obrnuto je razmjerna je prosječnoj vrijednosti promjera ćelija [15]. Ova je ovisnost prikazana na slici **Sl.- 25** i ima oblik hiperbole.



Sl.- 25. Ovisnost prividne gustoće o veličini ćelija [15].

3.3.2 Ovisnost gustoće ekspandiranoga polistirena o udjelu pentana

Sadržaj pentana se mijenja tijekom faza dobivanja ekspandiranoga polistirena. Optimalni maseni udio pentana iznosi od 6,5 % do 8,5 % [15].

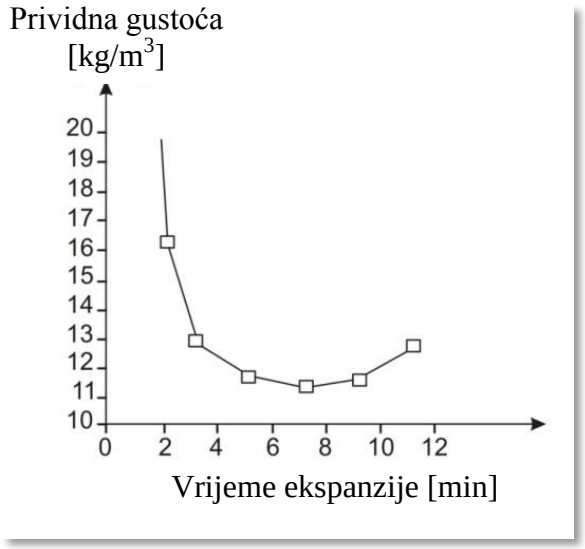
Prevelika količina pentana razara ćelijastu strukturu te dovodi do loma ćelije. Premala količina onemogućuje ekspanziju, te dolazi do pojave tvrdih jezgara čime se povećava

gustoća ekspandiranoga polistirena. Zrno koje ima udio pentana 6,0 % nakon ekspanzije imati će sadržaj pentana 4,3 %, a formirani proizvod 2,6 % [15].

3.3.3 Ovisnost gustoće ekspandiranoga polistirena o vremenu provedenom u ekspanderu

Podešavanje vrijednosti gustoće postiže se kontrolom vremena koje zrna provedu u ekspanderu i/ili tlaka u predekspanderu [67].

Produljeno vrijeme u ekspanderu (ili previsoka temperatura vodene pare) dovodi do povećanja gustoće i naknadnog kolapsa zrna. Kolaps nastaje uslijed pada tlaka unutar zrna zbog nestanka pentana. Ovisnost prividne gustoće toplinsko-izolacijskog materijala o vremenu ekspanzije prikazana je slikom **Sl.- 26**.



Sl.- 26. Ovisnost prividne gustoće o vremenu ekspanzije zrna ekspandiranoga polistirena [67].

3.3.4 Značajke ekspandiranoga polistirena – ovisnost svojstava o gustoći

Ekspandirani polistiren porozan je plastomerni materijal ćelijaste strukture i niske gustoće, najčešće u rasponu od 15 kg/m^3 do 40 kg/m^3. Zahvaljujući strukturnim svojstvima, proizvodi od ekspandiranoga polistirena:

- su najčvršći ćelijasti polimerni materijali,
- odlični su toplinski izolatori,

- imaju vrlo mali koeficijent apsorpcije vode, te
- imaju vrlo malu propusnost plinova i para.

Za EPS kao toplinsko-izolacijski materijal s primjenom u građevinarstvu, provjera svojstava, način označavanja, i sustav potvrđivanja sukladnosti daje norma specifikacija HRN EN 13163 - Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade - Tvornički izrađeni proizvodi od ekspandiranoga polistirena (EPS) – Specifikacija [2]. Na temelju navedene norme, proizvođač pridružuje svom proizvodu oznaku kojom definira svojstva značajna za taj proizvod, čime ujedno ukazuje i na mogućnost primjene proizvoda za ugradnju u građevinsku konstrukciju [70].

Primjeri toplinsko-izolacijskih ploča ekspandiranoga polistirena različite gustoće prikazani su slikom **Sl.- 27**.



Sl.- 27. Toplinsko-izolacijske ploče ekspandiranoga polistirena.

Tablica 3. daje pregled primjene ekspandiranoga polistirena u građevinarstvu obzirom na vrijednost tlačne čvrstoće prema *European Manufacturers of Expanded Polystyrene* (EUMEPS) [71].

Tablica 3. Pregled primjene ekspandiranoga polistirena u građevinarstvu obzirom na tlačnu čvrstoću [71].

PODRUČJE PRIMJENE	Tlačna čvrstoća [kPa]					
	EPS 60/100	EPS 100/150	EPS 150/200	EPS 200/250	EPS 250/300	EPS-T
PODRUMI						
vanjska izolacija	●	—	—	—	—	—
unutarnja izolacija	=	●	—	—	—	—
perimetarske ploče	=	=	=	●	—	—
PRIZEMLJE U RAZINI SA TLOM						
na zemlji	●	●	●	●	—	—
betonski pod	●	●	—	—	—	—
konstrukcijski pod	●	●	—	—	—	●
elementi za obnovu	●	●	—	—	—	—
PODOVI						
stropovi	●	—	—	—	—	—
plivajući podovi	●	●	—	—	—	●
ZIDOVI						
izolacija šupljih zidova	●	●	—	—	—	—
sendvič paneli-čelik	●	—	—	—	—	—
vanjska izolacija	●	—	—	—	—	—
ETICS	●	●	—	—	—	—
KOSI KROVOVI						
unutarnja izolacija	●	—	—	—	—	—
sendvič paneli	●	—	—	—	—	—
vanjska izolacija	●	●	●	—	—	—
RAVNI KROVOVI						
topli krov	●	●	●	●	—	—
hladni krov	●	—	—	—	—	—
obrnuti krov	=	=	●	—	—	—
NISKOGRADNJA						
sve/općenito	●	●	●	●	●	—

LEGENDA:

● normalna uporaba
= nije moguće zbog funkcionalnih zahtjeva
— nije potrebno osim u slučaju kada je specifično svojstvo zahtijevano
● u slučaju potrebe za raspodjelom opterećenja
● u slučaju kada je potrebno svojstvo nosivosti
● prema *European Manufacturers of Expanded Polystyrene* (EUMEPS) zahtjev može biti i stroži ovisno o zakonima pojedine zemlje.

Tablica 4 daje sistematizirani pregled svojstava ekspandiranoga polistirena ovisno o njegovoj vrsti (sistematizacija u odnosu na deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće u kPa). Podaci u tablici odnose se na ekspandirani polistiren opće namjene [72].

Tablica 4. Osnovna svojstva EPS-a opće namjene [72].

Prema normi HRN EN 13163 navedeni simboli u tablici predstavljaju:

- CS(10) simbol za razinu tlačnog naprezanja pri 10%-tnoj stišljivosti u kPa.
- BS simbol za razinu čvrstoće pri savijanju u kPa.
- DS(N) simbol za vrijednost stabilnosti izmjera pri normalnom laboratorijskim uvjetima u %.

Svojstva	**HRN EN 13163**	**Oznaka i mjerna jedinica**	**Vrsta EPS-a obzirom na tlačnu čvrstoću**				
			EPS 60	**EPS 100**	**EPS 150**	**EPS 200**	**EPS 250**
Toplinska provodljivost	HRN EN 12667 ili HRN EN 12939	"λ" [mW/mK]	38	36	35	34	34
Tlačno naprezanje pri 10 %-tnoj stišljivosti	HRN EN 826	CS(10) [kPa]	60	100	150	200	250
Čvrstoća pri savijanju	HRN EN 12089	BS [kPa]	100	150	200	250	350
Dimenzijska stabilnost	HRN EN 1603	DS(N) [%]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Vrijednost gustoće	HRN EN 1608	kg/m^2	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**

4. METODOLOGIJA ANALIZE SLIKE

Obzirom na cilj ovog rada, a i značajke strukture uzoraka ekspandiranoga polistirena detaljno obrađene u poglavlju 3, potrebno je provesti analizu digitalnih zapisa radiografske slike. Obzirom da su nakon očitanja digitalnih zapisa radiografske slike podaci spremljeni u RAW formatu potrebno je odabrati onaj format koji će nakon eksportiranja podataka dati sliku „najvjerniju“ originalu. Odabir formata slike za eksportiranje te oblika kompresije dan je u poglavlju 4.1.

Iskoristivost informacija za karakterizaciju uzorka ekspandiranoga polistirena sadržanih u digitalnom slikovnom zapisu ovisna je o načinu pristupa informaciji, načinu pretraživanja, ali prije svega o postupku određivanja korisnih značajki slika. Potrebno je odabrati one značajke na osnovu kojih se sadržaj slike može opisati, interpretirati i evaluirati.

Značajke slike se mogu utvrditi vizualnom interpretacijom, ali i izvesti numeričkim algoritmima, odnosno manipulacijama izravno iz vrijednosti pojedinih piksela.

Vizualna interpretacija može biti kognitivan postupak ljudskog bića, ali i automatizirani proces sustava umjetnog vida. Njome se utvrđuju značajke slike poput uključina u uzorku eksponiranom rendgenskom metodom, ali i boja očiju na fotografiji lica ili identitet osobe na fotografiji.

Značajke izvedene numeričkim algoritmima se također mogu koristi kao alat za vizualnu interpretaciju, ali njima se mogu utvrditi značajke koje ukazuju i na svojstva koja ne moraju izravno biti povezana s vizualnom percepcijom, gustoćom na primjer.

Sama analiza digitalnih zapisa radiografske slike provodi se na područjima od interesa definirane i nepromjenjive veličine. Područje od interesa predstavlja skup piksela s odzivom eksponiranog volumena, stoga je za promatrani skup piksela potrebno odabrati i definirati one značajke koje će se koristiti za analizu digitalnih zapisa radiografske slike.

Potencijalno mjerljive značajke elementa slike objašnjene su u 4.2, dok su izdvojene značajke koje će se koristit za analizu digitalnih zapisa radiografskih slika tijekom određivanja optimalnih parametara eksponiranja i očitanja definirane u poglavljima 4.2.1.3 i 4.3.

Da bi se odredili optimalni parametri eksponiranja i očitanja potrebno je definirati određeni kriterij – *kriterij dobrote.* Maksimalna vrijednost kriterija izračunat će se na temelju odabranih značajki koje se iščitavaju iz histograma područja od interesa, a u cilju nalaženja optimalnih parametara eksponiranja i očitanja. To će u konačnici omogućiti što bolje razlikovanje promatranih strukturnih stanja ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena definiranih u poglavlju 5.4. Način određivanja kriterija za područje od interesa 16-bitnog digitalnog zapisa radiografske slike prikazan je u poglavlju 4.4.

4.1 Format slike

PMT cijev daje analogni izlazni signal. A/D pretvarač pretvara signal u slijed diskretnih cjelobrojnih vrijednosti čime se kodira amplituda signala. Korišten sustav VMI 5100MS proizvođača Virtual Media Integration ima 16 bitni A/D pretvarač, a rezultat očitanja se pohranjuje kao rasterska digitalna slika [73].

Rasterske slike velike razlučivosti sadrže puno detalja, ali predstavljaju velike datoteke nepogodne za manipulaciju. Površinska razlučivost korištenog sustava skenera je od 50 μm do 200 μm (u koracima od 10 μm). Integrirani računalni program za analizu slike StarrView 7 Standard Edition VMI 5100MS cRT [74] nema mogućnost analize slike po površini već je ona moguća samo po proizvoljno odabranom pravcu. Za analizu digitalnih zapisa radiografske slike ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena potrebno je analizirati segmente površine. Korišten je računalni program ImageJ verzija 1.44 p.

Budući da se podaci dobiveni radiografskim ispitivanjem koriste na različitim platformama prilikom analize, potrebno ih je sačuvati od gubitka informacije tijekom prijenosa na različite platforme. Rendgenska slika dobivena procesom digitalizacije pohranjuje se u obliku sirove slikovne datoteke (od eng. *RAW image file*) na VMI 5100MS platformi. RAW je format u kojemu se bilježe svi podaci koje je skener tijekom očitanja slikovne ploče zabilježio („RAW" znači sirov. To su neprocesirani podaci).

Najveći nedostatak RAW-a je što nije univerzalni format već zahtjeva posebne računalne programe za obradu. Svi proizvođači daju i besplatne inačice programa za obradu, no kod nekih su to samo varijante programa sa smanjenim mogućnostima. Kao takvi oni su vezani uz sudbinu pojedinih proizvođača te se može dogoditi da prestane njihov daljnji razvoj i dostupnost alata za obradu.

Za obradu digitalnih zapisa radiografskih slika potrebno je njihovo eksportiranje. Integrirani računalni program [74] omogućuje eksportiranje podataka u niz različitih formata. Za obradu digitalnih zapisa slika odabran je TIFF format. TIFF (od eng. *Tag-based Image File Format*) može sadržavati slike koje imaju od 2 do 16777216 boja (ili nijansi skale sivih tonova). Prednosti formata u odnosu na primjer BMP (od eng. *Bitmap*) format je manje zauzeće memorije, a u odnosu na JPEG (od eng. *Joint Photographic Experts Group*) format kvaliteta slika [75].

Drugi razlog je i rasprostranjenost TIFF formata u čitavom nizu aplikacija gdje se zahtijeva očuvanje slikovnih/grafičkih podataka od gubitka informacije tijekom zapisivanja tijekom eksportiranja. Omogućuje pohranu slika visoke razlučivosti te se može neograničeno uređivati i pohranjivati. Format podržava sažimanje podataka bez gubitaka, ali može pohranjivati i nesažete podatke. Podaci dobiveni analizom digitalnog zapisa radiografske slike

sadrže velik broj podataka, odnosno kod 16 bitnog zapisa sadrže 65536 nijansi skale sivih tonova. Kod ovakve grupe podataka sažimanje bez gubitaka (od eng. *lossless compression*) zahtijeva veće procesne kapacitete, a nastale komprimirane datoteke se sporije otvaraju i pohranjuju ([50], [75]).

S druge strane sažimanje s gubicima (od eng. *lossy compression*) omogućava veći stupanj kompresije, ali i smanjenje kakvoće slike. Naime, ova vrsta sažimanja se temelji na stapanju sličnih podataka bez mogućnosti povratka u početno stanje. Radi se o objektivnom gubitku informacije koji nije zamjetan ljudskom oku. Obzirom da je najveća prednost sustava digitalne radiografije upravo dobivanje digitalnih radiograma velike razlučivosti, odabran je TIFF format bez ijednog oblika kompresije.

4.2 Mjerljive značajke elementa slike

Digitalni zapisi radiografskih slika su skale sivih tonova. Jedan od načina dobivanja korisnih informacija je analiza uz pomoć histograma. Iz histograma se nadalje izvode pojedine značajke za analizu. Za sliku u skali sivih tonova, histogram prvog reda predstavlja relativnu frekvenciju pojave različitih razina sivog u slici.

Pregledom dostupne literature sistematizirane su i izdvojene one značajke za analizu digitalnih zapisa radiografskih slika ekspandiranoga polistirena koje daju iskoristivu informaciju o slici. One su predstavljene kao momenti histograma odnosno momenti distribucije frekvencija ([76], [77]).

4.2.1 Momenti distribucije frekvencija

Moment *r*-tog reda oko broja „*a*“ se definira kao aritmetička sredina odstupanja numeričke varijable od zadanog broja „*a*“, podignute na *r*-tu potenciju. Moment distribucije frekvencija dan je izrazom (5):

$$m_{\mathrm{r}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - a)^r \tag{5}$$

- za vrijednost broja „a“ kod izračunavanja momenata obično se uzima vrijednost 0 (nula), pa se takvi momenti zovu momenti oko nule ili pomoćni momenti ili momenti oko ishodišta,
- ili vrijednost aritmetičke sredine, pa se takvi momenti zovu momenti oko sredine ili centralni momenti.

4.2.1.1 Momenti oko ishodišta

Momenti oko ishodišta se označavaju sa m_{r} a računaju se za pomoću izraza (6):

$$m_{\mathrm{r}} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - 0)^r}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i^r}{N} \tag{6}$$

Prvi moment oko nule je aritmetička sredina i predstavlja mjeru lokacije. Dana je izrazom (7)

$$m_1 = \bar{x} \tag{7}$$

Ostali momenti oko nule nisu kao takvi pokazatelji u analizi numeričkog niza već se koriste za jednostavnije izračunavanje momenata oko sredine, pa se zbog toga i nazivaju pomoćni momenti i definirani su u poglavlju 4.2.1.2.

4.2.1.2 Centralni momenti

Centralni momenti se koriste za mjerenje disperzije, asimetrije i zaobljenosti u okolini modalnog vrha krivulje. To su aritmetičke sredine odstupanja vrijednosti numeričkog obilježja od sredine podignuta na neku potenciju. Momenti oko sredine se uobičajeno označavaju sa μ_{r}, a određuju se na temelju izraza (8):

$$\mu_r = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^r \tag{8}$$

gdje je r = 1, 2, 3, 4.

4.2.1.2.1 Prvi centralni momenti

Prvi centralni moment jednak je nuli te kao takav ne predstavlja iskoristivu značajku slike.

$$\mu_1 = 0 \tag{9}$$

4.2.1.2.2 Drugi centralni moment

Drugi moment oko sredine služi za mjerenje disperzije podataka. Varijanca je aritmetička sredina kvadrata odstupanja numeričke varijable od njezine aritmetičke sredine. Varijanca je jednaka kvadratu standardnog odstupanja σ^2. Navedeno se može prikazati izrazom (10):

$$\mu_2 = \sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2 \tag{10}$$

Standardna devijacija se tumači kao prosječno odstupanje vrijednosti numeričke varijable od njezine aritmetičke sredine. Izraz za računanje standardne devijacije izvodi su iz izraza za varijancu. Dobiva se kao pozitivni drugi korijen iz varijance.

4.2.1.2.3 Treći centralni moment

Važna značajka distribucije skupa podataka je njezin oblik. Jedna komponenta oblika je simetričnost, određena koeficijentom asimetrije α_3, dok je druga spljoštenost, određena koeficijentom zaobljenosti α_4. Treći centralni moment naziva se relativna mjera asimetrije. Računa se omjerom trećeg momenta oko sredine i standardne devijacije podignute na treću potenciju. Određuje se prema izrazu (11) kako slijedi:

$$\mu_3 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^3 \tag{11}$$

Treći centralni moment može se odrediti korištenjem momenata oko ishodišta prema izrazu (12):

$$\alpha_3 = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \tag{12}$$

gdje je treći moment oko ishodišta dan izrazom (13):

$$\mu_3 = m_3 - 3m_1m_2 + 2m_1^3 \tag{13}$$

Skup podataka je *simetričan* ako je njihov treći centralni moment jednak nuli, odnosno ako je taj skup brojeva simetričan u odnosu na svoju aritmetičku sredinu. Odstupanje od simetričnosti mjeri se koeficijentom asimetrije, α_3, prikazanim izrazom (12).

Vrijedi da je histogram:

- negativno asimetričan ako je $\alpha_3 < 0$,
- pozitivno asimetričan ako je $\alpha_3 > 0$, i
- simetričan ako je $\alpha_3 = 0$. Grafički prikazano, histogram simetričnog skupa podataka je simetričan u odnosu na vertikalni pravac koji prolazi aritmetičkom sredinom.

4.2.1.2.4 Četvrti centralni moment

Druga komponenta oblika je zaobljenost [78]. Koeficijent relativne zaobljenosti vrha distribucije (od eng. *Kurtosis*) je značajka koja pruža informaciju o rasprostranjenosti distribucije po ordinati, te u kojoj mjeri su vrijednosti koncentrirane oko aritmetičke sredine.

Koeficijent relativne zaobljenosti vrha distribucije označava relativnu zaobljenost modalnog vrha krivulje razdiobe uspoređenu s normalnom razdiobom.

Određuje se prema izrazu (14):

$$\mu_4 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^4 \tag{14}$$

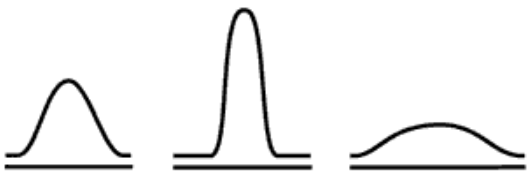
Koeficijent relativne zaobljenosti vrha distribucije dobiva se kao omjer četvrtog momenta oko sredine i standardne devijacije dignute na četvrtu potenciju, odnosno prema izrazu (15):

$$\alpha_4 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} \tag{15}$$

gdje je četvrti moment oko ishodišta dan izrazom (16):

$$\mu_4 = m_4 - 4m_1m_3 + 6m_1^2m_2 - 3m_1^4 \tag{16}$$

Vrijednost koeficijenta zaobljenosti za normalnu distribuciju iznosi 3 (slika **Sl.- 28** a). Koeficijent relativne zaobljenosti vrha distribucije vrijednosti > 3 označava relativno šiljastu distribuciju (slika **Sl.- 28** b). Koeficijent relativne zaobljenosti vrha distribucije vrijednosti < 3 označava relativno plosnatu distribuciju (slika **Sl.- 28** c).



a) b) c)

a) $\alpha_4 = 3$- normalna distribucija

b) $\alpha_4 > 3$ - razdioba je zašiljenija u odnosu na normalnu

c) $\alpha_4 < 3$ - razdioba je spljoštenija u odnosu na normalnu

Sl.- 28. Koeficijent relativne zaobljenosti vrha distribucije.

4.2.1.3 Izdvojene mjerljive značajke

Za analizu područja od interesa digitalnog zapisa radiografske slike izdvojene su slijedeće značajke iz histograma slike:

- srednja vrijednost (mjera lokacije, prvi moment oko ishodišta) i
- standardna devijacija (mjera raspršenja, drugi centralni moment).

4.3 Intenzitet zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike

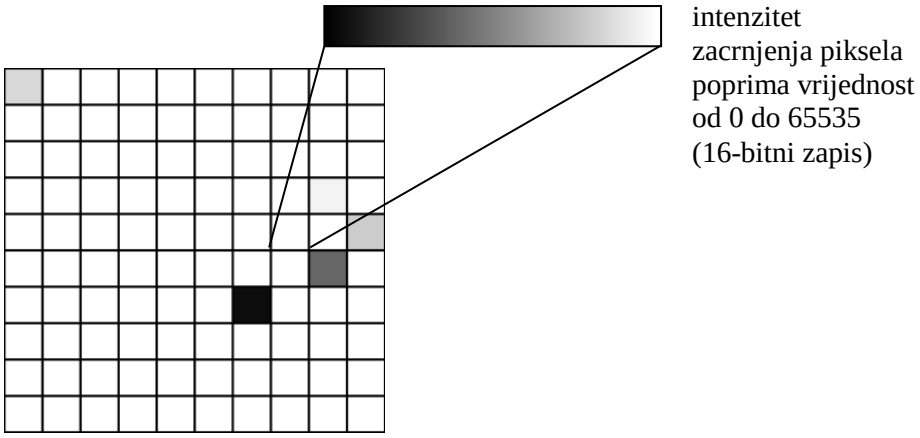
Na klasičnim radiogramima (konvencionalna film radiografija) govorimo o zacrnjenju (od eng. *Density*), pri čemu se „punim imenom“ dakako radi o *optical density*, budući da radiograme (kemijski razvijene filmove) promatramo na svjetlećim površinama (iluminatorima), te je fizikalno riječ o prolasku svjetlosti kroz radiogram do oka promatrača. Kemijske reakcije (srebrnih bromida) u filmu tijekom razvijanja su takove da u konačnici od latentnog zapisa u eksponiranom filmu (pozitiv) dolazimo do tamnijih područja (veće zacrnjenje) na filmu tamo gdje je riječ o manjoj „prozračenoj“ debljini materijala ili istoj debljini drugog materijala koji manje apsorbira prolazno zračenje od osnovnog materijala (negativ).

StarrView računalni program [74] u kombinaciji sa skenerom slikovnih ploča VMI 5100MS u konačnici na ekranu prikazuje negativ kako bi uvježbanom oku RT ispitivača interpretacija bila nepromijenjena u odnosu na interpretacije kod klasičnih radiograma (u filmskoj tehnici), odnosno nakon očitanja latentnog zapisa sa slikovnih ploča (pozitiv) StarrView računalni program automatski „invertira“ stupanj zacrnjenja kako bi dao negativ prikaz analogan konvencionalnim radiogramima. Kada pomoću StarView računalnog programa eksportiramo slikovne zapise u TIFF format, onda se u tom zapisu zadržavaju originalne vrijednosti PSL odziva, odnosno pozitiva. Iz toga proizlazi da su u TIFF zapisima na računalu veće vrijednosti u korelaciji sa svjetlinom piksela, te će stoga većim vrijednostima biti dodijeljena svijetlija nijansa sive, a vrijednost 0 će biti crna.

U skali sivih tonova (od eng. *grayscale*) svaki piksel digitalne rasterske slike nosi samo jednu informaciju i to o razini svjetline. Svakom je pikselu u sustavu sa 16-bitnom dubinom boje dodijeljena jedna od 65536 razina svjetline odnosno 65536 nijansi skale sivih tonova. Pri tome je vrijednost zacrnjenja piksela 0 pridijeljena crnoj boji, a vrijednost zacrnjenja piksela 65535 bijeloj boji (slika **Sl.- 29**). Kako je prikazano na

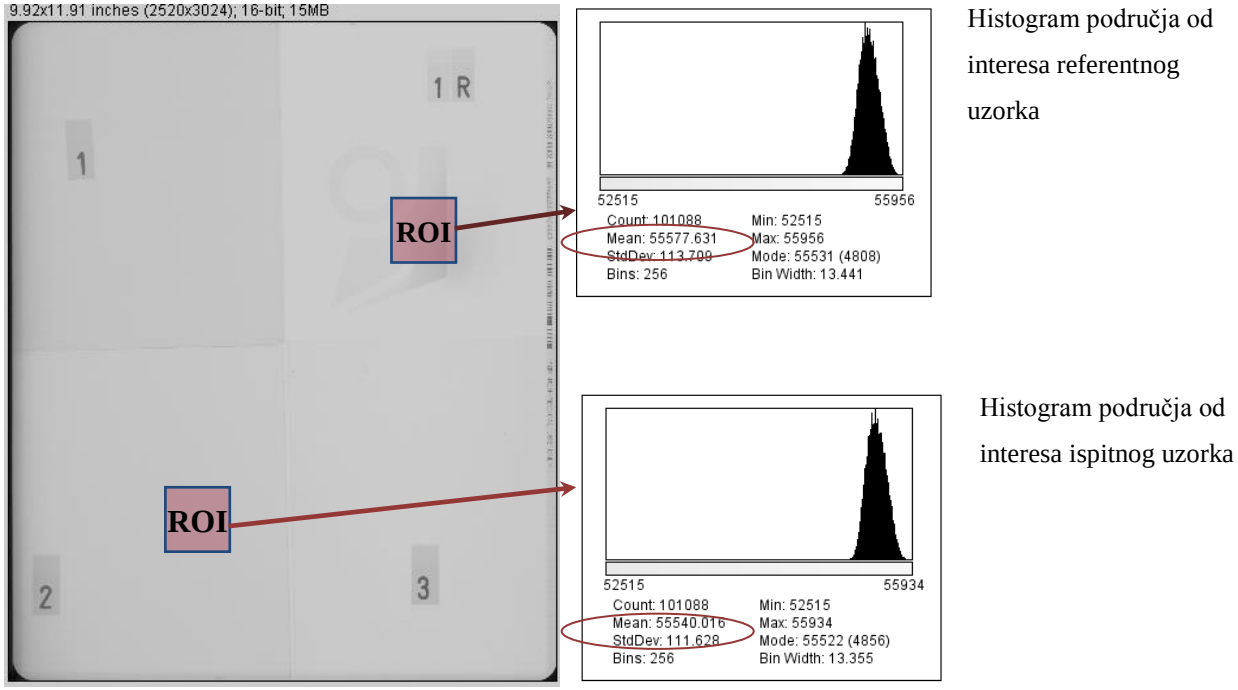
Sl.- 40 i **Sl.- 41** na njima su praznine/šupljine svjetlije, a "ovojnice" zrna i ćelija (koje predstavljaju tvar veće gustoće te posljedično i veće apsorpcije zračenja) su tamnije.

Osim intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike ispitnog uzorka određuje se i intenzitet zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike referentnog uzorka. Kao referentni uzorak služi ili polietilenski materijal debljine 2 mm ili ispitni uzorak poznate vrijednosti debljine i gustoće.



Sl.- 29. Rasterska slika.

Za analizu digitalnih zapisa radiografske slike odabrana je aritmetička sredina jer je to mjera lokacije i predstavlja odziv strukture uzorka (kao posljedica debljine i gustoće). Slika **Sl.- 30** prikazuje histogram područja od interesa.



Histogram područja od interesa referentnog uzorka

Histogram područja od interesa ispitnog uzorka

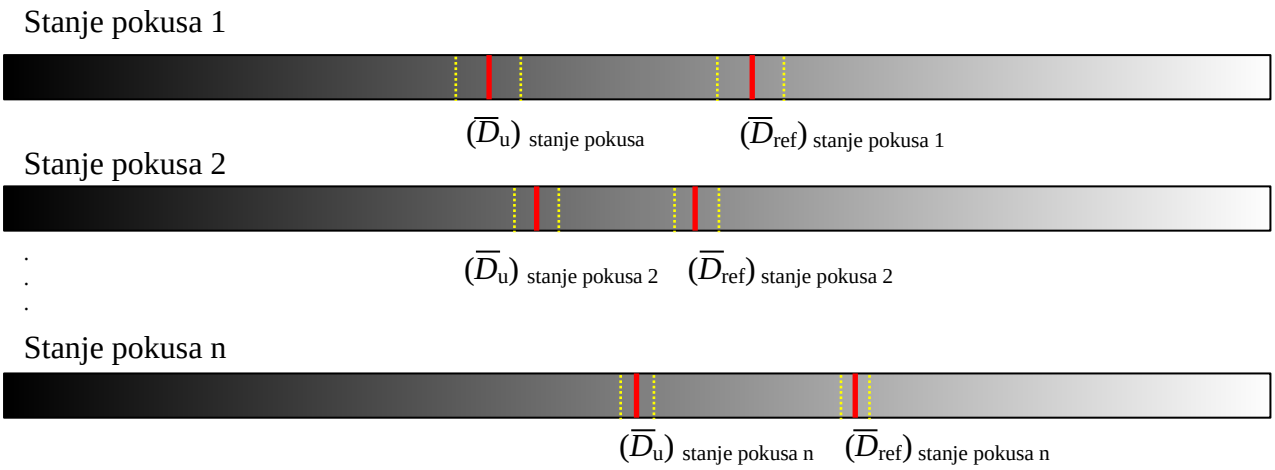
Sl.- 30. Histogram područja od interesa.

Na slici **Sl.- 30** intenzitet zacrnjenja piksela predstavljen je kao srednja vrijednost zacrnjenja piksela unutar područja od interesa (od eng. ROI, *Region of Interest*) za ukupan broj piksela. Veličina područja od interesa na slici je definirana kao konstantna vrijednost za sve analize koje će se provesti u eksperimentalnom dijelu rada i iznosi 1 cm x 1 cm. Položaj područja od interesa nije ponovljiv jer jednom očitana slikovna ploča mora se ponovo eksponirati, što rezultira drugačijim digitalnom zapisom slikovne ploče.

4.4 Kriterij dobrote

U svrhu određivanja optimalnih parametara eksponiranja i očitanja uveden je kriterij nazvan *dobrota*. Uvođenjem kriterija dobrote tražit će se njegova maksimalna vrijednost u cilju nalaženja optimalnih parametara eksponiranja i očitavanja, a u svrhu što uspješnijeg razlikovanja promatranih strukturnih stanja ekspandiranoga polistirena.

Kriterij dobrote određuje se iz funkcije dobrote. Način određivanja funkcije dobrote za područje od interesa 16-bitnog digitalnog zapisa radiografske slike prikazan je izrazom (17) i slikom **Sl.- 31**.



Sl.- 31. Određivanje funkcije dobrote eksponiranja i očitanja.

Na slici **Sl.- 31** crvenom crtom označena je srednja vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela područja od interesa dok je žutom označeno standardno odstupanje intenziteta zacrnjenja piksela područja od interesa.

Kako je prikazano izrazom (17) i slikom **Sl.- 31,** funkcija dobrote određuje se za svako stanje pokusa određeno planom pokusa.

Vrijednost dobrote predstavlja apsolutnu vrijednost razlike srednje vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela područja od interesa ispitnog uzorka i referentnog uzorka, te razlike standardnog odstupanja intenziteta zacrnjenja piksela područja od interesa ispitnog uzorka i referentnog uzorka.

Vrijednost dobrote eksponiranja i očitanja, δ, za pojedino stanje pokusa određuje se na temelju izraza (17).

$$\delta = \left| \frac{\overline{D_{\mathrm{u}}} - \overline{D_{\mathrm{ref}}}}{\overline{s_{\mathrm{D_u}}} + \overline{s_{D_{\mathrm{ref}}}}} \right| \tag{17}$$

gdje je:

- $\overline{D_u}$ srednja vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela područja od interesa ispitnog uzorka,
- $\overline{D_{\text{ref}}}$ srednja vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela područja od interesa referentnog uzorka,
- $\overline{s_{D_u}}$ standardno odstupanje intenziteta zacrnjenja piksela područja od interesa ispitnog uzorka i
- $\overline{s_{D_{\text{ref}}}}$ standardno odstupanje intenziteta zacrnjenja piksela područja od interesa referentnog uzorka.

Optimalni parametri dobrote eksponiranja i očitavanja određeni su kriterijem (18):

$$\text{optimalni parametri} = \max(\delta)_i \tag{18}$$

U kriteriju (18) *i* označava stanje pokusa sa maksimalnom vrijednošću parametra dobrote, δ za i = od 1 do n, a konačan broj stanja pokusa n određen je pojedinim planom pokusa.

5. TEHNIKA PROVEDBE EKSPERIMENTA

Karakterizacija u kvalitativnom smislu predstavlja definiranje svojstvenih odziva komponenata sustava, dok kvantitativno to podrazumijeva određivanje iznosa s kojim svaka ta komponenta utječe na pouzdanost rezultata ispitivanja.

Na primjer, odziv po promatranoj površini nije i ne može biti ujednačen. Obzirom da je cilj karakterizacija sadržaja ćelijastih struktura ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena (opisanih u poglavlju 5.4, **Sl.- 41**), potrebno je okarakterizirati (i po mogućnosti i kvantificirati) odzive svojstvene cjelokupnom sustavu, to jest cijelom procesu dobivanja/generiranja slike u digitalnom zapisu.

U cilju dokazivanja hipoteze rada i izrade modela za opisivanje utjecaja parametara eksponiranja i očitanja slikovnih ploča na odabrane značajke digitalnog zapisa radiografske

snimke, proveden je eksperiment korištenjem ISOVOLT 160 M2 0.4/1.5 rendgenskog uređaja proizvođača GE ([79], [80], [81]) i skenera VMI 5100MS CR SCANNER [73] sa integriranim računalnim programom za analizu slike StarrView 7 Standard Edition [74].

Eksperimentalni dio rada je proveden na ispitnim uzorcima ekspandiranoga polistirena opisanih u poglavlju 5.4. Komponente sustava kojima će biti određen kvantitativan i kvalitativan utjecaj na parametre od interesa biti će opisane u narednim poglavljima (5.1, 5.2, 5.3).

5.1 Rendgenski uređaj

U eksperimentalnom dijelu rada kao izvor zračenja koristi se rendgenski uređaj ISOVOLT mobil, proizvođača GE Inspection Technologies prikazan na slici **Sl.- 32**. Rendgenski je uređaj dostupan u Zrakoplovno-tehničkom centru, Velika Gorica.



Sl.- 32. Rendgenski uređaj ISOVOLT mobil s rendgenskom cijevi ISOVOLT 160 M2 0.4/1.5 (lijevo) s upravljačkom jedinicom (desno).

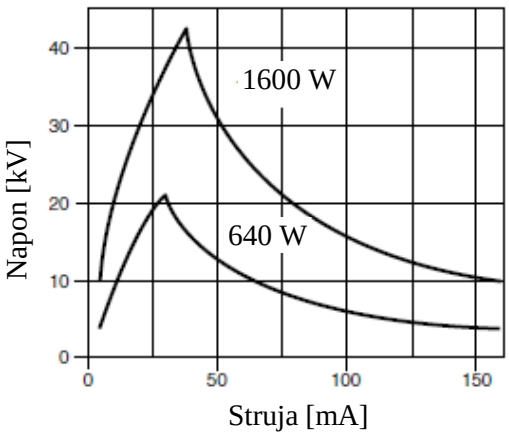
Primarni zahtjevi koji su postavljeni prilikom odabira rendgenskog uređaja bili su mogućnost eksponiranja, kao i stabilnost u području malih energija ionizirajućeg zračenja obzirom na mali maseni koeficijent prigušenja ekspandiranoga polistirena. Slijedeća značajka odabranog rendgenskog uređaja je i mogućnost korištenja fokusa promjera 1 mm. Naime,

smanjenjem promjera fokusa, oštrina i razlučivost, te mogućnost raspoznavanja detalja digitalne slike, se povećavaju kako je objašnjeno u poglavlju 2.3.4.

Osnovni tehnički podaci rendgenskog uređaja [79]:

- *jakost struje*: od 0,5 do 10 mA (u koracima od 0,1 mA),
- *napon na rendgenskoj cijevi*: od 5 do 160 kV (u koracima od 1 kV),
- *vrijeme radiografske ekspozicije*: od 0,1 do 99,9 min (u koracima od 0,1 min ili 1 s).

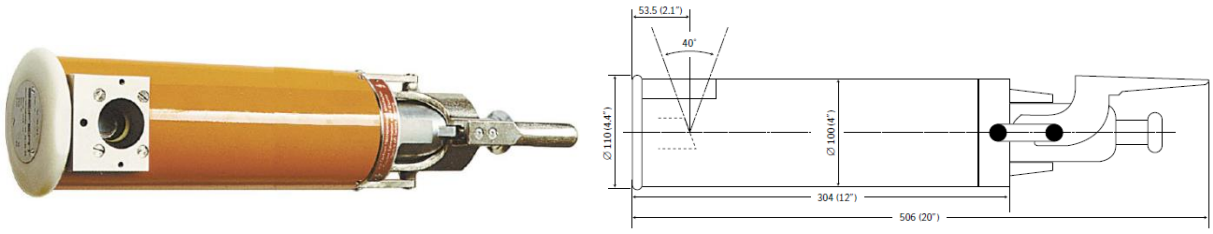
Slika **Sl.- 33** prikazuje ovisnost jakosti struje i napona za dva promjera fokusa: 1 mm (maksimalna snaga na anodi 640 W) i 3 mm (maksimalna snaga na anodi 1600 W).



Sl.- 33. Ovisnost napona o struji za promjere fokusa 1 mm (donja) i 3 mm (gornja) rendgenske cijevi uređaja ISOVOLT mobil [81].

Osnovni tehnički podaci rendgenske cijevi ISOVOLT 160 M2 0.4/1.5 prikazane na slici **Sl.- 34** [80]:

- *efektivni promjer fokusa (prema HRN EN 12543* [82]*):* 1 mm (≈ 0,4 IEC 336) i 3 mm (≈ 1,5 IEC 336),
- *maksimalna snaga na anodi*: 640 W za fokus promjera 1 mm i 1600 W za fokus promjera 3 mm,
- *struja pri* U_{max}: 4 mA,
- *izlazni kut snopa X zračenja*: 40˚.



Sl.- 34. Rendgenska cijev ISOVOLT 160 M2 0.4/1.5 uređaja ISOVOLT mobil [81].

5.2 Skener slikovnih ploča

Osnovni element sustava računalne radiografije VMI 5100MS je skener slikovnih ploča sa integriranim sustavom za analizu slike StarrView 7 Standard Edition dostupan i u funkciji u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja, pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu ([73], [74]). Skener slikovnih ploča sastoji se od lasera sa čvrstom jezgrom i sustavom dioda za pobuđivanje lasera (s valnom duljinom crvenog pobudnog svjetla λ = 670 - 690 nm). Promjer laserskog snopa je podesiv između 50 μm i 200 μm. Omogućava 16-bitno očitanje u skali sivih tonova. Time je osigurano više bitova podataka po pikselu, odnosno veći broj raspoloživih sivih tonova i točnije predstavljanje boja na digitalnim slikama.

Skener slikovnih ploča korišten za eksperimentalni dio je prikazan slikama **Sl.- 35** i **Sl.- 36**.



Sl.- 35. Skener slikovnih ploča sustava računalne radiografije VMI 5100MS [73].



Sl.- 36. Prikaz elementa skenera slikovnih ploča sustava računalne radiografije VMI 5100MS u koji je umetnuta slikovna ploča i StarrView radna stanica.

Prednost VMI 5100MS je i u njegovoj brzini očitavanja koja je rezultat pomičnog sustava sa jednostrukom akcijom. Pobuda laserskom zrakom i očitanje PSL odziva odvija se istovremeno samo pomakom pobudnog lasera dok slikovna ploča ostaje nepomična, što nije slučaj kod lasera sa dvostrukom akcijom (pomak lasera i slikovne ploče). Brisanje latentnog zapisa slike odvija se u povratu lasera u prvobitni položaj. Osnovni tehnički podaci skenera slikovnih ploča VMI 5100MS sustava [73]:

- *Izvor svjetla:* laserska zraka valne duljine pobude $\lambda = 670 - 690$ nm
- *Senzor:* fotomultiplikatorska cijev - PMT
- *Dubina boje / broj bitova:* više od 65000 nijansi sive / 16-bitni zapis
- *Efektivni promjer laserske zrake:* od 50 μm do 200 μm (korak od 10 μm)
- *Pomični sustav:* sustav s jednostrukom akcijom (samo pomak lasera)
- *Pohrana / brisanje*: u jednom prolazu s mogućnošću uključenja / isključenja.

5.3 Slikovne ploče

U eksperimentalnom dijelu rada korištene su slikovne ploče KODAK INDUSTREX Flex proizvođača KODAK [43]. Ovisno o dostupnosti korištene su slikovne ploče visoke razlučivosti oznake HR ili slikovne ploče standardne razlučivosti oznake GR.

Aktivni sloj ima oznaku $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ gdje (Br_x,I_{1-x}) predstavlja halogeni element. Dvovalentni Eu^{2+} predstavlja namjerno dodanu nečistoću ili dopand. Fotoosjetljivi sloj postavljen je na fleksibilnu polimernu osnovu. Stražnji crni polikarbonatni poboljšava optička svojstva, te povećava otpornost slikovnih ploča na toplinu i udarce. **Tablica 5** pokazuje pojedine slojeve $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovnih ploča, te njihove debljine.

Tablica 5. Debljine i vrste slojeva $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovnih ploča [43].

Korištene kratice su:
HR - slikovne ploče visoke razlučivosti
GP - slikovne ploče standardne razlučivosti

Vrsta slikovne ploče	Ukupna debljina [μm]	Aktivni sloj [μm]	Površinski sloj [μm]	Stražnji zaštitni sloj [μm]
HR	444	150	6	25,4
GP	605	300	12	38,1

Procedura očitavanja nakon provedenih eksponiranja mora biti konzistentna. Naročitu pažnju treba posvetiti vremenskom periodu između eksponiranja i očitanja slike. Vremenske periode između radiografske ekspozicije i očitanja slike potrebno je držati konstantnima čime će se u najvećoj mogućoj mjeri smanjiti varijacija u rezultatima koja bi nastala uslijed gubitka latentnog zapisa na slikovnim pločama. Sposobnost zadržavanja latentne slike korištenih $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovnih ploča prikazana je slikom **Sl.- 7**.

Obzirom da je za potrebe provedbe eksperimentalnog dijela rada sustav računalne radiografije VMI 5100MS bio fizički smješten u prostorijama Zrakoplovno-tehničkog centra, očitanje slikovnih ploča nakon eksponiranja provedeno je unutar jedne minute. U tom vremenu vrijednost zadržanog signala nešto je veća kod GP slikovnih ploča.

Valna duljina pobude laserske zrake korištenog lasera u skeneru sustava VMI 5100MS i PSL odziva KODAK INDUSTREX Flex slikovnih ploča s aktivnim slojem $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ se podudaraju. Time se značajno doprinosi kvaliteti korisnog signala.

Tablica 6 prikazuje fizikalna svojstva $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ fotoosjetljivog sloja.

Tablica 6. Fizikalna svojstva $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ fotoosjetljivog sloja [5].

Korištene kratice predstavljaju:

W – učinkovitost apsorpcije,
G – emitirani svjetlosni fotoni za 50 kV apsorbirane energije X zračenja,
VI – vrijeme trajanja PSL odziva,
MVD – maksimalna valna duljina emisije,
VDP – valna duljina pobude.

Fotoosjetljivi sloj	Gustoća [g/cm^3]	W [eV]	G [fotona/50 kV]	VI [μs]	MVD [nm]	VDP [nm]
$BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$	5,1	360	140	0,7	390	550-700

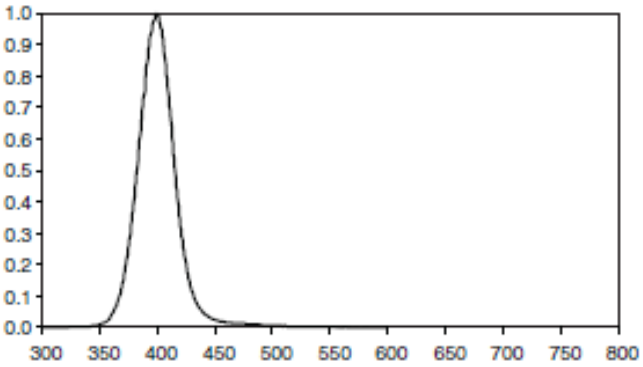
Kako pokazuje **Tablica 6**, minimalna valna duljina PSL odziva slikovnih ploča nakon pobude laserskom zrakom iznosi 390 nm (**Sl.- 37**). Valna duljina emitirane svjetlosti nakon pobude pri kojoj skener sustava VMI 5100MS postiže svoju maksimalnu učinkovitost tijekom procesa očitanja iznosi 390 nm (**Sl.- 38**).

Kako je prikazano, valna duljina potrebna za pobudu slikovnih ploča nalazi se unutar raspona od 550 nm do 700 nm. Valna duljina pobudne laserske zrake skeneru slikovnih ploča sustava VMI 5100MS iznosi 680 nm, slika **Sl.- 38** [43].

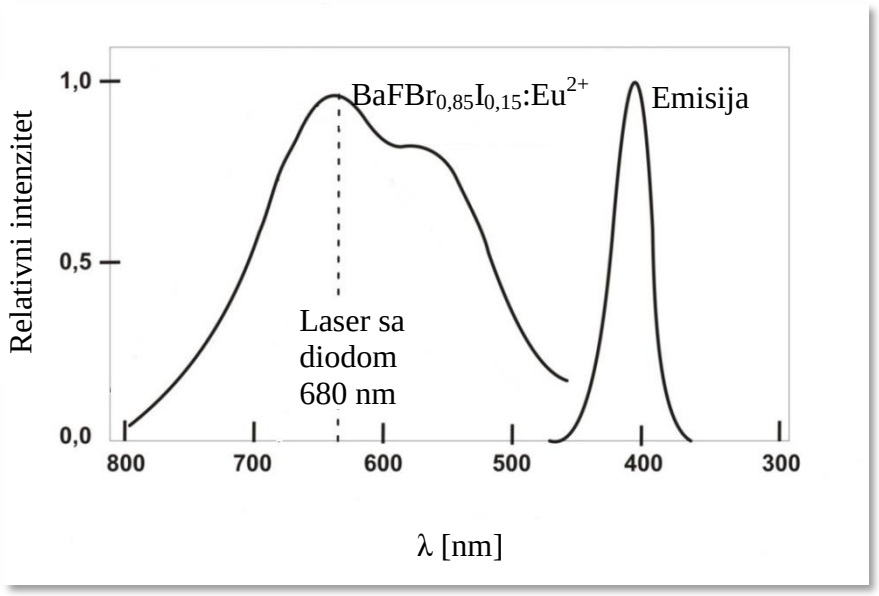
Spektar odziva $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ slikovnih ploča

Relativni intenzitet

Valna duljina PSL odziva [nm]



Sl.- 37. Spektar PSL odziva slikovnih ploča KODAK INDUSTREX Flex s $BaFBr_{0,85}I_{0,15}:Eu^{2+}$ fotoosjetljivim slojem [43].



Sl.- 38. Spektar pobude i emisije PSL svjetla slikovnih ploča [43].

5.4 Ispitni uzorci ekspandiranoga polistirena

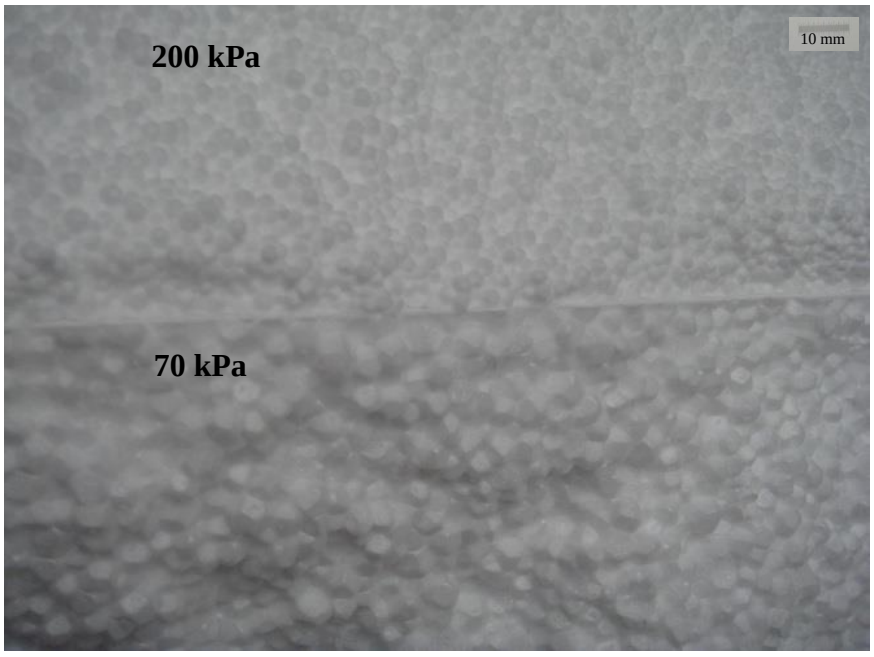
Toplinsko izolacijske ploče ekspandiranoga polistirena proizvedene su u tvrtki Okipor d.d. Dimenzije ploča su 1000 mm x 500 mm x *d*, gdje je *d* debljina u milimetrima. Za potrebe ovog rada odabrane su toplinsko izolacijske ploče:

- deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 50 kPa (gustoće od 12 kg/m^3),

- deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 70 kPa (gustoće od 15 kg/m^3),
- deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 100 kPa (gustoće od 20 kg/m^3),
- deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 150 kPa (gustoće od 25 kg/m^3),
- deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 200 kPa (gustoće od 30 kg/m^3).

Navedene gustoće nisu deklarirane vrijednosti. Za svaku vrijednost tlačnih čvrstoća osigurane su toplinsko izolacijske ploče debljina 60 mm, 80 mm i 100 mm.

Na slici **Sl.- 39** prikazana je razlika u veličini ekspandiranoga zrnja u ploči ekspandiranoga polistirena deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 200 kPa (gore) i 70 kPa (dolje).



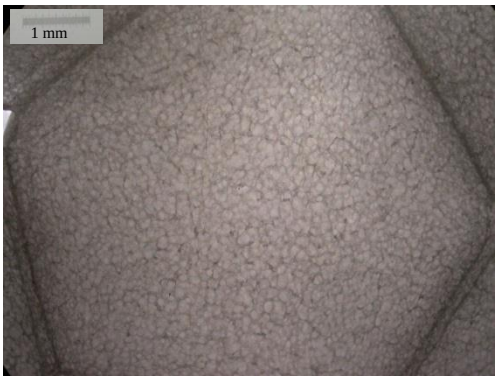
Sl.- 39. Ekspandirana zrna u gotovom proizvodu toplinsko-izolacijske ploče ekspandiranoga polistirena.

Na slici

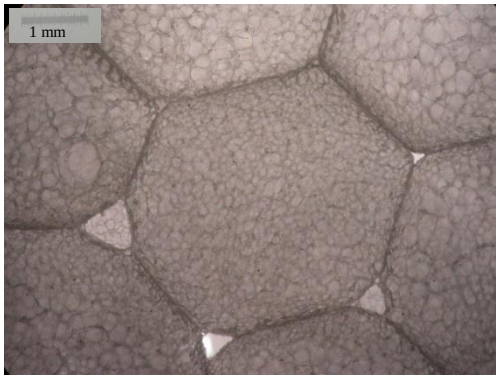
Sl.- 40 prikazana je makrostruktura uzoraka ekspandiranoga polistirena različitih deklariranih vrijednosti tlačnih čvrstoća: a) 50 kPa; b) 70 kPa; c) 100 kPa; d) 150 kPa; e) 200 kPa. Slike su snimljene u Laboratoriju za kamen i agregat, Instituta IGH, d.d. na svjetlosnom mikroskopu NIKON ECLIPSE E600. Povećanje na slici iznosi 20 X.

Presjek tipične ćelije ekspandiranoga polistirena prikazan je na slici **Sl.- 41**. Na slici je vidljiva tanka polistirenska ovojnica zrna. Uzorak je snimljen u Laboratoriju za kamen i agregat, Instituta IGH, d.d. na svjetlosnom mikroskopu NIKON ECLIPSE E600. Povećanje na slikama iznosi 40 X.

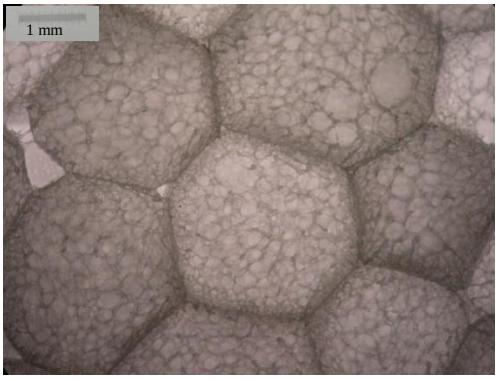
Kako bi se mogli potvrditi rezultati dobiveni analizom digitalnog zapisa radiografske snimke strukture ekspandiranoga polistirena, određena je prividna gustoća ispitnih uzoraka. Ispitivanje prividne gustoće ispitnih uzoraka provedeno je prema normi ispitivanja HRN EN 1602 [26] u Laboratoriju za građevinsku fiziku, Instituta IGH, d.d.



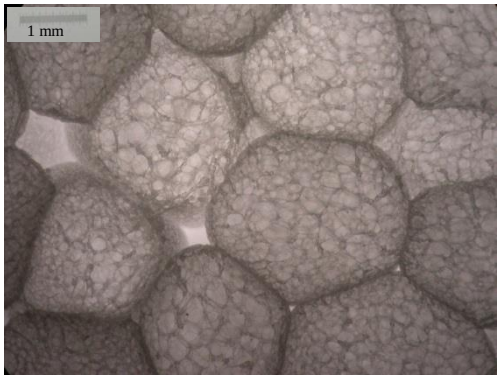
a) ekspandirani polistiren tlačne čvrstoće 50 kPa



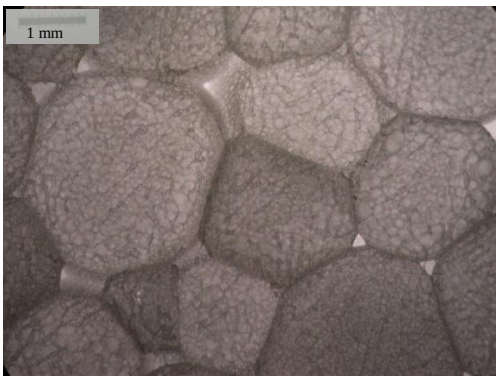
b) ekspandirani polistiren tlačne čvrstoće 70 kPa



c) ekspandirani polistiren tlačne čvrstoće 100 kPa



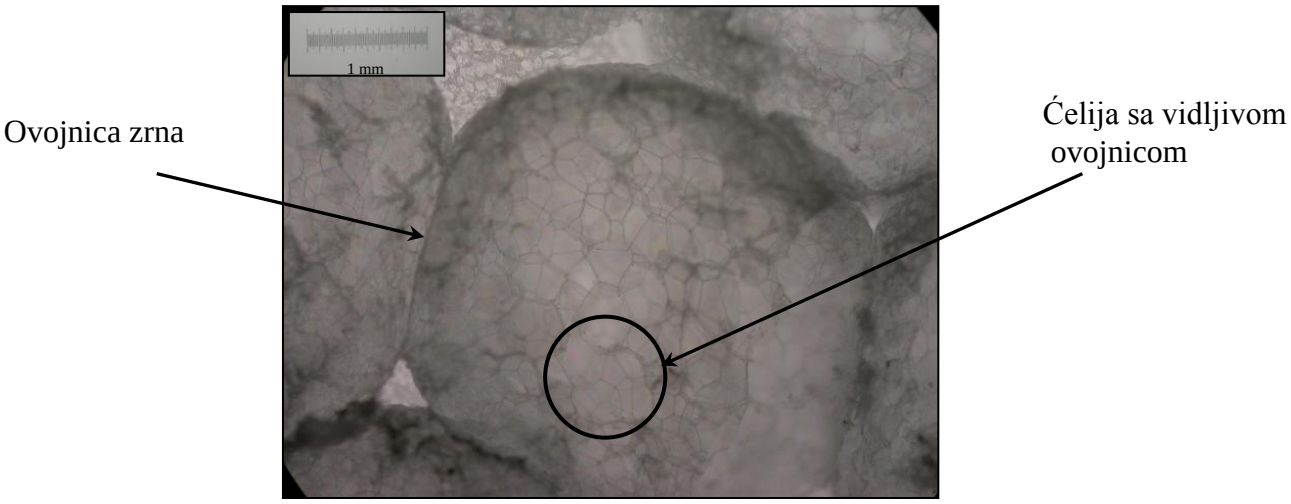
d) ekspandirani polistiren tlačne čvrstoće 150 kPa



e) ekspandirani polistiren tlačne čvrstoće 200 kPa

Sl.- 40. Makrostruktura ekspandiranoga polistirena tlačnih čvrstoća 50, 70, 100, 150, 200 kPa.

Prema normi specifikaciji za ekspandirani polistiren HRN EN 13163 [2] prividna se gustoća određuje na temelju 5 ispitnih uzoraka (toplinsko-izolacijske ploče) proizvodnih dimenzija, najčešće 1000 mm x 500 mm x debljina. Zbog ograničenja sustava za računalnu radiografiju, posebice u veličini slikovnih ploča koje se mogu snimiti i veličini promjera X zračenja, ispitni su uzorci odrezani postupkom vruće žice na dimenzije 200 mm x 200 mm x *d*, gdje je *d* debljina toplinsko izolacijskih ploča. Ispitni uzorci izrezani su iz toplinsko-izolacijske ploče ne uzimajući dio koji se nalazi 50 mm od rubova ploča. Time se ne uzima u obzir utjecaj grijanja vrućom žicom tijekom izrezivanja gdje dolazi do efekta taljenja ćelija granula EPS-a. Izrezano je ukupno pet ispitnih uzoraka iz dvije ploče, za svaku debljinu i deklariranu vrijednost tlačne čvrstoće na slučajno odabranim mjestima.



Sl.- 41. Mikrostruktura tipičnog ekspandiranoga polistirena.

Linearne dimenzije ispitnih uzoraka određuju se u skladu sa normom ispitivanja HRN EN 12085 uz traženu točnost od 0,5 % [83]. Linearne dimenzije: duljina, širina i debljina izmjerene su digitalnim pomičnim mjerilom razlučivosti 0,01 mm. Mjerne nesigurnosti mjerenja linearnih dimenzija ovim načinom mjerenja manje su od 0,5 %. Linearne dimenzije: duljina, širina i debljina izmjerene su na 5 mjesta za svaki od 5 ispitnih uzoraka. Prema normi ispitivanja HRN EN 1602, prividna gustoća se određuje kao omjer izmjerene mase i volumena pojedinog ispitnog uzorka [26]. Navedeno je dano izrazom (19):

$$\rho_{\mathrm{i}} = m_{\mathrm{i}}/V_{\mathrm{i}} \tag{19}$$

gdje je m_{i} masa u kg pojedinog ispitnog uzorka izmjerena vagom, proizvođača Mettler Toledo, tipa XS4002S, razreda točnosti II. V_{i} je volumen pojedinog ispitnog uzorka određen kao umnožak duljine, širine i debljine, izražen u m^3.

U Prilogu 1 dani su rezultati mjerenja volumena uzoraka u m^3, izmjerene vrijednosti mase u kg i vrijednosti gustoće u kg/m^3. Kao rezultat prikazana je opća srednja vrijednost gustoće ρ kao najbolja procjena vrijednosti gustoće za 5 ispitnih uzoraka uz mjernu nesigurnost mjerenja gustoće u_ρ.

Opća srednja vrijednost izračunata je korištenjem pripadajućih težinskih faktora ovisnih o mjernoj nesigurnosti pojedinog mjernog rezultata. Također je dana i proširena

mjerna nesigurnost srednje vrijednosti gustoće za interval povjerenja od 95 % uz faktor pokrivanja $k = 2{,}78$ (Studentova raspodjela za $\nu = 5 - 1 = 4$ stupnja slobode) [84].

5.5 Metodologija karakterizacije komponenata karakterizacijskog niza

Eksperimentalni dio rada podijeljen je u dva međusobno ovisna dijela. Prvi dio eksperimenta provesti će se u svrhu određivanja optimalnih parametara eksponiranja uzoraka ekspandiranoga polistirena. **Tablica 7** prikazuje odabrane parametre eksponiranja čiji će se utjecaj na mjerljive značajke digitalnog zapisa radiografske slike analizirati. To su napon u kV i radiografska ekspozicija u mAs.

Tablica 7. Odabrani parametri za provedbu eksperimenta.

Parametri eksponiranja:				
1.	Napon [kV]	Preliminarnim pokusom određena vrijednost od najviše 40 kV		
2.	Radiografska ekspozicija [mAs]	Ovisno o vrijednostima dobivenim analizom mjerljivih značajki digitalnog zapisa radiografske snimke		
Parametri očitanja:				
1.	Razlučivost očitanja [µm]	50	100	150
2.	Gustoća snage (intenzitet zračenja lasera), LP [W/m^2]	10	15	20
3.	Napon pojačanja PMT [V]	4,25	5,25	6,25
Parametri ispitnih uzoraka:				
1.	Tlačna čvrstoća [kPa]	50; 100; 150; 200		
2.	Debljina [mm]	60	80	100

U prvom dijelu eksperimenta, parametri očitanja za sva stanja eksponiranja su nepromijenjeni, a to su:

1. napon pojačanja PMT: 5,25 V,
2. gustoća snage (intezitet zračenja lasera): 15 J/m^2, i
3. razlučivost očitanja (Res): 100 µm.

Karakterizacija komponenata sustava eksponiranja provesti će se na ispitnim uzorcima ekspandiranoga polistirena deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 100 kPa. Debljine uzoraka biti će 60 mm, 80 mm i 100 mm.

Drugi dio eksperimenta provesti će se u svrhu određivanja optimalnih parametara očitanja. Pri tome će optimalni parametri eksponiranja, određeni u prvom dijelu eksperimenta, biti nepromijenjeni za sva stanja pokusa.

Odabrana su četiri faktora očitanja čiji će se utjecaj na mjerljive značajke digitalnog zapisa radiografske snimke analizirati. To su napon pojačanja PMT u V, razlučivost u μm, gustoća snage (intezitet zračenja lasera) u J/m^2 i deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće u kPa. Ispitivanje će se provesti na tri razine. Postupak karakterizacije elemenata sustava očitanja biti će proveden na ispitnim uzorcima deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa i 200 kPa uz konstantnu vrijednost debljine uzoraka od 80 mm.

6. OPTIMALNI PARAMETRI EKSPONIRANJA

Slikovni zapis je konačni rezultat aktivnosti koje se odvijaju u svakoj od komponenata sustava računalne radiografije. Kako bi se što pouzdanije evaluirao sadržaj slikovnog zapisa (odziva) potrebno je definirati i karakterizirati svaku pojedinu komponentu sustava računalne radiografije.

U poglavlju 6 oblikovan je plan pokusa za karakterizaciju komponenata sustava eksponiranja, dok će plan pokusa za karakterizaciju komponenata očitanja biti definiran u poglavlju 7. Kod oblikovanja plana pokusa za karakterizaciju komponenata eksponiranja u poglavlju 6.1.1 biti će definiran koristan dinamički raspon slikovnih ploča, te parametri provedenog pokusa: napon na rendgenskoj cijevi u kV i radiografska ekspozicija u mAs.

Nakon provedbe pokusa korištenjem opreme ISOVOLT 160 M2 0.4/1.5 rendgenskog uređaja proizvođača GE (poglavlje 5.1) ([79], [80], [81]), skenera VMI 5100MS CR

SCANNER sa integriranim računalnim programom za analizu slike StarrView 7 Standard Edition (poglavlje 5.2) ([73], [74]) i slikovnih ploča standardne razlučivosti KODAK INDUSTREX Flex proizvođača KODAK (poglavlje 5.3) [43], prikazani su rezultati određivanja intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike (poglavlje 6.2) i rezultati određivanja vrijednosti dobrote digitalnog zapisa radiografske slike (poglavlje 6.3).

Optimalni parametri eksponiranja određeni su parametarskom optimizacijom (grafičkom i numeričkom) korištenjem programa Microsoft Excel. Optimizacija je provedena postavljanjem gornjih i donjih granica parametra modela kako je definirano u poglavlju 6.5.

6.1 Plan pokusa za karakterizaciju komponenata sustava eksponiranja

Pokus je definiran za tri različite debljine uzoraka 60 mm, 80 mm i 100 mm deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 100 kPa uz referentni PE uzorak debljine 2 mm. Vrijednosti stanja pokusa (parametara eksponiranja) mijenjani su i prilagođavani tijekom provođenja pokusa ovisno o postavljenom cilju.

Cilj je da se za unaprijed određene debljine ispitnih uzoraka iste deklarirane vrijednosti čvrstoće, promjenom parametara napona na rendgenskoj cijevi i radiografske ekspozicije tijekom eksponiranja ispitnih uzoraka X zračenju, dobiju vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike u području dinamičkog raspona slikovnih ploča od 30000 do 35000. Područje dinamičkog raspona slikovnih ploča od 30000 do 35000 odabrano je da bi se izbjegla područja neuporabljiva za analizu digitalnog zapisa radiografske slike, a to su područje pojave mrena kod nižih vrijednosti intenziteta, te područje pojave zasićenja u gornjem području korisnog dinamičkog raspona slikovnih ploča prikazanih u poglavlju 6.1.2. Prema tome, nakon analize digitalnih zapisa radiografskih slika, metodologijom opisanom u poglavlju 4.3, provedena je prilagodba parametra eksponiranja da bi se intenzitet zacrnjenja piksela nalazio u području od 30000 do 35000 na dinamičkom rasponu slikovnih ploča.

6.1.1 Oblikovanje plana pokusa za karakterizaciju komponenata sustava eksponiranja

Tablica 8 prikazuje parametre provedenog pokusa gdje je svako stanje definirano članovima modela: naponom na rendgenskoj cijevi u kV i radiografskom ekspozicijom u mAs (umnožak jakosti struje na rendgenskoj cijevi u mA i vremena u s).

Tablica 8. Oznaka stanja pokusa, članovi modela: napon na rendgenskoj cijevi u kV, struja na rendgenskoj cijevi u mA, vrijeme u s i radiografska ekspozicija u mAs.

Slučajan raspored eksponiranja	Stanje eksponiranja	Debljina uzorka (za EPS 100)	Članovi modela			
			A	B		
			Napon [kV]	Radiografska ekspozicija [mAs]		
				Vrijeme [s]	Struja [mA]	Radiografska ekspozicija [mAs]
5	1	60, 80, 100	10	40	1	40
8	2		10	90	1	90
7	3		10	120	5	600
6	4		10	240	5	1200
9	5		15	120	1	120
10	6		15	120	2	240
12	7		15	120	3	360
11	8		15	120	3,5	420
4	9		40	10	0,5	5
3	10		40	10	3	30
1	11		40	20	4	80
2	12		40	40	4	160

Eksponiranja su provedena slučajnim redoslijedom također prikazanim u tablici. Stanja su unesena prema vrijednosti napona, a potom je za svaku vrijednost napona unesena ekspozicija od manje prema većoj vrijednosti radiografske ekspozicije.

Intenzitet zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike mjeren je u skladu sa metodologijom definiranom u poglavlju 4.3.

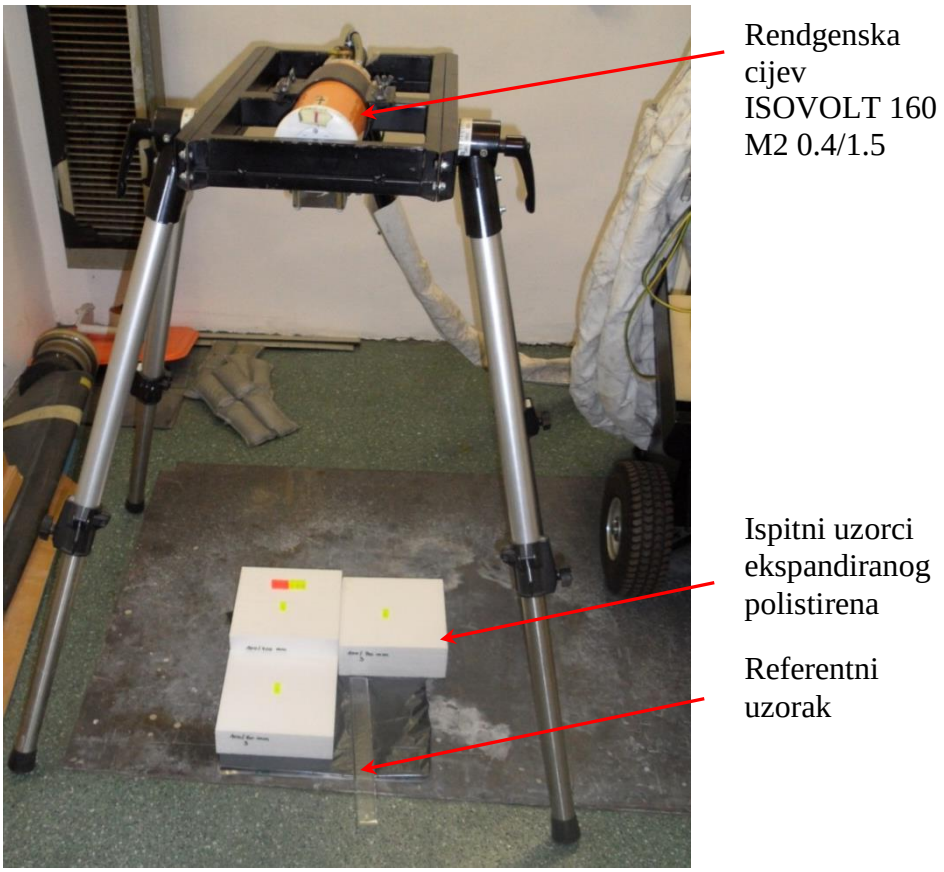
6.1.2 Provedba pokusa za karakterizaciju komponenata sustava eksponiranja

Na temelju saznanja dobivenih preliminarnim pokusima te podacima iz literature određena je maksimalna vrijednost napona rendgenske cijevi od 40 kV [14]. Parametri

eksponiranja temelje se na iskustvenim podacima te će za sva stanja eksponiranja biti nepromijenjeni. Parametri očitanja su:

- Napon pojačanja (PMT): 5,25 V
- gustoća snage (intezitet zračenja lasera) (LP): 15 J/m^2
- Razlučivost očitanja (Res): 100 µm.

Za karakterizaciju komponenata sustava eksponiranja odabrani su ispitni uzorci ekspandiranoga polistirena deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 100 kPa. Debljine uzoraka iznose 60 mm, 80 mm i 100 mm. **Sl.- 42** prikazuje postavku rendgenske cijevi i ispitnih uzoraka tijekom radiografske ekspozicije.

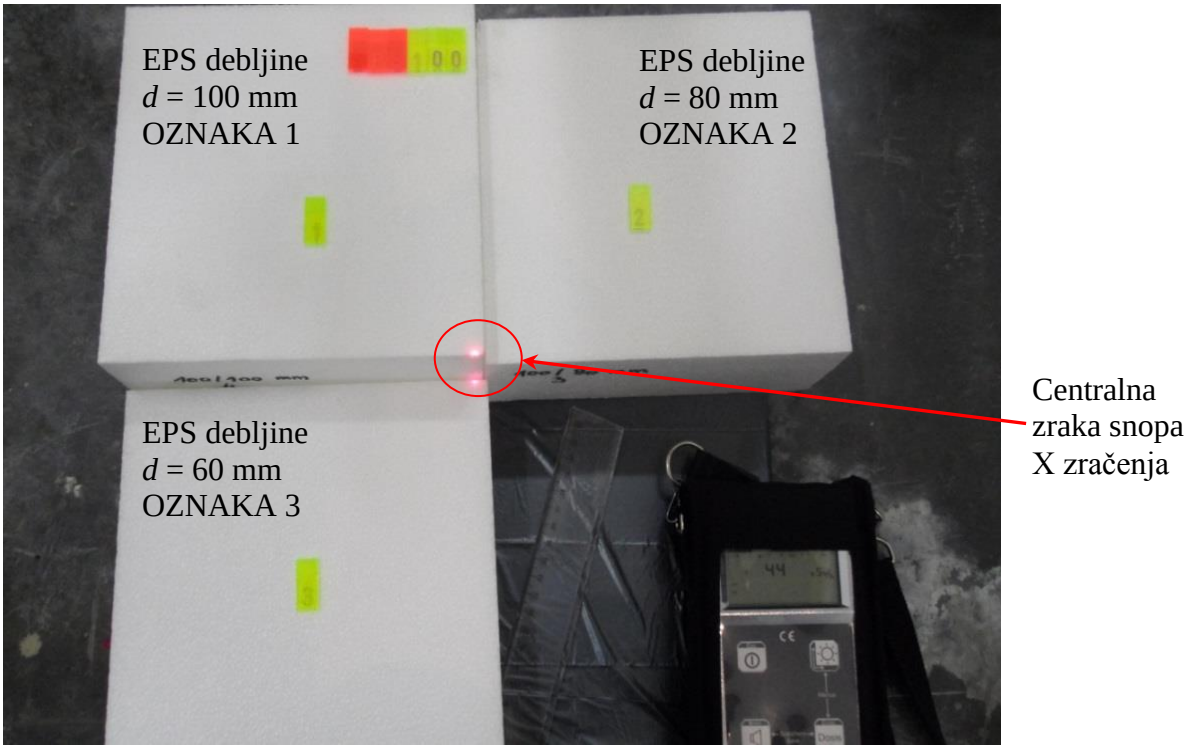


Sl.- 42. Postav ispitnih uzoraka i rendgenska cijev.

Na slici **Sl.- 43** prikazan je postav uzoraka na slikovnoj ploči tijekom karakterizacije komponenata eksponiranja. Oznaka 1 predstavlja uzorak debljine 100 mm, oznaka 2 predstavlja uzorak debljine 80 mm i oznaka 3 predstavlja uzorak debljine 60 mm. Također je

prikazan referentni polietilenski uzorak debljine 2 mm koji će služiti za određivanje utjecaja parametara eksponiranja na vrijednost dobrote digitalnog zapisa radiografske slike. Ispitni uzorci ekspandiranoga polistirena postavljeni su oko centralne točke snopa X zračenja. Centralna zraka snopa ima uvijek isti položaj.

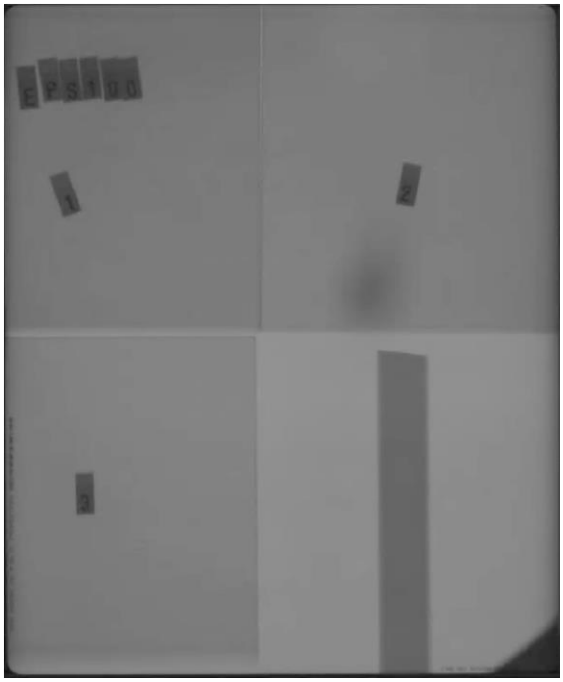
Udaljenost fokus-film (od eng. *FFD, Focus Film Distance*) postavljena je na 1 m. Za provođenje pokusa za karakterizaciju sustava očitanja korištene su KODAK INDUSTREX Flex slikovne ploče standardne razlučivosti proizvođača KODAK [43].



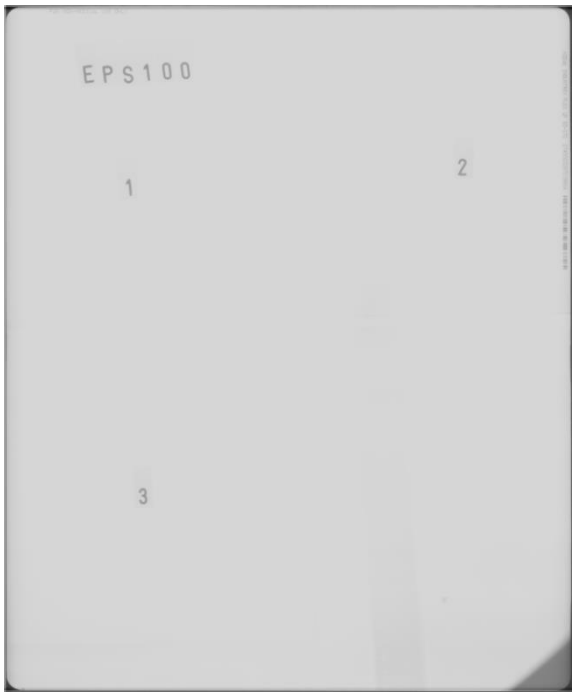
Sl.- 43. Postav uzoraka na slikovnoj ploči tijekom karakterizacije komponenata sustava eksponiranja.

Na slikama **Sl.- 44**, **Sl.- 45** i **Sl.- 46** prikazani su digitalni zapisi radiografskih slika za različita područja intenziteta zacrnjenja piksela. Na slici **Sl.- 44** prikazan je primjer digitalnog zapisa radiografske slike gdje se vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela nalazi u donjem području dinamičkog raspona slikovnih ploča, u području pojave mrena. Na slici **Sl.- 45** prikazan je primjer digitalnog zapisa radiografske slike gdje se vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela nalazi u gornjem području dinamičkog raspona slikovnih ploča, u području zasićenja. Na slici **Sl.- 46** prikazan je primjer digitalnog zapisa radiografske slike gdje se

vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela nalazi u odabranom području dinamičkog raspona slikovnih ploča između 30000 i 35000.



Sl.- 44. Digitalni zapis radiografske snimke s vrijednostima intenziteta zacrnjenja piksela u donjem području dinamičkog raspona slikovnih ploča (parametri eksponiranja su napon na rendgenskoj cijevi 10 kV, vrijeme 40 s, struja na rendgenskoj cijevi 1 mA).



Sl.- 45. Digitalni zapis radiografske snimke s vrijednostima intenziteta zacrnjenja u gornjem području dinamičkog raspona slikovnih ploča (parametri eksponiranja su: napon na rendgenskoj cijevi 40 kV, vrijeme 20 s, struja na rendgenskoj cijevi 4 mA).



Sl.- 46. Digitalni zapis radiografske slike s vrijednostima intenziteta zacrnjenja piksela unutar odabranog područja dinamičkog raspona slikovnih ploča (parametri eksponiranja su napon na rendgenskoj cijevi 15 kV, vrijeme 120 s, struja na rendgenskoj cijevi 3,5 mA).

6.2 Rezultati određivanja intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike

Metodologija određivanja intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike objašnjena je u poglavlju 4.3. Sa digitalnog zapisa radiografske slike svakog ispitnog uzorka iz plana pokusa, na tri područja od interesa, određena je vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela. Na temelju tri vrijednosti intenziteta piksela digitalnog zapisa radiografske slike izračunata je aritmetička sredina $\overline{D_{sred}}$. Sve vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike za svaki ispitni uzorak određena su na tri područja od interesa, jednake veličine i dovoljno daleko od utjecaja rubova uzoraka, no blizu centralne zrake snopa X zračenja prikazane na slici **Sl.- 43**. Prilog 2 daje pojedinačne vrijednosti

intenziteta zacrnjenja piksela za tri područja od interesa za svaki pojedini digitalni zapis radiografske slike, srednju vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela $\overline{D_{sred}}$, pojedinačne vrijednosti standardnog odstupanja, te srednju vrijednost standardnog odstupanja $\overline{s_{D_{sred}}}$.

Vrijednosti standardnog odstupanja intenziteta zacrnjenja piksela određena su analogno metodologiji određivanja zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike. Vrijednosti standardnog odstupanja intenziteta zacrnjenja piksela određene su na istim pripadajućim područjima od interesa, a u svrhu računanja dobrote prema izrazu (17) u poglavlju 4.4. **Tablica 9**, **Tablica 10** i **Tablica 11** daju prikaz vrijednosti struje na rendgenskoj cijevi i vremena eksponiranja za pojedino stanje eksponiranja. Također su prikazane izračunate vrijednosti aritmetičke sredine intenziteta zacrnjenja piksela za sve tri debljine ispitnih uzoraka za sva stanja pokusa.

Tablica 9. Vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti radiografske ekspozicije uz konstantan napon 10 kV.

Stanje pokusa	Struja [mA]	Vrijeme [s]	Rad. eksp. [mAs]	Intenzitet zacrnjenja piksela za vrijednost debljine:		
				60 mm	80 mm	100 mm
1	1	40	40	2596	2489	2482
2	1	90	90	12152	12019	11941
3	5	120	600	16012	16001	16030
4	5	240	1200	22007	21884	21200

Tablica 10. Vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti radiografske ekspozicije uz konstantan napon 15 kV.

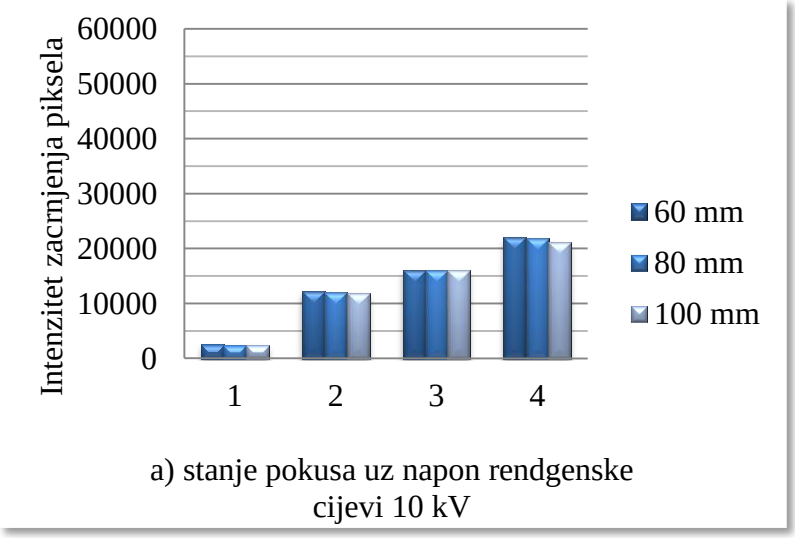
Stanje pokusa	Struja [mA]	Vrijeme [s]	Rad. eksp. [mAs]	Intenzitet zacrnjenja piksela za vrijednost debljine:		
				60 mm	80 mm	100 mm
5	1	120	120	15767	15609	15305
6	2	120	240	24651	24567	23967
7	3	120	360	30454	30079	29631
8	3,5	120	420	32999	32847	32392

Tablica 11. Vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti radiografske ekspozicije uz konstantan napon 40 kV.

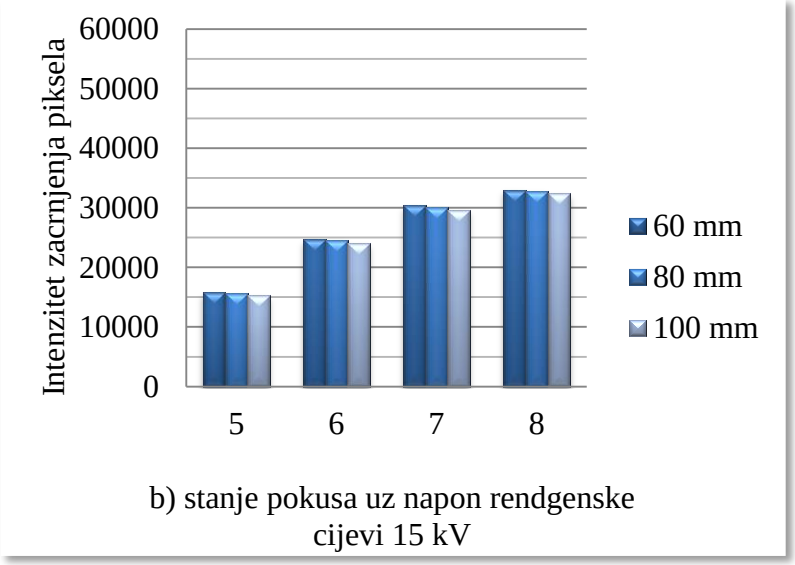
Stanje pokusa	Struja [mA]	Vrijeme [s]	Rad. eksp. [mAs]	Intenzitet zacrnjenja piksela za vrijednost debljine:		
				60 mm	80 mm	100 mm

9	0,5	10	5	34441	34470	34089
10	3	10	30	51685	51775	51002
11	4	20	80	55015	55042	55028
12	4	40	160	51413	51420	51419

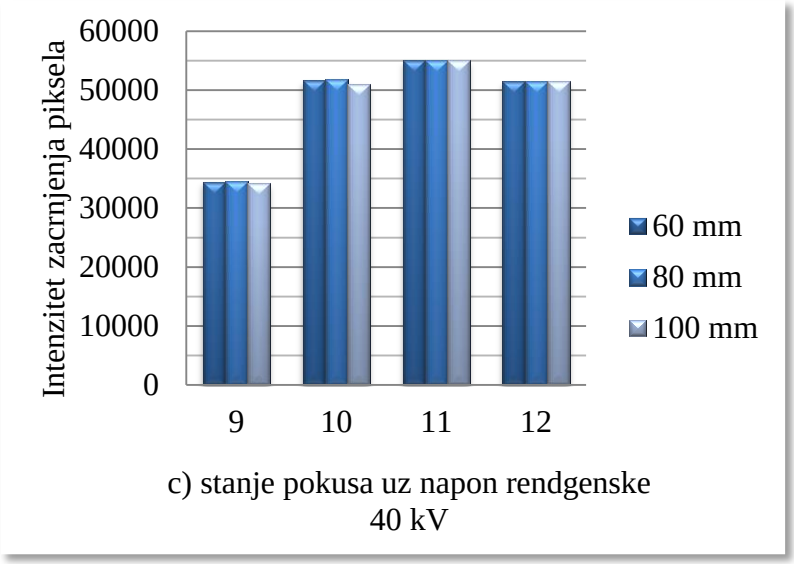
Slika **Sl.- 47** prikazuje ovisnost intenziteta zacrnjenja piksela o pojedinim stanjima pokusa odnosno o parametrima eksponiranja: naponu na rendgenskoj cijevi i radiografskoj ekspoziciji.



a) stanje pokusa uz napon rendgenske cijevi 10 kV



b) stanje pokusa uz napon rendgenske cijevi 15 kV



Sl.- 47. Ovisnost intenziteta zacrnjenja piksela o parametrima eksponiranja pri različitim vrijednostima napona na rendgenskoj cijevi: a) 10 kV, b) 15 kV i c) 40 kV.

Svako stanje pokusa prikazano je za tri debljine uzoraka 60 mm, 80 mm i 100 mm. Intenzitet zacrnjenja piksela na slikama predstavljen je aritmetičkom sredinom izmjerenih vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela na tri području od interesa na digitalnom zapisu radiografske slike. Pojedinačne vrijednosti dane su u Prilogu 2.

6.3 Rezultati određivanja dobrote digitalnog zapisa radiografske slike

Vrijednosti dobrote, δ, izračunate su na temelju izraza (17) i korištenjem srednje vrijednosti intenziteta piksela digitalnog zapisa radiografske slike sa tri područja od interesa prema u izrazu (20).

$$\delta = \left| \frac{\overline{D_{\text{sred}}} - \overline{D_{\text{ref}}}}{\overline{s_{\text{D}_{\text{sred}}}} + \overline{s_{\text{D}_{\text{ref}}}}} \right| \tag{20}$$

gdje je:

- $\overline{D_{\text{sred}}}$ srednja vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela na tri područja od interesa digitalnog zapisa radiografske slike jednog uzorka pri jednoj radiografskoj ekspoziciji odnosno pri jednom stanju pokusa,

- $\overline{D_{\text{ref}}}$ srednja vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela na tri područja od interesa digitalnog zapisa radiografske slike referentnog uzorka pri jednoj radiografskoj ekspoziciji odnosno pri jednom stanju pokusa,
- $\overline{s_{\text{D}_{\text{sred}}}}$ srednja vrijednost standardnog odstupanja intenziteta zacrnjenja piksela na tri područja od interesa digitalnog zapisa radiografske slike jednog uzorka pri jednoj radiografskoj ekspoziciji odnosno pri jednom stanju pokusa,
- $\overline{s_{\text{D}_{\text{ref}}}}$ srednja vrijednost standardnog odstupanja intenziteta zacrnjenja piksela na tri područja od interesa digitalnog zapisa radiografske slike referentnog uzorka pri jednoj radiografskoj ekspoziciji odnosno pri jednom stanju pokusa.

U izrazu 20 $\overline{D_{\text{sred}}}$ i $\overline{s_{\text{D}_{\text{sred}}}}$ odnose se na tri ispitna uzorka deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 100 kPa, debljina 60 mm, 80 mm i 100 mm. Vrijednosti dobrote izračunate su korištenjem srednjih vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela i standardnog odstupanja, za svaku debljinu i stanje pokusa. Srednje vrijednosti dobrote izračunate na temelju izraza (20) vrijednosti dane su u Prilogu 2.

Tablica 12, **Tablica 13** i **Tablica 14** daju prikaz vrijednosti dobrote na temelju analize digitalnog zapisa radiografske snimke za različite vrijednosti radiografske ekspozicije pri konstantnim vrijednostima napona rendgenske cijevi.

Tablica 12. Izračunate vrijednosti dobrote na temelju analize digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti rad. eksp. pri konstantnom naponu rendgenske cijevi od 10 kV.

Stanje pokusa	Struja [mA]	Vrijeme [s]	Rad. eksp. [mAs]	Vrijednost dobrote za debljine:		
				60 mm	80 mm	100 mm
1	1	40	40	4,52	3,81	2,85
2	1	90	90	5,96	5,93	5,50
3	5	120	600	6,12	5,99	6,01
4	5	240	1200	7,02	6,50	6,26

Tablica 13. Izračunate vrijednosti dobrote na temelju analize digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti rad. eksp. pri konstantnom naponu rendgenske cijevi od 15 kV.

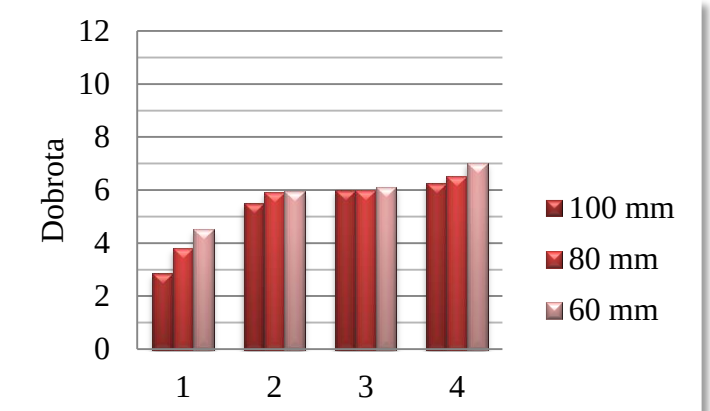
Stanje pokusa	Struja [mA]	Vrijeme [s]	Rad. eksp. [mAs]	Vrijednost dobrote za debljine:		
				60 mm	80 mm	100 mm
5	1	120	120	6,53	3,97	3,69

6	2	120	240	9,18	8,66	6,10
7	3	120	360	9,75	8,39	6,16
8	3,5	120	420	10,06	9,79	7,62

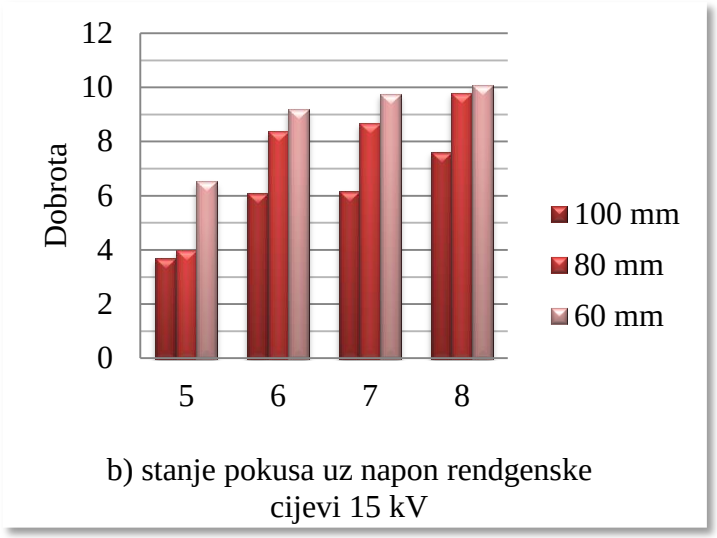
Tablica 14. Izračunate vrijednosti dobrote na temelju analize digitalnog zapisa radiografske slike za različite vrijednosti rad. eksp. pri konstantnom naponu rendgenske cijevi od 40 kV.

Stanje pokusa	Struja [mA]	Vrijeme [s]	Rad. eksp. [mAs]	Vrijednost dobrote za debljine:		
				60 mm	80 mm	100 mm
9	0,5	10	5	7,59	8,59	8,78
10	3	10	30	5,93	8,49	8,63
11	4	20	80	3,33	3,49	3,55
12	4	40	160	2,26	2,90	3,32

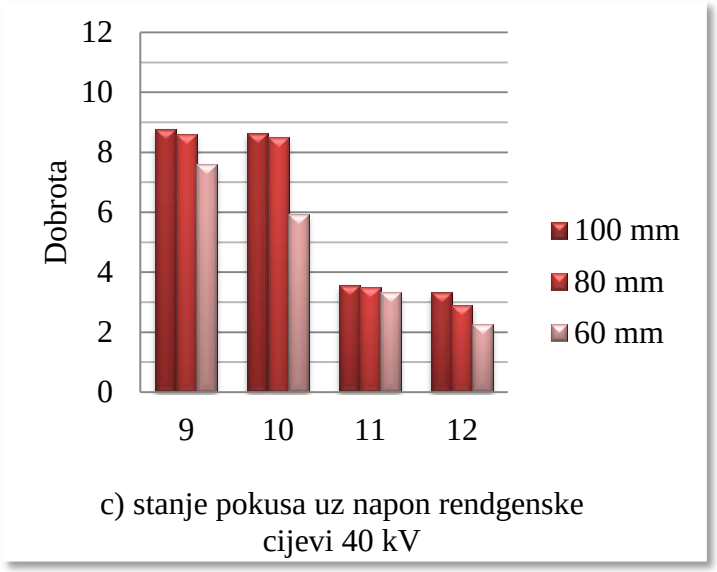
Slika **Sl.- 48** prikazuje ovisnost dobrote o pojedinim stanjima pokusa odnosno o parametrima eksponiranja: naponu na rendgenskoj cijevi i radiografskoj ekspoziciji. Svako stanje pokusa prikazano je za tri debljine uzoraka 60 mm, 80 mm i 100 mm.



a) stanje pokusa uz napon rendgenske cijevi 10 kV



b) stanje pokusa uz napon rendgenske cijevi 15 kV

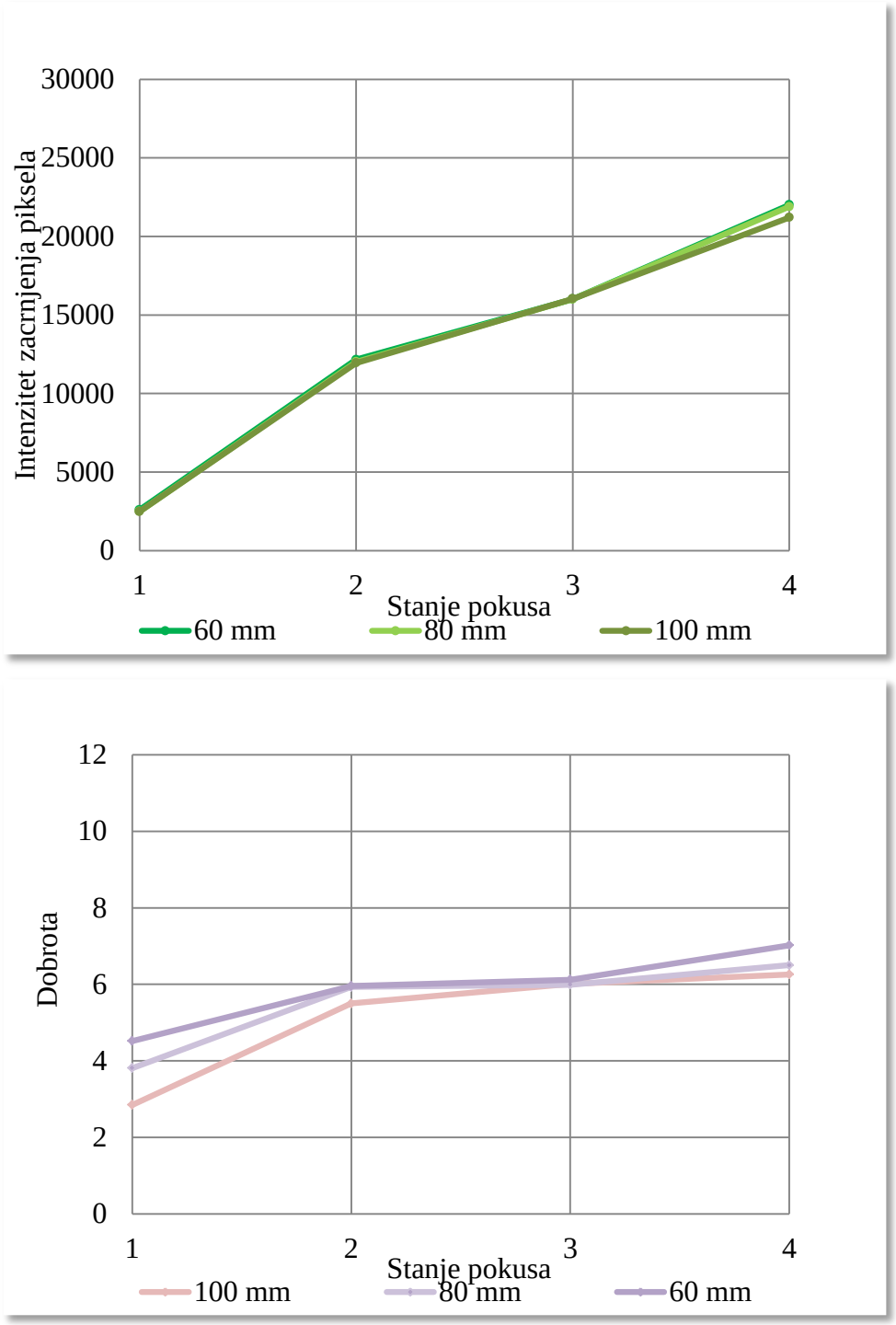


c) stanje pokusa uz napon rendgenske cijevi 40 kV

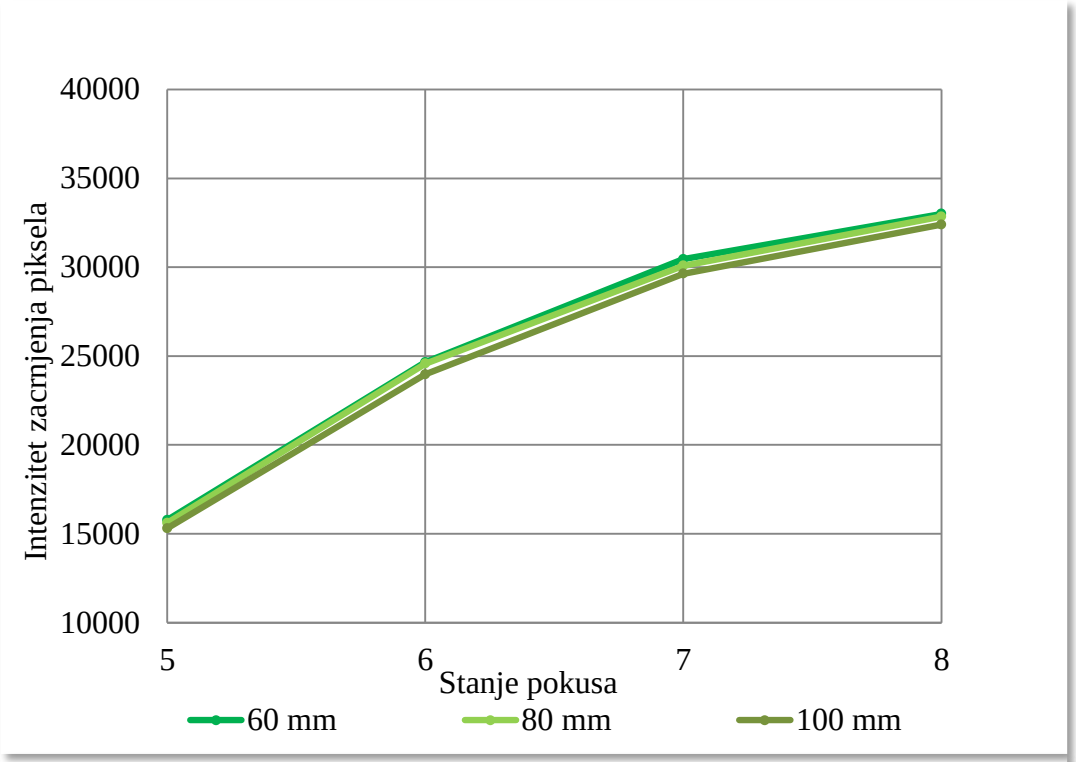
Sl.- 48. Ovisnost dobrote o parametrima eksponiranja uz konstantnu vrijednost napona rendgenske cijevi: a) 10 kV, b) 15 kV i c) 40 kV.

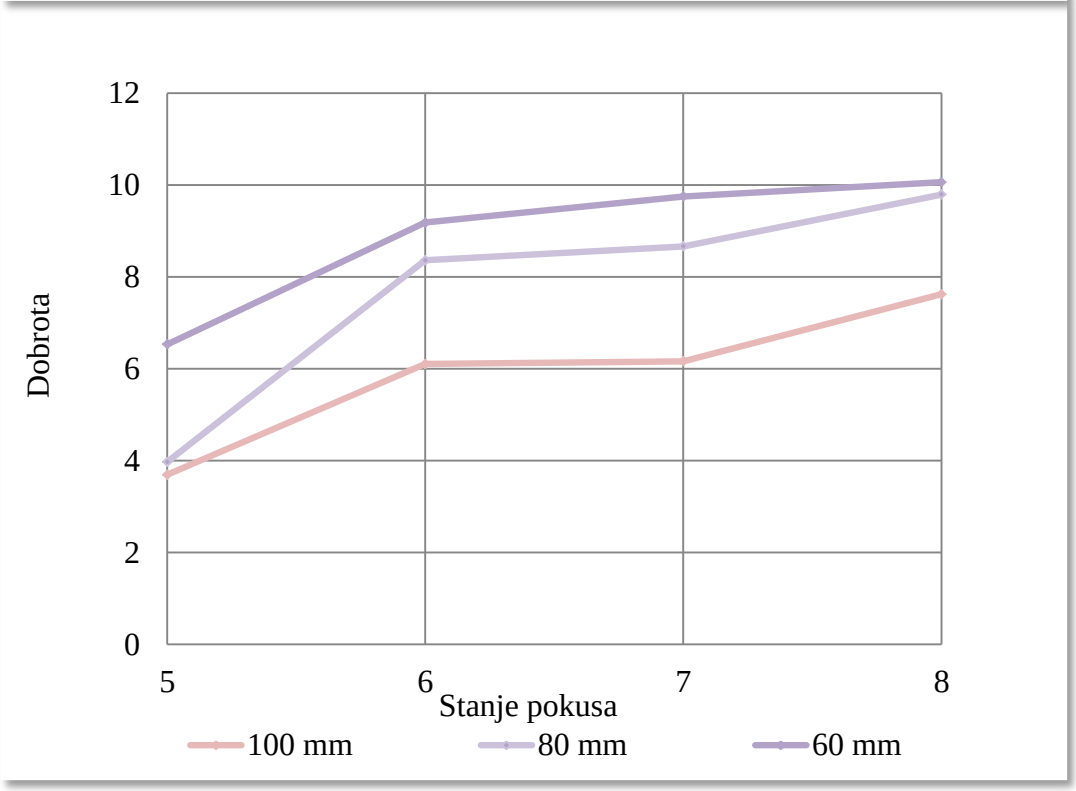
6.4 Analiza rezultata ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote o parametrima eksponiranja

Na slikama **Sl.- 49** do **Sl.- 51** dan je prikaz ovisnosti dobrote i intenziteta zacrnjenja piksela oparametrima eksponiranja za stanja pokusa od 1 do 12.

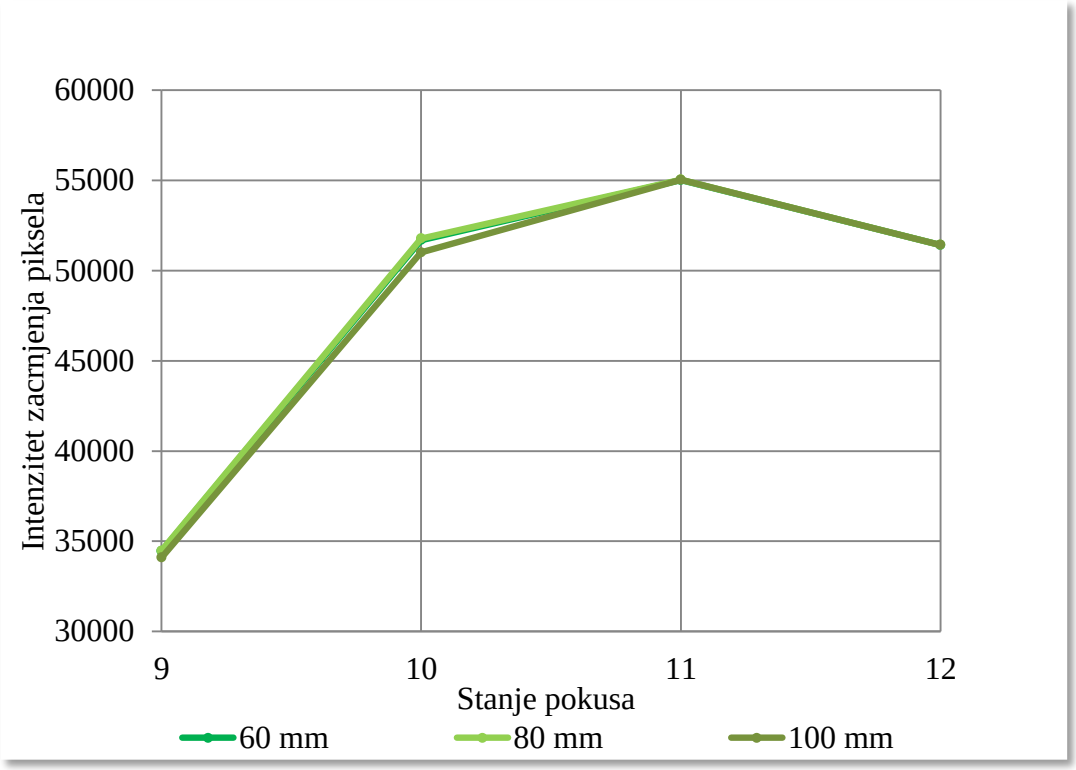


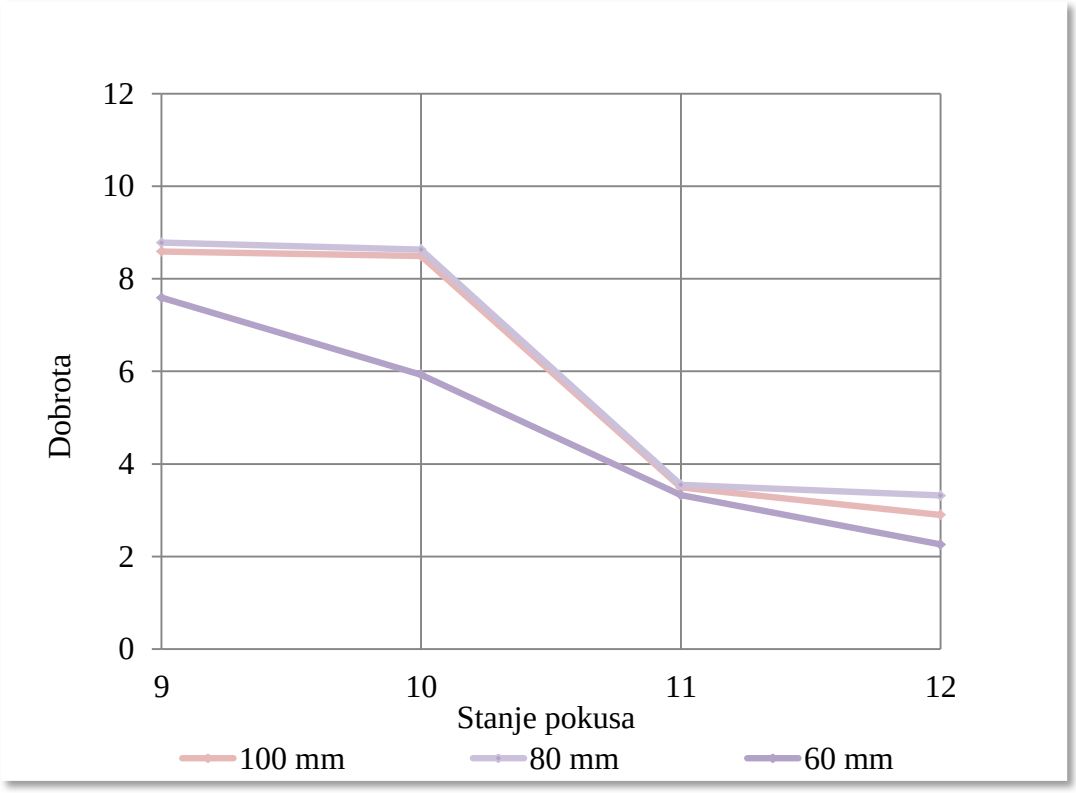
Sl.- 49. Grafički prikaz ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote o parametrima pokusa za stanja pokusa 1 - 4 (uz napon na rendgenskoj cijevi 10 kV i deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće 100 kPa).


40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
Intenzitet zacmljenja piksela
5
6
7
8
Stanje pokusa
60 mm
80 mm
100 mm


12
10
8
6
4
2
0
Dobrota
5
6
7
8
Stanje pokusa
100 mm
80 mm
60 mm

Sl.- 50. Grafički prikaz ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote o parametrima pokusa za stanja pokusa 5 - 8 (uz napon na rendgenskoj cijevi 15 kV i deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće 100 kPa).


60000
55000
50000
45000
40000
35000
30000
Intenzitet zacrnjenja piksela
9
10
11
12
Stanje pokusa
60 mm
80 mm
100 mm


12
10
8
6
4
2
0
Dobrota
9
10
11
12
Stanje pokusa
100 mm
80 mm
60 mm

Sl.- 51. Grafički prikaz ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote o parametrima pokusa za stanja pokusa 9 - 12 (uz napon 40 kV i deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće 100 kPa).

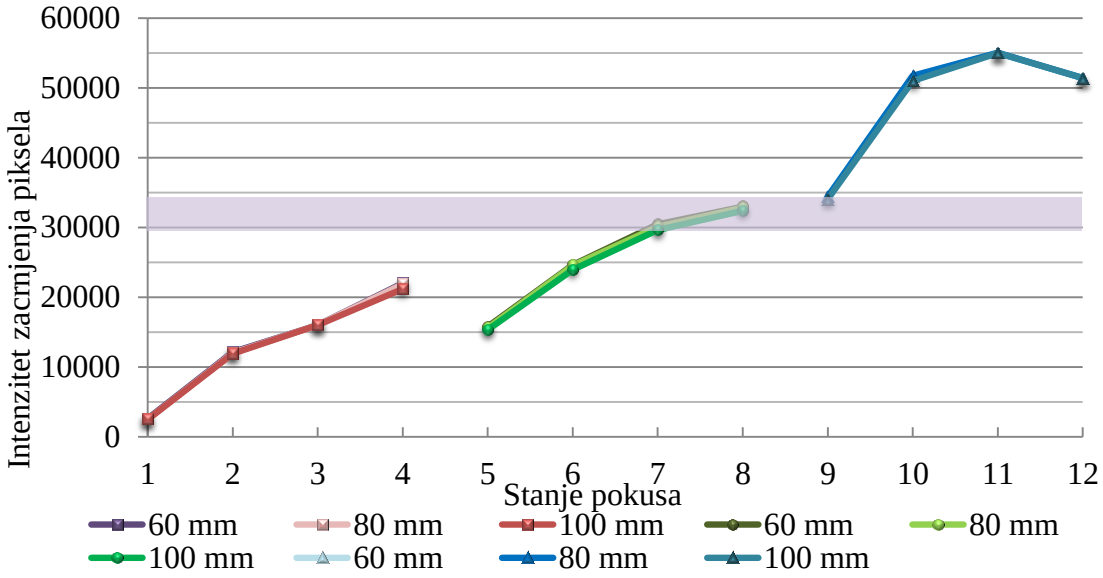
6.5 Parametarska optimizacija

Optimalni parametri eksponiranja određeni su parametarskom optimizacijom (grafičkom i numeričkom) korištenjem računalnog programa Microsoft Excel. Optimizacija je provedena postavljanjem gornjih i donjih granica parametra modela kako definira **Tablica 15**.

Tablica 15. Postavljena ograničenja za optimizaciju parametara eksponiranja uzoraka tlačne čvrstoće 100 kPa unutar raspona debljine od 60 mm do 100 mm.

OGRANIČENJA	Cilj	Donja granica	Gornja granica
Parametar modela:			
Napon na rendgenskoj cijevi	Unutar raspona	10	40
Radiografska ekspozicija	Unutar raspona	U rasponu definiranom za pojedini napon rendgenske cijevi	
Debljina	Unutar raspona	60	100
$\overline{D_{sred}}$	Unutar raspona	30000	35000
Dobrota	Maksimalna vrijednost	Maksimalna izračunata vrijednost unutar postavljenog raspona intenziteta zacrnjenja piksela za svaku debljinu, definirani napon i stanje pokusa.	

Provedeni postupak optimizacije prikazan je grafički na **Sl.- 52**. Na slici je tamnije naznačeno područje vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela od 30000 do 35000.

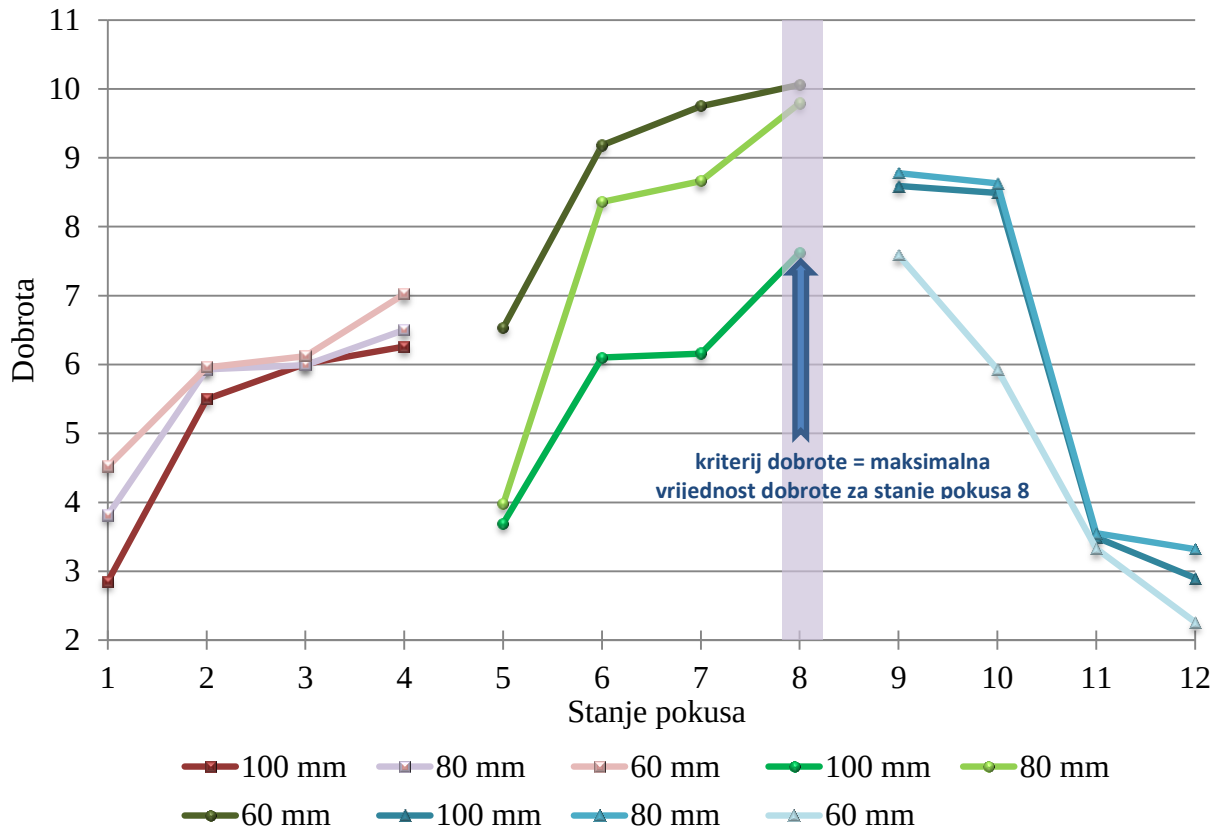


Sl.- 52. Grafički prikaz ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela o parametrima eksponiranja za stanja pokusa 1 - 12.

Iz slike **Sl.- 52** proizlazi da slijedeća stanja pokusa imaju izmjerenu vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela unutar definiranog područja. To su:

- stanje pokusa 7 sa parametrima eksponiranja: napon 15 kV i radiografska ekspozicija 360 mAs,
- stanje pokusa 8 sa parametrima eksponiranja: napon 15 kV i radiografska ekspozicija 420 mAs i
- stanje pokusa 9 sa parametrima eksponiranja: napon 40 kV i radiografska ekspozicija 5 mAs.

Maksimalna vrijednost dobrote definirana je stanjem pokusa 8 za sve debljine eksponiranja obuhvaćene pokusom. Navedeno je tamnije naznačeno na slici **Sl.- 53**.



Sl.- 53. Grafički prikaz ovisnosti dobrote o parametrima eksponiranja za stanja pokusa od 1 do 12 s naznačenom maksimalnom vrijednošću dobrote za stanje pokusa 8.

Optimalni parametri eksponiranja ekspandiranoga polistirena nakon provedene optimizacije unutar zadanih graničnih uvjeta su:

- **napon na rendgenskoj cijevi 15 kV i**
- **radiografska ekspozicijaa 420 mAs (*I* = 3,5 mA).**

Navedeni parametri biti će korišteni u poglavlju 7 kao konstantni parametri eksponiranja za sva stanja pokusa tijekom određivanja optimalnih parametara očitanja digitalnih zapisa radiografskih slika ekspandiranoga polistirena.

7. OPTIMALNI PARAMETRI OČITANJA

Parametarskom optimizacijom u poglavlju 6 definirani su optimalni parametri eksponiranja: napon na rendgenskoj cijevi 15 kV i radiografska ekspozicijaa 420 mAs (I = 3,5 mA). Navedeni parametri su konstantni parametri eksponiranja za sva stanja pokusa tijekom određivanja optimalnih parametara očitanja digitalnih zapisa radiografskih slika ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena. Također je definirana udaljenost fokus-film (IP) 1 m.

Nakon provedbe pokusa prema planu definiranom u poglavlju 7.1 analizirati će se utjecaj parametara očitanja na odziv intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike u poglavlju 7.2, te na odziv dobrote u poglavlju 7.3.

Analiza modela odziva provesti će se korištenjem računalnog programa DESIGN EXPERT 8.0.7.1. [85]. Provesti će se analiza varijance izrađenih modela („ANOVA”).

Parametarskom optimizacijom u poglavlju 7.4. biti će određeni optimalni parametri očitanja digitalnih zapisa radiografskih slika ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena.

Postupak parametarske optimizacije biti će objašnjen na primjeru ispitnih uzoraka odabrane vrijednosti tlačne čvrstoće.

7.1 Plan pokusa za karakterizaciju komponenata sustava očitanja

Odabrani plan pokusa za karakterizaciju komponenata sustava očitanja, stanja pokusa te članovi modela čiji će se utjecaj na odziv intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote promatrati objašnjeni su u poglavlju 7.1.1.

Poglavlje 7.1.2 definira provedbu odabranog plana pokusa, korištenu opremu, ispitne uzorke, referentni uzorak te postav ispitnih uzoraka tijekom provedbe pokusa u odnosu na centralnu zraku snopa X zračenja.

7.1.1 Oblikovanje plana pokusa za karakterizaciju komponenata sustava očitanja

Odabran je potpuni faktorski plan pokusa za određivanje optimalnih parametara komponenata sustava očitanja eksponiranih slikovnih ploča. Odabrani plan pokusa istražit će se utjecaj 4 člana modela: pojačanja fotomultiplikatorske cijevi [V], razlučivosti očitanja [μm], snage laserske zrake [J/m^2] i deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće [kPa]. **Tablica 16** prikazuje četiri člana modela čiji će se utjecaj na odziv istraživati na tri razine (tri različite vrijednosti parametara).

Tablica 16. Odabrani članovi modela za provedbu eksperimenta za karakterizaciju sustava očitanja.

Parametri očitanja:				
1.	Razlučivost očitanja [μm]	50	100	150
2.	gustoća snage (intezitet zračenja lasera) [W/m^2]	10	15	20
3.	Napon pojačanja PMT [V]	4,25	5,25	6,25
Parametri ispitnih uzoraka:				
1.	Deklarirana tlačna čvrstoća [kPa]		50; 100; 150; 200	

Tablica 17 prikazuje stanja pokusa unesena u ovisnosti o redoslijedu izvođenja. Pojedino stanje pokusa označeno je upravo kombinacijom vrijednosti članova modela.

Tablica 17. Stanja pokusa za reducirani kvadratni matematički model vrijednosti odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike.

Redoslijed izvođenja plana pokusa	Članovi modela			
	A PMT napon pojačanja [V]	B LP gustoća snage (intezitet zračenja lasera) [W/m^2]	C Res razlučivost očitanja [µm]	D EPS deklarirana vrijednosti tlačne čvrstoće [kPa]
30	5,25	10	50	50
59	6,25	10	100	150
60	6,25	10	100	50
52	5,25	20	150	200
58	6,25	10	100	200
35	5,25	10	150	150
69	6,25	15	100	50
66	6,25	15	50	50
23	4,25	20	100	150
47	5,25	20	50	150
40	5,25	15	100	200
72	6,25	15	150	50
43	5,25	15	150	200
78	6,25	20	100	50
67	6,25	15	100	200
80	6,25	20	150	150
33	5,25	10	100	50
25	4,25	20	150	200
7	4,25	10	150	200
21	4,25	20	50	50
10	4,25	15	50	200
29	5,25	10	50	150
13	4,25	15	100	200
64	6,25	15	50	200
17	4,25	15	150	150
45	5,25	15	150	50
11	4,25	15	50	150
39	5,25	15	50	50
18	4,25	15	150	50
81	6,25	20	150	50
5	4,25	10	100	150

Redoslijed izvođenja plana pokusa	Članovi modela			
	A PMT napon pojačanja [V]	B LP gustoća snage (intezitet zračenja lasera) [W/m^2]	C Res razlučivost očitanja [µm]	D EPS deklarirana vrijednosti tlačne čvrstoće [kPa]
63	6,25	10	150	50
4	4,25	10	100	200
1	4,25	10	50	200
76	6,25	20	100	200
75	6,25	20	50	50
8	4,25	10	150	150
57	6,25	10	50	50
12	4,25	15	50	50
79	6,25	20	150	200
46	5,25	20	50	200
56	6,25	10	50	150
24	4,25	20	100	50
50	5,25	20	100	150
65	6,25	15	50	150
36	5,25	10	150	50
74	6,25	20	50	150
49	5,25	20	100	200
44	5,25	15	150	150
61	6,25	10	150	200
41	5,25	15	100	150
16	4,25	15	150	200
6	4,25	10	100	50
62	6,25	10	150	150
48	5,25	20	50	50
27	4,25	20	150	50
51	5,25	20	100	50
14	4,25	15	100	150
19	4,25	20	50	200
77	6,25	20	100	150
73	6,25	20	50	200
55	6,25	10	50	200
31	5,25	10	100	200
9	4,25	10	150	50
32	5,25	10	100	150
22	4,25	20	100	200
68	6,25	15	100	150
15	4,25	15	100	50
34	5,25	10	150	200
37	5,25	15	50	200
71	6,25	15	150	150
3	4,25	10	50	50

Redoslijed izvođenja plana pokusa	Članovi modela			
	A PMT napon pojačanja [V]	B LP gustoća snage (intezitet zračenja lasera) [W/m^2]	C Res razlučivost očitanja [μm]	D EPS deklarirana vrijednosti tlačne čvrstoće [kPa]
70	6,25	15	150	200
38	5,25	15	50	150
54	5,25	20	150	50
2	4,25	10	50	150
42	5,25	15	100	50
26	4,25	20	150	150
53	5,25	20	150	150
28	5,25	10	50	200
20	4,25	20	50	150

Nakon provedbe pokusa za određivanje optimalnih parametara očitanja, te analize digitalnog zapisa radiogramske snimke, kako je opisano u poglavlju 7.2.1 odnosno 7.3.1, pomoću F – testa analizirati će se varijanca, odnosno utvrditi značajnost doprinosa pojedinih članova modela. Nadalje, utvrditi će se postojanje interakcije, odnosno utjecaja istovremene promjene više članova modela na promatranu vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela (poglavlja 7.2.3 i 7.2.4) i dobrote (poglavlja 7.3.2 i 7.3.3).

Metodologija izrade i vrednovanja matematičkog modela odziva intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote opisana je u poglavlju 7.2.1. Model ovisnosti biti će opisan regresijskom jednadžbom višeg reda, te će se analizirati greške u eksperimentalnom prostoru i pri tome će se detektirati nelinearnosti u odnosima. Redoslijed izvođenja prikazanog plana pokusa je rezultat generiranja slučajnog redoslijeda programom Design-Expert 8.0.7.1 [85].

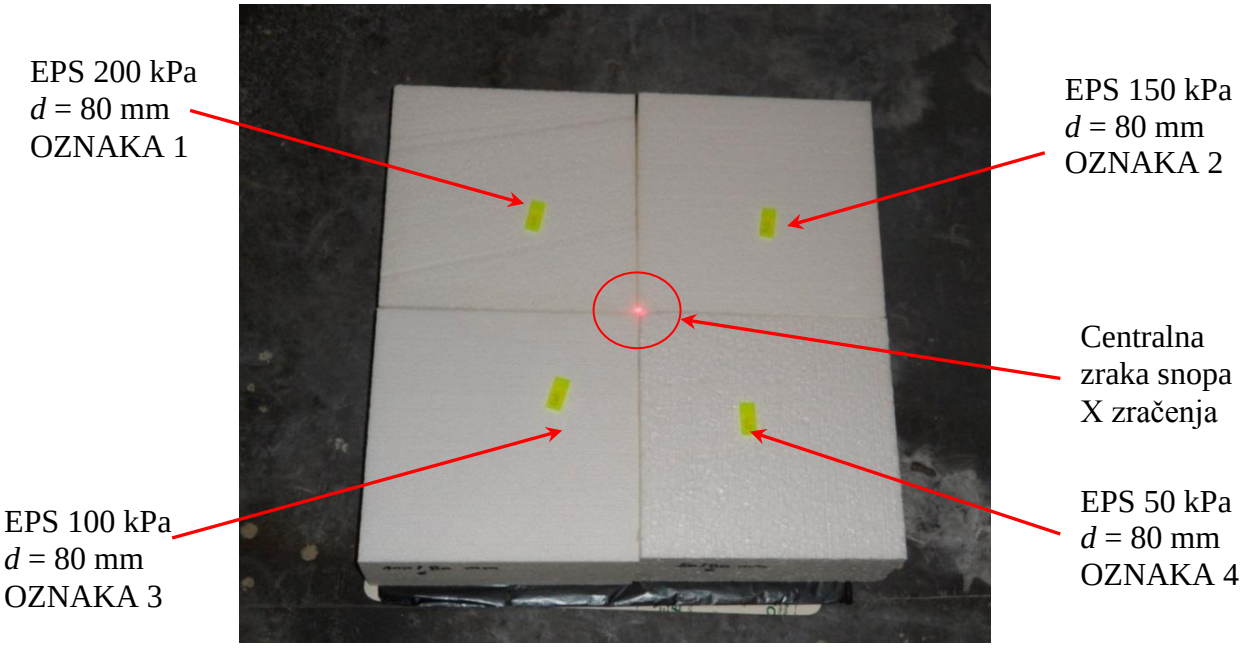
7.1.2 Provedba pokusa karakterizacije komponenata sustava očitanja

U poglavlju 6.5 parametarskom optimizacijom su utvrđeni optimalni parametri eksponiranja ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena. Optimalni parametri eksponiranja ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena su napon rendgenske cijevi 15 kV i radiografska ekspozicija 420 mAs (I = 3,5 mA). Vrijednosti optimalnih parametara eksponiranja biti će konstantni za sva očitanja tijekom pokusa određivanja optimalnih parametara očitanja.

Sl.- 54 prikazuje postav ispitnih uzoraka i referentnog uzorka na slikovnu ploču tijekom izvođenja pokusa za karakterizacije komponenata sustava očitanja.

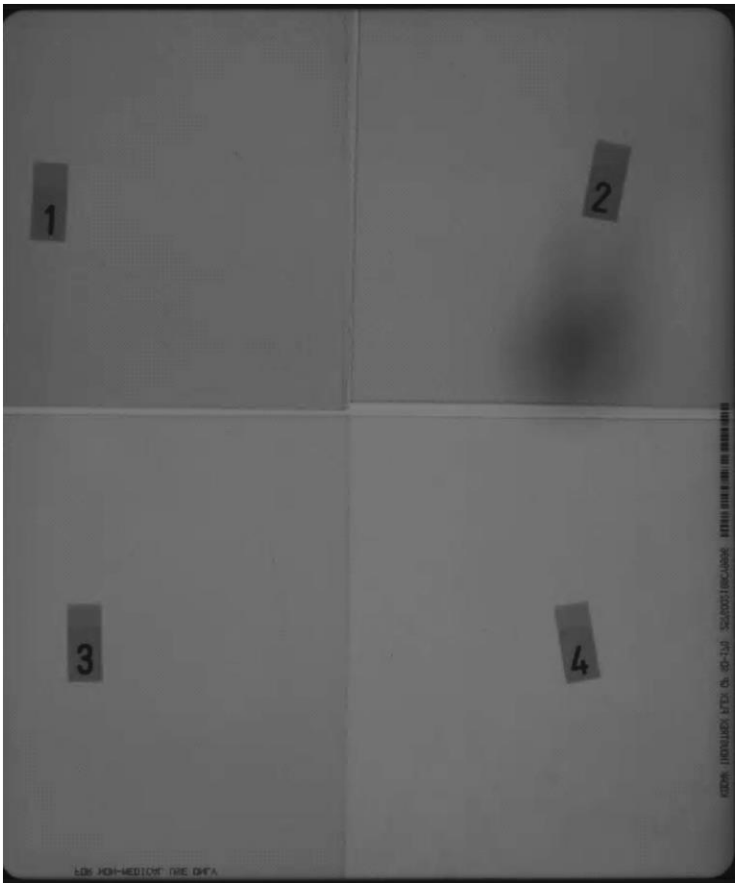
Na slici **Sl.- 54** oznaka 1 predstavlja uzorak deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 200 kPa, oznaka 2 uzorak deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 150 kPa, oznaka 3 uzorak tlačne čvrstoće deklarirane vrijednosti 100 kPa i oznaka 4 uzorak deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 50 kPa. Kao referentni uzorak za određivanje vrijednosti dobrote odabran je uzorak oznake 3.

Postupak karakterizacije komponenata sustava očitanja provesti će se uz konstantnu vrijednost debljine uzoraka d = 80 mm. Udaljenost fokus-film (od eng. *FFD, Focus Film Distance*) postavljen je na 1 m. Za provođenje pokusa karakterizacije komponenata sustava očitanja korištene su KODAK INDUSTREX Flex slikovne ploče standardne razlučivosti proizvođača KODAK [43].



Sl.- 54. Postav ispitnih uzoraka na slikovnu ploču za pokus karakterizacije komponenata sustava očitanja.

Sl.- 55 prikazuje digitalni zapis radiografske slike uz parametre eksponiranja: napon na rendgenskoj cijevi 15 kV, vrijeme 120 s, jakost struje 3,5 mA i parametre očitanja: napon pojačanja fotomultiplikatorske cijevi 4,25 V, gustoća snage (intezitet zračenja lasera) 10 W/m^2 i razlučivost očitanja 50 µm. Ispitni uzorci opisani su u poglavlju 5.4.



Sl.- 55. Digitalni zapis radiografske snimke (parametri eksponiranja: napon na rendgenskoj cijevi 15 kV, vrijeme 120 s, struja 3,5 mA i parametri očitanja: napon pojačanja PMT 4,25 V, gustoća snage (intezitet zračenja lasera) 10 W/m^2 i razlučivost 50 μm).

7.2 Utjecaj parametara očitanja na odziv intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike

Metodologija određivanja značajke intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike određena je u poglavlju 7.2.1.

Postupkom analize područja od interesa digitalnih zapisa radiografskih slika odrediti će se vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike za sve ispitne uzorke obuhvaćene planom pokusa definiranim tablicom 17.

U poglavlju 7.2.3 vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike područja od interesa statistički će biti obrađene pomoću programskog

paketa DESIGN EXPERT 8.0.7.1. te će se provesti analiza varijance modela („ANOVA") [85]. Utjecaj parametara očitanja svih stanja pokusa na odziv intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike analiziran je u poglavlju 7.2.4.

7.2.1 Metodologija određivanja odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike

Metodologija određivanja intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike objašnjena je u poglavlju 4.3. Sa digitalnog zapisa radiografske slike svakog ispitnog uzorka iz plana pokusa definiranog u poglavlju 7.1.1, na tri područja od interesa, određena je vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela.

Na temelju tri vrijednosti intenziteta piksela digitalnog zapisa radiografske slike izračunata je aritmetička sredina $\overline{D_{sred}}$. Sve vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike za svaki ispitni uzorak određena su na tri područja od interesa, jednake veličine i dovoljno daleko od utjecaja rubova uzoraka no blizu centralne zrake snopa X zračenja (slika **Sl.- 54**).

Vrijednosti standardnog odstupanja intenziteta zacrnjenja piksela određene su analogno metodologiji određivanja zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike. Vrijednosti standardnog odstupanja intenziteta zacrnjenja piksela određene su za ista područja od interesa.

7.2.2 Izrada i vrednovanje matematičkog modela odziva intenziteta zacrnjenja piksela

Vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela, te standardnog odstupanja digitalnog zapisa radiografske slike područja od interesa određene kako je opisano u poglavlju 7.2.1 i statistički su obrađene pomoću računalnog programa DESIGN EXPERT 8.0.7.1 [85]. Pomoću navedenog računalnog programa izrađeni su matematički modeli za opisivanje utjecaja parametara očitanja na odzive intenziteta zacrnjenja piksela i vrijednosti dobrote (opisano u poglavlju 7.3).

Prikladnost modela određivana je pomoću F-testa te na temelju maksimalne vrijednosti koeficijenata determinacije, R-kvadrata („Adjusted R-Squared" i „Predicted R-Squared"). Provedena je analiza varijance izrađenih modela („ANOVA").

Primjenom F-testa određivana je značajnost izrađenih modela, značajnost pojedinih članova modela te odstupanje od modela testiranjem hipoteze H_0 prema alternativnoj hipotezi H_1.

F-test se provodi tako da se od izračunanih procijenjenih varijanci analiziranih skupova podataka veća stavlja u brojnik, a manja u nazivnik zbog čega će F-vrijednost biti uvijek veća od 1. Za odgovarajuće stupnjeve slobode brojnika i nazivnika se očitava desni prag značajnosti, F_0.

Ako je izračunata F-vrijednost veća od F_0, hipoteza H_0 se odbacuje kao neistinita i prihvaća se alternativna hipoteza H_1 [86]. Vjerojatnost odgovara površini ispod krivulje F-razdiobe koja je određena pripadajućom F vrijednosti.

F- vrijednost modela je omjer procijenjene varijance modela i procijenjene varijance ostataka koji pokazuje relativan doprinos procijenjene varijance modela procijenjenoj varijanci ostataka. Veliki broj ukazuje na to da je varijanca u velikoj mjeri objašnjena modelom, a mali broj da je varijanca moguća zbog šumova. Vrijednost „Prob>F" analizirane F-vrijednosti modela je vjerojatnost da je hipoteza H_0 istinita (da model nije značajan). Kada je vrijednost „Prob>F" manja od 0,05, znači da je model značajan, a u obrnutom slučaju da je model neznačajan.

F- vrijednost člana modela je omjer procijenjene varijance člana modela i procijenjene varijance ostataka koji pokazuje relativan doprinos procijenjene varijance člana modela procijenjenoj varijanci ostataka. Veliki broj ukazuje na to da je varijanca u velikoj mjeri objašnjena članom modela, a mali broj da je varijanca moguća zbog šumova. Vrijednost „Prob>F" analizirane F-vrijednosti člana modela je vjerojatnost da je hipoteza H_0 istinita (da član modela nije značajan). Kada je vrijednost „Prob>F" manja od 0,05, znači da je član modela značajan, a u obrnutom slučaju da je član modela neznačajan.

F- vrijednost Odstupanje od modela je omjer procijenjene varijance Odstupanja od modela i procijenjene varijance Čiste greške koji pokazuje relativan doprinos procijenjene

varijance Odstupanja od modela procijenjenoj varijanci Čiste greške. Veliki broj ukazuje na to da je varijanca u velikoj mjeri objašnjena Odstupanjem od modela, a mali broj da je varijanca moguća zbog šumova. Što je broj veći, veća je vjerojatnost da izrađeni model ne opisuje dobro pojavu.

Vrijednost „Prob>F“ analizirane F-vrijednosti Odstupanja od modela je vjerojatnost da je hipoteza H_0 istinita (da Odstupanje od modela nije značajno). Kada je vrijednost „Prob>F“ manja od 0,05, znači da je Odstupanje od modela značajno, a u obrnutom slučaju da je Odstupanje od modela neznačajno.

Prema potrebi, provodi se redukcija modela eliminacijom unatrag, to jest isključivanjem neznačajnih članova čija vrijednost „Prob>F“ je veća od 0,05. Ovakvim pristupom redukciji modela eliminacijom unatrag svi članovi imaju mogućnost uključivanja, te je dobiveni model znatno robusniji od pristupa uključivanjem unaprijed.

U nastavku su objašnjene veličine koje su korištene za analizu i vrednovanje kvalitete izrađenih matematičkih modela.

Dijagnostičkim alatima programa provjeravano je da li postoji „grubo“ odskakanje neke od točaka modela od stvarne izmjerene vrijednosti promatranog svojstva. Za grafičko prikazivanje odabran je način interpretacije konturnom plohom i 3D površinom. Princip hijerarhije modela implicira da u slučaju kada model sadrži značajne članove višeg reda i značajne interakcije, model mora nužno imati i članove nižeg reda od kojih su sastavljeni članovi višeg reda [87].

7.2.3 Statistička obrada rezultata odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiogramske slike

Statističkom obradom rezultata dobivenih analizom digitalnog zapisa radiografske snimke, odnosno parametra intenziteta zacrnjenja piksela, pristupilo se izradi matematičkog modela za opisivanje utjecaja komponenata sustava očitanja na odziv intenziteta zacrnjenja piksela.

Model će moći ovisno o ulaznim parametrima očitanja izračunati odnosno predvidjeti odziv intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike.

Analiza varijance (ANOVA) je pokazala da se ovisnost intenziteta zacrnjenja piksela o ulaznim parametrima komponenata sustava očitanja može najbolje opisati reduciranim kvadratnim matematičkim modelom (uz lambda = 0,5).

Tablica 18 prikazuje analizu varijance za reducirani kvadratni matematički model odziva vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela, gdje je A – napon pojačanja (PMT) [V], B – gustoća snage (intezitet zračenja lasera) [W/m^2], C – razlučivost očitanja (Res) [μm] i D - deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće (EPS) [kPa].

Tablica 18. Analiza varijance za reducirani kvadratni matematički model odziva intenziteta zacrnjenja piksela.

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Broj stupnjeva slobode (df)	Srednji kvadrat odstupanja	F- vrijednost	P vrijednost Prob>F	Značajnost
Model	65031,07	6	10838,51	2805,64	< 0,0001	značajan
Članovi modela						
A	56364,26	1	56364,26	14590,34	< 0,0001	značajan
B	6561,47	1	6561,47	1698,49	< 0,0001	značajan
C	1135,23	1	1135,23	293,86	< 0,0001	značajan
D	455,52	1	455,52	17,92	< 0,0001	značajan
A^2	330,57	1	330,57	85,57	< 0,0001	značajan
B^2	316,56	1	316,56	81,94	< 0,0001	značajan
Ostatak	285,87	74	3,86			
Ukupno	65316,94	80				

F – vrijednost modela od 2805,64 ukazuje na značajnost modela jer vjerojatnost da se pojavi tako velika vrijednost uslijed šuma iznosi samo 0,01 % što ukazuje da je model značajan. Vrijednost “Prob > F“ manja od 0,05 za pojedine članove matematičkog modela govori u prilog značajnosti njihova utjecaja kako je definirano u poglavlju 7.2.1.

U ovom su matematičkom modelu značajni članovi A, B, C i D kao članovi prvog reda koji linearno doprinose odzivu modela, te A^2 i B^2 kao članovi drugog reda koji linearno doprinose odzivu modela.

Tablica 19 prikazuje veličine koje opisuju kvalitetu reduciranog kvadratnog matematičkog modela odziva intenziteta zacrnjenja piksela.

Vrijednost R_{pre}^2 od 0,9948 je dobro usklađena s vrijednošću R_{adj}^2 od 0,9953. Obzirom da nema vrijednosti Odstupanje od modela, model se prihvaća te se nastavlja analiza.

Adekvatna preciznost modela mjeri odnos veličina signala u odnosu na šum. U modelu omjer taj iznosi 175,597, što je značajno više od najmanje poželjne vrijednosti koja iznosi 4. Navedeno indicira da postoji primjeren signal te se model može koristiti za analizu u eksperimentalnom prostoru.

Tablica 19. Veličine koje opisuju kvalitetu reduciranog kvadratnog modela odziva intenziteta zacrnjenja piksela.

Veličine koje opisuju kvalitetu reduciranog kvadratnog modela odziva intenziteta zacrnjenja piksela:	
Procjena standardnog odstupanja	1,97
Aritmetička sredina	165,29
Koeficijent varijacije [%]	1,19
Predviđena suma kvadrata ostataka	339,93
R^2 – koeficijent determinacije	0,9956
R_{adj}^2 – prilagođeni koeficijent determinacije	0,9953
R_{pre}^2 – predviđeni koeficijent determinacije	0,9948
Adekvatna preciznost	175,597

Tablica 20 prikazuje vrijednosti procjene koeficijenata, procijenjeno standardno odstupanje koeficijenata (standardnu pogrešku), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije modela za svaki član modela.

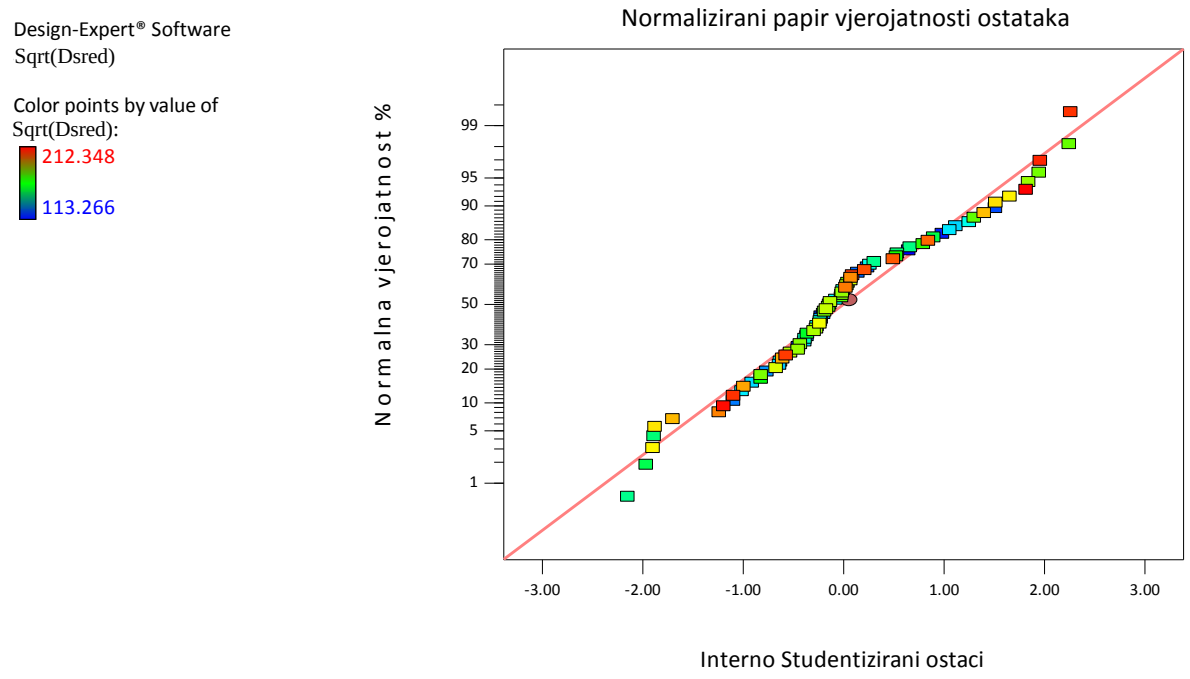
Tablica 20. Procjena koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjeno standardno odstupanje koeficijenata (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance za svaki član reduciranog kvadratnog matematičkog modela odziva zacrnjenja digitalnog zapisa radiografske slike.

Član modela	Procjena koeficijenata	Stupnjevi slobode	Standardna pogreška	95% interval povjerenja donja granica	95% interval povjerenja gornja granica	Faktor inflacije varijance
Slobodni član	171,10	1	0,49	170,13	172,08	1,00

A	32,47	1	0,27	31,94	33,01	1,00
B	11,02	1	0,27	10,49	11,56	1,00
C	4,59	1	0,27	4,05	5,12	1,00
D	-2,85	1	0,26	-3,38	-2,33	1,00
A^2	-4,33	1	0,47	-5,26	-3,40	1,00
B^2	-4,19	1	0,46	-5,12	-3,27	1,00

Faktor inflacije modela mjeri porast varijance modela smanjenjem ortogonalnosti u planu pokusa. Ako je član ortogonalan u odnosu na ostale članove modela, dani faktor inflacije varijance iznosi 1.

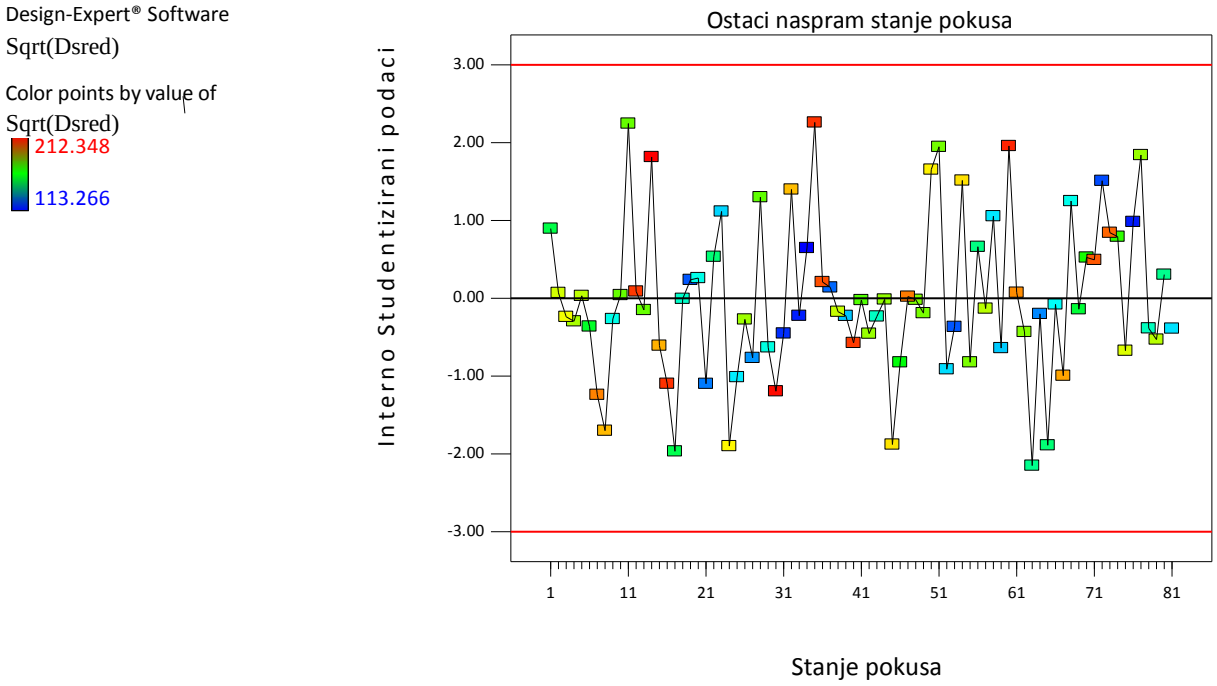
Tablica 20 prikazuje da je između članova modela u potpunosti zadržana ortogonalnost. Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka ispituje normalnost izmjerenih vrijednosti za pojedina stanja pokusa i prikazan je slikom **Sl.- 56**.



Sl.- 56. Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za reducirani kvadratni matematički model odziva intenziteta zacrnjenja piksela.

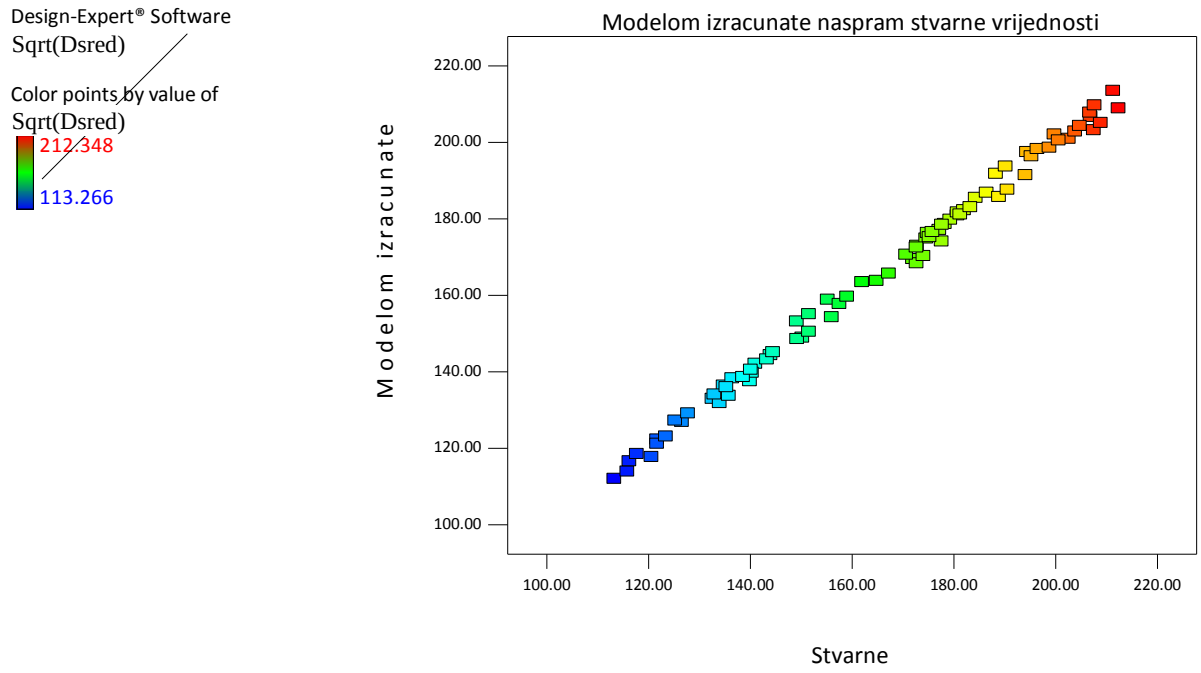
Kako je vidljivo sa slike **Sl.- 56** normalizirani papir vjerojatnosti ostataka u odnosu na vrijednosti predviđenog odziva ne ukazuje na problem jer ne postoji obrazac razdiobe prikazanih ostataka u odnosu na vrijednosti izračunatog (predviđenog) odziva.

Dijagram ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa prikazan je na slici **Sl.- 57** i provjerava postojanje sistematske pogreške koja je mogla utjecati na odziv tijekom izvođenja eksperimenta. Vidljivo je da ne postoji sistematska pogreška u pozadini koja bi se očitovala kao trend u podacima.



Sl.- 57. Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa.

Slika **Sl.- 58** prikazuje odnos modelom izračunatih (predviđenih) vrijednosti odziva. Vidljivo je da se vrijednosti dobro podudaraju.



Sl.- 58. Odnos modelom izračunatog odziva i stvarnog odziva.

Završni matematički model s kodiranim vrijednostima članova modela dan je izrazom (21):

$$\text{Sqrt}(D_{sred}) = 171{,}10 + 32{,}47\cdot A + 11{,}02\cdot B + 4{,}59\cdot C - 2{,}85\cdot D - 4{,}33\cdot A^2 - 4{,}19\cdot B^2 \qquad (21)$$

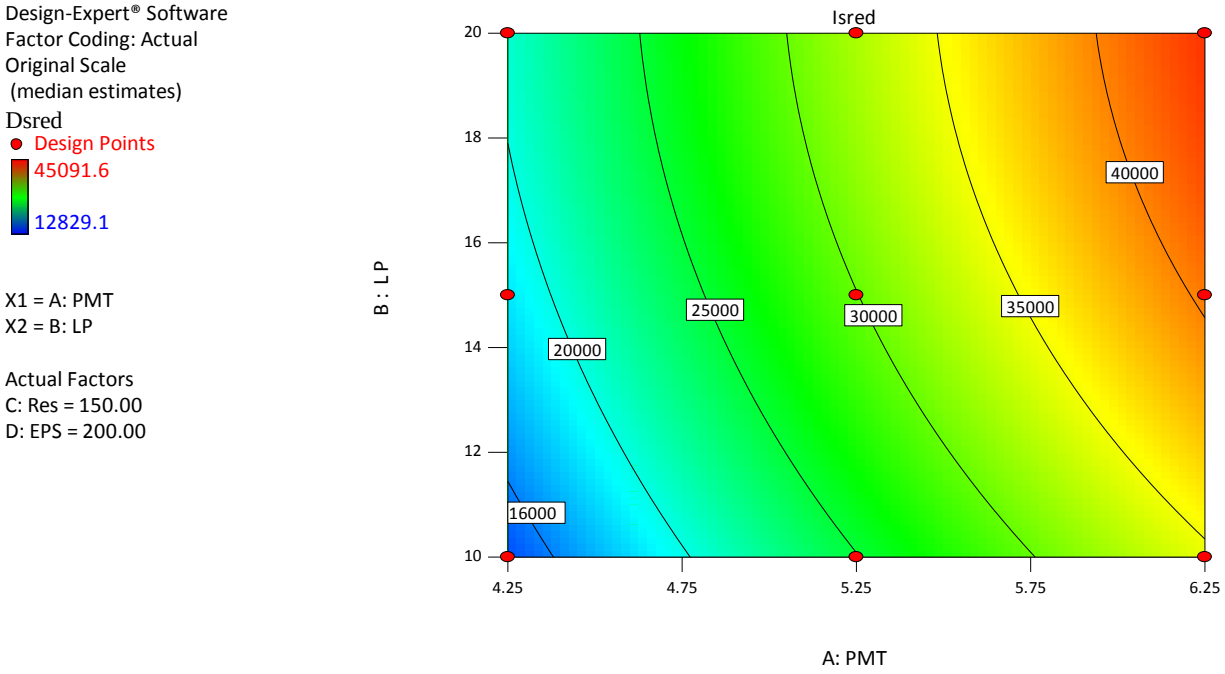
Matematički model s kodiranim vrijednostima članova modela iz izraza (21) prevodi se u model sa stvarnim vrijednostima članova modela prema izrazu (22):

$$\text{Sqrt}(D_{sred}) = -191{,}498 + 77{,}267\cdot PMT + 7{,}237\cdot LP + 0{,}092\cdot Res - 0{,}038\cdot EPS - 4{,}285\cdot PMT^2 - 0{,}168\cdot LP^2 \qquad (22)$$

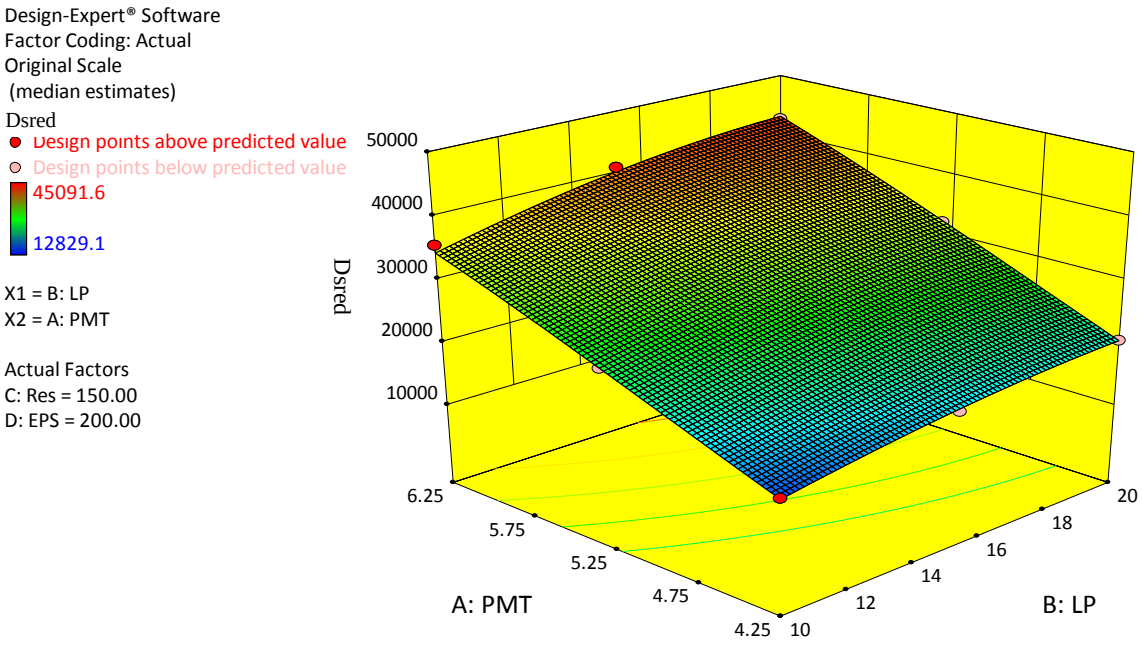
gdje je PMT – napon pojačanja fotomultiplikatorske cijevi u V, LP - gustoća snage (intezitet zračenja lasera) W/m^2, Res - razlučivost u μm i EPS - deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće u kPa. Oznaka Sqrt znači da je provedena transformacija podataka „*Square root*“ da bi se postigao dovoljno jak utjecaj modela na odziv. U ovom slučaju *Lambda* = 0,5.

Slike od **Sl.- 59** do **Sl.- 62** prikazuju konturne i 3D prikaze matematičkog modela ovisnosti odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima komponenata sustava očitanja.

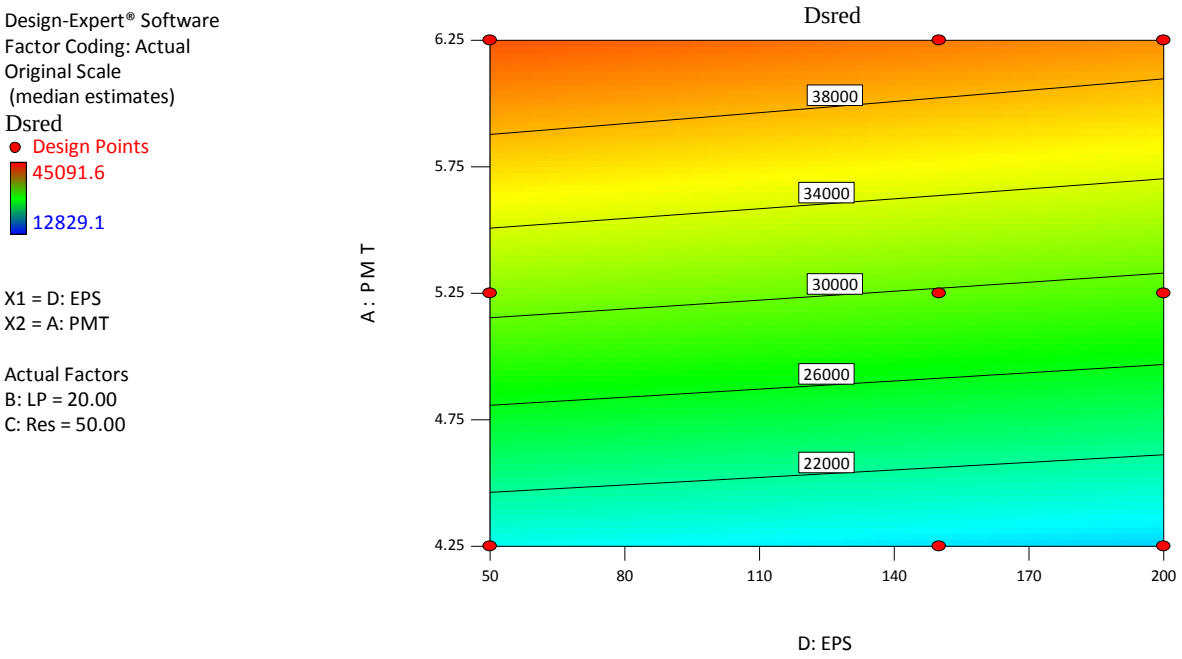
Dsred



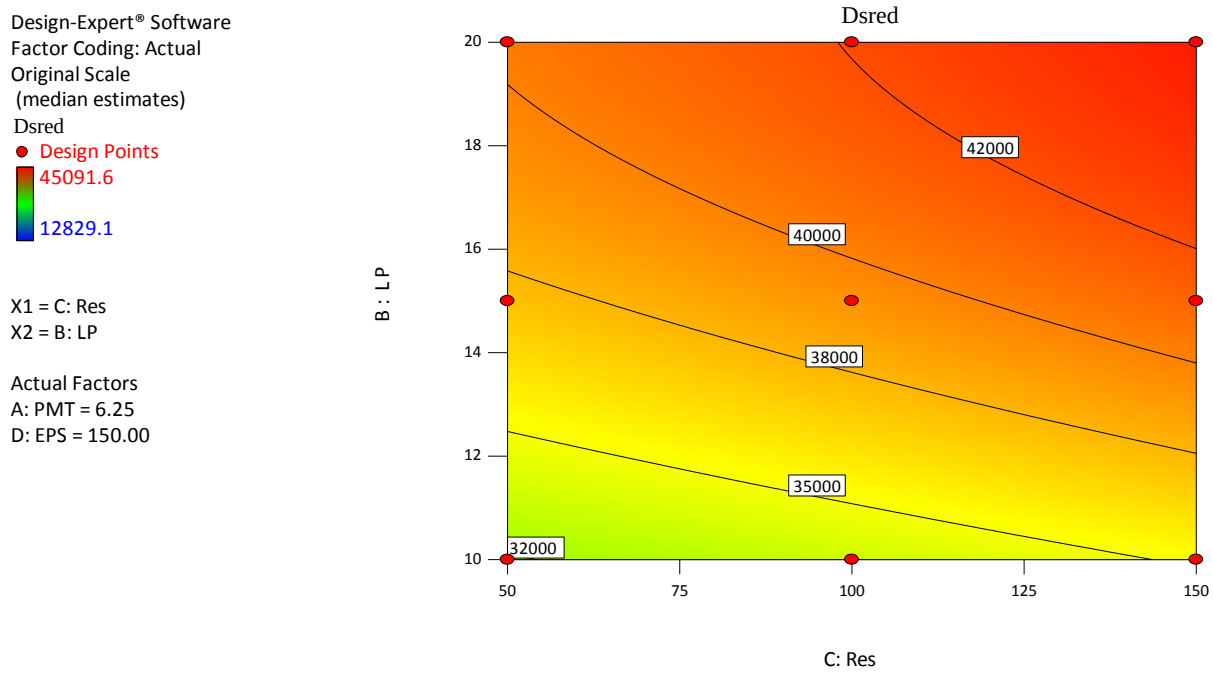
Sl.- 59. Konturni prikaz matematičkog modela ovisnosti odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su C:Res = 150 µm i D:EPS = 200 kPa).



Sl.- 60. 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su C:Res = 150 µm i D:EPS = 200 kPa).



Sl.- 61. Konturni prikaz matematičkog modela ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su B:LP = 20 W/m^2 i C:Res = 50 µm).



Sl.- 62. Konturni prikaz matematičkog modela ovisnosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su A:PMT = 6,25 V i D:EPS = 150 kPa).

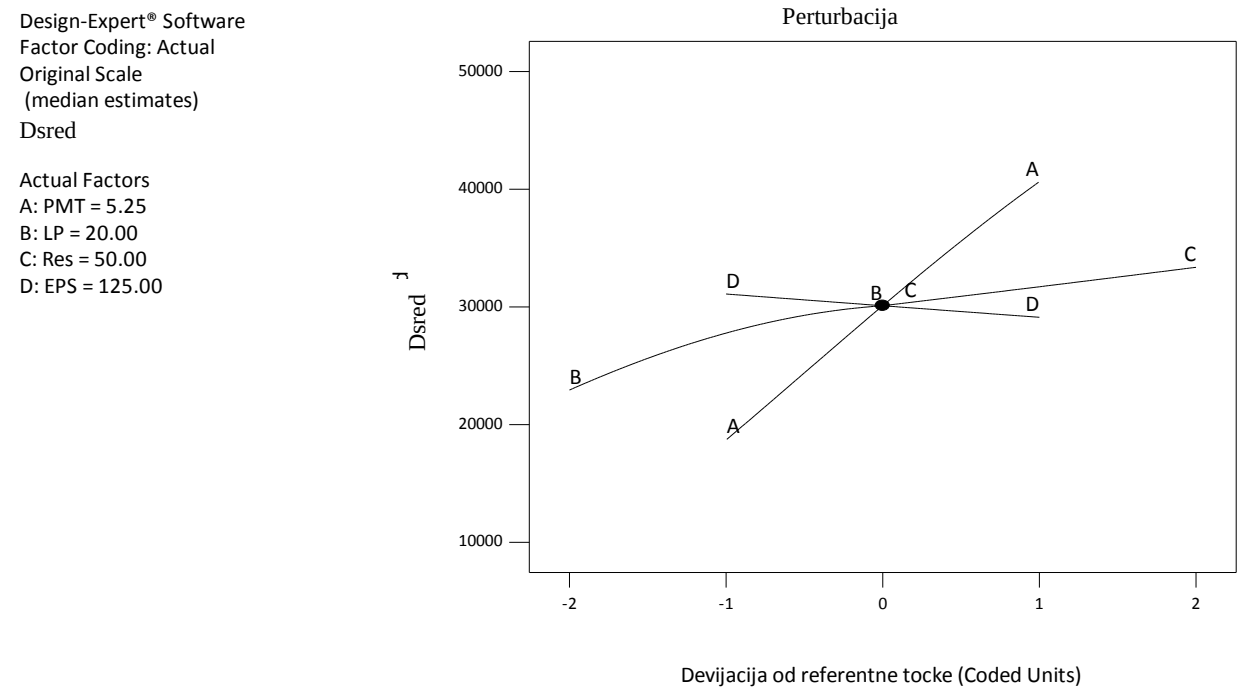
Prilog 3 prikazuje dijagnostičkim alatima programa Design Expert 8.0.7.1. dobivene statističke podatke analiziranog matematičkog modela za izračunavanje (predviđanje) odziva intenziteta zacrnjenja piksela u ovisnosti o parametrima komponenata sustava očitanja.

Na temelju provedene analize i izrade matematičkog modela za izračunavanje (predviđanje) odziva intenziteta zacrnjenja piksela prema izrazu (22) provesti će se analiza utjecaja parametara komponenata sustava očitanja na odziv intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike ekspandiranoga polistirena (poglavlje 7.2.4).

7.2.4 Analiza utjecaja parametara komponenata sustava očitanja na odziv intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike ekspandiranoga polistirena

Utjecaj pojedinih parametara na odziv u izrađenom matematičkom modelu prikazuje se dijagramom perturbacije. Dijagram perturbacije pomaže u određivanju veličine utjecaja svakog pojedinog faktora u određenom stanju plana pokusa. Iz oblika i nagiba odziva može se zaključiti o veličini utjecaja pojedinog faktora. Što je veći nagib, veći je utjecaj faktora na odziv. Ukoliko je odziv zakrivljen, faktor ima kvadratni utjecaj. Dijagrami preturbacije su prikazani u kodiranim vrijednostima faktora. Prikazuju samo promjenu odziva kada se promijeni razina analiziranog faktora, a svi ostali faktori se drže konstantni.

Na slici **Sl.- 63** prikazan je dijagram perturbacije matematičkog modela odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike.



Sl.- 63. Dijagram perturbacije matematičkog modela odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike.

Iz matematičkog modela odziva intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike (pozitiv) područja od interesa ekspandiranoga polistirena i slika od **Sl.- 60** do **Sl.- 63** moguće je zaključiti slijedeće:

1. Postoje četiri utjecajna člana modela prvog reda čiji je utjecaj na model linearan, a oni su A – napon pojačanja PMT [V], B – gustoća snage (intezitet zračenja lasera) [w/m^2], C - razlučivost očitanja [μm] i D - deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće [kPa].
2. Najveći utjecaj na model ima član A – napon pojačanja fotomultiplikatorske cijevi. Povećanjem člana modela A raste intenzitet zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike. Posljedica je to pojačanja signala u pojačalu na izlazu iz fotodetektora, u ovom slučaju PMT cijevi (gdje se konvertira emitirani svjetlosni signal – PSL odziv u električni signal).
3. Član modela B predstavlja efektivni promjer laserske zrake. Što je efektivni promjer laserske zrake korištenog skenera sustava računalne radiografije VMI 5100MS manji (razlučivost), to je pobudna zraka koncentriranija te imamo manji efekt raspršenja energije u aktivnom sloju slikovne ploče.
4. Član modela C je gustoća snage (intezitet zračenja lasera). Dubina prodiranja laserske zrake u aktivni fotoosjetljivi sloj odgovara podesivom parametru snage. Iako je cilj pobuditi što je moguće veći volumen latentne slike koja je spremljena u aktivnom dijelu slikovne ploče standardne razlučivosti KODAK INDUSTREX Flex, količina signala koji se u stvarnosti ekstrahira ovisi o ukupnoj količini energije koju unosi izvor pobude.

   Ova energija jednaka je umnošku intenziteta i vremena trajanja pobude koje se naziva i vrijeme zadržavanja laserske zrake (od eng. *dwell time*). Prema tome porastom gustoće snage (inteziteta zračenja lasera) raste i intenzitet zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike ekspandiranoga polistirena.
5. Član modela D – tlačna čvrstoća ekspandiranoga polistirena, ima linearan utjecaj na odziv modela, ali sa negativnim predznakom. Drugim riječima porastom tlačne čvrstoće ekspandiranoga polistirena opada intenzitet zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike. Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka direktno je ovisna o gustoći i raste porastom gustoće. Povećanje

gustoće u konačnici znači apsorbiranje veće količine X zračenja, a to kao rezultat ima smanjenje intenziteta zacrnjenja piksela na digitalnom zapisu radiografske slike.

6. Postoje članovi modela drugog reda A^2 i B^2 koji linearno utječu na odziv modela.
7. Nema utjecajnih interakcija.

7.3 Utjecaj parametara očitanja na odziv dobrote digitalnog zapisa radiografske slike

U ovom poglavlju će se analizirati utjecaj parametara očitanja na odziv dobrote digitalnog zapisa radiografske slike. Metodologija određivanja vrijednosti dobrote iz odabranih značajki digitalnog zapisa radiografske slike intenziteta zacrnjenja piksela i standardne odstupanja određena je u poglavlju 7.3.1.

Plan pokusa kao i njegova provedba opisani su u poglavlju 7.1.1 i 7.1.2. Postupkom analize područja od interesa digitalnih zapisa radiografskih slika odrediti će se vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike za sve ispitne uzorke obuhvaćene planom pokusa definiranim tablicom 17.

U poglavlju 7.3.2 vrijednosti dobrote područja od interesa digitalnog zapisa radiografske slike statistički će biti obrađene pomoću računalnog programa DESIGN EXPERT 8.0.7.1. te će se provesti analiza varijance modela („ANOVA") [85]. Utjecaje parametara očitanja svih stanja pokusa na odziv dobrote digitalnog zapisa radiografske slike analiziran je u poglavlju 7.3.3.

7.3.1 Metodologija određivanja odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike

Vrijednosti dobrote izračunate su na temelju srednjih vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela i standardnih odstupanja za tri područja od interesa na digitalnom zapisu radiografske snimke za svaki ispitni uzorak ekspandiranoga polistirena i za svako stanje pokusa. Dobrota, δ, izračunata je na temelju izraza (23).

$$\delta = \left| \frac{\overline{D_{\text{sred}}} - \overline{D_{\text{ref}}}}{\overline{s_{\text{D}_{\text{sred}}}} + \overline{s_{\text{D}_{\text{ref}}}}} \right| \tag{23}$$

gdje je:

- $\overline{D_{\text{sred}}}$ srednja vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela na tri područja od interesa digitalnog zapisa radiografske slike jednog uzorka pri jednoj

radiografskoj ekspoziciji i jednom očitanju, odnosno pri jednom stanju pokusa,

- $\overline{D_{\mathrm{ref}}}$ srednja vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela na tri područja od interesa digitalnog zapisa radiografske slike referentnog uzorka pri jednoj radiografskoj ekspoziciji i jednom očitanju, odnosno pri jednom stanju pokusa,
- $\overline{s_{\mathrm{D_{sred}}}}$ srednja vrijednost standardnog odstupanja intenziteta zacrnjenja piksela na tri područja od interesa digitalnog zapisa radiografske slike jednog uzorka pri jednoj radiografskoj ekspoziciji i jednom očitanju, odnosno pri jednom stanju pokusa, i
- $\overline{s_{\mathrm{D_{ref}}}}$ srednja vrijednost standardnog odstupanja intenziteta zacrnjenja piksela na tri područja od interesa digitalnog zapisa radiografske slike referentnog uzorka pri jednoj radiografskoj ekspoziciji i jednom očitanju odnosno pri jednom stanju pokusa.

U izrazu (23) referentne vrijednosti $\overline{s_{\mathrm{D_{ref}}}}$ i $\overline{D_{\mathrm{ref}}}$ odnose se na referentni uzorak deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 100 kPa i debljine 80 mm. $\overline{D_{\mathrm{sred}}}$ i $\overline{s_{\mathrm{D_{sred}}}}$ odnose se na tri ispitna uzorka deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 50 kPa, 150 kPa i 200 kPa, debljine 80 mm. Izrada i vrednovanje matematičkog modela odziva dobrote opisana je u poglavlju 7.3.1. Na temelju opisane metodologije provesti će se statistička obrada rezultata odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike ekspandiranoga polistirena u poglavlju 7.3.2.

7.3.2 Statistička obrada rezultata odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike

Statističkom obradom vrijednosti dobrote pristupilo se izradi matematičkog modela kojim će se moći ovisno o ulaznim parametrima očitanja predvidjeti vrijednost dobrote na digitalnom zapisu radiografske snimke. Analiza varijance (ANOVA) je pokazala da se ovisnost vrijednosti dobrote o ulaznim parametrima očitanja može najbolje opisati reduciranim matematičkim modelom bez transformacije (lambda = 1,0).

Tablica 21 prikazuje analizu varijance za reducirani kvadratni matematički model gdje je C - razlučivost u μm i D - deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće u kPa.

Tablica 21. Analiza varijance za reducirani kvadratni matematički model odziva dobrote.

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Broj stupnjeva slobode (df)	Srednji kvadrat odstupanja	F- vrijednost	P vrijednost Prob>F	Značajnost
Model	98,45	4	24,61	45,50	< 0,0001	Značajan
Članovi modela						
C	13,02	1	13,02	24,08	< 0,0001	Značajan
D	26,61	1	26,61	49,20	< 0,0001	Značajan
C^2	4,19	1	4,19	7,75	0,00068	Značajan
D^2	67,77	1	67,77	125,27	< 0,0001	Značajan
Ostatak	41,12	76	0,54			
Ukupno	139,57	80				

F – vrijednost modela od 45,50 ukazuje na značajnost modela jer vjerojatnost da se pojavi tako velika vrijednost uslijed šuma iznosi samo 0,01 %. Prema tome model je značajan. Vrijednost „Prob > F“ manja od 0,05 za pojedine članove predloženog matematičkog modela govori u prilog značajnosti njihova utjecaja. U ovom su matematičkom modelu značajni članovi su C i D kao članovi koji linearno utječu na odziv modela, te C^2 i D^2 kao članovi modela drugog reda koji također linearno utječu na odziv modela. Članovi A i B nemaju značajan utjecaj na model (vrijednost „Prob > F“ veća je od 0,05).

Obzirom da nema vrijednosti Odstupanje od modela, model se prihvaća te se nastavlja analiza. **Tablica 22** prikazuje veličine koje opisuju kvalitetu reduciranog kvadratnog matematičkog modela odziva dobrote.

Tablica 22. Veličine koje opisuju kvalitetu reduciranog kvadratnog modela odziva dobrote.

Veličine koje opisuju kvalitetu reduciranog kvadratnog modela odziva dobrote:	
Procjena standardnog odstupanja	0,74
Aritmetička sredina	3,28
Koeficijent varijacije [%]	22,45
Predviđena suma kvadrata ostataka	46,70
R^2 – koeficijent determinacije	0,7054
R_{adj}^2 – prilagođeni koeficijent determinacije	0,6899
R_{pre}^2 – predviđeni koeficijent determinacije	0,6654

Adekvatna preciznost	18,749

Vrijednost R_{pre}^2 od 0,6654 je dobro usklađena s vrijednošću R_{adj}^2 od 0,6899.

Adekvatna preciznost modela mjeri odnos veličina signala u odnosu na slučajno rasipanje. U predloženom modelu omjer iznosi 18,749, što je značajno više od najmanje poželjne vrijednosti koja iznosi 4. Navedeno indicira da postoji primjeren signal, te se predloženi model može koristiti za analizu u eksperimentalnom prostoru.

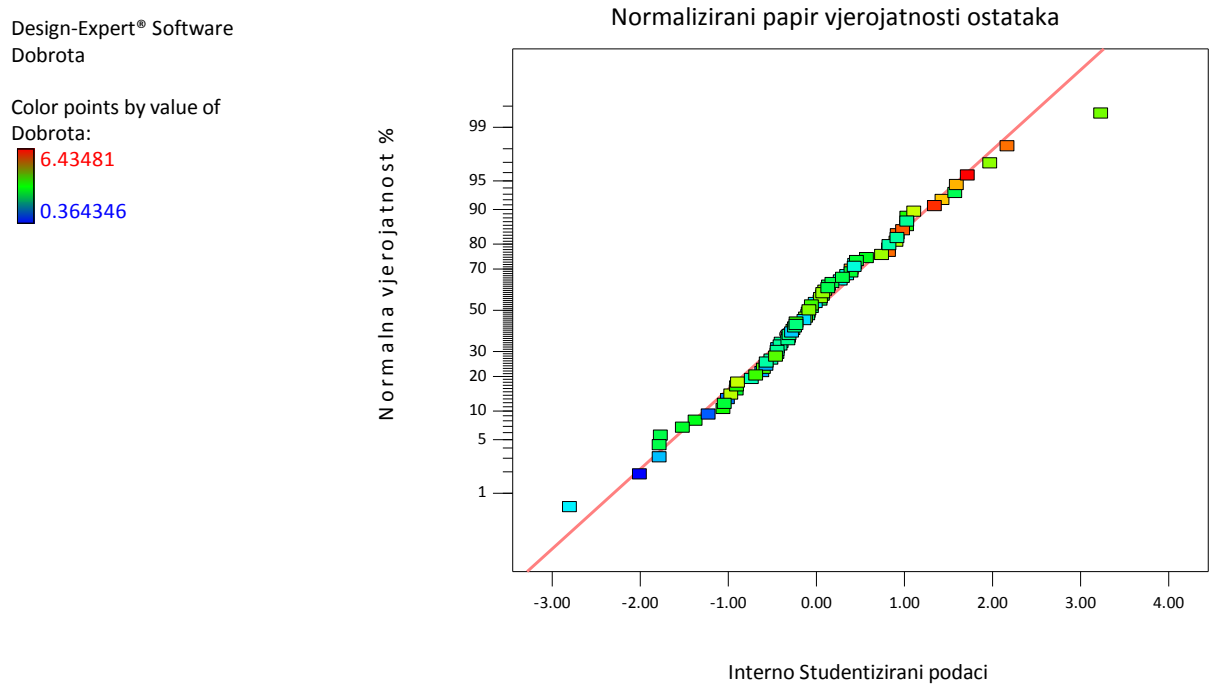
Tablica 23 prikazuje vrijednosti procjene koeficijenata, procijenjeno standardno odstupanje koeficijenata (standardnu pogrešku), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije modela za svaki član modela. Iz tablice je vidljivo da je između članova modela u potpunosti zadržana ortogonalnost.

Tablica 23. Procjena koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjeno standardno odstupanje koeficijenata (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance za svaki član reduciranog kvadratnog matematičkog modela odziva dobrote.

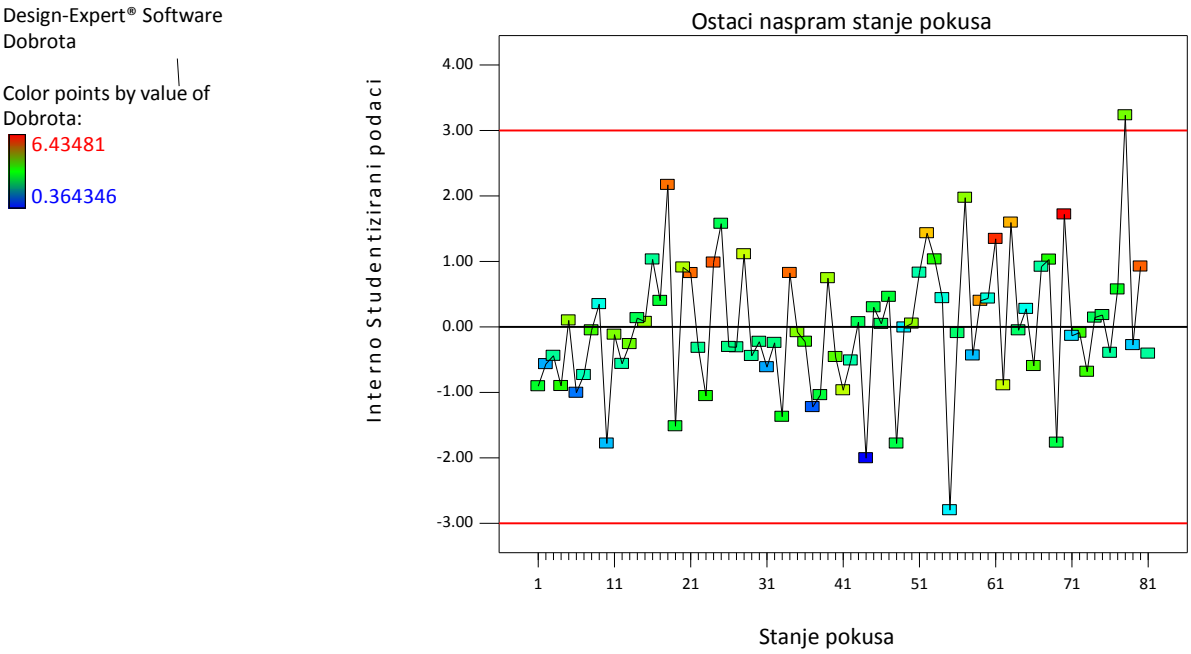
Član modela	Procjena koeficijenata	Stupnjevi slobode	Standardna pogreška	95% interval povjerenja donja granica	95% interval povjerenja gornja granica	Faktor inflacije varijance
Slobodni član	1,31	1	0,20	0,91	1,71	
C	-0,49	1	0,10	-0,69	-0,29	1,00
D	0,70	1	0,10	0,50	0,90	1,04
C^2	0,48	1	0,17	0,14	0,93	1,00
D^2	2,22	1	0,20	1083	2,62	1,04

Slika **Sl.- 64** prikazuje normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za pojedino stanje pokusa. Kako je vidljivo sa slike normalizirani papir vjerojatnosti ostataka u odnosu na vrijednosti predviđenog odziva ne ukazuje na problem jer ne postoji obrazac razdiobe prikazanih ostataka u odnosu na vrijednosti izračunatog (predviđenog) odziva. Dijagram

ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa na **Sl.- 65** provjerava postojanje sistematske pogreške koja je mogla utjecati na odziv tijekom izvođenja eksperimenta. Vidljivo je da ne postoji sistematska pogreška u pozadini koja bi se očitovala kao trend u podacima.

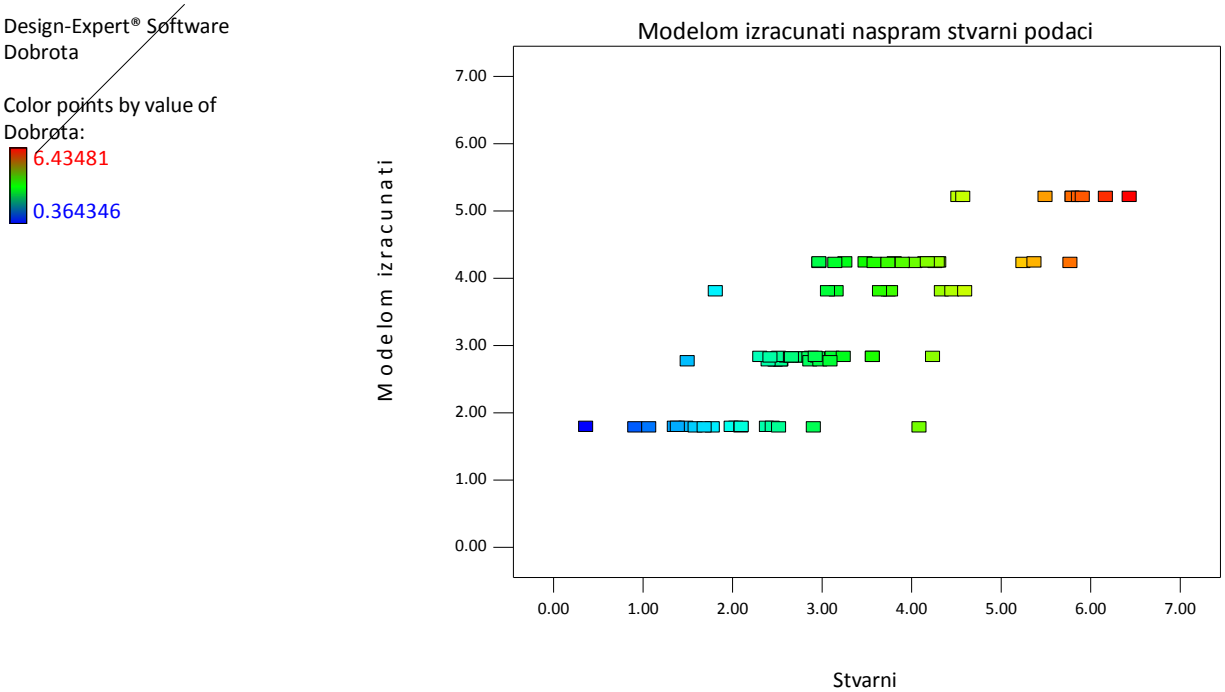


Sl.- 64. Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za reducirani kvadratni matematički model odziva dobrote.



Sl.- 65. Slučajno rasipanje ostataka u ovisnosti o redoslijedu izvođenja plana pokusa.

Slika **Sl.- 66** prikazuje odnos modelom izračunatog odziva i stvarnog odziva. Vidljivo je da se vrijednosti dobro podudaraju.



Sl.- 66. Odnos modelom izračunatog odziva i stvarnog odziva.

Završni matematički model s kodiranim vrijednostima članova modela prikazan je izrazom (24)**:**

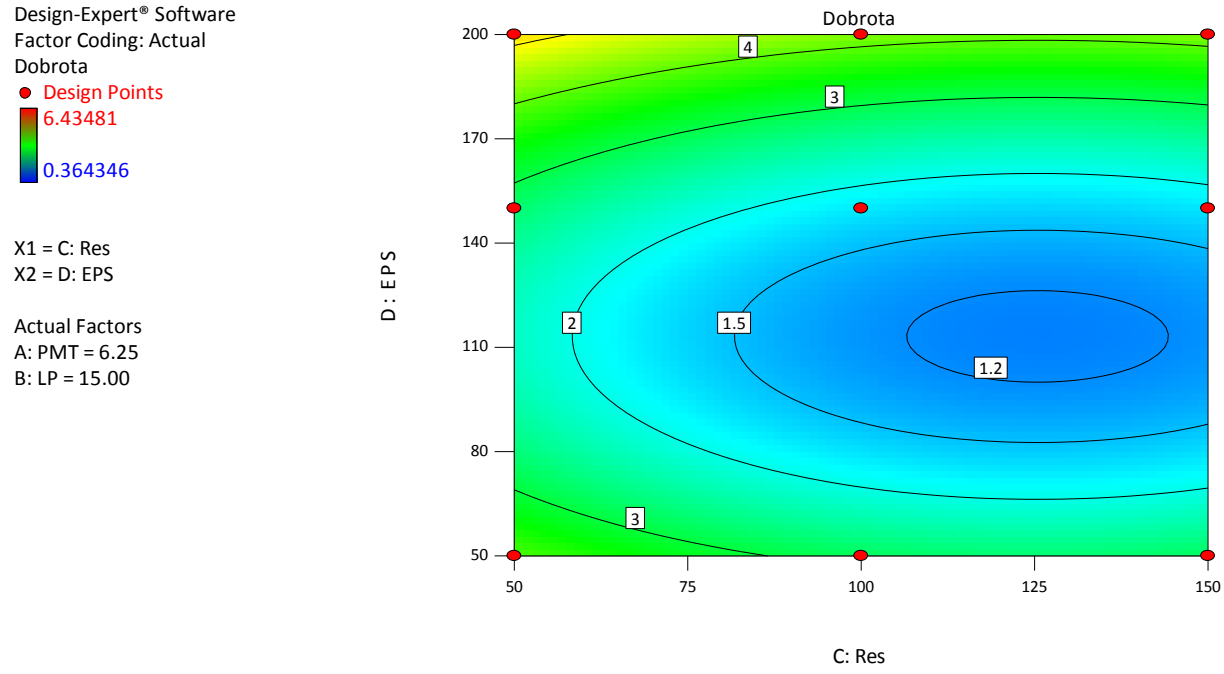
$$\delta = 1{,}31\text{-}0{,}49\cdot C+0{,}70\cdot D+0{,}48\cdot C^2+2{,}22\cdot D^2 \quad (24)$$

Matematički model s kodiranim vrijednostima članova modela iz izraza (24) prevodi se u model sa stvarnim vrijednostima članova modela prema izrazu (25):

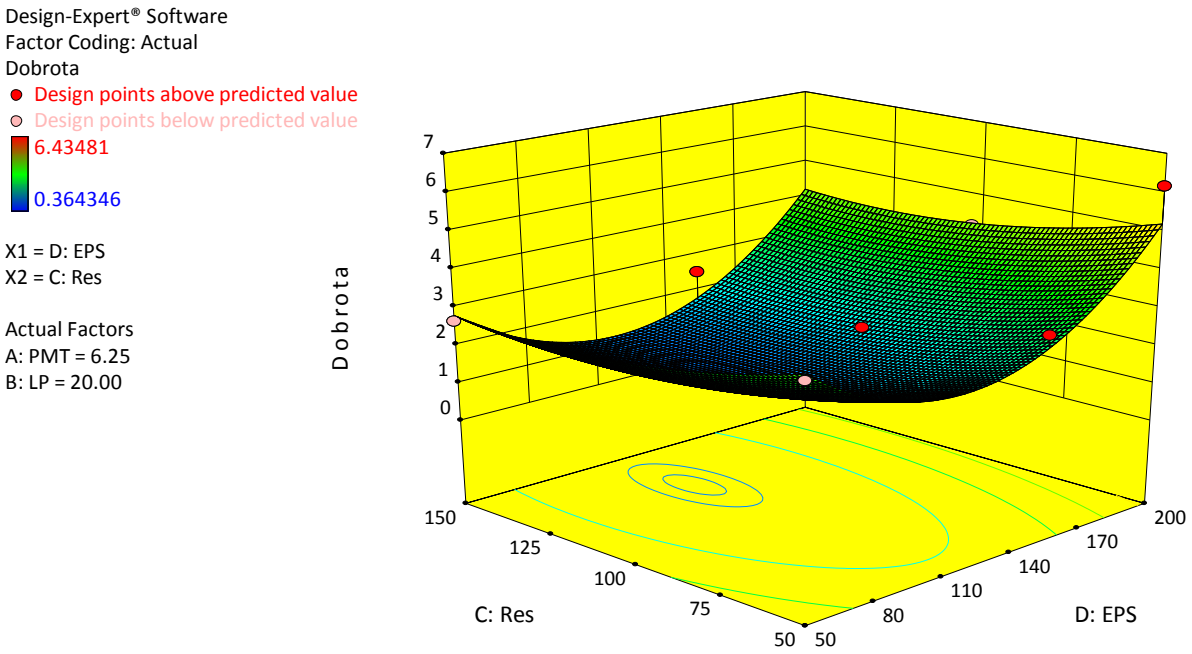
$$\delta=9{,}22954\text{-}70{,}048439\cdot Res\text{-}0{,}089438\cdot EPS+1{,}9308410\cdot 10^{-4}\cdot Res^2+3{,}95195\cdot 10^{-4}\cdot EPS^2 \quad (25)$$

gdje je Res razlučivost u μm i EPS deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće u kPa. U predstavljenom matematičkom modelu vrijednosti predstavljaju netransformirane vrijednosti (*Lambda* = 1).

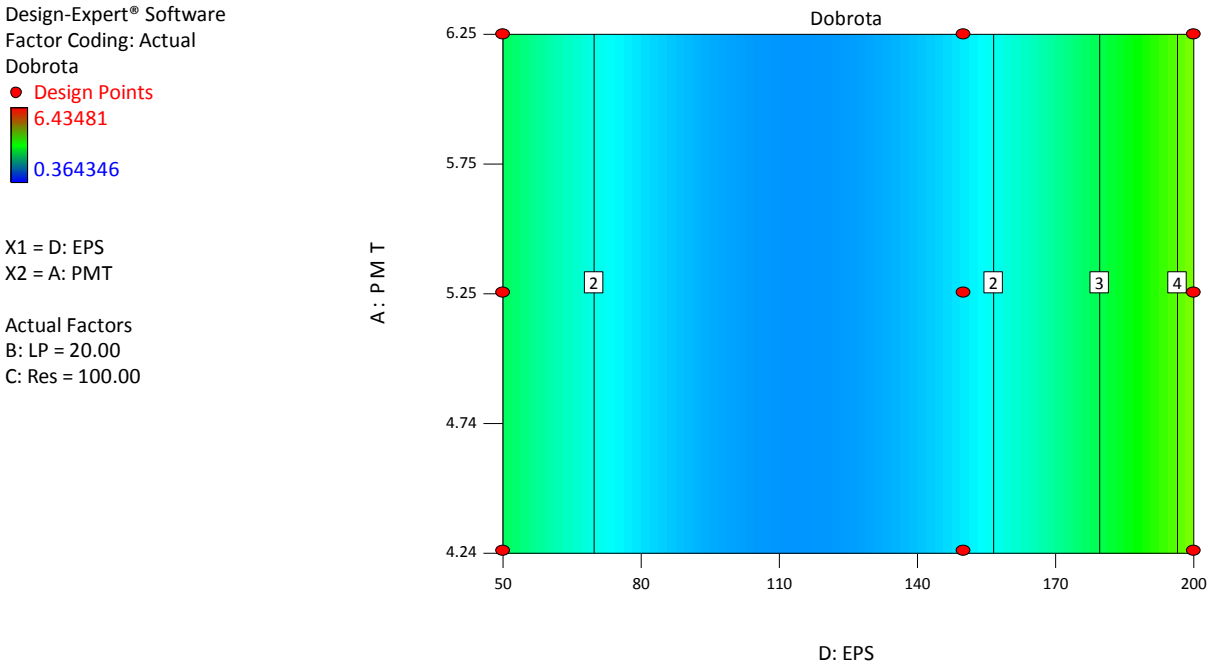
Slike od **Sl.- 67** do **Sl.- 69** prikazuju konturne i 3D prikaze matematičkog modela ovisnosti odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske snimke o parametrima komponenata sustava očitanja.



Sl.- 67. Konturni prikaz matematičkog modela ovisnosti odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su A:PMT = 6,25 V i B:LP = 15 W/m^2).



Sl.- 68. 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su A:PMT = 6,25 V i B:LP = 20 W/m^2).



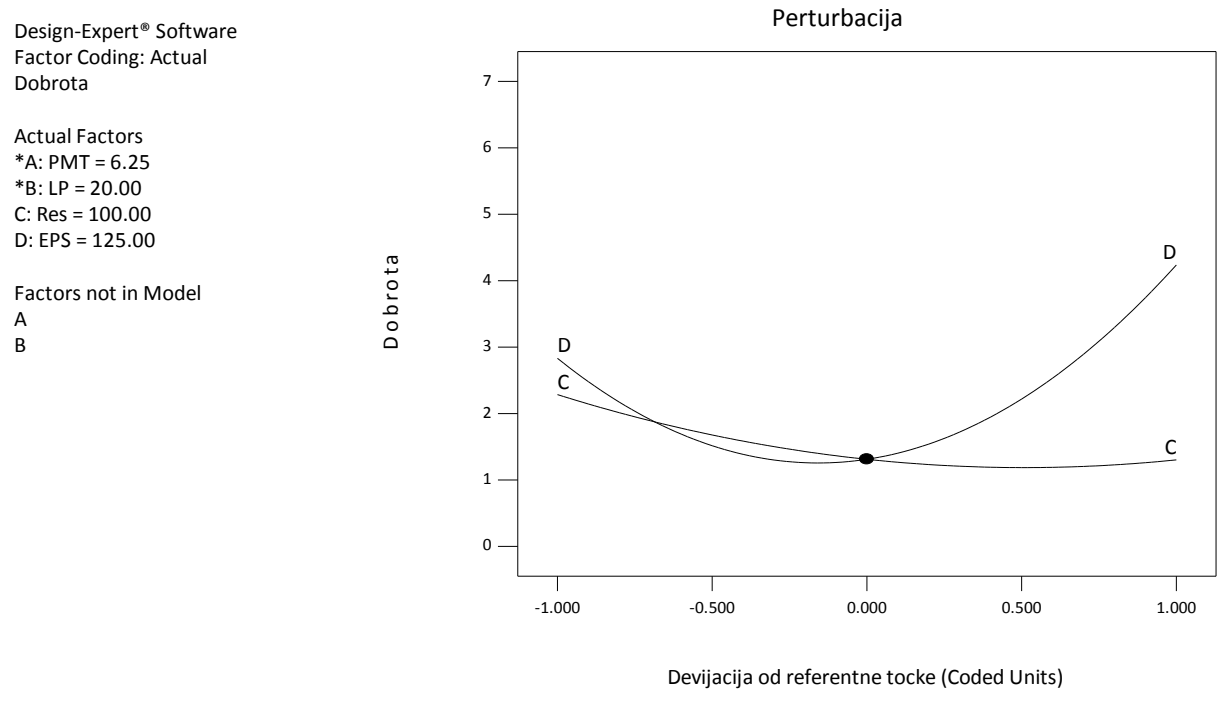
Sl.- 69. Konturni prikaz matematičkog modela ovisnosti odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike o parametrima očitanja (konstantni su B:LP = 20 W/m^2 i C:Res = 100 μm).

Prilog 4 prikazuje dijagnostičkim alatima programa Design Expert 8.0.7.1. dobivene statističke podatke analiziranog matematičkog modela za izračunavanje (predviđanje) odziva dobrote u ovisnosti o parametrima komponenata sustava očitanja.

Na temelju provedene analize i izrade matematičkog modela za izračunavanje (predviđanje) odziva dobrote prema izrazu (25) provesti će se analiza utjecaja parametara komponenata sustava očitanja na odziv dobrote digitalnog zapisa radiografske slike ekspandiranoga polistirena (poglavlje 7.3.3).

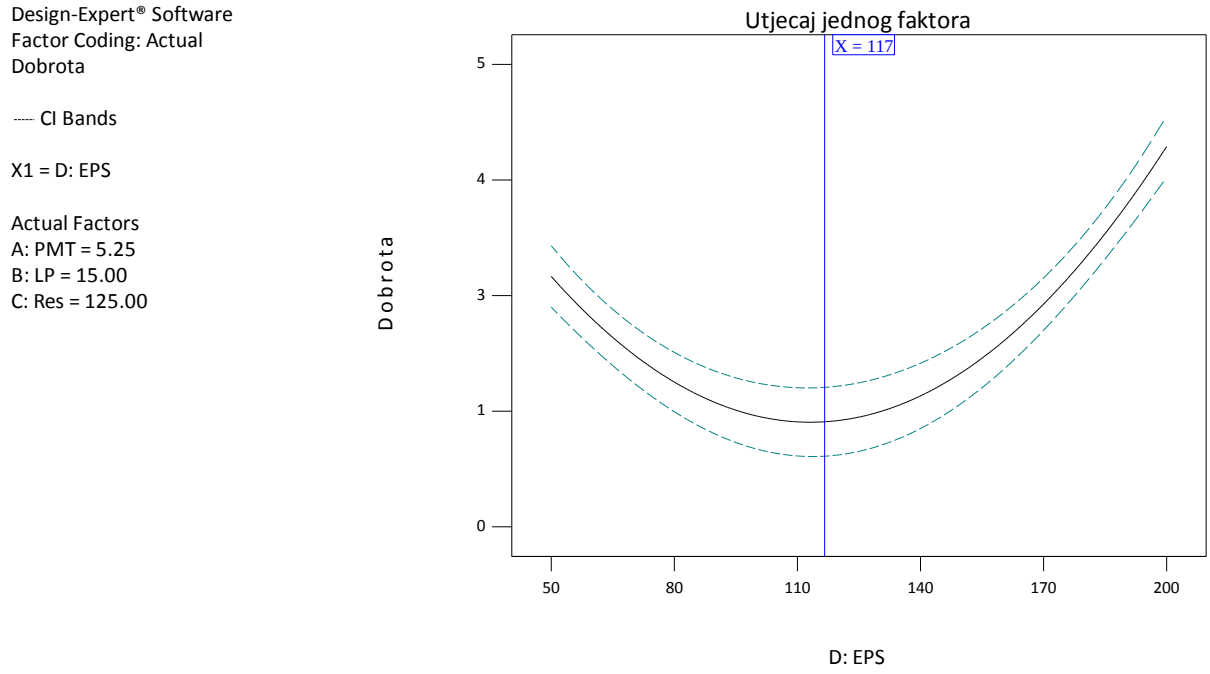
7.3.3 Analiza utjecaja parametara komponenata sustava očitanja na odziv dobrote digitalnog zapisa radiografske slike ekspandiranoga polistirena

Na slici **Sl.- 70** prikazan je dijagram perturbacije matematičkog modela odziva dobrote digitalnog zapisa radiografske slike.

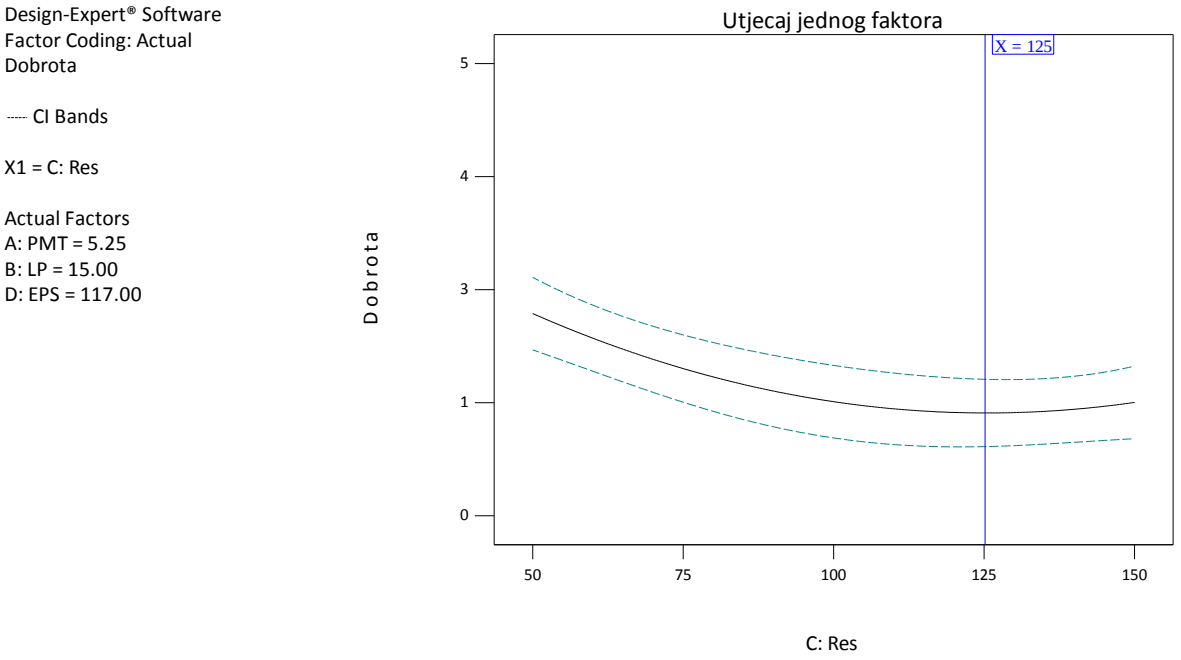


Sl.- 70. Dijagram perturbacije matematičkog modela za predviđanje dobrote digitalnog zapisa radiografske snimke.

Na narednim slikama dan je prikaz ponašanja odziva dobrote u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći (**Sl.- 71**) i u ovisnosti o razlučivosti (**Sl.- 72**). Sa slika je vidljivo da ponašanje odziva ima ekstrem. Isprekidanim je linijama (gornja i donja granica) prikazan interval 95 % povjerenja.



Sl.- 71. Prikaz ponašanja odziva dobrote u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći uzorka (konstantni su A:PMT= 5,25 V, B:LP = 15 W/m^2 i C:Res = 125 μm).



Sl.- 72. Prikaz ponašanja odziva dobrote u ovisnosti o razlučivosti (konstantni su A:PMT= 5,25 V, B:LP = 15 W/m^2 i D:EPS = 117 kPa).

Iz matematičkog modela odziva dobrote (25) i slika od **Sl.- 67** do **Sl.- 72** moguće je zaključiti slijedeće:

1. Postoje dva utjecajna parametra prvog reda koji linearno utječu na model. To su C - razlučivost [μm] i D - deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće [kPa].
2. Utjecaj člana modela D, deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće, može se opisati kvadratnom funkcijom. Vrijedi da vrijednost dobrote opada porastom deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće. Zakonitost se mijenja kod vrijednosti tlačne čvrstoće od približno 117 kPa, kada vrijednost dobrote raste daljnjim porastom vrijednosti tlačne čvrstoće.
3. Utjecaj člana modela C, razlučivost, na model je linearan. Za sve modelom obuhvaćene vrijednosti tlačne čvrstoće, vrijednost parametra dobrote raste na manjim vrijednostima razlučivosti. Na vrijednostima razlučivosti većim od 125 μm zakonitost se mijenja i dobrota neznatno raste sa manjim nagibom funkcije kako je vidljivo na slici **Sl.- 72**.

4. Postoje članovi modela drugog reda C^2 i D^2 koji linearno utječu na odziv modela.
5. Nema utjecaja članova modela A – napon pojačanja PMT i B – gustoća snage (intezitet zračenja lasera).
6. Nema utjecajnih interakcija.

7.4 Parametarska optimizacija

Optimalni parametri skeniranja određeni su parametarskom optimizacijom (grafičkom i numeričkom) korištenjem računalnog programa Design-Expert 8.0.7.1 [85]. Optimizacija je provedena postavljanjem gornjih i donjih granica, odnosno ograničenja na članove modela kako je prikazano na slijedećem primjeru:

- Napon pojačanja PMT: u rasponu od 4,25 V do 6,25 V
- Gustoća snage (intezitet zračenja lasera): u rasponu od 10 W/m^2 do 20 W/m^2
- Razlučivost očitanja: u rasponu od 50 µm do 150 µm
- Tlačna čvrstoća: u koraku od 10 kPa (na primjer od 180 kPa do 190 kPa)
- Intenzitet zacrnjenja piksela: u rasponu od 30000 do 35000
- Kriterij dobrote: cilj je maksimalna vrijednost dobrote unutar postavljenog raspona zacrnjenja piksela i raspona tlačne čvrstoće.

Provedeni postupak parametarske optimizacije prikazan je na primjeru ispitnih uzorka ekspandiranoga polistirena raspona tlačne čvrstoće od 180 kPa do 190 kPa. **Tablica 24** daje prikaz postavljenih ograničenja za optimizaciju parametara očitanja navedenog primjera.

Tablica 24. Postavljena ograničenja za optimizaciju parametara očitanja uzoraka tlačne čvrstoće unutar raspona od 180 kPa do 190 kPa.

OGRANIČENJA	Cilj	Donja granica	Gornja granica
Član modela:			
A:PMT	Unutar raspona	4,25	6,25
B:LP	Unutar raspona	10	20
C:Res	Unutar raspona	50	150
D:EPS	Unutar raspona	180	190
D_{sred}	Unutar raspona	30000	35000
δ	Maksimalna vrijednost	0,364346	6,43481

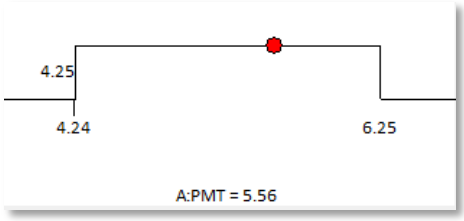
Prikaz modelom određenih optimalnih parametara očitanja za navedeni primjer nakon provedene optimizacije unutar zadanih graničnih vrijednosti daje **Tablica 25**. Modelom je pronađeno je ukupno 9 optimalnih parametara očitanja koje prikazuje **Tablica 25**, a čijom kombinacijom se postiže maksimalna dobrota 4,56354 i parametar poželjnosti 0,692 (maksimalna postiziva vrijednost parametra poželjnosti iznosi 1 i ocjena je postupka

parametarske optimizacije). Dobivene vrijednosti dobrote i poželjnosti predstavljaju maksimalne vrijednosti koje se mogu dobiti unutar postavljenih ograničenja.

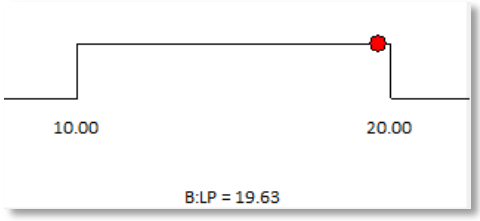
Tablica 25. Prikaz modelom određenih optimalnih parametara očitanja nakon provedene parametarske optimizacije za ekspandirani polistiren deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće u rasponu od 180 kPa do 190 kPa.

RJEŠENJA	PMT	LP	Res	EPS	D_{sred}	δ	Poželjnost
1.	5,56	19,63	50	190	32549,5		
2.	5,65	15,99	50	190	31808,9		
3.	6,21	10,72	50	190	31900,6		
4.	5,45	18,14	50	190	31036,7		
5.	5,44	17,16	50	190	30330,2	4,56354	0,692
6.	5,89	15,70	50	190	34019,8		
7.	5,35	19,79	50	190	30324,9		
8.	5,74	14,39	50	190	31510,5		
9.	5,52	15,32	50	190	30073,5		

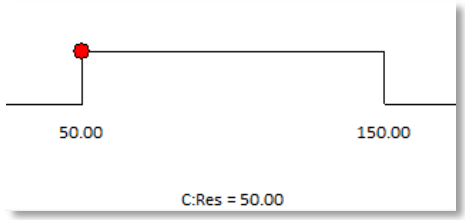
Grafički prikaz prvog od 9 modelom određenih optimalnih parametara očitanja te vrijednosti dobrote, δ, za ekspandirani polistiren deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće od 180 kPa do 190 kPa, prikazuju slike od **Sl.- 73** do **Sl.- 75**.



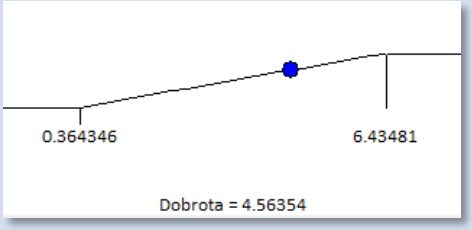
a) napon pojačanja PMT za δ= 4,56354



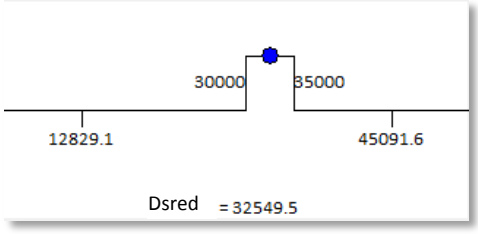
b) gustoća snage (intezitet zračenja lasera) za δ= 4,56354

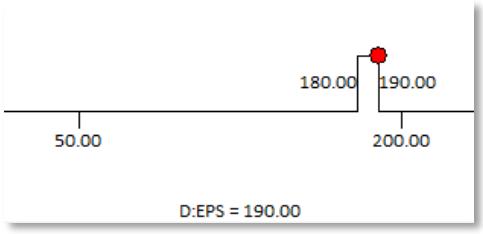


c) razlučivost očitanja za δ= 4,56354



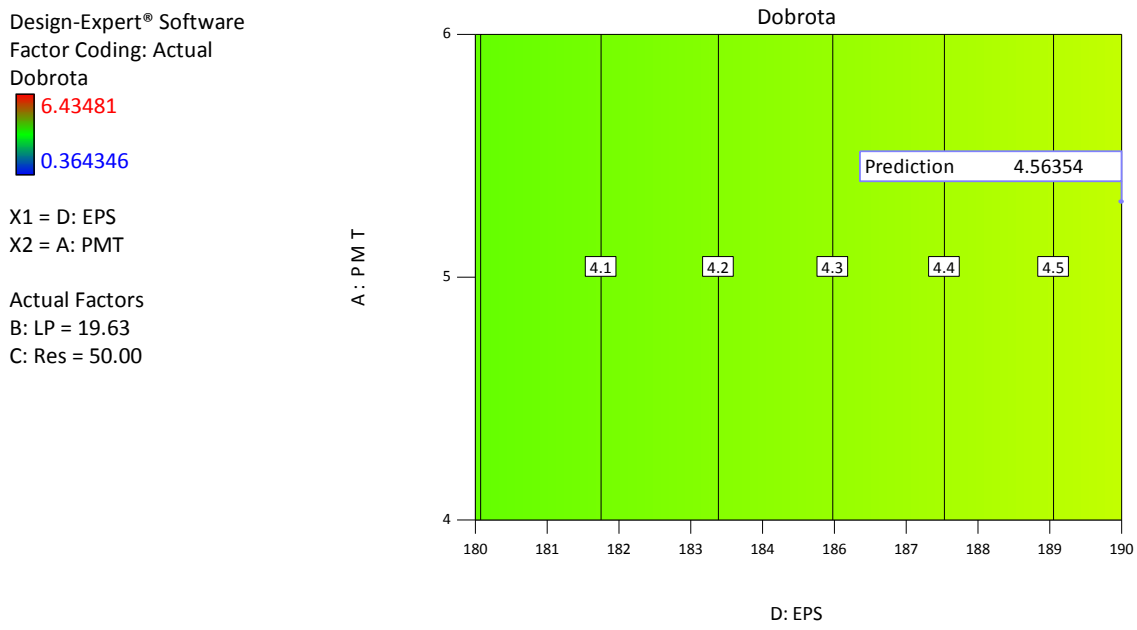
d) max. δ za postavljena ograničenja



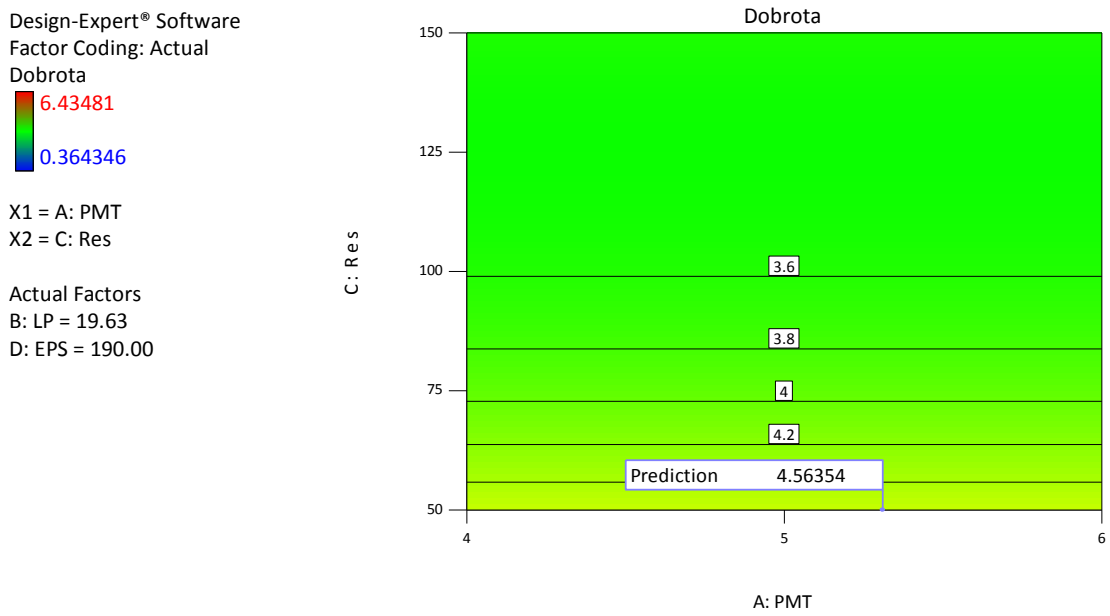


e) intenziteta zacrnjenja za δ= 4,56354	f) tlačna čvrstoća EPS-a

Sl.- 73. Grafički prikaz položaja modelom određenih optimalnih parametara očitanja u odnosu na postavljene raspone i ograničenja za ekspandirani polistiren deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće od 180 kPa do 190 kPa.



Sl.- 74. Konturni prikaz dobrote u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći (D:EPS) i pojačanju fotomultiplikatorske cijevi (A:PMT) (stvarne vrijednosti snage laserske zrake B: LP = 19,63 W/m^2 i razlučivosti C: Res = 50 μm).



Sl.- 75. Konturni prikaz dobrote u ovisnosti o razlučivosti (C:Res) i pojačanju fotomultiplikatorske cijevi (A:PMT) (stvarne vrijednosti snage laserske zrake B: LP = 19,63 W/m^2 i tlačne čvrstoće D:EPS = 190 kPa).

Prema izrazu (18) maksimalna vrijednost dobrote je kriterij za određivanje optimalnih parametara očitanja. Postavljanjem bilo kojih parametara određenih modelom, a koje daje **Tablica 25** za ispitne uzorke ekspandiranoga polistirena u rasponu od 180 kPa do 190 kPa, dobiva se maksimalna vrijednost dobrote.

Istovjetno prikazano primjeru za ekspandirani polistiren tlačne čvrstoće u rasponu od 180 kPa do 190 kPa, provodi se parametarska parametrizacija i za ostale raspone tlačne čvrstoće te se dobivaju optimalni parametri očitanja.

Parametarskom optimizacijom moguće je postaviti vrijednost tlačne čvrstoće na „jednu“ vrijednost tlačne čvrstoće, te upravo za nju dobiti optimalne parametre očitanja.

Nakon provedene optimizacije unutar zadanih graničnih vrijednosti, kao rezultat dobivaju se optimalni parametri očitanja koji vrijede za modelom obuhvaćene vrijednosti tlačne čvrstoće, ekspandiranoga polistirena od 50 kPa do 200 kPa:

- **napon pojačanja PMT: 5,25 V**

- **gustoća snage (intezitet zračenja lasera): 20 W/m^2**
- **razlučivost očitanja: 50 µm**

Parametarskom optimizacijom u poglavlju 6.5 određeni su optimalni parametri eksponiranja ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena obuhvaćenih modelom, dok su u poglavlju 7.4 određeni optimalni parametri očitanja ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena obuhvaćenih modelom.

U poglavlju 8 analizirati će se sinergijsko djelovanje svih komponenata karakterizacijskog niza na varijabilnost rezultata ispitivanja. Navedeno će se provesti određivanjem odzivne funkcije karakterizacijskog niza koja se temelji upravo na određenim optimalnim parametrima eksponiranja i očitanja, kao i korištenoj predloženoj metodologiji za analizu digitalnih zapisa radiografskih slika.

8. ODZIVNI MODEL KARAKTERIZACIJSKOG NIZA

Analiza i evaluacija utjecaja parametara eksponiranja i očitanja na odziv dobrote digitalnog zapisa radiografske slike, u poglavljima 6 i 7, doprinijela je razumijevanju pojedinačnih utjecaja parametara procesa eksponiranja slikovnih ploča u prvom koraku procesa, kao i razumijevanju analogno-digitalne konverzije latentnog zapisa slikovnih ploča kod procesa očitanja u idućem koraku procesa.

Sinergijsko djelovanje elemenata karakterizacijskog niza na varijabilnost rezultata ispitivanja biti će evaluirano utvrđivanjem odzivnog modela karakterizacijskog niza. Odzivni model karakterizacijskog niza predstavlja ovisnost omjera intenziteta zacrnjenja piksela na digitalnom zapisu radiografske slike ispitnog i referentnog uzorka, D_n/D_{ref}, u odnosu na omjer

intenziteta fotona koji su prošli kroz ispitni i referentni uzorak i pobudili latentni zapis slikovne ploče tijekom eksponiranja, I_n/I_{ref}.

Omjer intenziteta zacrnjenja piksela, D_n/D_{ref}, rezultat je analize digitalnih zapisa radiografskih slika metodologijom definiranom u poglavlju 4. D_n/D_{ref} u konačnici je rezultat eksponiranja i očitanja upravo optimalnim parametrima dobivenim parametarskom optimizacijom u poglavljima 6.5 i 7.4, te evaluacije značajki područja od interesa predloženom metodologijom iz poglavlja 4.

Omjer intenziteta X zraka koje su prošli kroz ispitni i referentni uzorak i eksponirali slikovnu ploču, I_n/I_{ref}, temelji se na koeficijentima prigušenja materijala ispitnog i referentnog uzorka, te debljini ispitnog i referentnog uzorka kako će biti objašnjeno u poglavlju 8.1.

U poglavlju 8.3 biti će evaluiran utjecaj odabira područja od interesa na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće, dok će u poglavlju 8.4 biti evaluiran utjecaj strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće. Utjecaj na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena provesti će se određivanjem relativnog odstupanja modelom određene strukturne gustoće izračunate na temelju odzivne funkcije karakterizacijskog niza, u koju su implementirani optimalni parametri eksponiranja i očitanja, i prividne gustoće određene normiranom metodom HRN EN 1602 [26]. Rezultati prividnih gustoća svih ispitnih uzoraka obuhvaćenih modelom nalaze se u prilogu 1 ovog doktorskog rada.

8.1 Koeficijent prigušenja

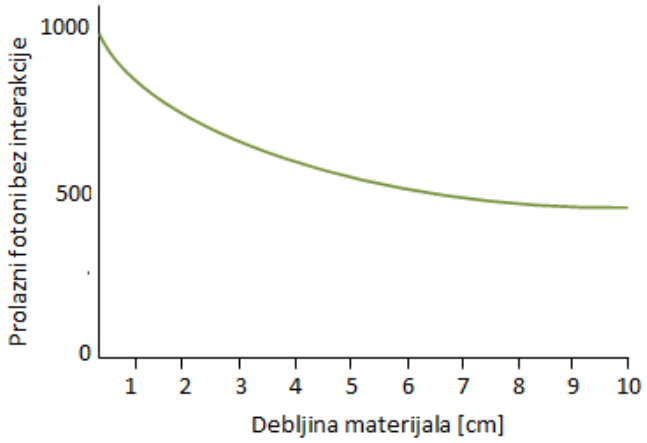
Za postavljanje odzivnog modela karakterizacijskog niza koristit će se odnos između ulaznog X zračenja i materijala koji je izložen djelovanju X zraka ([44], [88], [89]). Kada se X zrake jednakog intenziteta usmjere u ispitni uzorak dolazi do:

1. interakcije između X zraka i strukture ispitivanog materijala pri čemu se energija X zraka apsorbira ili rasipa. Ta se pojava naziva prigušenje.
2. ili nesmetanog potpunog prolaza kroz ispitni objekt bez interakcije X zračenja s materijalom koji se ispituje.

Iako fotoni imaju jednaku energiju, zbog interakcije sa strukturom materijala, prolaze različite udaljenosti kroz uzorak ekspandiranoga polistirena. Naravno, vjerojatnost interakcije fotona sa materijalom se povećava s povećanjem debljine ispitivanoga materijala. Ova je ovisnost eksponencijalna i prikazana je slikom **Sl.- 76** [89] te se može napisati kao:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{26}$$

gdje su I intenzitet izlaznih fotona, I_0 početan ulazni intenzitet fotona, μ koeficijent prigušenja i x prijeđena udaljenost kroz materijal, odnosno debljina ispitivanog materijala.



Sl.- 76. Eksponencijalna ovisnost broja fotona koji prođu kroz materijal o debljini [89].

Da bi se iz koeficijenta prigušenja dobio maseni koeficijent prigušenja, potrebno je uvesti utjecaj gustoće materijala. Maseni koeficijent prigušenja računa se prema izrazu:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \tag{27}$$

gdje je μ_m maseni koeficijent prigušenja u cm^2/g, μ koeficijent prigušenja u cm^{-1} i ρ gustoća ispitivanog materijala u g/cm^3. Uvrštavanjem izraza (27) u izraz (26) dobiva se izraz za intenzitet koji u sebi sadrži maseni koeficijent prigušenja:

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x} \tag{28}$$

Maseni koeficijent prigušenja za ekspandirani polistiren iznosi 2,088 cm^2/g za srednju vrijednost gustoće ekspandiranoga polistirena koji se koristi kao toplinska izolacija od 26 kg/m^3 [14].

8.2 Odzivni model karakterizacijskog niza

Odzivni model karakterizacijskog niza predstavlja ovisnost omjera intenziteta zacrnjenja piksela na digitalnom zapisu radiografske slike ispitnog i referentnog uzorka, D_n/D_{ref}, o omjeru intenziteta fotona koji su prošli kroz ispitni i referentni uzorak i te pobudili slikovnu ploču tijekom eksponiranja, I_n/I_{ref}.

Omjer intenziteta zacrnjenja piksela na digitalnom zapisu radiografske slike ispitnog uzorka i referentnog uzorka, D_n/D_{ref}, određuje se na temelju analize digitalnih zapisa radiografskih slika koji su rezultat eksponiranja ispitnih uzoraka i očitanja slikovnih ploča upravo optimalnim parametrima eksponiranja i očitanja određenim u poglavljima 6 i 7.

Kako je prikazano na slici **Sl.- 77** odzivni model karakterizacijskog niza rezultat je niza pretvorbi pobuda i odziva koje se odvijaju u slijedećim komponentama karakterizacijskog niza:

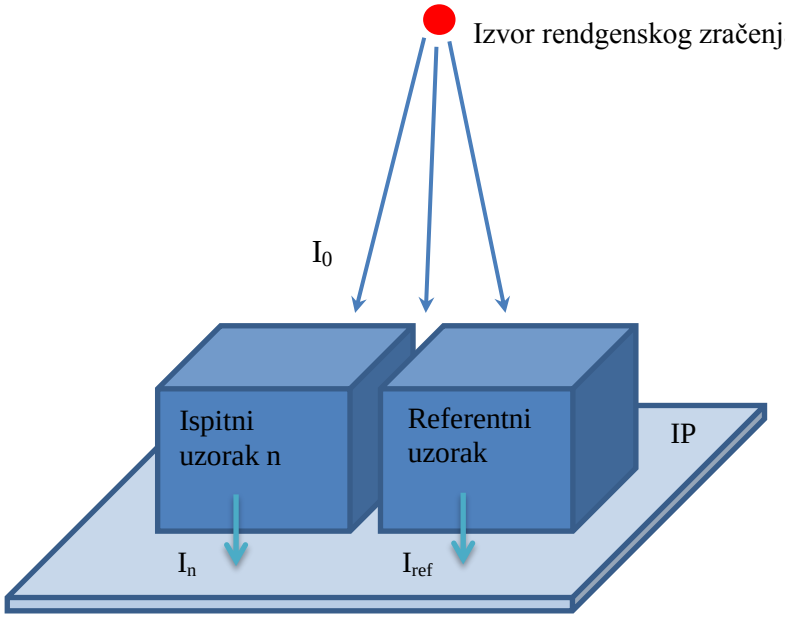
- izvoru rendgenskog zračenja (napon, radiografska ekspozicija),
- skeneru slikovnih ploča (napon pojačanja PMT, gustoća snage (intezitet zračenja lasera), rezolucija očitanja) i
- slikovnim pločama.

Odzivni model karakterizacijskog niza omogućiti će karakterizaciju sinergijskog djelovanja elemenata karakterizacijskog niza na varijabilnost rezultata ispitivanja što predstavlja jedan od ciljeva ovog doktorskog rada.

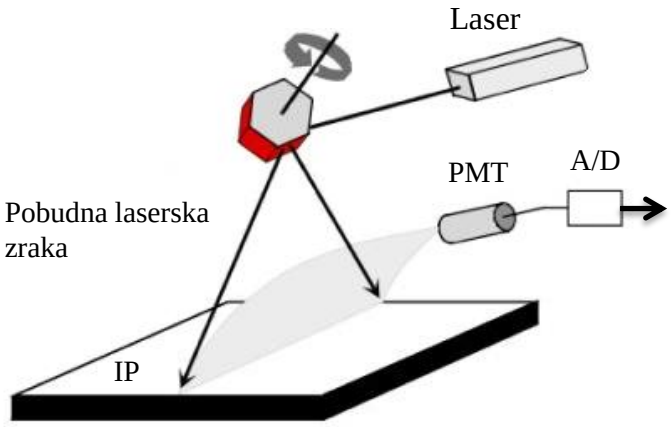
Intenzitet X zraka koje su prošle kroz ispitni uzorak i došle do slikovne ploče nakon eksponiranja, I_n, sa slike **Sl.- 77** računa se prema izrazu (29):

$$I_n = I_0 e^{-\mu_{m_n} \rho_n x_n} \tag{29}$$

gdje je I_n izlazni intenzitet X zraka, I_0 početni ulazni intenzitet X zraka, μ_{mn} maseni koeficijent prigušenja ispitnog uzorka, ρ_n gustoća ispitnog materijala i x_n debljina ispitnog uzorka.

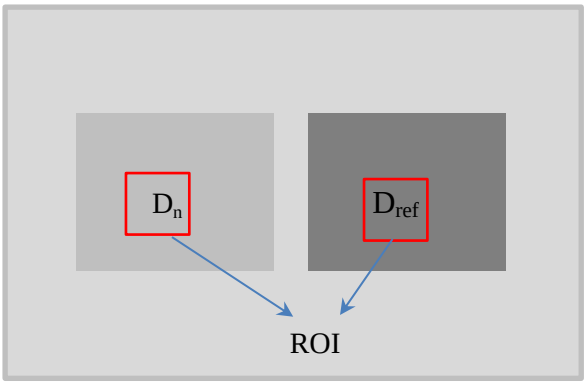


a) eksponiranje



b) očitanje i A/D pretvorba

16-bitni digitalni zapis radiografske slike u TIFF formatu



c) analiza ROI na digitalnom zapisu radiografske slike

Sl.- 77. Shematski prikaz modeliranja odzivnog modela karakterizacijskog niza: a) eksponiranje, b) očitanje i A/D pretvorba i c) analiza ROI na digitalnom zapisu radiografske slike.

Intenzitet X zraka koje su prošle kroz referentni uzorak i došle do slikovne ploče nakon eksponiranja, I_{ref}, sa slike **Sl.- 77** računa se prema izrazu (30):

$$I_{\mathrm{ref}} = I_0 e^{-\mu_{\mathrm{m_{ref}}}\rho_{\mathrm{ref}}x_{\mathrm{ref}}} \tag{30}$$

gdje je I_{ref} izlazni intenzitet X zraka, I_0 početni ulazni intenzitet X zraka, μ_{mref} maseni koeficijent prigušenja referentnog uzorka, ρ_{ref} gustoća referentnog uzorka i x_{ref} debljina referentnog uzorka.

Omjerom intenziteta fotona koji su prošli kroz ispitni uzorak i referentni uzorak te došli do slikovne ploče nakon eksponiranja, $I_{\mathrm{n}}/I_{\mathrm{ref}}$, kako je dano izrazom (31), eliminira se nepoznanica - početni ulazni intenzitet fotona, I_0.

$$\frac{I_{\mathrm{n}}}{I_{\mathrm{ref}}} = \frac{e^{-\mu_{\mathrm{m_n}}\rho_{\mathrm{n}}x_{\mathrm{n}}}}{e^{-\mu_{\mathrm{m_{ref}}}\rho_{\mathrm{ref}}x_{\mathrm{ref}}}} \tag{31}$$

Metodologija određivanja intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike objašnjena je u poglavlju 4.3. Na temelju vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela sa tri područja od interesa digitalnog zapisa radiografske slike izračunate su aritmetičke sredine $\overline{D_{\mathrm{n}}}$ i $\overline{D_{\mathrm{ref}}}$. Sve vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike, za ispitne uzorke korištene tijekom određivanja odzivne karakteristike karakterizacijskog niza, izmjerene su za područja od interesa jednake veličine i dovoljno daleko od utjecaja rubova uzoraka no blizu centralne zrake snopa X zračenja. Broj analiziranih područja od interesa definiran je zasebno za svaki pokus proveden u narednim poglavljima.

Parametarskom optimizacijom u poglavlju 6 definirani su optimalni parametri eksponiranja: napon na rendgenskoj cijevi 15 kV i radiografska ekspozicija 420 mAs (I = 3,5 mA). Navedeni parametri predstavljaju konstantne parametre eksponiranja uzoraka tijekom određivanja odzivne funkcije karakterizacijskog niza. Parametarskom optimizacijom u

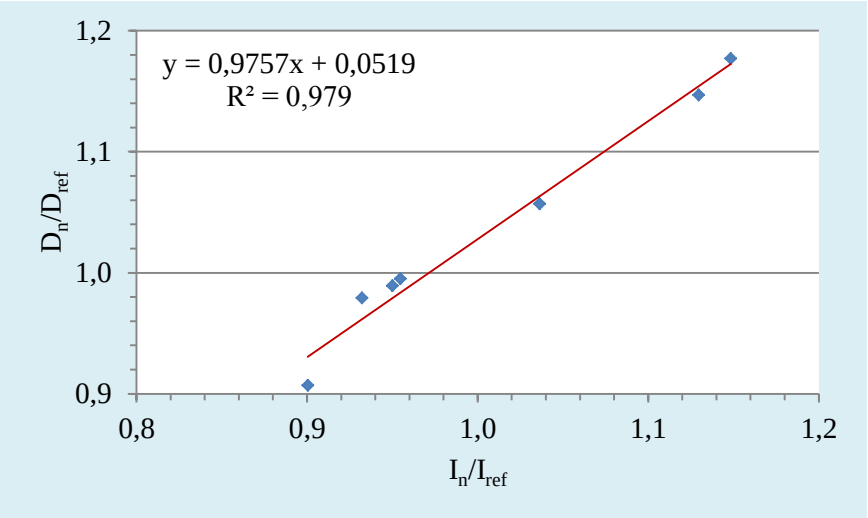
poglavlju 7 definirani su optimalni parametri očitanja: napon pojačanja PMT: 5,25 V, gustoća snage (intezitet zračenja lasera): 20 W/m^2 i razlučivost očitanja: 50 μm. Navedeni parametri predstavljaju konstantne parametre očitanja tijekom određivanja odzivne funkcije karakterizacijskog niza.

Tablica 26 prikazuje optimalne parametre eksponiranja i očitanja, te značajke ispitnih uzoraka: tlačnu čvrstoću, debljinu i gustoću koji su korišteni pri određivanju odzivnog modela karakterizacijskog niza. Uzorak oznake 100/80/5 predstavlja referentni uzorak i u tablici je jasnije naznačen. Također je dana vrijednost pripadajuće prividne gustoće ispitnih uzoraka prema tablici u prilogu 1.

Tablica 26. Optimalni parametri eksponiranja i očitanja, te značajke ispitnih uzoraka: tlačna čvrstoća, debljina i gustoća uzoraka koji su korišteni pri modeliranju odzivnog modela karakterizacijskog niza.

Napon [kV]	Radiografska ekspozicija [mAs]	PMT [V]	LP [W/m^2]	Res [μm]	Uzorak	EPS [kPa]	Debljina [mm]	Gustoća [kg/m^3]
15	420	5,25	20	50	200/80/2	200	80	30,1497
					150/80/3	150	80	26,9845
					100/80/5	**100**	**80**	**19,2332**
					50/80/1	50	80	11,9394
					100/60/1	100	60	22,7983
					100/100/2	100	100	18,7523
					70/60/4	70	60	14,5649
					150/100/2	150	100	29,3846

Odzivni model karakterizacijskog niza prikazan je na slici **Sl.- 78** kao ovisnost omjera intenziteta zacrnjenja piksela na digitalnom zapisu radiografske slike ispitnog i referentnog uzorka, D_n/D_{ref}, o omjeru intenziteta X zraka koje su prošle kroz ispitni i referentni uzorak, I_n/I_{ref}.



Sl.- 78. Odzivni model karakterizacijskog niza.

Odzivni model karakterizacijskog niza sa slike **Sl.- 78** aproksimiran je linearnom jednadžbom uz koeficijent determinacije $R^2 = 0{,}979$:

$$y = 0{,}9757x + 0{,}0519 \tag{32}$$

Vrijedi da je:

$$y = \frac{D_n}{D_{ref}} \tag{33}$$

gdje je D_n/D_{ref} omjer intenziteta zacrnjenja piksela na digitalnom zapisu radiografske slike ispitnog uzorka i referentnog uzorka dobiven analizom digitalnih zapisa radiografskih slika ispitnih uzoraka, i

$$x = \frac{I_n}{I_{ref}} \tag{34}$$

gdje je I_n/I_{ref} omjer intenziteta X zraka koje su prošle kroz ispitni i referentni uzorak i došle do slikovne ploče nakon eksponiranja.

Na temelju jednadžbe (31) i odzivnog modela karakterizacijskog niza sa slike **Sl.- 78**, te izraza (32), (33) i (34) može se definirati model u svrhu karakterizacije materijala, odnosno određivanja nepoznate strukturne gustoće ispitnih uzorka ekspandiranoga polistirena, ρ_n.

$$\frac{D_n}{D_{ref}} = 0{,}9757\,\frac{I_n}{I_{\mathrm{ref}}} + 0{,}0519 = 0{,}9757\,\frac{e^{-\mu_{\mathrm{m_n}}\rho_{\mathrm{n}}x_{\mathrm{n}}}}{e^{-\mu_{\mathrm{m_{ref}}}\rho_{\mathrm{ref}}x_{\mathrm{ref}}}} + 0{,}0519 \tag{35}$$

gdje je

- $D_{\mathrm{n}}/D_{\mathrm{ref}}$ omjer intenziteta zacrnjenja piksela na digitalnom zapisu radiografske slike ispitnog uzorka i referentnog uzorka,
- $I_{\mathrm{n}}/I_{\mathrm{ref}}$ omjer intenzitet X zraka koje su prošle kroz ispitni i referentni uzorak i eksponirale slikovnu ploču,
- μ_{m} maseni koeficijent prigušenja nepoznatog ispitnog uzorka i referentnog uzorka,
- ρ_n gustoća nepoznatog ispitnog uzorka,
- ρ_{ref} gustoća referentnog uzorka (za potrebe pokusa jednaka prividnoj gustoći iz priloga 1),
- X_{n} debljina nepoznatog ispitnog uzorka i
- X_{ref} debljina referentnog uzorka.

Temeljem izraza (35), u poglavlju 8.3 biti će evaluiran utjecaj odabira područja od interesa na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće, dok će u poglavlju 8.4 biti evaluiran utjecaj strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće.

8.3 Utjecaj odabira područja od interesa na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena

U poglavlju 8.3.1 biti će objašnjena metodologija određivanja utjecaja odabira područja od interesa na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena. Evaluacija utjecaja odabira područja od interesa biti će provedena u poglavlju 8.3.2 na uzorku tlačne čvrstoće 100 kPa i debljine 60 mm.

8.3.1 Metodologija određivanja utjecaja odabira područja od interesa na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena

Za određivanje utjecaja odabira područja od interesa (ROI) na varijabilnost modelom dobivene strukturne gustoće proveden je pokus korištenjem ispitnih uzoraka različitih debljina i iste deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće. Parametri pokusa su slijedeći:

1. Debljina ispitnog uzorka iznosi 60 mm i tlačna čvrstoća 100 kPa.
2. Debljina referentnog uzorka iznosi 80 mm i tlačna čvrstoća 100 kPa.
3. Optimalni uvjeti eksponiranja određeni su parametarskom optimizacijom u poglavlju 6.5 tijekom određivanja optimalnih parametara eksponiranja rendgenskim uređajem kao elementa karakterizacijskog niza i iznose:
   - napon: 15 kV i
   - radiografska ekspozicija: 420 mAs (I = 3,5 mA).
4. Optimalni uvjeti očitanja određeni su parametarskom optimizacijom u poglavlju 7.4 tijekom određivanja optimalnih parametara očitanja skenerom slikovnih ploča kao elementa karakterizacijskog niza i iznose:
   - napon pojačanja PMT: 5,25 V,
   - gustoća snage (intezitet zračenja lasera): 20 W/m^2 i
   - razlučivost očitanja: 50 μm
5. Udaljenost fokus-film iznosi 1 m.
6. Metodologija analize digitalnog zapisa radiografske slike definirana je u poglavlju 4.

Za utjecaj odabira područja od interesa na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće nasumično je iz grupe uzoraka odabran ispitni uzorak oznake 100/60/1 (gdje 100 predstavlja deklariranu vrijednost tlačne čvrstoće, 60 predstavlja debljinu ispitnog uzorka, a 1 predstavlja prvi od 5 uzoraka iz grupe uzoraka s istim parametrima. Analogno vrijedi za sve uzorke pa se u daljnjem tekstu više neće objašnjavati značenje oznake), te referentni uzorak 100/80/5. Određivanje nepoznate gustoće ispitnih uzoraka, $\rho_{n,}$ provedeno je transformacijom izraza (35) za opisivanje odzivne funkcije karakterizacijskog niza.

Vrijedi:

$$\rho_n = \frac{\mu_{ref} x_{ref} \rho_{ref} - \ln\left(\frac{\left(\frac{D_n}{D_{ref}}\right) - 0{,}0519}{0{,}9757}\right)}{\mu_{mn} x_n} \tag{36}$$

gdje je

- D_n/D_{ref} omjer intenziteta zacrnjenja piksela na digitalnom zapisu radiografske slike ispitnog uzorka oznake 100/60/1 i referentnog uzorka oznake 100/80/5,
- $\mu_{mn} = \mu_{ref}$ maseni koeficijent prigušenja ispitnog uzorka oznake 100/60/1 i referentnog uzorka oznake 100/80/5,
- ρ_n nepoznata strukturna gustoća ispitnog uzorka debljine 60 mm oznake 100/60/1,
- ρ_{ref} prividna gustoća referentnog uzorka debljine 80 mm oznake 100/80/5 uzeta iz tablice iz priloga 1 i dobivena konvencionalnom metodom prema metodi HRN EN 1602,
- X_n = 60 mm - debljina ispitnog uzorka 100/60/1 nepoznate vrijednosti strukturne gustoće,
- X_{ref} = 80 mm - debljina referentnog uzorka 100/80/5.

Na digitalnom zapisu radiografske slike analizirano je po 5 područja od interesa. Pokus je ponovljen pet puta sa istom postavkom ispitnih uzoraka (pet eksponiranja). Digitalni zapis radiografske slike pokusa za određivanje utjecaja odabira područja od interesa na varijabilnost modelom dobivene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena prikazan je na slici **Sl.- 79**.

Na slici **Sl.- 79** oznaka 1 na digitalnom zapisu radiografske slike predstavlja ispitni uzorak debljine 6 cm oznake 100/60/1, oznaka 2 na digitalnom zapisu radiografske slike predstavlja uzorak debljine 8 cm oznake 100/80/5 koji će služiti kao referentni uzorak. Također je za ispitni uzorak oznake 1 prikazan raspored 5 područja od interesa konstantne veličine 1 cm x 1 cm. Analogno je provedeno i za referentni uzorak oznake 2.



Sl.- 79. Digitalni zapis radiografske slike (jedna radiografska ekspozicija) pokusa za određivanje utjecaja odabira područja od interesa na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena.

8.3.2 Evaluacija utjecaja odabira područja od interesa na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena

Modelom (36) određene vrijednosti strukturne gustoće dane su za pet eksponiranja (ponavljanja). Za svako je eksponiranje izračunato relativno odstupanje, $\Delta\rho_{rel}$, vrijednosti modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, od prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, izračunate prema konvencionalnoj metodi HRN EN 1602. Vrijednostima prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, pridružena je vrijednost mjerne nesigurnosti ± 1U.

Relativno se odstupanje računa prema slijedećem izrazu:

$$\Delta\rho_{rel} = \frac{\rho_n - \rho_{prividno}}{\rho_{prividno}} x100 \qquad (37)$$

gdje je

- $\Delta\rho_{rel}$ relativno odstupanje vrijednosti modelom dobivene strukturne gustoće, ρ_n, od prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, u %,

- ρ_n strukturna gustoća ispitnih uzoraka određena prema postavljenom modelu (36) izvedenog iz odzivne funkcije karakterizacijskog niza iz poglavlja 8.2 u g/cm^3 i
- $\rho_{prividno}$ prividna vrijednost gustoće izračunata prema normiranoj metodi HRN EN 1602 i dana u prilogu 1 za sve uzorke obuhvaćene ovim doktorskim radom u g/cm^3.

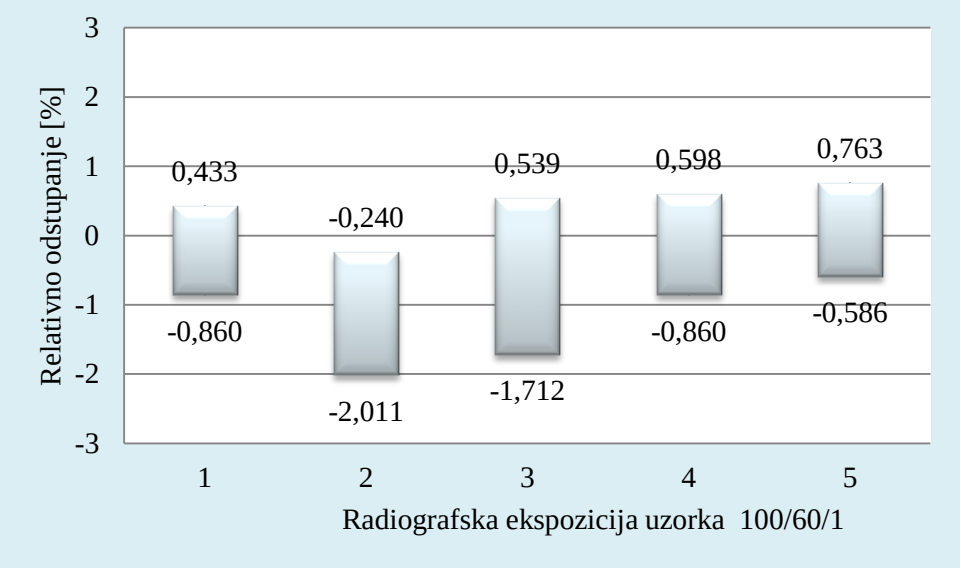
Modelom (36) određene vrijednosti strukturne gustoće, ρ_n, za uzorak oznake 100/60/1 daje **Tablica 27**.

Tablica 27. Modelom (36) određene strukturne gustoće, ρ_n, za uzorak oznake 100/60/1 i relativna odstupanja izračunatih vrijednosti strukturnih gustoća, $\Delta\rho_{rel}$, od prividne gustoće izračunate prema normiranoj metodi, $\rho_{prividno}$, za ukupno pet radiografskih ekspozicija.

Radiografska ekspozicija	Oznaka ROIx na uzorku 100/60/1 po radiografskoj ekspoziciji	$\rho_{prividno}$ HRN EN 1602 [g/cm^3]	ρ_n prema (36) [g/cm^3]	$\Delta\rho_{rel}$ prema (37) [%]
1	1	0,02280 U = 0,00034	0,02280	0,0740
	2		0,02261	-0,8058
	3		0,02260	-0,8601
	4		0,02290	0,4329
	5		0,02285	0,2129
	Aritmetička sredina:		0,02275	
	Standardno odstupanje:		0,00014	
2	1	0,02280 U = 0,00034	0,02265	-0,6689
	2		0,02274	-0,2397
	3		0,02260	-0,8875
	4		0,02234	-2,0108
	5		0,02250	-1,3280
	Aritmetička sredina:		0,02276	

Radiografska ekspozicija	Oznaka ROIx na uzorku 100/60/1 po radiografskoj ekspoziciji	ρ_{prividno} HRN EN 1602 [g/cm^3]	ρ_n prema (36) [g/cm^3]	$\Delta\rho_{\text{rel}}$ prema (37) [%]
	Standardno odstupanje:		0,00015	
3	1	0,02280 U = 0,00034	0,02256	-1,0258
	2		0,02254	-1,5756
	3		0,02251	-1,7123
	4		0,02257	0,1657
	5		0,02283	0,5386
	Aritmetička sredina:		0,02270	
	Standardno odstupanje:		0,00013	
4	1	0,02280 U = 0,00034	0,02293	0,5978
	2		0,02292	0,5476
	3		0,02260	-0,8601
	4		0,02271	-0,3645
	5		0,02271	-0,3642
	Aritmetička sredina:		0,02278	
	Standardno odstupanje:		0,00015	
5	1	0,02280 U = 0,00034	0,02297	0,7633
	2		0,02295	0,6538
	3		0,02285	0,2415
	4		0,02266	-0,5863
	5		0,02285	0,2386
	Aritmetička sredina:		0,02286	
	Standardno odstupanje:		0,00012	

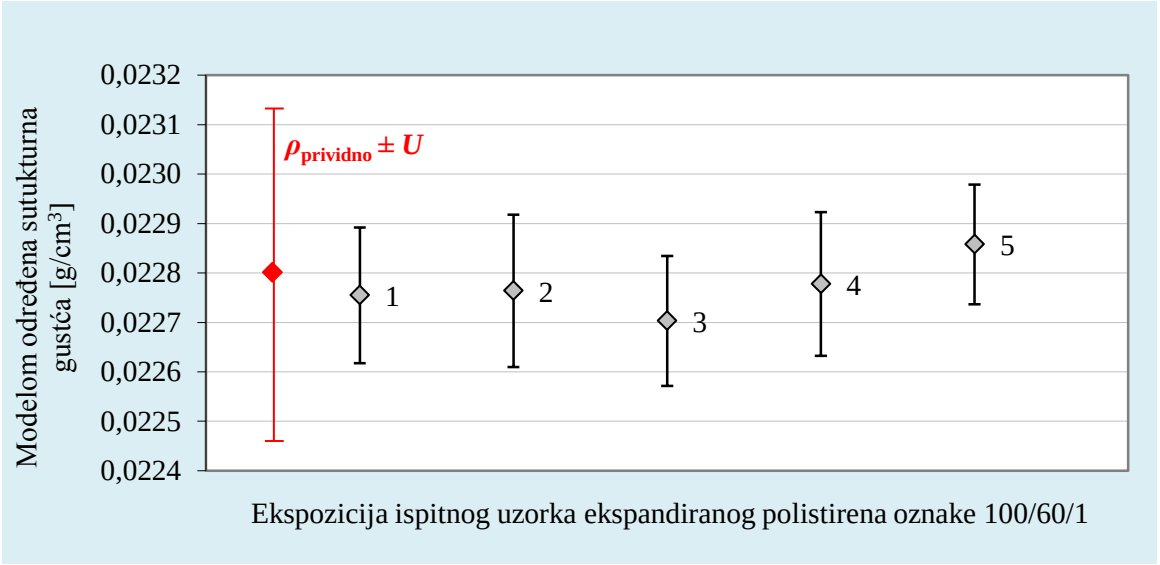
Slika **Sl.- 80** prikazuje relativna odstupanja, $\Delta\rho_{\text{rel}}$, modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, uzorka oznake 100/60/1 za ukupno pet eksponiranja, od prividne gustoće dobivene normiranom metodom HRN EN 1602, ρ_{prividno} = 0,02280 g/cm^3. Za svaku radiografsku ekspoziciju također je prikazana vrijednost minimalne i maksimalne vrijednosti relativnog odstupanja. Za svaku radiografsku ekspoziciju odabrano je ukupno pet područja od interesa (ROIx gdje je x oznaka područja od interesa za jednu radiografsku ekspoziciju).



Sl.- 80. Relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, uzorka oznake 100/60/1 od gustoće izmjerene normiranom metodom HRN EN 1602, $\rho_{prividno}$, za ukupno pet eksponiranja.

Na slici **Sl.- 81** prikazani su modelom određene aritmetičke sredine strukturne gustoće, ρ_n, za pet područja od interesa za svako eksponiranje ispitnog uzorka oznake 100/60/1. Ukupno je provedeno pet eksponiranja. Aritmetičkim sredinama pridružene se vrijednosti rasipanja rezultata u rasponu od dva standardna odstupanja.

Na **Sl.- 81** crvenom bojom označena je vrijednost prividne gustoće ispitnog uzorka ekspandiranoga polistirena oznake 100/60/1 iz priloga 1 ovog doktorskog rada. Vrijednosti prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, pridružena je vrijednost ± 1U. Navedene vrijednosti daje **Tablica 27**.



Sl.- 81. Usporedivost za razinu povjerenja od 95 % modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, na pet područja od interesa i prividne gustoće $\rho_{prividno}$, dobivene konvencionalnom metodom za ispitni uzorak ekspandiranoga polistirena oznake 100/60/1.

Za razinu povjerenja od 95 % intervali modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, ostvarene za pet eksponiranja i prividne gustoće, usporedivi su s $\rho_{prividno}$ koji su dobiveni konvencionalnom metodom za ispitni uzorak ekspandiranoga polistirena oznaka 100/60/1.

8.4 Utjecaj strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena

U poglavlju 8.4.1 biti će prikazana metodologija određivanja utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena. Evaluacija utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena provesti će se za dvije debljine, 60 mm u poglavlju 8.4.2.1 i 100 mm u poglavlju 8.4.2.2, na uzorcima tlačne čvrstoće 100 kPa.

8.4.1 Metodologija određivanja utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće

Za evaluaciju utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće proveden je pokus korištenjem ispitnih uzoraka različitih debljina i iste vrijednosti tlačne čvrstoće.

Parametri pokusa su slijedeći:

1. Debljina ispitnih uzoraka iznosi 60 mm i 100 mm, tlačna čvrstoća svih ispitnih uzoraka iznosi 100 kPa.
2. Referentni uzorak je uzorak tlačne čvrstoće 100 kPa i debljine 80 mm.
3. Optimalni uvjeti eksponiranja određeni su parametarskom optimizacijom u poglavlju 6.5 tijekom određivanja optimalnih parametara eksponiranja rendgenskim uređajem kao elementa karakterizacijskog niza i iznose:
    - napon na rendgenskoj cijevi: 15 kV i
    - radiografska ekspozicija: 420 mAs (I = 3,5 mA).
4. Optimalni uvjeti očitanja određeni su parametarskom optimizacijom u poglavlju 7.4 tijekom određivanja optimalnih parametara očitanja skenerom slikovnih ploča kao elementa karakterizacijskog niza i iznose:
    - napon pojačanja PMT: 5,25 V,
    - gustoća snage (intezitet zračenja lasera): 20 W/m^2 i

- razlučivost očitanja: 50 μm.

5. Udaljenost fokus-film iznosi 1 m. Metodologija analize digitalnog zapisa radiografske slike definirana je u poglavlju 4.

Za evaluaciju utjecaja strukture ekspandiranoga na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće odabrani su ispitni uzorci oznake 100/60/n, gdje je *n* = 1 do 5 i ispitni uzorci oznake 100/100/n gdje je *n* = 1 do 5, te referentni uzorci oznake 100/80/n, gdje je *n* = 1 do 5. Plan pokusa proveden je slučajnim redoslijedom i kombinacijom uzoraka. **Tablica 28** daje kombinaciju ispitnih uzoraka pri izvođenju pokusa za određivanja utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće.

Tablica 28. Kombinacija ispitnih uzoraka pri izvođenju pokusa za evaluaciju utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće.

Redoslijed eksponiranja	Oznake ispitnih uzoraka tlačne čvrstoće 100 kPa		
	Debljina 60 mm	Debljina 80 mm (referentni uzorak)	Debljina 100 mm
	100/60/n	100/80/n	100/100/n
1	100/60/1	100/80/1	100/100/2
3	100/60/3	100/80/2	100/100/4
10	100/60/5	100/80/4	100/100/5
25	100/60/4	100/80/5	100/100/1
24	100/60/2	100/80/3	100/100/3
4	100/60/1	100/80/2	100/100/3
5	100/60/2	100/80/3	100/100/4
14	100/60/3	100/80/5	100/100/2
15	100/60/5	100/80/4	100/100/1
16	100/60/4	100/80/1	100/100/5
22	100/60/5	100/80/4	100/100/2
20	100/60/1	100/80/5	100/100/3
21	100/60/3	100/80/2	100/100/1
19	100/60/2	100/80/3	100/100/4
18	100/60/4	100/80/1	100/100/5
2	100/60/1	100/80/4	100/100/5
6	100/60/5	100/80/2	100/100/1
11	100/60/4	100/80/3	100/100/2
7	100/60/3	100/80/1	100/100/4
12	100/60/2	100/80/5	100/100/3
8	100/60/4	100/80/5	100/100/1
13	100/60/3	100/80/1	100/100/2
17	100/60/1	100/80/2	100/100/3
9	100/60/2	100/80/3	100/100/4

Redoslijed eksponiranja	Oznake ispitnih uzoraka tlačne čvrstoće 100 kPa		
	Debljina 60 mm	Debljina 80 mm (referentni uzorak)	Debljina 100 mm
	100/60/n	100/80/n	100/100/n
23	100/60/5	100/80/4	100/100/5

U tablici 28 kombinacije ispitnih uzoraka unesene su prema redoslijedu eksponiranja. Na svakom digitalnom zapisu radiografske slike nalazi se po jedan uzorak debljine 60 mm, 80 mm i 100 mm. Svaki je „komplet“ ispitnih uzoraka eksponiran ukupno 5 puta, te je iz svakog digitalnog zapisa radiografske slike za svaki ispitni uzorak analizirano po 5 različitih područja od interesa.

Određivanje modelom strukturne gustoće ispitnih uzoraka, ρ_n, provedeno je korištenjem transformiranog izraza za opisivanje odzivne funkcije karakterizacijskog niza.

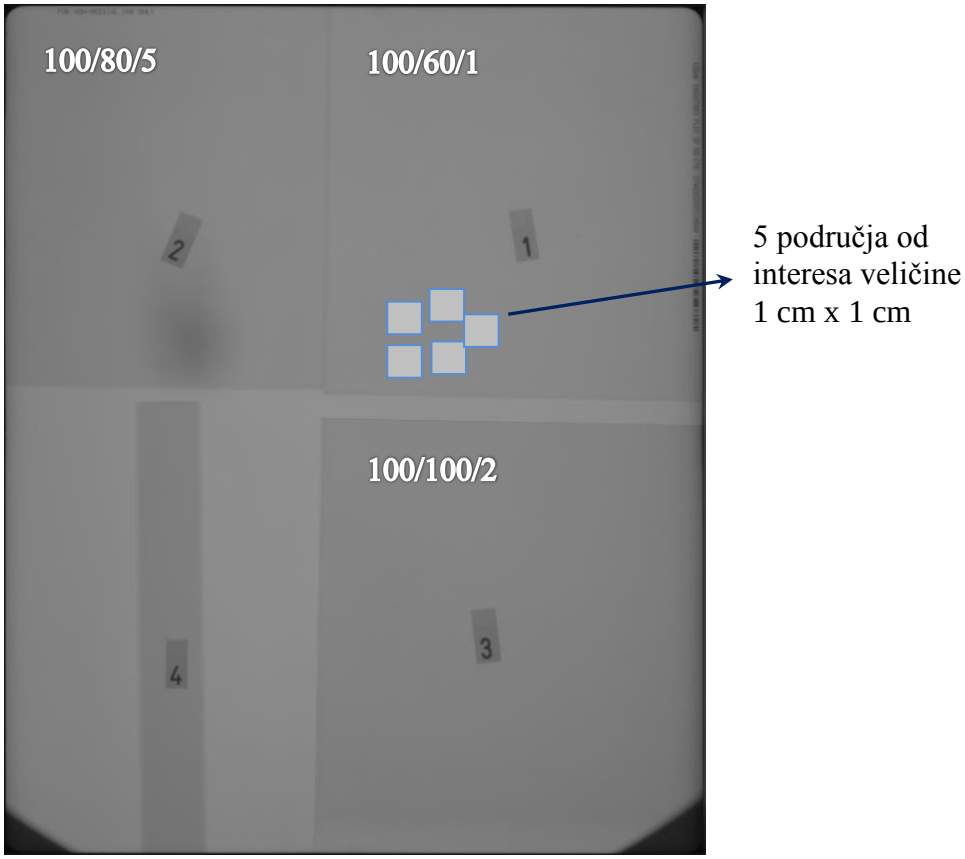
$$\rho_n = \frac{\mu_{ref} x_{ref} \rho_{ref} - \ln\left(\frac{\left(\frac{D_n}{D_{ref}}\right) - 0{,}0519}{0{,}9757}\right)}{\mu_{mn} x_n}$$

gdje je

- D_n/D_{ref} omjer intenziteta zacrnjenja piksela na digitalnom zapisu radiografske slike ispitnog uzorka debljine 60 mm i 100 mm i referentnog uzorka debljine 80 mm,
- $\mu_{mn} = \mu_{ref}$ maseni koeficijent prigušenja ispitnog uzorka oznake 100/60/n gdje je n = 1 do 5 i oznake 100/100/n gdje je n = 1 do 5, te referentnog uzorka (isti obzirom da se radi o istom materijalu),
- ρ_n nepoznata strukturna gustoća ispitnog uzorka debljine 60 mm oznake 100/60/n gdje je n = 1 do 5 i debljine 100 mm oznake 100/100/n gdje je n = 1 do 5,
- ρ_{ref} prividna gustoća referentnog uzorka debljine 80 mm oznake 100/80/n gdje je n = 1 do 5 uzeta iz tablice iz priloga 1 i dobivena normiranom metodom HRN EN 1602,

- X_n = 60 mm i 100 mm - debljina ispitnog uzorka nepoznate vrijednosti strukturne gustoće oznake 100/60/n gdje je n = 1 do 5 i oznake 100/100/n gdje je n = 1 do 5,
- X_{ref} = 80 mm - debljina referentnog uzorka 100/80/n gdje je n = 1 do 5.

Na slici **Sl.- 82** prikazan je primjer digitalnog zapisa radiografske slike jedne radiografske ekspozicije. Pri tome, oznaka 1 na digitalnom zapisu radiografske slike predstavlja ispitni uzorak debljine 6 cm oznake 100/60/1, oznaka 2 na digitalnom zapisu radiografske slike predstavlja referentni uzorak debljine 8 cm oznake 100/80/5 i oznaka 3 na digitalnom zapisu radiografske slike predstavlja ispitni uzorak debljine 10 cm oznake 100/100/2. Također je za ispitni uzorak oznake 1 prikazan raspored 5 područja od interesa konstantne veličine 1 cm x 1 cm. Analogno je provedeno za ispitni uzorak oznake 3 i za referentni uzorak oznake 2. Postupak analize digitalnih zapisa radiografskih slika ponovljen je za svih 25 radiografskih ekspozicija.



Sl.- 82. Digitalni zapis radiografske slike (jedna radiografska ekspozicija) pokusa za određivanje utjecaja strukture EPS-a na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena.

8.4.2 Evaluacija utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće

Na temelju postavljene metodologije iz poglavlja 8.4.1 određene su vrijednosti strukturnih gustoća pet uzoraka oznake 100/60/n, gdje je n = 1 do 5 i pet uzoraka oznake 100/100/n, gdje je n = 1 do 5.

Metodologija određivanja utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena opisana je u prethodnom poglavlju i jednaka je za ispitne uzorke oznake 100/60/n i 100/100/n. Evaluacija rezultata biti će provedena odvojeno za uzorke debljine 60 (poglavlje 8.4.2.1) mm i debljine 100 mm (poglavlje 8.4.2.2).

8.4.2.1 Evaluacija utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena debljine 60 mm na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće

Tablica 29 prikazuje vrijednosti modelom (36) određene strukturne gustoće, ρ_n, za uzorke oznake 100/60/n gdje je n = 1 do 5 i relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, vrijednosti modelom dobivenih strukturnih gustoća, ρ_n, od vrijednosti prividnih gustoća izračunatih prema normiranoj metodi, $\rho_{prividno}$.

Vrijednostima prividnih gustoća, $\rho_{prividno}$, pridjeljena je vrijednost mjerne nesigurnosti 1U. Sve vrijednosti modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, izračunate su postavljenim

modelom u odnosu na poznatu prividnu gustoću referentnih uzorka debljine 8 cm oznaka 100/80/n gdje je n = 1 do 5 dobivene normiranom metodom i danu u prilogu 1.

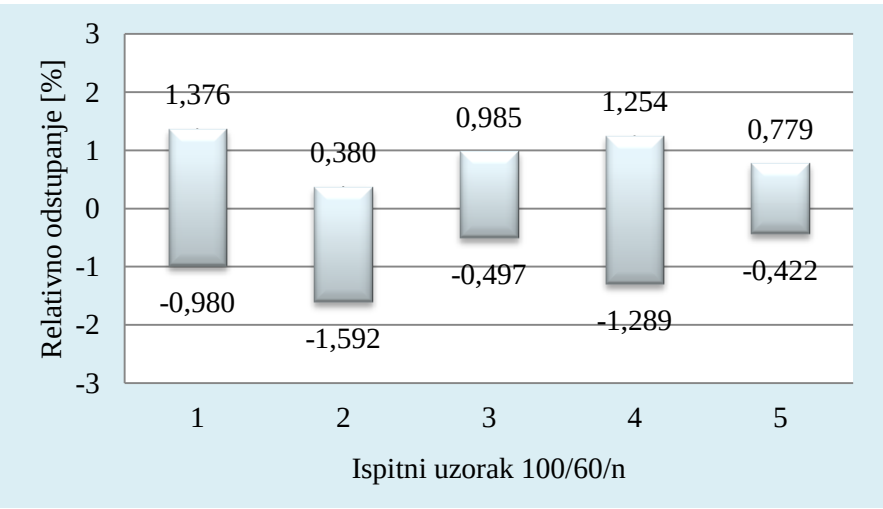
Strukturne gustoće, ρ_n, određene su modelom kao srednje vrijednosti za 5 područja od interesa. Relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, računaju se prema izrazu (37) definiranom u poglavlju 8.3.2.

Tablica 29. Modelom (36) određene vrijednosti strukturne gustoće, ρ_n, za uzorke oznake 100/60/n gdje je n = 1 do 5 i relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, vrijednosti strukturnih gustoća kao srednjih vrijednosti za pet područja od interesa, ρ_n, od stvarnih vrijednosti izračunatih prema normiranoj metodi, $\rho_{prividno}$.

Redni broj eksponiranja	Oznaka uzorka 100/60/n	$\rho_{prividno}$ HRN EN 1602 [g/cm^3]	ρ_n prema (36) [g/cm^3]	$\Delta\rho_{rel}$ prema (37) [%]
1	100/60/1	0,02280 U = 0,00034	0,02257	-0,9804
4			0,02270	-0,4316
20			0,02280	-0,8052
2			0,02231	1,3755
17			0,02260	-0,8599
		Aritmetička sredina:	0,02260	
		Standardno odstupanje:	0,00018	
24	100/60/2	0,02271 U = 0,00034	0,02231	-1,0752
5			0,02221	-1,5920
19			0,02266	0,3803
12			0,02284	0,1839
9			0,02261	0,1805
		Aritmetička sredina:	0,02253	
		Standardno odstupanje:	0,00026	
3	100/60/3	0,02257 U = 0,00034	0,02292	0,1002
14			0,02273	0,6839
21			0,02246	-0,4971
7			0,02261	0,1445
13			0,02280	0,9846

Redni broj eksponiranja	Oznaka uzorka 100/60/n	ρ_{prividno} HRN EN 1602 [g/cm^3]	ρ_n prema (36) [g/cm^3]	$\Delta\rho_{\text{rel}}$ prema (37) [%]
		Aritmetička sredina:	0,02270	
		Standardno odstupanje:	0,00018	
25	100/60/4	0,02253 U = 0,00034	0,02243	-0,4374
15			0,02290	0,6112
18			0,02224	-1,2893
11			0,02260	0,2980
8			0,02274	1,2535
		Aritmetička sredina:	0,02258	
		Standardno odstupanje:	0,00026	
10	100/60/5	0,02246 U = 0,00034	0,02260	0,6395
16			0,02263	0,7788
22			0,02243	-0,1145
6			0,02263	0,7726
23			0,02236	-0,4220
		Aritmetička sredina:	0,02253	
		Standardno odstupanje:	0,00013	

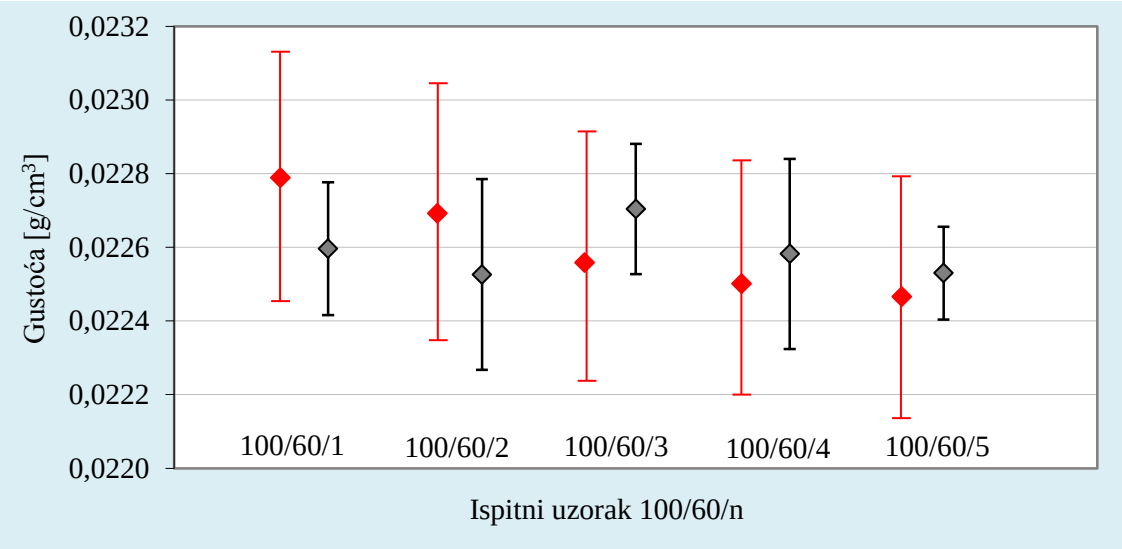
Slika **Sl.- 83** prikazuje relativna odstupanja, $\Delta\rho_{\text{rel}}$, modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, uzoraka debljine 6 cm, oznake 100/60/n, gdje je n = 1 do 5, dobivenih za pet eksponiranja, od gustoća dobivenih normiranom metodom HRN EN 1602, ρ_{prividno}. Za svaki ispitni uzorak ekspandiranoga polistirena prikazana je minimalna i maksimalna vrijednosti relativnog odstupanja za ukupno 5 eksponiranja.



Sl.- 83. Relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, uzoraka oznake 100/60/n, gdje je n = 1 do 5, dobivenih za pet eksponiranja, od prividnih gustoća dobivenih normiranom metodom HRN EN 1602, $\rho_{prividno}$.

Na slici **Sl.- 84** prikazane su modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, kao aritmetičke sredine za pet eksponiranja, ispitnih uzorka oznake 100/60/n gdje je n = 1 do 5. Svaka vrijednost modelom određene strukturne gustoće pojedine radiografske ekspozicije, ρ_n, dobivena je kao aritmetička sredina pet područja od interesa. Aritmetičkim sredinama rezultata mjerenja pridružene su vrijednosti rasipanja rezultata u rasponu od dva standardna odstupanja. Navedene vrijednosti daje **Tablica 29**.

Na slici **Sl.- 84** crvenom bojom označene su vrijednosti prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, iz priloga 1, dobivene konvencionalnom metodom. Vrijednostima prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, za ispitne uzorke ekspandiranoga polistirena oznaka 100/60/n, gdje je n = 1 do 5, pridružene su vrijednosti ± 1U. Kako je vidljivo sa slike **Sl.- 84**, za razinu povjerenja od 95 % intervali modelom dobivenih strukturnih gustoća, ρ_n, ostvareni za pet eksponiranja, usporedivi su s rezultatima, $\rho_{prividno}$, koji su dobiveni konvencionalnom metodom za ispitne uzorke ekspandiranoga polistirena oznaka 100/60/n i 100/100/n, gdje je n = 1 do 5.



Sl.- 84. Usporedivost za razinu povjerenja od 95 % modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, za pet eksponiranja i prividnih gustoća, $\rho_{prividno}$, dobivenih konvencionalnom metodom, za ispitne uzorke ekspandiranoga polistirena oznaka 100/60/n, gdje je n = 1 do 5.

8.4.2.2 Evaluacija utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena debljine 100 mm na varijabilnost modelom određene strukturne gustoće

Tablica 30 prikazuje modelom određene vrijednosti strukturne gustoće, ρ_n, prema izrazu (36) za uzorke oznake 100/100/n gdje je n = 1 do 5 i relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, vrijednosti strukturnih gustoća, ρ_n, od prividnih gustoća izračunatih prema konvencionalnoj metodi, $\rho_{prividno}$. Vrijednostima prividnih gustoća, $\rho_{prividno}$, pridjeljena je vrijednost mjerne nesigurnosti ± 1U.

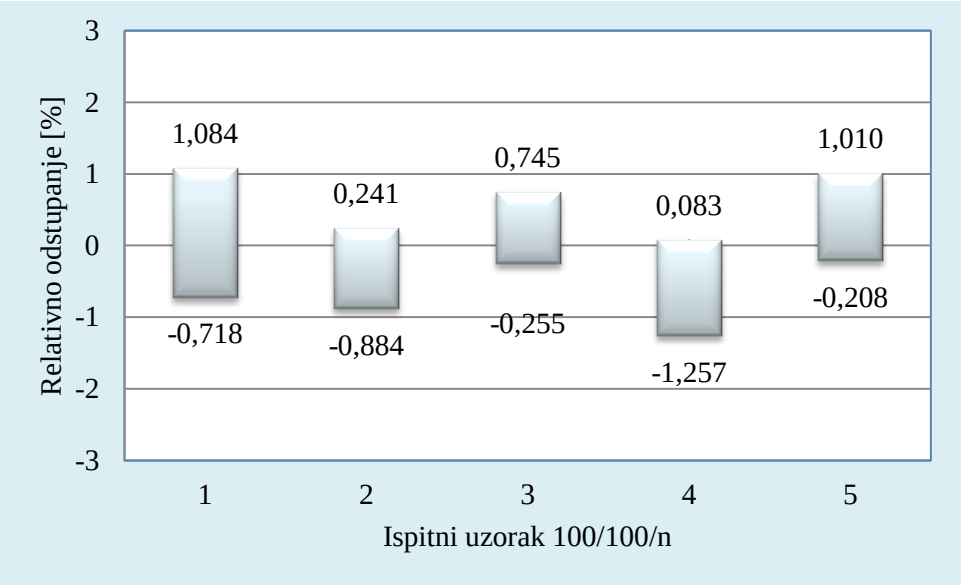
Sve vrijednosti modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, izračunate su u odnosu na poznate gustoće referentnih uzorka debljine 8 cm oznaka 100/80/n, gdje je n = 1 do 5 dobivenih normiranom metodom i dane u prilogu 1. Strukturne gustoće, ρ_n, određene su modelom kao srednje vrijednosti za 5 područja od interesa. Relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, računaju se prema izrazu (37) definiranom u poglavlju 8.3.2.

Tablica 30. Modelom (36) određene vrijednosti strukturne gustoće, ρ_n, za uzorke oznake 100/100/n gdje je n = 1 do 5 i relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, vrijednosti strukturnih gustoća kao srednjih vrijednosti za pet područja od interesa, ρ_n, od stvarnih vrijednosti izračunatih prema normiranoj metodi, $\rho_{prividno}$.

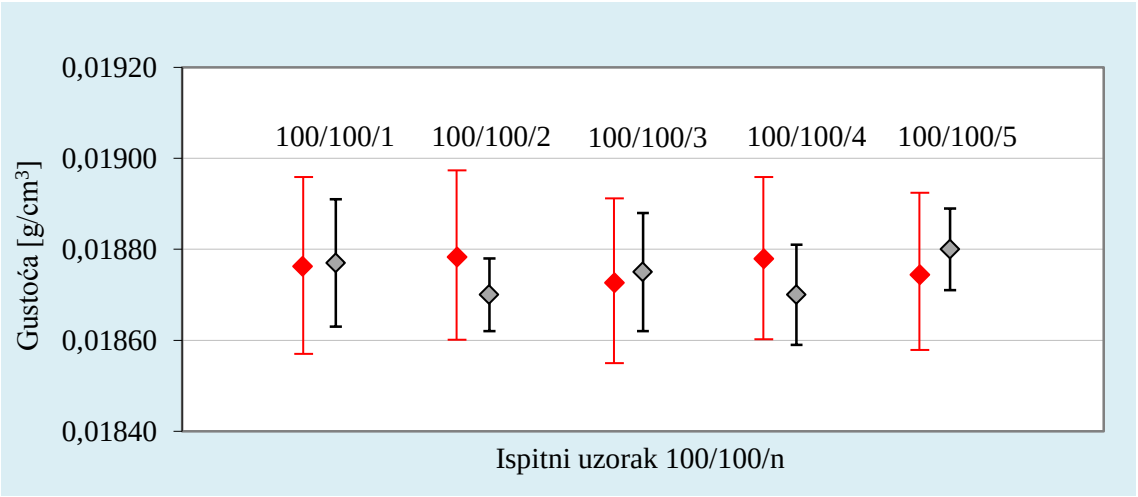
Redni broj eksponiranja	Oznaka uzorka 100/60/n	$\rho_{prividno}$ HRN EN 1602 [g/cm^3]	ρ_n prema (36) [g/cm^3]	$\Delta\rho_{rel}$ prema (37) [%]
25	100/100/1	0,01877 U = 0,00019	0,01879	0,1247
15			0,01866	-0,6103
21			0,01898	1,0838
6			0,01880	0,3495
8			0,01864	-0,7178
		Aritmetička sredina:	0,01877	
		Standardno odstupanje:	0,00014	
1	100/100/2	0,01879 U = 0,00019	0,01876	0,0376
14			0,01880	0,2411

Redni broj eksponiranja	Oznaka uzorka 100/60/n	ρ_{prividno} HRN EN 1602 [g/cm^3]	ρ_n prema (36) [g/cm^3]	$\Delta\rho_{\text{rel}}$ prema (37) [%]
22			0,01860	-0,8052
11			0,01860	-0,8841
24			0,01866	-0,5714
		Aritmetička sredina:	0,01870	
		Standardno odstupanje:	0,00008	
13	100/100/3	0,01874 U = 0,00019	0,01889	0,7447
4			0,01872	-0,1308
20			0,01874	-0,0173
12			0,01870	-0,2552
17			0,01870	-0,2235
		Aritmetička sredina:	0,01875	
		Standardno odstupanje:	0,00013	
3	100/100/4	0,01879 U = 0,00019	0,01880	0,0825
5			0,01855	-1,2570
19			0,01880	-0,0391
7			0,01863	-0,6470
9			0,01870	-0,6726
		Aritmetička sredina:	0,01870	
		Standardno odstupanje:	0,00011	
10	100/100/5	0,01875 U = 0,00019	0,01889	0,7447
16			0,01871	-0,2079
18			0,01872	-0,1627
2			0,01890	1,0101
23			0,01878	0,1832
		Aritmetička sredina:	0,01880	
		Standardno odstupanje:	0,00009	

Slika **Sl.- 85** prikazuje relativna odstupanja, $\Delta\rho_{\text{rel}}$, modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, uzoraka debljine 10 cm, oznake 100/100/n, gdje je n = 1 do 5, dobivenih za pet eksponiranja, od gustoća dobivenih normiranom metodom HRN EN 1602, ρ_{prividno}.



Sl.- 85. Relativna odstupanja, $\Delta\rho_{rel}$, modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, uzoraka oznake 100/100/n, gdje je n = 1 do 5, dobivenih za pet eksponiranja, od prividnih gustoća dobivenih normiranom metodom HRN EN 1602, $\rho_{prividno}$.



Sl.- 86. Usporedivost za razinu povjerenja od 95 % modelom određenih strukturnih gustoća, ρ_n, za pet eksponiranja i prividnih gustoća, $\rho_{prividno}$, dobivenih konvencionalnom metodom, za ispitne uzorke ekspandiranoga polistirena oznaka 100/100/n, gdje je n = 1 do 5.

Na slici **Sl.- 86** prikazane su modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, kao aritmetičke sredine za pet eksponiranja, ispitnih uzorka oznake 100/100/n, gdje je n = 1 do 5. Svaka vrijednost modelom određene strukturne gustoće pojedine radiografske ekspozicije, ρ_n,

dobivena je kao aritmetička sredina pet područja od interesa. Aritmetičkim sredinama rezultata mjerenja pridružene su vrijednosti rasipanja rezultata u rasponu od dva standardna odstupanja. Navedene vrijednosti daje **Tablica 30**. Crvenom bojom označene su vrijednosti prividne gustoće, ρ_{prividno}, iz priloga 1, dobivene konvencionalnom metodom. Vrijednostima prividnih gustoća, ρ_{prividno}, za ispitne uzorke ekspandiranoga polistirena oznaka 100/100/n, gdje je n = 1 do 5, pridružene su vrijednosti ± 1U.

Kako je vidljivo sa slike **Sl.- 86** za razinu povjerenja od 95 % intervali modelom dobivenih strukturnih gustoća, ρ_{n}, ostvareni za pet eksponiranja i prividnih gustoća, ρ_{prividno}, dobivenih konvencionalnom metodom, za ispitne uzorke ekspandiranoga polistirena oznaka 100/100/n, gdje je n = 1 do 5 su usporedivi.

Provedene analize utjecaja odabira područja od interesa i utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na rezultate izračuna pomoću predloženoga modela za procjenu strukturne gustoće predstavljaju preduvjet za dokazivanje uspješnosti i pouzdanosti karakterizacije ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena kako je postavljeno u hipotezi istraživanja. U tu svrhu je temeljem uspostavljene metodologije u poglavlju 9 određena strukturna gustoća „slijepih“, nasumično odabranih ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena, odnosno uzoraka koji nisu „sudjelovali“ u osnivanju modela.

9. KARAKTERIZACIJA EKSPANDIRANOGA POLISTIRENA cRT METODOM

Analiza i evaluacija utjecaja parametara komponenata sustava eksponiranja i očitanja na odziv vrijednosti dobrote digitalnog zapisa radiografske slike, u poglavljima 6 i 7, doprinijele su razumijevanju pojedinačnih utjecaja parametara procesa eksponiranja slikovnih ploča na ulazu u proces kao i razumijevanju analogno-digitalne konverzije latentnog zapisa slikovnih ploča kod procesa očitanja na izlazu iz procesa. Na temelju provedenih analiza, u poglavlju 8 pristupilo se evaluaciji sinergijskog djelovanja elemenata karakterizacijskog niza na varijabilnost rezultata ispitivanja.

Određivanje sinergijskog djelovanja provedeno je modeliranjem odzivnog modela karakterizacijskog niza u cijelosti. Odzivni model karakterizacijskog niza u sebi sadrži utjecaj svih elemenata karakterizacijskog niza: rendgenskog uređaja za eksponiranje ispitnih uzoraka (napon, eksponiranje), skenera slikovnih ploča (napon pojačanja PMT, razlučivost očitanja i gustoća snage (intezitet zračenja lasera)), te slikovnih ploča. Odzivni model vrijedi za elemente karakterizacijskog niza koji su korišteni u ovoj disertaciji. Svaka promjena elementa karakterizacijskog niza zahtjeva ponovno određivanje odzivnog modela karakterizacijskog niza.

Osim u zagradama nabrojanih parametara, čiji se utjecaj analizirao tijekom postupka optimizacije parametara eksponiranja i očitanja, na odzivnu karakteristiku utjecaj imaju i šumovi pripisivi svakom elementu karakterizacijskog niza.

9.1 Metodologija određivanja strukturne gustoće slijepih uzoraka

Provjera rezultata ispitivanja provedena je na dva nasumično odabrana ispitna uzorka ekspandiranoga polistirena oznaka 70/60/3 i 200/60/3 koji će služiti kao slijepi uzorci. Ispitni uzorci nisu korišteni za modeliranje odzivnog modela karakterizacijskog niza. Eksponiranje je provedeno pet puta. Za svaki digitalni zapis radiografske slike analizirano je po 5 područja od interesa.

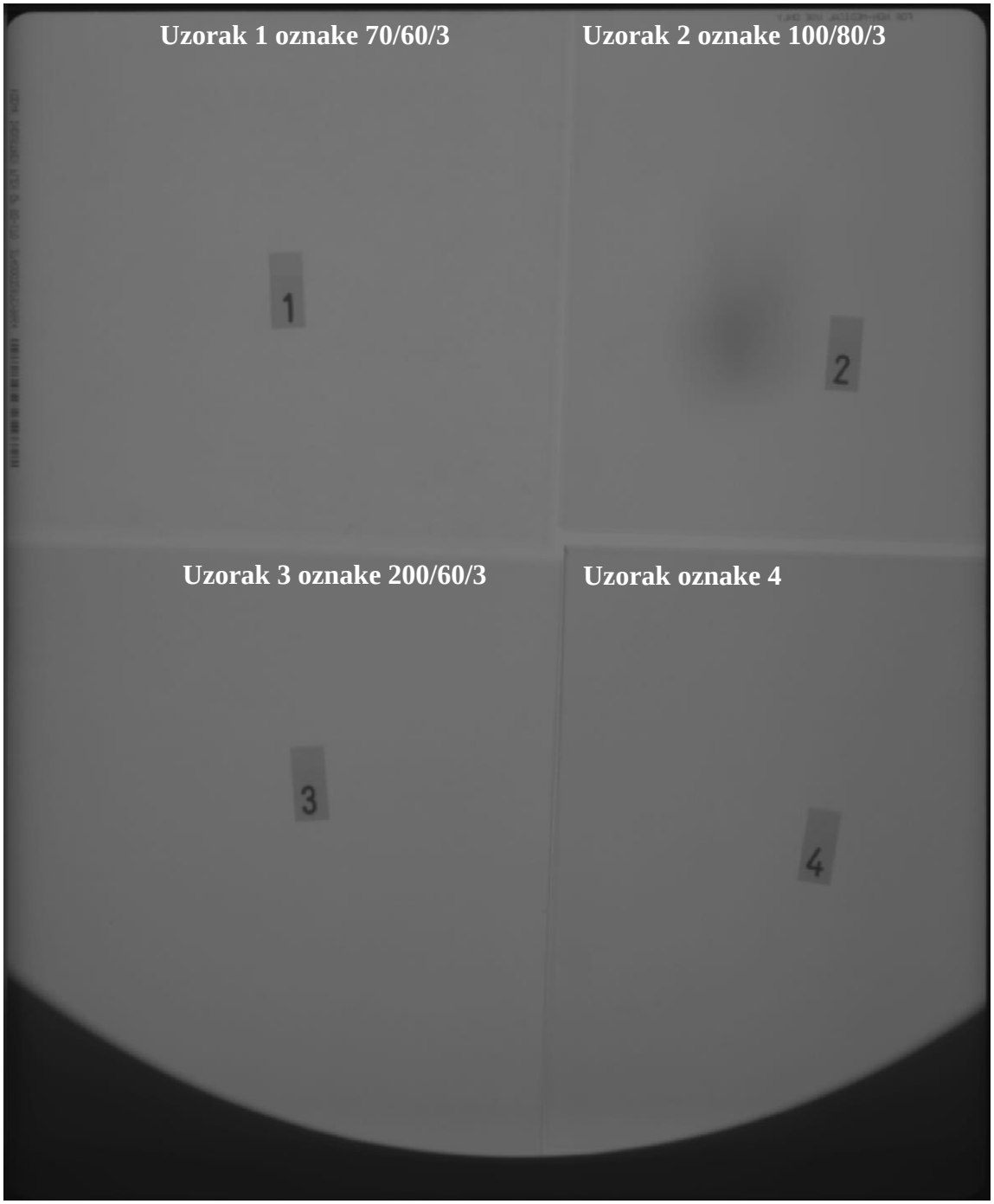
Parametri pokusa su slijedeći:

1. Slijepi ispitni uzorci oznake:
   - 70/60/3, i
   - 200/60/3.
2. Referentni ispitni uzorak oznake 100/80/5.
3. Optimalni uvjeti eksponiranja određeni su parametarskom optimizacijom u poglavlju 6.5 i iznose:
   - napon na rendgenskoj cijevi: 15 kV, i
   - radiografska ekspozicija: 420 mAs (I = 3,5 mA).
4. Optimalni uvjeti očitanja određeni su parametarskom optimizacijom u poglavlju 7.4 i iznose:
   - napon pojačanja PMT: 5,25 V,

- gustoća snage (intezitet zračenja lasera): 20 W/m^2, i
- razlučivost očitanja: 50 μm

5. Udaljenost fokus-film (IP) iznosi 1 m.

Metodologija analize digitalnog zapisa radiografske slike definirana je u poglavlju 4. Digitalni zapis radiografske slike jedne radiografske ekspozicije prikazan je na slici **Sl.- 87**.



Sl.- 87. Digitalni zapis radiografske slike pri karakterizaciji materijala cRT metodom.

Na slici **Sl.- 87** oznaka 1 na digitalnom zapisu radiografske slike predstavlja ispitni uzorak debljine 6 cm oznake 70/60/3, oznaka 2 na digitalnom zapisu radiografske slike predstavlja referentni uzorak debljine 8 cm oznake 100/80/3 i oznaka 3 na digitalnom zapisu radiografske slike predstavlja ispitni uzorak debljine 6 cm oznake 200/60/3. Ispitni uzorak oznake 4 nije od značaja za provedeni pokus.

9.2 Evaluacija modelom određenih vrijednosti strukturnih gustoća slijepih uzoraka ekspandiranoga polistirena

Kako je navedeno u poglavlju 9.1, eksponiranje je provedeno za dva slijepa uzorka uz nepromijenjene parametre eksponiranja i očitanja. Evaluacija modelom određenih strukturnih gustoća biti će prikazana zasebno za dva uzorka.

Potvrda uspješnosti metodologije predložene u ovom doktorskom radu dana je na kraju ovog poglavlja.

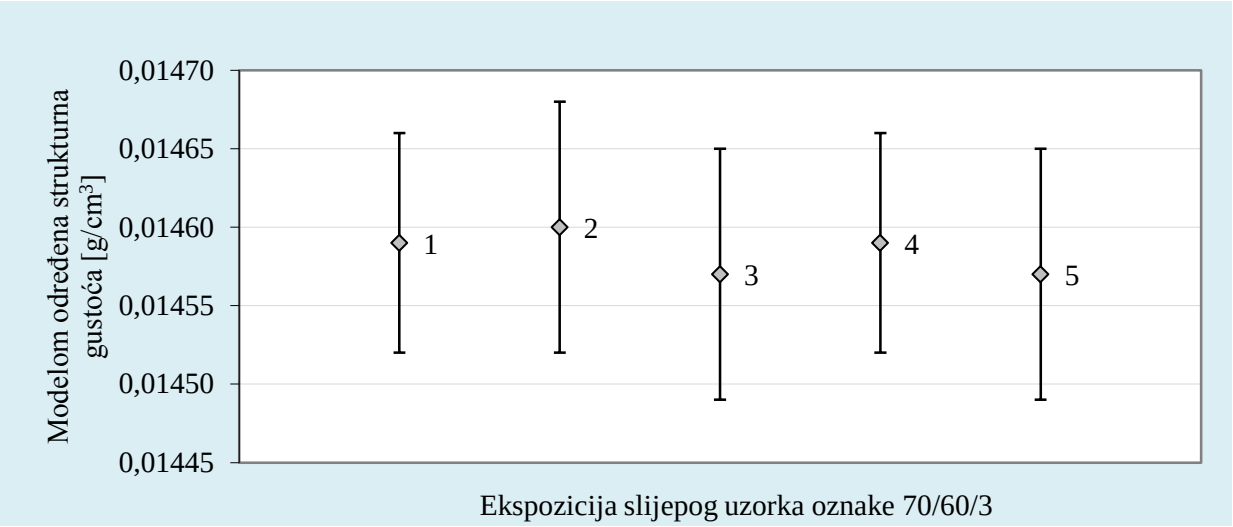
Tablica 31 prikazuje vrijednosti modelom (36) određenih strukturnih gustoća, ρ_n, za uzorak oznake 70/60/3, njihove aritmetičke sredine, te procijenjena standardna odstupanja. Vrijednosti modelom određenih strukturnih gustoća predstavljaju aritmetičke sredine pet područja od interesa. Rezultati su prikazani za pet eksponiranja.

Tablica 31. Vrijednosti modelom (36) određenih strukturnih gustoća, ρ_n, za uzorak oznake 70/60/3, njihove aritmetičke sredine, te standardna odstupanja.

Radiografska ekspozicija	ROI	ρ_n prema izrazu (36) [g/cm^3]	Oznaka uzorka
1	1	0,01460	**70/60/3**
	2	0,01458	
	3	0,01458	
	4	0,01459	
	5	0,01459	
	Aritmetička sredina:	0,01459	
	Standardno odstupanje:	0,00007	
2	1	0,01473	
	2	0,01462	
	3	0,01458	
	4	0,01455	
	5	0,01451	
	Aritmetička sredina:	0,01460	
	Standardno odstupanje:	0,00008	
3	1	0,01445	
	2	0,01455	
	3	0,01461	
	4	0,01455	
	5	0,01467	
	Aritmetička sredina:	0,01457	
	Standardno odstupanje:	0,00008	
4	1	0,01449	
	2	0,01467	
	3	0,01463	
	4	0,01459	
	5	0,01459	
	Aritmetička sredina:	0,01459	
	Standardno odstupanje:	0,00007	
5	1	0,01445	
	2	0,01455	
	3	0,01461	
	4	0,01455	
	5	0,01467	
	Aritmetička sredina:	0,01457	
	Standardno odstupanje:	0,00008	

Na slici **Sl.- 88** prikazane su modelom (36) određene strukturne gustoće, ρ_n, ispitnog uzorka oznake 70/60/3 kao aritmetičke sredine pet područja od interesa za pet eksponiranja.

Aritmetičkim sredinama rezultata mjerenja pridružene su vrijednosti rasipanja rezultata na razini dva standardna odstupanja. Navedene vrijednosti daje **Tablica 31**.

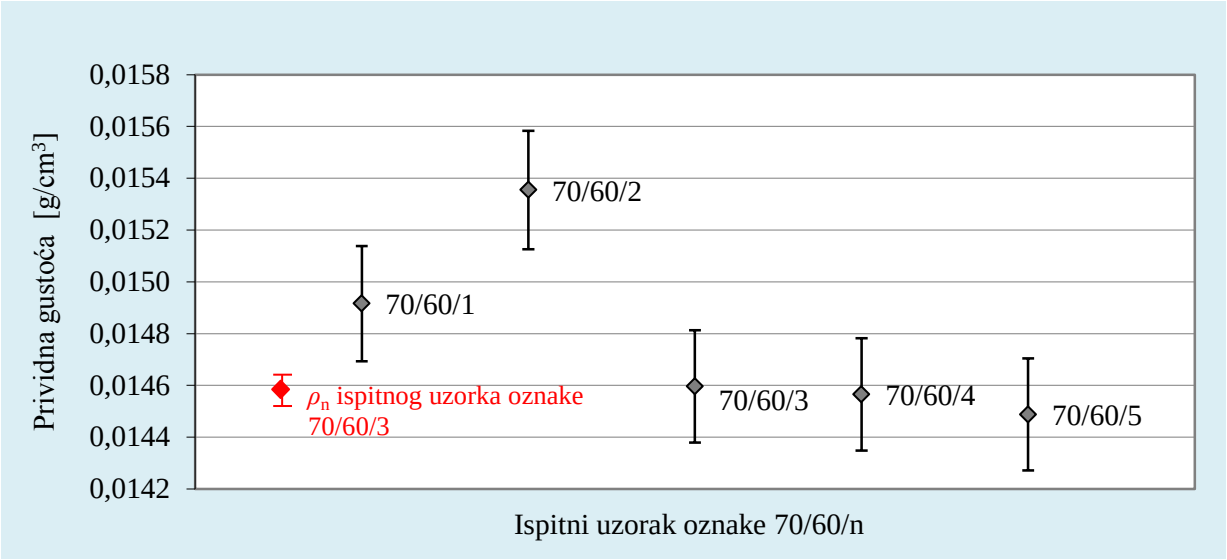


Sl.- 88. Modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, za ispitni uzorak oznake 70/60/3, na razini povjerenja od 95 %.

Kako je vidljivo sa slike **Sl.- 88**, za razinu povjerenja od 95 %, intervali modelom dobivenih strukturnih gustoća, ρ_n, ostvareni za pet eksponiranja ispitnog uzorka ekspandiranoga polistirena oznake 70/60/3, su usporedivi.

Na slici **Sl.- 89** prikazane su prividne gustoće, ρ_{prividno}, uzoraka oznake 70/60/n, gdje je n = 1 do 5, dobivene konvencionalnom metodom (prilog 1). Vrijednostima prividnih gustoća, ρ_{prividno}, pridružene su vrijednosti mjernih nesigurnosti ± 1U. Crvenom bojom označena je modelom određena strukturna gustoća „slijepog“ uzorka oznake 70/60/3 dobivena kao aritmetička sredina za 5 radiografskih ekspozicija iz tablice **Tablica 31**.

Vrijednost aritmetičke sredine modelom određene strukturne gustoće „slijepog“ uzorka ekspandiranoga polistirena oznake 70/60/3 iznosi ρ_n = 0,014584 g/cm^3 uz pridruženu vrijednost rasipanja rezultata na razini dva standardna odstupanja od 0,000152 g/cm^3.



Sl.- 89. Prividne gustoće, ρ_{prividno}, za ispitne uzorke oznake 70/60/n, gdje je n = 1 do 5, uz pridružene vrijednosti mjernih nesigurnosti ± 1U.

Tablica 32 prikazuje vrijednosti modelom (36) određenih strukturnih gustoća, ρ_n, za slijepi uzorak oznake 200/60/3, njihove aritmetičke sredine, te standardna odstupanja. Vrijednosti modelom određenih strukturnih gustoća predstavljaju aritmetičke sredine pet područja od interesa. Rezultati su prikazani za pet eksponiranja.

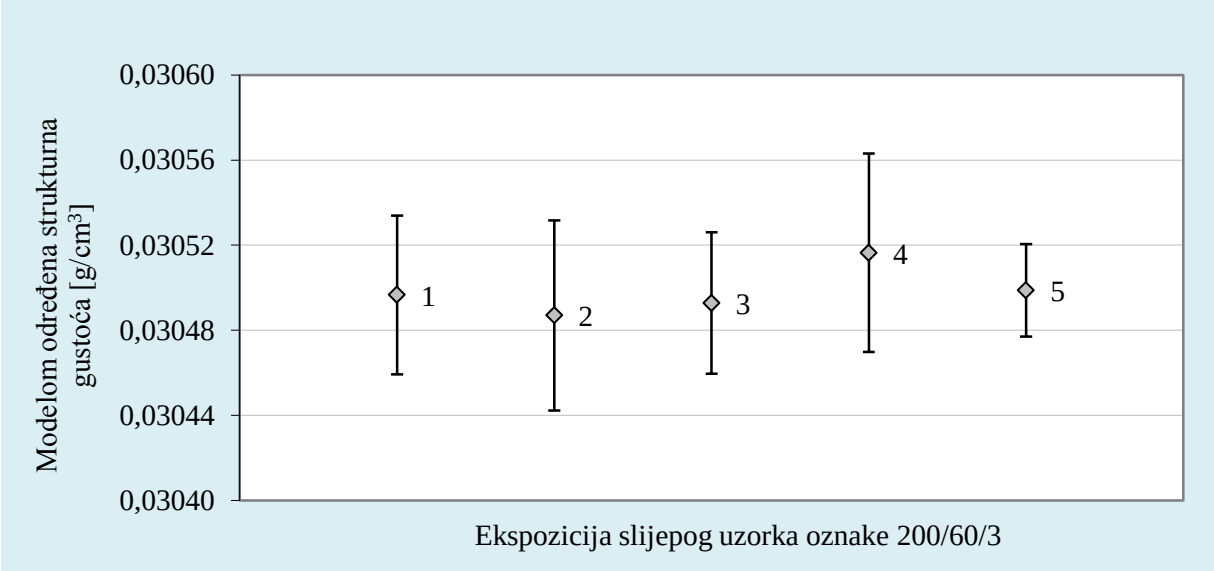
Tablica 32. Vrijednosti modelom (36) određenih strukturnih gustoća, ρ_n, za uzorak oznake 200/60/3, njihove aritmetičke sredine, te standardna odstupanja.

Radiografska ekspozicija	ROI	ρ_n prema izrazu (36) [g/cm^3]	Oznaka uzorka
1	1	0,03054	**200/60/3**
	2	0,03049	
	3	0,03051	
	4	0,03044	
	5	0,03050	
	Aritmetička sredina:	0,03050	
	Standardno odstupanje:	0,00004	
2	1	0,03056	
	2	0,03050	
	3	0,03047	
	4	0,03043	
	5	0,03048	
	Aritmetička sredina:	0,03049	
	Standardno odstupanje:	0,00004	
3	1	0,03045	
	2	0,03049	
	3	0,03047	
	4	0,03052	
	5	0,03053	
	Aritmetička sredina:	0,03049	
	Standardno odstupanje:	0,00003	
4	1	0,03059	
	2	0,03050	
	3	0,03050	
	4	0,03047	
	5	0,03052	
	Aritmetička sredina:	0,03052	
	Standardno odstupanje:	0,00005	
5	1	0,03050	
	2	0,03047	
	3	0,03052	
	4	0,03049	
	5	0,03051	
	Aritmetička sredina:	0,03050	
	Standardno odstupanje:	0,00002	

Na slici **Sl.- 90** prikazane su modelom (36) određene strukturne gustoće, ρ_n, ispitnog uzorka oznake 200/60/3 kao aritmetičke sredine pet područja od interesa za pet eksponiranja.

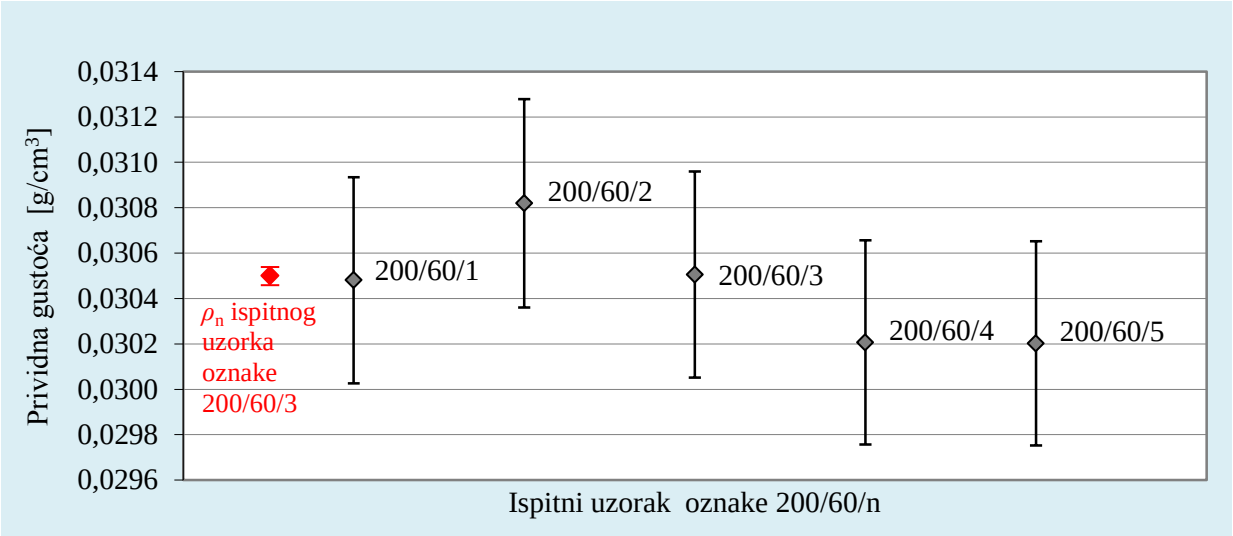
Aritmetičkim sredinama rezultata mjerenja pridružene su vrijednosti rasipanja rezultata na razini dva standardna odstupanja. Navedene vrijednosti daje **Tablica 32**.

Kako je vidljivo sa slike **Sl.- 90**, za razinu povjerenja od 95 %, intervali modelom dobivenih strukturnih gustoća, ρ_n, ostvareni za pet eksponiranja ispitnog uzorka ekspandiranoga polistirena oznake 200/60/3 su usporedivi.



Sl.- 90. Modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, za ispitni uzorak oznake 200/60/3, na razini povjerenja od 95 %.

Na slici **Sl.- 91** prikazane su prividne gustoće, ρ_{prividno}, uzoraka oznake 200/60/n, gdje je n = 1 do 5, dobivene konvencionalnom metodom (prilog 1).



Sl.- 91. Prividne gustoće, ρ_{prividno}, za ispitne uzorke oznake 200/60/n, gdje je n = 1 do 5, uz pridružene vrijednosti mjernih nesigurnosti ± 1U.

Na slici **Sl.- 91** vrijednostima prividnih gustoća, ρ_{prividno}, pridružene su vrijednosti mjernih nesigurnosti ± 1U. Crvenom bojom označena je modelom određena strukturna gustoća „slijepog“ uzorka oznake 200/60/3 dobivena kao aritmetička sredina za 5 radiografskih ekspozicija iz tablice **Tablica 31**.

Vrijednost aritmetičke sredine modelom određene strukturne gustoće „slijepog“ uzorka ekspandiranoga polistirena oznake 200/60/3 iznosi ρ_n = 0,0305 g/cm^3 uz pridruženu vrijednost rasipanja rezultata na razini dva standardna odstupanja od 0,000072 g/cm^3.

Evaluacijom slika **Sl.- 88**, **Sl.- 89**, **Sl.- 90** i **Sl.- 91** može se zaključiti slijedeće:

1. Za „slijepe“ ispitne uzorke oznaka 70/60/3 i 200/60/3 za razinu povjerenja od 95 %, modelom dobivene strukturne gustoće, ρ_n, s pridruženom vrijednošću rasipanja na razini dva standardna odstupanja, ostvareni za pet eksponiranja, su usporedivi, te je ostvarena ponovljivost i obnovljivost rezultata (**Sl.- 88 i Sl.- 90**).
2. Na slici **Sl.- 89** prikazane su prividne gustoće, ρ_{prividno}, uzoraka oznake 70/60/n, gdje je n = 1 do 5, dobivene konvencionalnom metodom (prilog 1) te vrijednost aritmetičke sredine modelom određene strukturne gustoće „slijepog“ uzorka ekspandiranoga polistirena oznake 70/60/3. Usporedbom modelom

određene strukturne gustoće „slijepog“ uzorka ekspandiranoga polistirena sa vrijednostima prividne gustoće, ρ_{prividno}, dobiva se najmanje odstupanje od aritmetičke sredine ispitnog uzorka oznake 70/60/3 čime je potvrđena ispravna identifikacija slijepoga uzorka

3. Na slici **Sl.- 91** prikazane su prividne gustoće, ρ_{prividno}, uzoraka oznake 200/60/n, gdje je n = 1 do 5, dobivene konvencionalnom metodom (prilog 1) te vrijednost aritmetičke sredine modelom određene strukturne gustoće „slijepog“ uzorka ekspandiranoga polistirena oznake 200/60/3. Usporedbom modelom određene strukturne gustoće „slijepog“ uzorka ekspandiranoga polistirena oznake 200/60/3 sa vrijednostima prividne gustoće, ρ_{prividno}, dobiva se najmanje odstupanje od aritmetičke sredine ispitnog uzorka oznake 200/60/3 čime je potvrđena ispravna identifikacija slijepoga uzorka.

10. ZAKLJUČAK

Ekspandirani polistiren, ćelijasti materijal niske gustoće, koristi se u građevinarstvu, ponajviše kao toplinska izolacija u suvremenim građevinama gdje se inzistira na energetski učinkovitoj, a ujedno jeftinijoj gradnji. Mehanička i toplinska svojstva ekspandiranoga polistirena u korelaciji su s njegovom strukturnom gustoćom. Karakterizaciju ekspandiranoga polistirena moguće je provesti indirektno, konvencionalnom metodom, određivanjem mjerljivih značajki njegove strukture. Potrebno je istaknuti dvije činjenice, prva, konvencionalna je metoda bazirana na ispitivanju izuzetih uzoraka što podrazumijeva izrezivanje uzoraka, dakle razorno ispitivanje i druga, prisutna je problematika uzorkovanja koja nije zanemariva zbog problema nehomogenosti. Dakle, konvencionalnom metodom se dobiva samo prosječna vrijednost gustoće ekspandiranoga polistirena, bez saznanja o nehomogenostima unutar cijele toplinsko-izolacijske ploče.

Ovo je istraživanje primarno bilo motivirano spoznajom da ne postoji razvijena metoda za karakterizaciju materijala ćelijaste strukture računalnom radiografijom. Dodatna motivacija bio je i potencijal implementacije računalne radiografije u polje građevinske industrije.

U tom cilju, u radu je predložena metodologija procjenjivanja strukturne gustoće temeljena na sustavu računalne radiografije koja izravno omogućuje dobivanje informacije o varijabilnosti gustoće ispitivanih uzoraka ekspandiranoga polistirena. Predložena metodologija ima potencijal da postane značajan doprinos u tom smislu omogućuje praćenje i optimizaciju procesa proizvodnje analizom manjih područja volumena toplinsko izolacijskih ploča, čime se dobivaju lakše izvedivi podaci od podataka dobivenih konvencionalnom metodom.

10.1 Optimiranje parametara eksponiranja i očitanja

Zbog potencijalne primjene u karakterizaciji materijala ćelijaste strukture u svrhu procjene kvalitete ekspandiranoga polistirena, kvantifikacija pouzdanosti računalne radiografije predstavljala je imperativ i jedan je od očekivanih doprinosa ovog doktorskog rada. Važan doprinos planiranim ciljevima istraživanja također predstavljaju prikazi i analize nedovoljno istraženih svojstvenih odziva komponenata karaterizacijskog niza. U kvalitativnom smislu, definirani su svojstveni odzivi elemenata karakterizacijskog niza. S druge strane, kvantitativno, određeno je u kolikoj mjeri i na koji način postavljeni parametri procesa kontinuirane transformacije signala odziva utječu na pouzdanost rezultata ispitivanja.

Tijekom analize komponenata karakterizacijskog niza zaključeno je slijedeće:

a) izdvajanje mjerljivih značajki za analizu digitalnog zapisa radiografske snimke.

Analiza digitalnih zapisa radiografske slike provodi se na područjima od interesa (ROI) definirane i što je najvažnije, nepromjenjive veličine. Područje od interesa predstavlja skup piksela na digitalnom zapisu radiografske slike koji nude informaciju o odzivu eksponiranog volumena. Analiza se provodi na ***pozitivu*** kako je definirano u poglavlju 4.3.

Za promatrani skup piksela, odabrane su i definirane sljedeće značajke za analizu digitalnih zapisa radiografskih slika: ***aritmetička sredina i standardno odstupanje intenziteta zacrnjenja piksela odabranog područja od interesa***.

U svrhu definiranja optimalnih parametara eksponiranja i očitanja ***uvedena je funkcija dobrote eksponiranja i očitanja, δ***. Optimalni parametri vrijednosti dobrote eksponiranja i očitavanja određeni su maksimalnom vrijednošću dobrote što predstavlja ***kriterij dobrote*** koji

u konačnici omogućuje bolje razlikovanje promatranih strukturnih stanja ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena.

b) optimiranje parametara eksponiranja.

U poglavlju 6 oblikovan je i proveden plan pokusa za karakterizaciju komponenata sustava eksponiranja. Osnovni cilj bio je definirati korisnu dinamičku širinu slikovnih ploča, te postaviti optimalne parametre eksponiranja: napon na rendgenskoj cijevi u kV i radiografsku ekspoziciju u mAs.

Pokus je definiran za tri različite debljine uzoraka 60 mm, 80 mm i 100 mm deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 100 kPa uz referentni uzorak debljine 2 mm. Vrijednosti stanja pokusa (parametara eksponiranja) mijenjani su i prilagođavani tijekom provođenja pokusa ovisno o postavljenom cilju (nakon analize digitalnih zapisa radiografskih slika, metodologijom opisanom u poglavlju 4.3, provedena je prilagodba parametra eksponiranja da bi se intenzitet zacrnjenja piksela nalazio u korisnom dijelu dinamičkog raspona slikovnih ploča).

Područje ***dinamičkog raspona slikovnih ploča od 30000 do 35000*** odabrano je da bi se izbjegla područja neuporabljiva za analizu digitalnog zapisa radiografske slike, a to su područje pojave mrena kod malih vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela, te područje pojave zasićenja u gornjem području dinamičkog raspona slikovnih ploča prikazanih u poglavlju 6.1.2.

Kao rezultat pokusa provedenog u poglavlju 6 određeni su optimalni parametri eksponiranja ekspandiranoga polistirena:

- ***napon na rendgenskoj cijevi 15 kV i***
- ***radiografska ekspozicija 420 mAs (I = 3,5 mA)***.

c) optimiranje parametara očitanja

U poglavlju 7 oblikovan je i proveden potpuni faktorski plan pokusa, 3^4, za karakterizaciju komponenata sustava očitanja. Istražen je utjecaj 4 člana modela: napona pojačanja PMT [V], gustoće snage (inteziteta zračenja lasera) [W/m^2], razlučivosti očitanja [μm], i deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće ekspandiranogaa polistirena [kPa].

Postupak karakterizacije komponenata sustava očitanja proveden je korištenjem ispitnih uzorka deklariranih vrijednosti tlačnih čvrstoća 50 kPa, 150 kPa i 200 kPa, dok je uzorak deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 100 kPa služio kao referentni uzorak. Postupak karakterizacije komponenata sustava očitanja proveden je za uzorke konstantne debljine d = 80 mm.

Statističkim alatom izrađeni su i vrednovani matematički modeli odziva intenziteta zacrnjenja piksela i vrijednosti dobrote.

U poglavlju 7.2.4 analiziran je matematički model utjecaja parametara komponenata sustava očitanja na odziv intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike (pozitiva) ekspandiranoga polistirena. Stečene su slijedeće spoznaje:

- ***Postoje četiri utjecajna člana modela prvog reda čiji je utjecaj na model linearan: napon pojačanja PMT [V], gustoća snage (intezitet zračenja lasera) [W/m^2], razlučivost očitanja [µm] i deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće [kPa]***.
- ***Primarni utjecaj na model ima napon pojačanja PMT***. ***Veće pojačanje rezultira porastom vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike***. Posljedica je to pojačanja signala u pojačalu na izlazu iz fotodetektora u ovom slučaju PMT cijevi, gdje se emitirani svjetlosni signal konvertira u električni signal).
- Nadalje, ***što je efektivni promjer laserske zrake manji (razlučivost očitanja), to je pobudna zraka koncentriranija i utjecaj raspršenja energije u aktivnom sloju slikovne ploče je manji***.
- Dubina prodiranja laserske zrake u aktivni fotoosjetljivi sloj odgovara podesivom parametru gustoće snage (intezitetu zračenja lasera). Iako je cilj pobuditi što je moguće veći volumen latentne slike koja je spremljena u aktivnom dijelu slikovne ploče, količina signala koji se u stvarnosti ekstrahira ovisi o ukupnoj količini energije koju unosi izvor pobude. Prema tome ***porastom gustoće snage (inteziteta zračenja lasera) raste i vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike*** ekspandiranoga polistirena.
- Tlačna čvrstoća ekspandiranoga polistirena ima linearan utjecaj na odziv modela, ali sa negativnim predznakom. Drugim riječima, ***porastom tlačne čvrstoće ekspandiranoga polistirena opada vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela***

digitalnog zapisa radiografske slike. Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka direktno je ovisna o gustoći i raste porastom gustoće. Povećanje gustoće u konačnici znači i apsorbiranje veće količine X zračenja, a to kao rezultat ima smanjenje intenziteta zacrnjenja piksela na digitalnom zapisu radiografske slike.

U poglavlju 7.3.3 provedena je analiza matematičkog modela utjecaja parametara komponenata sustava očitanja na odziv intenziteta zacrnjenja piksela digitalnog zapisa radiografske slike ekspandiranoga polistirena.

Stečene su slijedeće spoznaje:

- ***Postoje dva utjecajna parametra prvog reda koji linearno utječu na model***. To su razlučivost očitanja [μm] i deklarirana vrijednost tlačne čvrstoće EPS-a [kPa].
- Utjecaj tlačne čvrstoće može se opisati kvadratnom funkcijom. ***Vrijedi da vrijednost dobrote opada porastom deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće. Zakonitost ima minimum kod vrijednosti tlačne čvrstoće od približno 117 kPa, kada vrijednost dobrote raste daljnjim porastom vrijednosti tlačne čvrstoće***. Posljedica je to odabira referentnog materijala tlačne čvrstoće 100 kPa.
- ***Utjecaj razlučivosti na model je linearan.*** Za sve modelom obuhvaćene vrijednosti tlačne čvrstoće, vrijednost parametra dobrote raste kada je vrijednosti razlučivosti veća. Smatra se da je razlučivost od 50 μm veća od 125 μm. Na vrijednostima razlučivosti većim od 125 μm zakonitost ima minimum i vrijednost dobrote neznatno raste.
- ***Nema utjecaja napon pojačanja i gustoće snage.***

Nakon provedene optimizacije unutar zadanih graničnih vrijednosti, kao rezultat dobiveni su optimalni parametri očitanja koji vrijede za modelom obuhvaćene vrijednosti tlačne čvrstoće ekspandiranoga polistirena od 50 kPa do 200 kPa:

- ***napon pojačanja PMT cijevi: 5,25 V***
- ***gustoća snage (intezitet zračenja lasera): 20 W/m^2***
- ***razlučivost očitanja: 50 μm.***

Svi gore navedeni zaključci, te parametarskom optimizacijom dobivene optimalne vrijednosti parametara eksponiranja i očitanja dobiveni su korištenjem slijedeće opreme: ISOVOLT 160 M2 0.4/1.5 rendgenskog uređaja proizvođača GE (poglavlje 5.1), skenera

VMI 5100MS CR SCANNER sa integriranim računalnim programom za analizu slike StarrView 7 Standard Edition (poglavlje 5.2) i slikovnih ploča standardne razlučivosti KODAK INDUSTREX Flex proizvođača KODAK (poglavlje 5.3). Bitno je napomenuti da je značajnijom promjenom bilo kojeg elementa karakterizacijskog niza potrebno provesti ponovnu optimizaciju parametara eksponiranja i očitanja metodom predstavljenom u ovom radu.

10.2 Vrednovanje modela obzirom na odabir područja od interesa

Analiza i evaluacija utjecaja parametara eksponiranja i očitanja na vrijednost dobrote digitalnog zapisa radiografske slike, u poglavljima 6 i 7, doprinijela je razumijevanju utjecaja pojedinačnih parametara procesa eksponiranja slikovnih ploča u prvom koraku procesa, kao i razumijevanju analogno-digitalne konverzije latentnog zapisa slikovnih ploča kod procesa očitanja u idućem koraku procesa.

U svrhu određivanja sinergijskog djelovanja elemenata karakterizacijskog niza na varijabilnost rezultata ispitivanja modeliran je ***odzivni model karakterizacijskog niza.*** Odzivni model karakterizacijskog niza aproksimiran je linearnom jednadžbom uz koeficijent determinacije R^2 = 0,979. Odzivni model karakterizacijskog niza određen je za područje dinamičkog raspona slikovnih ploča od 30000 do 35000, dok je u konačnici za sve pokusom obuhvaćene uzorke ekspandiranoga polistirena raspon intenziteta zacrnjenja piksela širi.

Za određivanje utjecaja odabira područja od interesa (ROI) na varijabilnost modelom dobivene strukturne gustoće proveden je pokus korištenjem ispitnog uzorka debljine 60 mm, deklarirane vrijednosti tlačne čvrstoće 100 kPa oznake 100/60/1.

Utjecaj na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena proveden je određivanjem relativnog odstupanja modelom određene strukturne gustoće izračunate na temelju odzivne funkcije karakterizacijskog niza, u koju su implementirani optimalni parametri eksponiranja i očitanja, i prividne gustoće određene konvencionalnom metodom.

Odzivnim modelom karakterizacijskog niza određene su vrijednosti strukturne gustoće. Aritmetičkim sredinama pridružene su vrijednosti rasipanja rezultata u rasponu od dva standardna odstupanja. Za svih pet eksponiranja izračunato je relativno odstupanje, $\Delta\rho_{rel}$,

vrijednosti modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, od prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, izračunate prema konvencionalnoj metodi HRN EN 1602. Vrijednostima prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, pridružena je vrijednost mjerne nesigurnosti ± 1U.

Intervali modelom procjenjene strukturne gustoće uzoraka ekspandiranoga polistirena, ρ_n, ostvarene za pet eksponiranja i prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, dobivene konvencionalnom metodom, za razinu povjerenja od 95 % su usporedivi.

10.3 Vrednovanje modela obzirom na varijabilnost strukture EPS-a

Evaluacija utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na varijabilnost modelom određene provedena je za dvije debljine, 60 mm u 8.4.2.1 i 100 mm u poglavlju 8.4.2.2 na uzorcima tlačne čvrstoće 100 kPa.

Utjecaj na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena proveden je određivanjem relativnog odstupanja modelom određene strukturne gustoće izračunate na temelju odzivne funkcije karakterizacijskog niza, u koju su implementirani optimalni parametri eksponiranja i očitanja, i prividne gustoće određene konvencionalnom metodom.

Odzivnim modelom karakterizacijskog niza određene su vrijednosti strukturne gustoće. Svaka vrijednost modelom određene strukturne gustoće pojedine radiografske ekspozicije, ρ_n, dobivena je kao aritmetička sredina sa pet područja od interesa. Aritmetičkim sredinama rezultata mjerenja pridružene su vrijednosti rasipanja rezultata u rasponu od dva standardna odstupanja. Za svih pet eksponiranja izračunato je relativno odstupanje, $\Delta\rho_{rel}$, vrijednosti modelom određene strukturne gustoće, ρ_n, od prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, izračunate prema konvencionalnoj metodi HRN EN 1602. Vrijednostima prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, pridružena je vrijednost mjerne nesigurnosti ± 1U.

Intervali modelom procjenjene strukturne gustoće uzoraka ekspandiranoga polistirena, ρ_n, ostvarene za pet eksponiranja i prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, dobivene konvencionalnom metodom za razinu povjerenja od 95 % su usporedivi.

10.4 Potvrda modela

Provedene analize utjecaja odabira područja od interesa i utjecaja strukture ekspandiranoga polistirena na rezultate izračuna pomoću predloženoga modela za procjenu strukturne gustoće bile su preduvjet za dokazivanje uspješnosti i pouzdanosti karakterizacije ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena kako je postavljeno u hipotezi istraživanja.

U tu svrhu je temeljem uspostavljene metodologije u poglavlju 9 određena strukturna gustoća „slijepih“, nasumično odabranih ispitnih uzoraka ekspandiranoga polistirena, koji nisu „sudjelovali“ u osnivanju modela.

Razvijenim modelom određene su strukturne gustoće, ρ_n, „slijepih“ ispitnih uzorka kao aritmetičke sredine pet područja od interesa za pet eksponiranja. Aritmetičkim sredinama rezultata mjerenja pridružene se vrijednosti rasipanja rezultata na razini dva standardna odstupanja.

Za razinu povjerenja od 95 %, intervali modelom dobivenih strukturnih gustoća, ρ_n, ostvareni za pet eksponiranja, su usporedivi, te je ostvarena ponovljivost i obnovljivost rezultata (**Sl.- 88** i **Sl.- 90**).

Na slici **Sl.- 89** prikazane su prividne gustoće, ρ_{prividno}, uzoraka oznake 70/60/n, gdje je n = 1 do 5, dobivene konvencionalnom metodom (prilog 1). Vrijednostima prividnih gustoća, ρ_{prividno}, pridružene su vrijednosti mjernih nesigurnosti ± 1U. Vrijednost aritmetičke sredine modelom određene strukturne gustoće „slijepog“ uzorka ekspandiranoga polistirena oznake 70/60/3 iznosi ρ_n = 0,01458 g/cm^3 uz pridruženu vrijednost rasipanja rezultata na razini dva standardna odstupanja od 0,00015 g/cm^3.

Usporedbom modelom određene strukturne gustoće „slijepog“ uzorka ekspandiranoga polistirena sa vrijednostima prividne gustoće, ρ_{prividno}, dobiva se najmanje odstupanje od aritmetičke sredine ispitnog uzorka oznake 70/60/3, čime je potvrđena ispravna identifikacija slijepoga uzorka.

Na slici **Sl.- 91** prikazane su prividne gustoće, ρ_{prividno}, uzoraka oznake 200/60/n, gdje je n = 1 do 5, dobivene konvencionalnom metodom (prilog 1). Vrijednostima prividnih gustoća, ρ_{prividno}, pridružene su vrijednosti mjernih nesigurnosti ± 1U. Vrijednost aritmetičke sredine modelom određene strukturne gustoće „slijepog“ uzorka ekspandiranoga polistirena

oznake B iznosi ρ_n = 0,0305 g/cm^3 uz pridruženu vrijednost rasipanja rezultata na razini dva standardna odstupanja od 0,000072 g/cm^3.

Usporedbom modelom određene strukturne gustoće „slijepog" uzorka ekspandiranoga polistirena sa vrijednostima prividne gustoće, $\rho_{prividno}$, dobiva se najmanje odstupanje od aritmetičke sredine ispitnog uzorka oznake 200/60/3, čime je potvrđena ispravna identifikacija slijepoga uzorka.

10.5 Znanstveni doprinosi disertacije

Na temelju provedenih evaluacija mogu se navesti znanstveni doprinosi ove disertacije:

- ***Razvijena je nova metodologija karakterizacije materijala ćelijaste strukture tehnikom računalne radiografije.***
- ***Ustanovljeni su pojedinačni utjecaji parametara procesa eksponiranja slikovnih ploča rendgenskim zračenjem i analogno-digitalne konverzije latentnog zapisa slikovnih ploča kod procesa očitanja.***
- ***Okarakterizirano je sinergijsko djelovanje elemenata karakterizacijskog niza na varijabilnost rezultata ispitivanja.***
- ***Izdvojene su i predložene mjerljive značajke u procesu analize digitalnog zapisa radiografske slike u svrhu utvrđivanja varijabilnosti tražene strukturne značajke na promatranom području***.

10.6 Hipoteze

Postavljene hipoteze provjerene su na slijepim uzorcima nepoznatih strukturnih gustoća. Postupak je proveden prema predloženoj metodologiji uz optimizirane parametre eksponiranja ispitnih uzoraka, optimizirane parametre očitavanja digitalnih zapisa radiografske slike i njihove analize.

Na temelju analize i evaluacije provedenog istraživanja postavljene se hipoteze mogu prihvatiti:

- ***Optimiranjem parametara procesa svih faza transformacije signala odziva postignuto je da je varijabilnost odziva svojstvena karakterizacijskom nizu u***

cijelosti manja od varijabilnosti strukturne značajke ispitivanog materijala i pripadajućih odziva.

- ***Analizom i evaluacijom odabranih mjerljivih značajki digitalnog zapisa radiografske slike na promatranom području, strukturne značajke ekspandiranoga polistirena procijenjene su točnije i preciznije nego konvencionalnom metodom.***

Ovim istraživanjem pokazano je i potvrđeno da su proširenjem postojećih spoznaja i sustavnim istraživanjem u konačnici stečena saznanja o ponašanju cjelokupnog ispitnog sustava. Okarakteriziran je odziv svojstven cjelokupnom sustavu (odzivni model karakterizacijskog niza). Ovime je stvorena osnova za postavljanje smjernica za pravilnu karakterizaciju i drugih materijala ćelijaste strukture.

10.7 Smjernice daljnjeg istraživanja

Provedenom analizom i evaluacijom utjecaja pojedinih komponenata karakterizacijskog niza na varijabilnost rezultata promatrane značajke pojavile su se nova pitanja o njihovom utjecaju.

Osim toga, otvorile su se i nove mogućnosti, te daljnji pravci istraživanja. Istaknuti su tek najznačajniji:

- Iako je provedenim optimiranjem parametara procesa svih faza transformacije signala odziva postignuto da je varijabilnost odziva svojstvena karakterizacijskom nizu u cijelosti manja od varijabilnosti strukturne značajke ispitivanog materijala i pripadajućih odziva, potrebno je dodatno utvrditi utjecaj oblika snopa X zračenja na varijabilnost rezultata modelom određene strukturne gustoće ekspandiranoga polistirena evaluacijom utjecaja odabira područja od interesa.
- Tijekom razvoja metodologije za određivanje gustoće ekspandiranoga polistirena ustanovljeni su pojedinačni utjecaji parametara procesa eksponiranja slikovnih ploča rendgenskim zračenjem te analogno-digitalne konverzije latentnog zapisa

slikovnih ploča kod procesa očitanja. Nadalje, okarakterizirano je sinergijsko djelovanje elemenata karakterizacijskog niza na varijabilnost rezultata ispitivanja. Razvijeni model vrijedi za slikovne ploče jednakih karakteristika kao što su ploče korištene u ovom radu, dok bi se za druge vrste slikovnih ploča zahtijevala dodatna verifikacija modela i ponovni proces optimiranja parametara eksponiranja i očitanja. Obzirom da je to jedna od komponenata karakterizacijskog niza koja je podložna promjenama zbog ograničene iskoristivosti samih slikovnih ploča, postavlja se pitanje o utjecaju isključivo slikovnih ploča na varijabilnost rezultata. Dakle, potrebno je uzeti u obzir različite vrste slikovnih ploča, naravno vodeći računa o kompatibilnosti valnih duljina s postojećim skenerom slikovnih ploča.

- Tijekom izvođenja plana pokusa pokazala se potreba za jedinstvenim referentnim uzorkom koji bi služio da se prema njemu modelira funkcija dobrote. Predlaže se da kao referentni uzorak bude napravljen blok od polietilena ili polistirena koji ima približno iste vrijednosti masenog koeficijenta prigušenja. Time bi se osigurala jednolikost i unificiranost postupka izračuna značajki od interesa.

11. LITERATURA

[1] U. Neitzel, Status and prospects of digital detector technology for CR and DR, Radiation Protection Dosimetry, May 2005, 114 (1-3): 32-38.

[2] HRN EN 13163:2002 - Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade - Tvornički izrađeni proizvodi od ekspandiranoga polistirena (ESP) - Specifikacija (EN 13163:2001).

[3] M.B. Williams, E.A.Krupinski, K. J. Strauss, Digital Radiography Image Quality Image Acquisition, J Am Coll Radiol 2007; 4:371-388.

[4] R. H. Miettunen, O. A. Korhola, The effect of scatter reduction on the signal-to-noise ratio in computed radiography, European Journal of Radiology, Volume 12, Issue 3, May-June 1991, p. 167-170.

[5] J. A. Rowlands, The physics of computed radiography, Physics in Medicine and Biology, 47 (2002) R123 - R166.

[6] R. K. Swank, Absorption and noise in x-ray phosphors, Journal of Applied Physics, 44 (2009) 4199-203.

[7] R. Schaetzing, Advances in Digital Radiography, RSNA Categorical Course in Diagnostic Radiology Physics 2003, pp 7 – 22.

[8] N. Kamenić; D. Markučič, J. Stepanić, T. Matusinović; S. Kurajica, N. Ukrainczyk, J. Šipušić, Toward the better ndt characterization of cement and concrete/mortar in situ, International Conference of Bridges: Proceedings, Radić, Jure (ur.), Zagreb : SECON HDGK, 2006. 1121-1128.

[9] N. C. Hilyard, Mechanics of Cellular Plastics. London, Applied Science Publishers LTD, 1982: 360 p.

[10] L. Lando, G. Sala, D. Olivieri, Deformation Mechanisms and Energy Absorption of Polystyrene Foams for Protective Helmets Polymer Testing 21 2002: pp. 217 – 28.

[11] Bocev, A. Ergić, G. Jurković, Ovisnost svojstva pjenećeg i pjenastog polistirena o strukturi, proizvodnji i preradi, Polimeri 9 (12), str.323-328, 1988.

[12] V. A. Vorobjov, R.A. Andrianov, Polymeric Thermo Insulating Materials. Moscow, Stroyizdat, 1972: 320 p.

[13] N. J. Mills, Micromechanics of Polymer Foams. 3rd Nordic Meeting on Materials and Mechanics, Aalborg, Denmark 2000: pp. 45 –76.

[14] R. Michaels, Digital x-ray system images EPS foam, Vision System Design, May 1, 2005.

[15] Z. Janović, K. Sarić, A. Jukić, S. Jurjašević, Razvoj novih procesa proizvodnje pjenećeg polistirena, Polimeri 29 (2008) 1:9-20.

[16] G. Salejova, J. Kosek, Dynamics of foaming of polystyrene particles, Macromolecular Symposia, 243 (2006), Issue 1, 233-246.

[17] S. Vaitkus, A. Laukaitis, I. Gnipas, V. Keršulis, S. Vėjelis, Experimental Analysis of Structure and Deformation Mechanisms of Expanded Polystyrene (EPS) Slabs, ISSN 1392–1320 Materials Science, 12 (4) 2006, str. 323 – 327.

[18] M. Körner, C. H. Weber, S. Wirth, K-J. Pfeifer, M. F. Reiser, M. Treitl, Advances in Digital Radiography: Physical Principles and System Overview, RadioGraphics, May 2007, 27, 675-686.

[19] M. Nakazawa, O. Morikawa, M. Nitta, H. Tsuchino, F. Shimada, Effect of protective layer on resolution properties of photostimulable phosphor detector for digital radiographic system, Proc. SPIE 1231, 350 (1990).

[20] J. Roussilhe, S. A. Mango, E. Fallet, Performance evaluation of a Computed Radiography System, DIR 2007 – International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, June 25-27, 2007, Lyon, France.

[21] M. Sonoda, M. Takano, J. Miyahara, H. Kato, Computed Radiography Utilizing Scanning Laser Stimulated Luminescence, Radiology 148:3, pp. 833-838, 1983.

[22] H. Kato, Photostimulable Phosphor Radiography Design Considerations, American Institute of Physics, Inc., Woodbury, NY. 1994;731-770.

[23] S.M. Kengyelics, A.G. Davies, A.R. Cowen, A comparison of the physical imaging properties of Fuji ST-V, ST-VA, and ST-VN computed radiography image plates, Med Phys. 1998 Nov; 25(11): 2163-9.

[24] R. Schaetzing, R. Fasbender, P. Kersten, New high-speed scanning technique for computed radiography, Proc. SPIE 4682, 511 (2002).

[25] VMI 5100MS, Virtual Media Integration: http://www.starrview.com/lists/1-products/items/15-vmi-5100ms-digitizer.

[26] HRN EN 1602:1998 - Toplinsko-izolacijski proizvodi za graditeljstvo - Određivanje prividne gustoće (EN 1602:1996+AC:1997).

[27] M. Körner, C. H. Weber, S. Wirth, K.J. Pfeifer, M.F. Reiser, M. Treitl, Advances in Digital Radiography: Physical Principles and System Overview, Radio Graphics 2007 May-Jun; 27(3): 675-86.

[28] EASTMAN KODAK COMPANY, Practice Guideline for Digital Radiography, 2007.

[29] R. J. Patel, Digital Aplications of Radiography, 3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition - 27-30 Nov 2005 Bahrein, Manama.

[30] A. L. McKnight, Digital Radiography in Equine Practice, Clinical Techniques in Equine Practice, Volume 3, Issue 4, December 2004, Pages 352–360.

[31] M. Omelić, Ž. Rijetković, Industrijska računalna radiografija – prednosti i ograničenja, MATEST 2009, Cavtat-Dubrovnik, 2009-9-23-26.

[32] HRN EN 14784-1 - Nerazorno ispitivanje - Industrijska računalna radiografija s uporabom fosfornih ploča - 1. dio: Razredba sustava (EN 14784-1:2005).

[33] HRN EN 14784-1 - Nerazorno ispitivanje - Industrijska računalna radiografija s uporabom fosfornih ploča - 2. dio: Osnovna načela za ispitivanje metalnih materijala uporabom X zraka i gama zraka (EN 14784-2:2005).

[34] American Association of Physicists in Medicine, Acceptance Testing and Quality Control of Photostimulable Phosphor Imaging Systems, Report of AAPM Task Group 10, October 2006.

[35] H. von Seggert, T. Voigt, W. Knupfer, G. Lange, Physical model of photostimulated luminescence of x-ray irradiated BaFBr:Eu^{2+}, J. Appl. Phys (1998) 64(3) 1405-12.

[36] K. Takahashi, K. Konda, J. Miyahara, Y. Kenemitsu, K. Amitani, S. Shionoya, Mechanism of photostimulated luminescence in BaFX:Eu^{2+} (X=Cl, Br) Phosphors, J. Luminiscence (1998) 31-32 266-8.

[37] Dopunska izobrazba iz područja zaštite od ionizirajućeg zračenja, Medicinska fizika i biofizika, Medicinski fakultet Sveučilišta u Osijeku, Skripta za kolegij Uvod u zaštitu od zračenja, Skripta 5, Rendgenski uređaj i nastanak rendgenskih zraka.

[38] Industrial Radiography, Image forming techniques, GE Inspection Technologies, 2007.

[39] Radiography in Modern Industry, Fourth edition, EASTMAN KODAK, 1980.

[40] What is Imaging Plate, http://home.fujifilm.com/products/science/ip/phosphor

[41] P. Leblans, D. Vanderbroucke, P. Willems Storage Phosphors for Medical Imaging, Materials 2011, 4, 1034-1086.

[42] H. von Seggern, Photostimulable x-ray storage phosphors: a review of present understanding, Brazilian Journal of Physics, 29(2), 254-268.

[43] KODAK INDUSTREX Digital Imaging Plates, Technical Data, September 2008.

[44] M. Hržan, Karakterizacija metalnih pjena pomoću kompjuterske radiografije, Diplomski rad, 2010. Zagreb.

[45] M. Uffmann, C. Schaefer-Prokop, Digital radiography: The balance between image quality and required radiation dose, European Journal of Radiology 72 (2009), 202-208.

[46] M. J. Yaffe, J. A. Rowlands, X-ray detectors for digital radiography, Phys. Med. Biol. 42 (1997) 1-39.

[47] Komunikacijski sustavi, Izvedba A/D pretvornika,

http://www.informatika.buzdo.com/s874.htm.

[48] A. Vladimirov, Comparasion of image quality test methods in computed radiography, MSc thesis, University of Tartu, 2010.

[49] U. Ewert, U. Zscherpel, K. Bavendiek, Strategies for Film Replacement in Radiography, IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Octubre 2007.

[50] Digitalni zapis u radiologiji, Klinički zavod za radiologiju, Klinički bolnički centar Rijeka, http://www.medri.uniri.hr/katedre/Radiologija.

[51], Kodak, http://www.e-radiography.net.

[52] M. Spahn, Flat detectors and their clinical applications, Eur. Radiol 2005(15) 1934-1947.

[53] F. Kong, Quality Evaluation for the Digital Radiography Inspection Based on Imaging Parameters, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.

[54] HRN EN 62220-1:208 Medicinski električni uređaji – Značajke digitaliziranih rendgenskih uređaja – 1. dio: Određivanje osjetljivosti otkrivanja (detekcije) zračenja (IEC 62220-1:2003; EN 62220-1:2004).

[55] H. Illers, E. Buhr, C. Hoeschen, Measurement of the detective quantum efficiency (DQE) of digital X-ray detectors according to the novel standard IEC 62220-1, Radiat Prot Dosimetry. 2005, 114(1-3), 39-44.

[56] V. Matijašević, Proizvodnja pjenećeg polistirena u tvrtki DIOKI d.d., Polimeri 29(2008)1, 30-33.

[57] E. Mıhlayanlar, S. Dilmac, A. Guner, Analysis of the effect of production process parameters and density of expanded polystyrene insulation boards on mechanical properties and thermal conductivity, Materials and Design 29 (2008) 344–352.

[58] E. Erbay, T. Bilgic, T. Karali, M. Savasci, Polystyrene suspension polymerization: the effect of polymerization parameterrs on particle size and distribution, Polym. Plast. Technol., Eng., 31(1992), 589-605.

[59] N. Marić, DIOKI-jevi materijali za proizvodnju plastomernih pjenastih materijala, Polimeri 30(2008)1:18-22.

[60] J.P. Dowding, B. Vincent, Suspension polymerization to form polymerbeads, Coll. Sur. A: Physicochem. Eng. Asp., 161(2000), 29-269.

[61] E. Vivaldo-Lima, P.E. Wood, A.E. Hamielec, A. Penlidis, An update on suspension polymerization, Ind. Eng. Chem. Res., 36(1997), 939-965.

[62] Expanded Polystyrene Foam (EPF), http://www.madehow.com/Volume-1/Expanded-Polystyrene-Foam-EPF.html.

[63] J. Udiković, Osnovni tipovi i uporabna svojstva pjenećeg polistirena, Polimeri 29(2008)1:34-37.

[64] H. Hopff, H. Lussi, E. Hammer, Parameters of suspension polymerization, Chem. Ing. Technol., 36(1994), 1085-1099.

[65] Expanded Polystyrene (EPS) and the Enviroment, http://www.eps.co.uk/.

[66] EKSPANDIRANI POLISTIREN EPS, Hrvatska komora arhitekata, Stručno usavršavanje.

[67] Technical Bulletin, TEC-I-001, General introduction to Expandable Polystyrene, release date 8/4/2006, http://texas.transconsteel.com/Productsultraframe/docs/Introduction_to_EPS.

[68] G. Salejova, J. Kosek, Dynamics of foaming of polystyrene particles, Macromol. Symp., 243(2006), 233-246.

[69] HRN EN 13499:2004 - Toplinsko-izolacijski proizvodi za primjenu u zgradarstvu - Povezani sustavi za vanjsku toplinsku izolaciju (ETICS) na osnovi ekspandiranoga polistirena – Specifikacija (EN 13499:2003).

[70] S. Šilhard-Mihaljević, Uporabljivost toplinskoizolacijskih proizvoda u zgradarstvu, GRAĐEVINAR 58 (2006) 8, 649-653.

[71] EPS White Book, EUMEPS Background Information on standardisation of EPS, European Manufacturers of Expanded Polystyrene (EUMEPS), 2011.

[72] European Manufacturers of Expanded Polystyrene (EUMEPS), Properties of EPS, http://eumps.org.

[73] VMI 5100MS CR SCANNER, Technical specification

http://www.starrview.com/lists/1-products/items/15-vmi-5100ms-cr-scanner.

[74] Integrirani sustav za analizu slike StarrView 7 Standard Edition VMI 5100MS cRT

[75] Formati za pohranu slika na računalu, http://racunala.ttf.unizg.hr/.

[76] M. Huzak, Vjerojatnost i matematička statistika, Sveučilište u Zagrebu, PMF-matematički odjel, Poslijediplomski specijalistički sveučilišni studij aktuatorske matematike, Predavanja, 2006.

[77] Moments and the Shape of Histograms, Chapter 4, Department of Economics at New York University, http://econ.as.nyu.edu/page/home.

[78] K. Balanda, H.L. MacGillivray (1988), "Kurtosis: A Critical Review", The American Statistician, (1988)42:2, pp. 111–119.

[79] Technical Specification and user manual – ISOVOLT *mobile* 160.

[80] Technical Specification – ISOVOLT *mobile* 160,

http://www.ge-mcs.com/en/radiography-x-ray/tubes-and-generator/isovolt-mobile-160.html.

[81] Data Sheet – SEIFERT X-ray Tubehousing, ISOVOLT 160 M2 / 0.4-1.5, http://www.ge-mcs.com/dowload/x-ray/tubes-generator/tubes_xr/GEIT-30029GB_ISOVOLT-160m2-0415.pdf.

[82] HRN EN 12543:2007 - Nerazorno ispitivanje - Značajke fokusnih točaka u industrijskim rendgenskim sustavima za uporabu pri nerazornom ispitivanju

[83] HRN EN 12085:1998 – Toplinsko-izolacijski proizvodi za graditeljstvo – Određivanje linearnih izmjera uzoraka (EN 12085:1997).

[84] Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti, DZNM, 1995.

[85] DESIGN EXPERT 7, http://www.stateease.com/de70_man.html.

[86] I. Pavlić, Statistička teorija i primjena, Tehnička knjiga zagreb, 1971.

[87] D.C. Montgomery, Applied Statistics and Probability for Engineers, J.Wiley & Sons, 2003.

[88] J.H. Hubbell, S.M. Seltzer, Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients (version 1.4), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, http://physics.nist.gov/xaamdi.

[89] Radiographic Testing (RT), MD, http://www.ndt-ed.org.

12. PRILOZI

Prilog 1 – Izmjerene vrijednosti gustoća ispitnih uzoraka metodom HRN EN 1602

Kao rezultat prikazana je opća srednja vrijednost gustoće ρ kao najbolja procjena vrijednosti gustoće za 5 ispitnih uzoraka uz mjernu nesigurnost mjerenja gustoće u_ρ.

Opća srednja vrijednost izračunata je korištenjem pripadajućih težinskih faktora ovisnih o mjernoj nesigurnosti pojedinog mjernog rezultata.

Također je dana i proširena mjerna nesigurnost srednje vrijednosti gustoće za interval povjerenja od 95 % uz faktor pokrivanja k = 2,78 (Studentova raspodjela za $\nu = 5 - 1 = 4$ stupnja slobode).

Oznaka uzorka (tlačna čvrstoća/debljina)	Ispitni uzorak	Volumen [m^3]	Masa [kg]	Gustoća [kg/m^3]
50/60	50/60/1	0,00237	0,02621	11,0741
	50/60/2	0,00237	0,02688	11,3507
	50/60/3	0,00237	0,02786	11,7645
	50/60/4	0,00237	0,0292	12,3403
	50/60/5	0,00237	0,02874	11,1454
			ρ:	**11,6965**
			u_ρ:	**0,07800**
			Proširena u_ρ:	**0,22387**
50/80	50/80/1	0,00317	0,03785	11,9394
	50/80/2	0,00317	0,03709	11,7014
	50/80/3	0,00317	0,03855	11,5227
	50/80/4	0,00317	0,03621	11,4096
	50/80/5	0,00317	0,03489	10,9977
			ρ:	**11,4966**
			u_ρ:	**0,06055**
			Proširena u_ρ:	**0,17377**
50/100	50/100/1	0,00395	0,0395	10,0040
	50/100/2	0,00395	000394	9,9783
	50/100/3	0,00395	0,0394	9,9685
	50/100/4	0,00395	0,0395	9,9999
	50/100/5	0,00395	0,0396	10,0291
			ρ:	**9,9959**
			u_ρ:	**0,04498**
			Proširena u_ρ:	**0,12908**

Oznaka uzorka (tlačna čvrstoća/ debljina)	Ispitni uzorak	Volumen [m^3]	Masa [kg]	Gustoća [kg/m^3]
70/60	70/60/1	0,00237	0,03531	14,9159
	70/60/2	0,00237	0,03638	15,3546
	70/60/3	0,00237	0,03458	14,5963
	70/60/4	0,00237	0,03448	14,5649
	70/60/5	0,00237	0,03428	14,4880
			ρ:	**14,7705**
			$u_ρ$:	**0,09842**
			Proširena $u_ρ$:	**0,28246**
70/80	70/80/1	0,00318	0,04682	14,7117
	70/80/2	0,00318	0,04491	14,1160
	70/80/3	0,00318	0,04819	15,1289
	70/80/4	0,00318	0,05152	16,1813
	70/80/5	0,00318	0,04934	15,5104
			ρ:	**15,0651**
			$u_ρ$:	**0,07917**
			Proširena $u_ρ$:	**0,22723**
70/100	70/100/1	0,00397	0,06300	15,8547
	70/100/2	0,00397	0,06010	15,1425
	70/100/3	0,00397	0,06069	15,2847
	70/100/4	0,00397	0,05737	14,4334
	70/100/5	0,00397	0,05933	14,9272
			ρ:	**15,1006**
			$u_ρ$:	**0,06772**
			Proširena $u_ρ$:	**0,19435**
100/60	100/60/1	0,00237	0,05396	22,7983
	100/60/2	0,00237	0,05380	22,7117
	100/60/3	0,00237	0,05346	22,5738
	100/60/4	0,00237	0,05335	22,5331
	100/60/5	0,00237	0,05316	22,4583
			ρ:	**22,6123**
			$u_ρ$:	**0,15066**
			Proširena $u_ρ$:	**0,43240**
100/80	100/80/1	0,00317	0,05923	18,6986
	100/80/2	0,00317	0,05866	18,5058
	100/80/3	0,00317	0,05987	18,8740
	100/80/4	0,00317	0,05911	18,6509
	100/80/5	0,00317	0,06100	19,2332
			ρ:	**18,7824**
			$u_ρ$:	**0,09890**

Proširena u_ρ:	**0,28384**

Oznaka uzorka (tlačna čvrstoća/ debljina)	Ispitni uzorak	Volumen [m^3]	Masa [kg]	Gustoća [kg/m^3]
100/100	100/100/1	0,00395	0,07414	18,7716
	100/100/2	0,00395	0,07439	18,7901
	100/100/3	0,00395	0,07466	18,7430
	100/100/4	0,00395	0,07424	18,7879
	100/100/5	0,00395	0,07444	18,7523
			ρ:	**18,8769**
			u_ρ:	**0,08463**
			Proširena u_ρ:	**0,24289**
150/60	150/60/1	0,00237	0,06302	26,6398
	150/60/2	0,00237	0,06161	26,4215
	150/60/3	0,00237	0,06408	27,0523
	150/60/4	0,00237	0,06234	26,3394
	150/60/5	0,00237	0,06400	27,0321
			ρ:	**26,6925**
			u_ρ:	**0,17853**
			Proširena u_ρ:	**0,51238**
150/80	150/80/1	0,00317	0,08529	29,9073
	150/80/2	0,00317	0,08612	27,1569
	150/80/3	0,00317	0,08562	26,9845
	150/80/4	0,00317	0,08655	27,3018
	150/80/5	0,00317	0,08655	27,2618
			ρ:	**27,1208**
			u_ρ:	**0,14277**
			Proširena u_ρ:	**0,40975**
150/100	150/100/1	0,00395	0,11512	29,1571
	150/100/2	0,00395	0,11608	29,3846
	150/100/3	0,00395	0,11765	29,7525
	150/100/4	0,00395	0,12097	30,6170
	150/100/5	0,00395	0,11968	30,2980
			ρ:	**29,8219**
			u_ρ:	**0,13418**
			Proširena u_ρ:	**0,35975**
200/60	200/60/1	0,00237	0,07212	30,4807
	200/60/2	0,00237	0,07305	30,8197
	200/60/3	0,00237	0,07234	30,5056
	200/60/4	0,00237	0,07161	30,2065
	200/60/5	0,00237	0,07153	30,2021

ρ:	**30,4395**
$u_ρ$:	**0,02069**
Proširena $u_ρ$:	**0,58171**

Oznaka uzorka (tlačna čvrstoća/ debljina)	Ispitni uzorak	Volumen [m^3]	Masa [kg]	Gustoća [kg/m^3]
200/80	200/80/1	0,00317	0,09984	31,4939
	200/80/2	0,00317	0,09561	30,1497
	200/80/3	0,00317	0,09717	30,6396
	200/80/4	0,00317	0,08928	28,2453
	200/80/5	0,00317	0,09058	28,5382
			ρ:	**29,7095**
			$u_ρ$:	**0,01565**
			Proširena $u_ρ$:	**0,44930**
200/100	200/100/1	0,00395	0,12573	31,8242
	200/100/2	0,00395	0,12781	32,3676
	200/100/3	0,00395	0,12494	32,6024
	200/100/4	0,00395	0,12346	31,2396
	200/100/5	0,00395	0,12360	31,2744
			ρ:	**31,6509**
			$u_ρ$:	**0,01424**
			Proširena $u_ρ$:	**0,40866**

Prilog 2 – Parametri intenziteta zacrnjenja piksela i dobrote kod određivanja optimalnih parametara eksponiranja

Pojedinačne vrijednosti intenziteta zacrnjenja piksela za tri područja od interesa za svaki pojedini digitalni zapis radiografske slike, srednja vrijednost intenziteta zacrnjenja piksela $\overline{D_{sred}}$, pojedinačne vrijednosti standardnog odstupanja, te srednja vrijednost standardnog odstupanja $\overline{s_{Dsred}}$. Rezultati su prikazani za svih 12 stanja pokusa za određivanje optimalnih parametara eksponiranja. Također je dana izračunata vrijednost dobrote, δ, na temelju izraza (20).

Stanje pokusa (napon/radiografska ekspozicija)	Debljina uzorka [mm]	$D_{sred\,1}$ $s_{Dsred\,1}$	$D_{sred\,2}$ $s_{Dsred\,2}$	$D_{sred\,3}$ $s_{Dsred\,3}$	$\overline{D_{sred}}$ $\overline{s_{D_{sred}}}$	Vrijednost dobrote
1 (10 kV/40 mAs)	60	2596 98	2598 97	2593 73	2596 69	4,52
	80	2486 101	2488 100	2492 104	2489 101	3,81
	100	2482 60	2485 62	2478 61	2482 61	2,85
	Referentni uzorak	2056 50	2057 50	2059 50	2058 50	---
2 (10 kV/90 mAs)	60	12153 163	12150 160	12154 166	12152 163	5,96
	80	12022 140	12020 140	12022 147	12019 142	5,93
	100	11941 159	11945 157	11936 160	11941 159	5,50
	Referentni uzorak	9730 243	9731 243	9731 243	9730 243	---
3 (10 kV/600 mAs)	60	16029 130	16033 128	16029 133	16012 130	6,12
	80	16001 135	16005 137	15996 133	16001 135	5,99
	100	16029 138	16033 138	16028 142	16030 139	6,01
	Referentni uzorak	14289 157	14258 157	1425 150	14266 155	---

Stanje pokusa (napon/radiografska ekspozicija)	Debljina uzorka [mm]	$D_{sred\,1}$ $s_{Dsred\,1}$	$D_{sred\,2}$ $s_{Dsred\,2}$	$D_{sred\,3}$ $s_{Dsred\,3}$	$\overline{D_{sred}}$ $\overline{s_{D_{sred}}}$	Vrijednost dobrote
4 (10 kV/1200 mAs)	60	22001 140	22006 144	22013 139	22007 141	7,02
	80	21881 147	21888 148	21884 145	21884 147	6,50
	100	21211 155	21200 156	21189 142	21200 151	6,26
	Referentni uzorak	19873 163	19882 161	19884 161	19880 162	---
5 (15 kV/120 mAs)	60	15760 118	15769 119	15771 122	15767 120	9,18
	80	15611 122	15609 121	15608 126	15609 123	8,66
	100	15301 117	15305 117	15310 121	15305 118	6,10
	Referentni uzorak	30650 112	30349 111	30641 113	30646 112	---
6 (15 kV/240 mAs)	60	23964 118	23962 119	23975 122	24651 120	9,18
	80	24561 122	24559 121	24579 126	24567 123	8,66
	100	23964 117	23962 117	23975 121	23967 118	6,10
	Referentni uzorak	22645 99	22643 99	22639 99	22642 99	---
7 (15 kV/360 mAs)	60	30452 108	30449 106	30460 110	30454 108	9,75
	80	30077 100	30071 102	30089 98	30079 100	8,39
	100	100 109	29630 107	29634 104	29631 107	6,16
	Referentni uzorak	28245 117	28241 119	28242 119	28243 119	---
(15 kV/420 mAs)	60	32999 121	32990 121	32396 123	32999 122	10,06
	80	32846 112	32841 114	32856 112	32847 113	9,79
	100	32390 118	32390 116	32396 117	32392 117	7,62
	Referentni uzorak	30650 112	30648 111	30641 113	30646 112	---

Stanje pokusa (napon/radiografska ekspozicija)	Debljina uzorka [mm]	$D_{sred\,1}$ $s_{Dsred\,1}$	$D_{sred\,2}$ $s_{Dsred\,2}$	$D_{sred\,3}$ $s_{Dsred\,3}$	$\overline{D_{sred}}$ $\overline{s_{D_{sred}}}$	Vrijednost dobrote
9 (15 kV/5 mAs)	60	34444 114	34439 118	34438 112	34441 115	7,59
	80	34466 112	34468 111	34477 116	34470 113	8,59
	100	34084 100	3483 104	34100 96	34089 100	8,78
	Referentni uzorak	32384 124	32379 124	32381 126	32381 125	---
10 (15 kV/30 mAs)	60	51690 147	51690 146	51675 148	51685 147	5,93
	80	51779 152	51780 515	51768 154	51775 153	5,49
	100	51000 157	51098 159	50909 158	51002 157	8,63
	Referentni uzorak	49209 144	49215 144	49221 144	49215 144	---
11 (15 kV/80 mAs)	60	55010 10	55019 10	55016 8	55015 9	3,33
	80	55041 13	55048 13	55037 10	55042 12	3,49
	100	55022 10	55021 10	55042 9	55028 10	3,55
	Referentni uzorak	54061 264	54061 264	54067 262	54063 264	---
12 (15 kV/160 mAs)	60	51416 7	51419 8	51404 5	51413 7	2,26
	80	51422 6	51429 6	51410 7	51420 6	2,90
	100	51410 6	51420 6	51427 7	51419 6	3,32
	Referentni uzorak	51356 13	51356 13	51355 13	51355 13	---

Prilog 3 - Stistički podaci analiziranog matematičkog modela za izračunavanje (predviđanje) odziva intenziteta zacrnjenja piksela u ovisnosti o parametrima komponenata sustava očitanja

Dijagnostičkim alatima programa Design Expert 8.0.7.1. dobivene statističke podatke analiziranog matematičkog modela za izračunavanje (predviđanje) odziva intenziteta zacrnjenja piksela u ovisnosti o parametrima komponenata sustava očitanja prema poglavlju 7.2.

Stanje pokusa	Stvarna vrijednost	Modelom izračunata vrijednost	Ostatak	Utjecaj na model	Interno Studentizirani ostaci	Ekstermo Studentizirani podaci	Razlika u odnosu na model	Cook-ova udaljenost
1.	113,26580	112,05470	1,21110	0,09436	0,64749	0,64493	0,20817	0,00624
2.	115,80900	113,95600	1,85296	0,08113	0,98349	0,98327	0,29217	0,01220
3.	120,57200	117,75880	2,81319	0,10229	1,51065	1,52409	0,51448	0,03715
4.	116,21800	116,63970	-0,42175	0,07584	-0,22321	-0,22177	-0,06353	0,00058
5.	117,68470	118,54110	-0,85638	0,06261	-0,45002	-0,44759	-0,11567	0,00193
6.	121,65490	122,34390	-0,68901	0,08377	-0,36623	-0,36408	-0,11009	0,00175
7.	121,67040	121,22480	0,44558	0,09436	0,23822	0,23669	0,07640	0,00085
8.	123,39140	123,12620	0,26523	0,08113	0,14077	0,13984	0,04155	0,00025
9.	126,55730	126,92890	-0,37162	0,10229	-0,19956	-0,19826	-0,06692	0,00065
10.	125,21910	127,27140	-2,05233	0,09436	-1,09723	-1,09877	-0,35466	0,01792
11.	127,73080	129,17280	-1,44200	0,08113	-0,76537	-0,76321	-0,22678	0,00739
12.	132,55730	132,97550	-0,41828	0,10229	-0,22461	-0,22317	-0,07533	0,00082
13.	133,96620	131,85650	2,10973	0,07584	1,11657	1,11846	0,32040	0,01462
14.	135,76820	133,75780	2,01035	0,06261	1,05644	1,05728	0,27324	0,01065
15.	139,91390	137,56060	2,35329	0,08377	1,25085	1,25572	0,37970	0,02044
16.	134,73800	136,44150	-1,70355	0,09436	-0,91077	-0,90971	-0,29364	0,01235
17.	136,43530	138,34290	-1,90758	0,08113	-1,01248	-1,01265	-0,30090	0,01293
18.	140,97360	142,14570	-1,17212	0,10229	-0,62941	-0,62683	-0,21159	0,00645
19.	132,90540	134,10080	-1,19542	0,09436	-0,63911	-0,63653	-0,20546	0,00608
20.	135,27080	136,00220	-0,73140	0,08113	-0,38821	-0,38597	-0,11469	0,00190
21.	140,29170	139,80500	0,48670	0,10229	0,26135	0,25970	0,08767	0,00111
22.	138,54050	138,68590	-0,14544	0,07584	-0,07698	-0,07646	-0,02190	0,00007
23.	140,08300	140,58730	-0,50430	0,06261	-0,26501	-0,26334	-0,06806	0,00067
24.	143,95330	144,39010	-0,43675	0,08377	-0,23215	-0,23066	-0,06975	0,00070
25.	143,26070	143,27100	-0,01032	0,09436	-0,00552	-0,00548	-0,00177	0,00000
26.	144,44720	145,17240	-0,72517	0,08113	-0,38490	-0,38267	-0,11371	0,00187
27.	150,21050	148,97510	1,23532	0,10229	0,66335	0,66082	0,22307	0,00716
28.	149,18010	148,60970	0,57042	0,09436	0,30496	0,30308	0,09783	0,00138
29.	151,51870	150,51110	1,00756	0,08113	0,53478	0,53218	0,15813	0,00361
30.	155,98420	154,31390	1,67030	0,10229	0,89693	0,89573	0,30237	0,01310
31.	149,13280	153,19480	-4,06196	0,07584	-2,14977	-2,20516	-0,63170	0,05418
32.	151,50290	155,09620	-3,59330	0,06261	-1,88827	-1,92235	-0,49682	0,03402
33.	155,20110	158,89890	-3,69789	0,08377	-1,96555	-2,00527	-0,60635	0,05046
34.	157,51810	157,77990	-0,26178	0,09436	-0,13995	-0,13902	-0,04487	0,00029

Stanje pokusa	Stvarna vrijednost	Modelom izračunata vrijednost	Ostatak	Utjecaj na model	Interno Studentizirani ostaci	Ekstermo Studentizirani podaci	Razlika u odnosu na model	Cook-ova udaljenost
35.	159,00170	159,68120	-0,67952	0,08113	-0,36066	-0,35853	-0,10653	0,00164
36.	161,95370	163,48400	-1,53027	0,10229	-0,82174	-0,81991	-0,27677	0,01099
37.	164,80980	163,82650	0,98330	0,09436	0,52570	0,52312	0,16885	0,00411
38.	167,22150	165,72780	1,49362	0,08113	0,79276	0,79075	0,23496	0,00793
39.	171,95280	169,53060	2,42220	0,10229	1,30069	1,30689	0,44116	0,02754
40.	172,65670	168,41150	4,24517	0,07584	2,24673	2,31174	0,66223	0,05918
41.	174,01920	170,31290	3,70628	0,06261	1,94764	1,98601	0,51327	0,03620
42.	177,58020	174,11570	3,46448	0,08377	1,84148	1,87240	0,56618	0,04429
43.	172,71680	172,99660	-0,27982	0,09436	-0,14960	-0,14861	-0,04797	0,00033
44.	174,54030	174,89800	-0,35766	0,08113	-0,18983	-0,18859	-0,05604	0,00046
45.	178,19750	178,70070	-0,50327	0,10229	-0,27025	-0,26855	-0,09065	0,00119
46.	170,61530	170,65590	-0,04061	0,09436	-0,02171	-0,02156	-0,00696	0,00001
47.	172,63770	172,55730	0,08045	0,08113	0,04270	0,04241	0,01260	0,00002
48.	174,83040	176,36010	-1,52971	0,10229	-0,82144	-0,81961	-0,27667	0,01098
49.	175,20730	175,24100	-0,03364	0,07584	-0,01781	-0,01768	-0,00507	0,00000
50.	177,11550	177,14240	-0,02688	0,06261	-0,01412	-0,01403	-0,00363	0,00000
51.	180,69870	180,94510	-0,24648	0,08377	-0,13101	-0,13014	-0,03935	0,00022
52.	179,27550	179,82600	-0,55054	0,09436	-0,29433	-0,29251	-0,09442	0,00129
53.	180,73030	181,72740	-0,99713	0,08113	-0,52924	-0,52665	-0,15649	0,00353
54.	184,27690	185,53020	-1,25332	0,10229	-0,67302	-0,67051	-0,22634	0,00737
55.	175,78800	176,59390	-0,80586	0,09436	-0,43084	-0,42845	-0,13830	0,00276
56.	177,64060	178,49530	-0,85470	0,08113	-0,45365	-0,45120	-0,13407	0,00260
57.	181,97880	182,29800	-0,31922	0,10229	-0,17142	-0,17029	-0,05748	0,00048
58.	181,24030	181,17900	0,06131	0,07584	0,03245	0,03223	0,00923	0,00001
59.	183,21410	183,08030	0,13380	0,06261	0,07031	0,06984	0,01805	0,00005
60.	186,43740	186,88310	-0,44572	0,08377	-0,23691	-0,23540	-0,07118	0,00073
61.	188,86070	185,76400	3,09665	0,09436	1,65556	1,67566	0,54087	0,04080
62.	190,52030	187,66540	2,85494	0,08113	1,51531	1,52894	0,45431	0,02896
63.	194,07410	191,46820	2,60594	0,10229	1,39936	1,40863	0,47550	0,03188
64.	188,25880	191,81060	-3,55181	0,09436	-1,89890	-1,93372	-0,62417	0,05367
65.	190,17220	193,71200	-3,53980	0,08113	-1,87881	-1,91223	-0,56820	0,04452
66.	194,34760	197,51480	-3,16720	0,10229	-1,70074	-1,72323	-0,58170	0,04709
67.	195,24870	196,39570	-1,14696	0,07584	-0,60703	-0,60442	-0,17314	0,00432
68.	196,40630	198,29710	-1,89074	0,06261	-0,99358	-0,99349	-0,25676	0,00942
69.	199,76820	202,09980	-2,33160	0,08377	-1,23932	-1,24390	-0,37613	0,02006
70.	202,55930	200,98080	1,57853	0,09436	0,84393	0,84227	0,27187	0,01060
71.	203,81510	202,88210	0,93292	0,08113	0,49516	0,49262	0,14638	0,00309
72.	206,84980	206,68490	0,16487	0,10229	0,08853	0,08794	0,02968	0,00013
73.	198,77830	198,64010	0,13818	0,09436	0,07388	0,07338	0,02369	0,00008
74.	200,58320	200,54150	0,04175	0,08113	0,02216	0,02201	0,00654	0,00001
75.	204,73500	204,34420	0,39072	0,10229	0,20981	0,20845	0,07037	0,00072
76.	207,49720	203,22510	4,27207	0,07584	2,26097	2,32748	0,66674	0,05993
77.	208,85220	205,12650	3,72569	0,06261	1,95784	1,99698	0,51610	0,03658
78.	212,34770	208,92930	3,41841	0,08377	1,81699	1,84633	0,55830	0,04312
79.	206,73850	207,81020	-1,07167	0,09436	-0,57295	-0,57033	-0,18409	0,00489
80.	207,64480	209,71160	-2,06684	0,08113	-1,09701	-1,09854	-0,32642	0,01518

Stanje pokusa	Stvarna vrijednost	Modelom izračunata vrijednost	Ostatak	Utjecaj na model	Interno Studentizirani ostaci	Ekstermo Studentizirani podaci	Razlika u odnosu na model	Cook-ova udaljenost
81.	211,29070	213,51440	-2,22367	0,10229	-1,19408	-1,19758	-0,40426	0,02321

Prilog 4 - Stistički podaci analiziranog matematičkog modela za izračunavanje (predviđanje) vrijednosti dobrote u ovisnosti o parametrima komponenata sustava očitanja

Dijagnostičkim alatima programa Design Expert 8.0.7.1. dobiveni statistički podaci analiziranog matematičkog modela za izračunavanje (predviđanje) vrijednosti dobrote u ovisnosti o parametrima komponenata sustava očitanja prema poglavlju 7.3.

Stanje pokusa	Stvarna vrijednost	Modelom izračunata vrijednost	Ostatak	Utjecaj na model	Interno Studentizirani ostaci	Ekstermo Studentizirani podaci	Razlika u odnosu na model	Cook-ova udaljenost
1.	5,79789	5,21042	0,58747	0,06173	0,82457	0,82281	0,21105	0,00895
2.	2,48489	2,76642	-0,28154	0,06173	-0,39516	-0,39296	-0,10079	0,00206
3.	3,74452	3,80635	-0,06184	0,06173	-0,08680	-0,08623	-0,02212	0,00010
4.	3,25964	4,23659	-0,97695	0,06173	-1,37125	-1,37936	-0,35380	0,02474
5.	1,35503	1,79259	-0,43756	0,06173	-0,61416	-0,61163	-0,15688	0,00496
6.	3,56779	2,83252	0,73527	0,06173	1,03201	1,03246	0,26482	0,01401
7.	3,14741	4,22818	-1,08076	0,06173	-1,51695	-1,53029	-0,39251	0,03028
8.	0,91207	1,78418	-0,87210	0,06173	-1,22408	-1,22816	-0,31502	0,01972
9.	2,78752	2,82411	-0,03659	0,06173	-0,05136	-0,05102	-0,01309	0,00003
10.	5,79757	5,21042	0,58715	0,06173	0,82412	0,82237	0,21093	0,00894
11.	2,54492	2,76642	-0,22151	0,06173	-0,31091	-0,30905	-0,07927	0,00127
12.	4,33748	3,80635	0,53112	0,06173	0,74548	0,74328	0,19065	0,00731
13.	3,48497	4,23659	-0,75162	0,06173	-1,05497	-1,05576	-0,27080	0,01464
14.	1,48303	1,79259	-0,30956	0,06173	-0,43450	-0,43217	-0,11085	0,00248
15.	3,56552	2,83252	0,73300	0,06173	1,02884	1,02924	0,26399	0,01393
16.	5,24846	4,22818	1,02028	0,06173	1,43206	1,44220	0,36992	0,02698
17.	2,90745	1,78418	1,12328	0,06173	1,57662	1,59248	0,40846	0,03271
18.	2,50879	2,82411	-0,31532	0,06173	-0,44258	-0,44023	-0,11292	0,00258
19.	5,49550	5,21042	0,28508	0,06173	0,40013	0,39791	0,10206	0,00211
20.	2,47646	2,76642	-0,28997	0,06173	-0,40699	-0,40475	-0,10382	0,00218
21.	4,45358	3,80635	0,64723	0,06173	0,90844	0,90739	0,23274	0,01086
22.	3,81155	4,23659	-0,42504	0,06173	-0,59659	-0,59404	-0,15237	0,00468
23.	2,04096	1,79259	0,24837	0,06173	0,34861	0,34659	0,08890	0,00160
24.	2,88432	2,83252	0,05180	0,06173	0,07270	0,07222	0,01853	0,00007
25.	5,77381	4,22818	1,54563	0,06173	2,16944	2,22512	0,57073	0,06193
26.	4,08734	1,78418	2,30316	0,06173	* 3.233	3,45788	0,88693	0,13750
27.	2,75775	2,82411	-0,06636	0,06173	-0,09314	-0,09253	-0,02373	0,00011
28.	5,86829	5,21042	0,65787	0,06173	0,92338	0,92248	0,23661	0,01122
29.	2,53923	2,76642	-0,22719	0,06173	-0,31889	-0,31699	-0,08131	0,00134

Stanje pokusa	Stvarna vrijednost	Modelom izračunata vrijednost	Ostatak	Utjecaj na model	Interno Studentizirani ostaci	Ekstermo Studentizirani podaci	Razlika u odnosu na model	Cook-ova udaljenost
30.	3,16147	3,80635	-0,64489	0,06173	-0,90516	-0,90407	-0,23189	0,01078
31.	5,37225	4,23659	1,13566	0,06173	1,59401	1,61064	0,41312	0,03343
32.	1,98976	1,79259	0,19717	0,06173	0,27674	0,27505	0,07055	0,00101
33.	3,11639	2,83252	0,28387	0,06173	0,39844	0,39622	0,10163	0,00209
34.	2,96985	4,22818	-1,25833	0,06173	-1,76618	-1,79168	-0,45956	0,04105
35.	1,06812	1,78418	-0,71605	0,06173	-1,00505	-1,00512	-0,25781	0,01329
36.	2,85755	2,82411	0,03344	0,06173	0,04694	0,04663	0,01196	0,00003
37.	6,43481	5,21042	1,22439	0,06173	1,71854	1,74137	0,44665	0,03886
38.	2,86824	2,76642	0,10181	0,06173	0,14290	0,14198	0,03642	0,00027
39.	4,59767	3,80635	0,79132	0,06173	1,11069	1,11242	0,28533	0,01623
40.	4,15264	4,23659	-0,08395	0,06173	-0,11783	-0,11707	-0,03003	0,00018
41.	2,38362	1,79259	0,59103	0,06173	0,82957	0,82785	0,21234	0,00906
42.	3,24116	2,83252	0,40864	0,06173	0,57357	0,57102	0,14646	0,00433
43.	4,04198	4,22818	-0,18620	0,06173	-0,26134	-0,25973	-0,06662	0,00090
44.	1,77906	1,78418	-0,00512	0,06173	-0,00719	-0,00714	-0,00183	0,00000
45.	2,60727	2,82411	-0,21683	0,06173	-0,30435	-0,30252	-0,07760	0,00122
46.	4,52171	5,21042	-0,68872	0,06173	-0,96668	-0,96626	-0,24784	0,01230
47.	1,49791	2,76642	-1,26851	0,06173	-1,78048	-1,80681	-0,46344	0,04171
48.	1,81230	3,80635	-1,99405	0,06173	-2,79884	-2,93578	-0,75301	0,10307
49.	2,96876	4,23659	-1,26783	0,06173	-1,77952	-1,80579	-0,46318	0,04167
50.	0,36435	1,79259	-1,42824	0,06173	-2,00467	-2,04628	-0,52486	0,05288
51.	4,23828	2,83252	1,40576	0,06173	1,97312	2,01232	0,51615	0,05123
52.	3,58593	4,22818	-0,64225	0,06173	-0,90146	-0,90033	-0,23093	0,01069
53.	1,58682	1,78418	-0,19736	0,06173	-0,27701	-0,27532	-0,07062	0,00101
54.	2,95396	2,82411	0,12985	0,06173	0,18226	0,18109	0,04645	0,00044
55.	4,57607	5,21042	-0,63435	0,06173	-0,89037	-0,88914	-0,22806	0,01043
56.	2,40246	2,76642	-0,36397	0,06173	-0,51086	-0,50836	-0,13039	0,00343
57.	3,06476	3,80635	-0,74160	0,06173	-1,04090	-1,04148	-0,26713	0,01426
58.	4,30808	4,23659	0,07149	0,06173	0,10034	0,09968	0,02557	0,00013
59.	1,38824	1,79259	-0,40435	0,06173	-0,56754	-0,56499	-0,14492	0,00424
60.	2,51848	2,83252	-0,31404	0,06173	-0,44078	-0,43843	-0,11246	0,00256
61.	4,26529	4,22818	0,03711	0,06173	0,05209	0,05175	0,01327	0,00004
62.	2,09730	1,78418	0,31312	0,06173	0,43949	0,43715	0,11213	0,00254
63.	2,65096	2,82411	-0,17315	0,06173	-0,24303	-0,24152	-0,06195	0,00078
64.	5,91173	5,21042	0,70131	0,06173	0,98435	0,98415	0,25243	0,01275
65.	2,98060	2,76642	0,21418	0,06173	0,30062	0,29881	0,07664	0,00119
66.	3,76980	3,80635	-0,03656	0,06173	-0,05131	-0,05097	-0,01307	0,00003
67.	4,29189	4,23659	0,05530	0,06173	0,07761	0,07710	0,01978	0,00008
68.	2,44834	1,79259	0,65575	0,06173	0,92041	0,91947	0,23584	0,01115
69.	2,30960	2,83252	-0,52292	0,06173	-0,73397	-0,73172	-0,18768	0,00709
70.	3,74045	4,22818	-0,48773	0,06173	-0,68457	-0,68216	-0,17497	0,00617
71.	1,68794	1,78418	-0,09624	0,06173	-0,13508	-0,13421	-0,03442	0,00024
72.	2,42208	2,82411	-0,40203	0,06173	-0,56428	-0,56174	-0,14408	0,00419
73.	6,16899	5,21042	0,95856	0,06173	1,34543	1,35276	0,34698	0,02382
74.	3,09390	2,76642	0,32747	0,06173	0,45964	0,45724	0,11728	0,00278
75.	3,64609	3,80635	-0,16027	0,06173	-0,22495	-0,22354	-0,05734	0,00067

Stanje pokusa	Stvarna vrijednost	Modelom izračunata vrijednost	Ostatak	Utjecaj na model	Interno Studentizirani ostaci	Ekstermo Studentizirani podaci	Razlika u odnosu na model	Cook-ova udaljenost
76.	4,17987	4,23659	-0,05672	0,06173	-0,07962	-0,07909	-0,02029	0,00008
77.	2,10187	1,79259	0,30928	0,06173	0,43410	0,43177	0,11075	0,00248
78.	2,92894	2,83252	0,09642	0,06173	0,13533	0,13446	0,03449	0,00024
79.	3,90133	4,22818	-0,32684	0,06173	-0,45876	-0,45636	-0,11705	0,00277
80.	2,51884	1,78418	0,73467	0,06173	1,03117	1,03161	0,26460	0,01399
81.	2,66283	2,82411	-0,16128	0,06173	-0,22637	-0,22495	-0,05770	0,00067

KRATKI ŽIVOTOPIS

Danijela Hrman rođena je 18. veljače 1977. godine u Prijedoru, Bosna i Hercegovina. Nakon završene Strojarsko-tehničke škole „Lucijan Vranjanjin“ u Zagrebu 1995. godine upisuje sveučilišni dodiplomski Studij zrakoplovstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirala je 2002. godine na smjeru Proizvodno strojarstvo. Poslijediplomski studij, smjer Industrijsko inženjerstvo i menadžment upisuje akademske godine 2002/2003. Od lipnja 2002. do ožujka 2008. radi kao znanstvena novakinja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u Zavodu za kvalitetu na Katedri za nerazorna ispitivanja. Aktivno surađuje u znanstveno-istraživačkom radu. Od 2002. do 2008. godine bila je uključena u izvođenje nastave kolegija Katedre za nerazorna ispitivanja te ostalih nastavnih i znanstvenih aktivnosti.

Od ožujka 2008. radi u Laboratoriju za građevinsku fiziku, Zavodu za materijale i konstrukcije, Laboratorij IGH, Instituta IGH, d.d. akreditiranog od Hrvatske akreditacijske agencije (HAA) prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025 za ispitivanja toplinsko-izolacijskih proizvoda za primjenu u graditeljstvu, izabranih ispitivanja: građevnih materijala i proizvoda s obzirom na toplinu, vlagu i akustička svojstva, toplinskih značajki zgrada, svojstava prozora i vrata, boja i lakova, te građevnih materijala i elemenata u požaru.

Majka je dvije djevojčice.

Aktivno se služi engleskim jezikom.

SHORT BIOGRAPHY

Danijela Hrman was born on 18th of February 1977 in Prijedor, Bosnia and Hercegovina. After completition of the Secondary technical school „Lucijan Vranjanjin“ in Zagreb in 1995 enrolled on Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. Graduated Aircraft Engineering in 2002. Enrolled Postgraduate study at the Department of Industrial Engineering and Management in academic year 2002/2003. From July 2002 till March 2008 worked as a research assistant at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Arhitecture in Zagreb, Quality Department, Chair of Nondestructive Testing. Active in scientific research. Since 2002 actively involved in lecturing courses of the Quality Department.

Since March 2008 works in Laboratory for Building Physics, Department for Materials and Structures, Laboratory IGH, Institut IGH, d.d. in Zagreb. Laboratory for Building Physics is accredited by the Croatian Accreditation Agency (HAA) according to the standard HRN EN ISO/IEC 17025 requirements for testing of thermal-insulation building products, selected testing of: building materials and products regarding thermal, hygric and acoustic properties, thermal characteristics of buildings, windows and doors properties, paints and varnishes, and fire-behavior of building materials and elements.

Mother of two girls.

Fluent in English.