

Sveučilište u Zagrebu

Grafički fakultet

Ana Čačić, Tea Čapko

**UTJECAJ PROCESA STARENJA NA POSTOJANOST  
INFORMACIJA U TISKANIM RAČUNALNO  
GENERIRANIM HOLOGRAMIMA**

Zagreb, 2021.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za opća i temeljna znanja pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Damira Modrića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2020./2021.

## **POPIS KRATICA**

CGH	Computer Generated Hologram
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal – Oxide Semiconductor
CtP	Computer to Plate
DPI	Dots per Inch
FT	Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
DFT	Discrete Fourier Transform
DOVID	Diffractive Optically Variable Image Device
PGM	Portable GrayMap
EPS	Encapsulated PostScript
PDF	Portable Document Format
PVC	Polyvinyl Chloride (oznaka u tekstu)
PC	Poly Chloride (oznaka u tekstu)

# SADRŽAJ RADA

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	3
2.1. Holografija .....	3
2.1.1. Klasifikacija i tipovi holograma .....	4
2.2. Računalno generirani hologrami .....	5
2.2.1. Numerička rekonstrukcija holograma .....	7
2.2.2. Metode kodiranja i snimanja holograma .....	8
2.2.3. Prednosti i nedostaci računalno generiranih holograma.....	9
2.3. Zaštitni elementi na dokumentima .....	10
3. CILJEVI RADA .....	13
4. METODOLOGIJA.....	14
4.1. Računalno generiranje holograma.....	15
4.2. Izrada pripreme za tisak .....	16
4.3. Tisak računalno generiranih holograma.....	19
4.4. Proces starenja.....	20
5. ANALIZA I OBRADA PODATAKA .....	22
5.1. OPTIČKA REKONSTRUKCIJA .....	22
5.1.1. SIGNAL .....	23
5.1.2. ŠUM .....	35
5.2. MIKROSKOPSKO MJERENJE.....	48
6. RASPRAVA.....	54
7. ZAKLJUČAK.....	59
8. ZAHVALA.....	61
9. LITERATURA.....	62
10. POPIS SLIKA I TABLICA .....	64
11. SAŽETAK .....	67
12. SUMMARY.....	68

## 1. UVOD

Holografija je jedan od značajnijeg razvoja moderne optike i samim time sve više postaje zastupljena u područjima grafičke tehnologije, vizualizacije te dizajna posebice kada se govori o zaštitnim elementima protiv krivotvorenja. Osim u tome, holografija sve veću primjenu pronalazi i u multimediji prvenstveno zbog mogućnosti prikaza dubinskih parametara što raniji prikazi slika i grafika na 2D plošnom zaslonu i tiskanim medijima nisu omogućavali.

Općenito se holografiju može definirati kao tehniku snimanja i rekonstrukcije svjetlosne valne fronte objekta, a osim klasične holografije, većim tehnološkim napretkom i razvojem suvremenih računala dolazi do razvoja računalne holografije koja predstavlja potpuno novi i jednostavniji način generiranja holograma. Dok klasična holografija zahtjeva laboratorijske uvjete i specifičnu opremu, za generiranje digitalnog holograma dovoljno je imati računalo. Takvim pristupom, računalna holografija rješava bitne nedostatke klasične holografije i postaje dostupna gotovo svima.

Računalno generirani hologrami, upravo zbog dostupnosti i lakoće generiranja, postaju sve primjenjiviji u područjima zaštite informacija i proizvoda, multimedijским prikazima, vizualizacijama scena i modela te ostalim vizualnim komunikacijama. Njihova prednost (u odnosu na klasične holograme) očituje se u slobodi dizajna i potpunoj kontroli generiranja objektnog i referentnog vala. Sloboda dizajna vidljiva je u korištenju različitih digitalnih elemenata kao modela te sitnih detalja, primjerice logotipa, koje nije moguće ostvariti u realnom okruženju. Osim toga, takve je detalje moguće nasumično generirati tako da nitko ne zna gdje se nalaze.

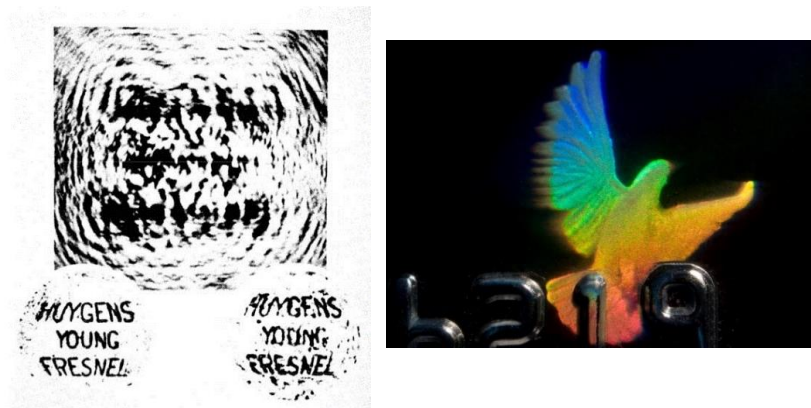
Upravo je široka primjena računalno generiranih holograma potaknula razne pristupe izračunu i proizvodnim metodama, a time dolazi do razvoja novih računalnih programa koji bi omogućili proizvodnju tiskanih holograma specifičnih parametara. Danas je sve češći odabir korištenja standardnih grafičkih tehnika za ispis holograma umjesto klasične proizvodnje na specijaliziranim strojevima. Kako bi svaki tisak računalno generiranih holograma bio uspješan, potrebno ih je pravilno pripremiti ovisno o tehničkim specifikacijama odabranih tehnika ispisa.

S obzirom da svaki hologram sadrži neku vrstu informacije, postavlja se pitanje koliko će ta informacija biti postojana nakon određenog vremena. Budući da informacija u hologramu na dokumentima mora biti postojana u periodu vijeka trajanja dokumenta, ovaj rad će ispitati postojanost tih informacija u ovisnosti o starenju uzoraka UV zračenjem kada se radi o računalno generiranim hologramima tiskanim ofset tehnikom na različitim vrstama materijala koji se upotrebljavaju u proizvodnji vrijednosnih dokumenata.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Holografija

Holografija (grč. „holos = cjelovit“ i „graphein = pisati“) označava postupak trodimenzionalnog snimanja i prikazivanja objekata, odnosno informacija, a zbog svojeg širokog područja primjene možemo ju nazvati kao jednu od najzanimljivijih razvoja moderne optike [1]. U teoriji, hologram je zabilježeni, to jest izračunati, difrakcijski uzorak koji rekonstruiran generira određenu valnu frontu. Za razliku od fotografije gdje se intenzitet svjetlosnog vala zapisuje na fotografskoj ploči ili filmu, u holografiji se na fotografsku ploču snima amplituda i faza svjetlosnog vala koji pada na istu. Shodno tome, svjetlosni valovi rekonstruirani pomoću holograma daju realistični trodimenzionalni prikaz promatranog predmeta. Hologram jednom riječju možemo nazvati „prozorom“ kroz koji gledamo trodimenzionalnu sliku scene, odnosno predmeta. Sama ideja holografije ostvarena je 1948. kada je Denis Gabor, britanski fizičar i nobelovac, mađarskog podrijetla, izveo prve eksperimente pomoću elektrolyčne živine svjetiljke, koja je u to doba bila najkoherentniji izvor svjetlosti, što je bilo nužno za izradu holograma [2]. Gaborovi su hologrami imali mnogo nesavršenosti zbog tehnoloških ograničenja, a glavni nedostatak njegove tehnike bila je loša kvaliteta rekonstruirane slike jer se konjugirana slika preklapala s originalom. Njegovu su metodu usavršili Leith i Upatnieks koji su koristili odvojeni referentni val, usmjeren na fotografsku ploču pod prihvatljivim kutem na objektni val. Rezultat takve metode bile su dvije slike dovoljno razmaknute jedna od druge te od izravne zrake što je dovelo do razvoja tehnike holograma izvan osi (off – axis hologram) [3][4]. Takav razvoj tehnike zapisa, te razvoj laserske tehnologije doveo je do značajnog pomaka u holografiji. Daljnjim razvojem tehnologije otvaraju se nove mogućnosti napretka u holografiji što se može zaključiti iz mnoštva novih postignuća od kojih je jedno generiranje holograma pomoću računala.



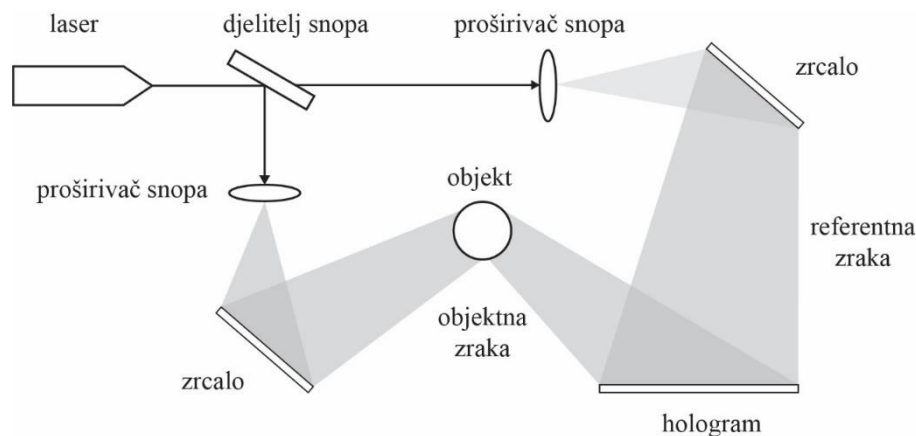
*Slika 1: Prvi hologram (lijevo), rainbow hologram (desno)*

*Izvor: <https://images.app.goo.gl/RREx8hVNqtKoDtQJ7>,  
<https://images.app.goo.gl/sJmwJcQ18xWf58Cz9>*

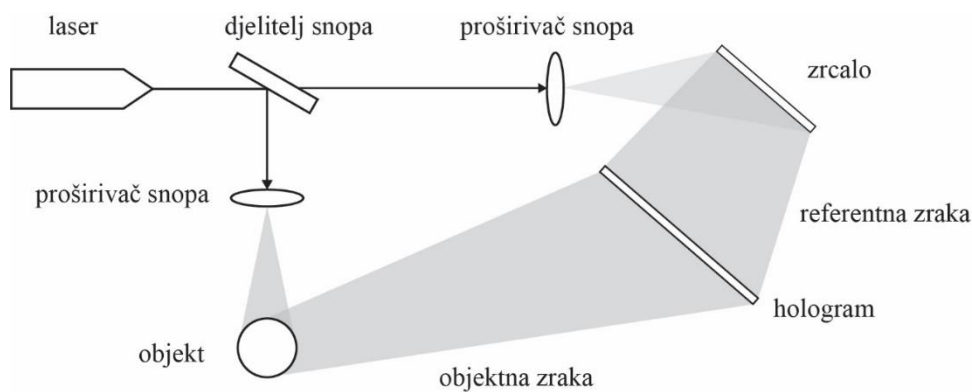
### **2.1.1. Klasifikacija i tipovi holograma**

Holograme se može klasificirati ovisno o nekoliko kriterija. Glavna podjela je obzirom na tri bitne karakteristike holograma. Ovisno o tome kako raspršuju svjetlo hologrami mogu biti transmisijski, kod kojih difraktirana zraka prolazi kroz hologram i izlazi na suprotnoj strani od upadne zrake, i refleksijski, koji raspršuje svjetlo na stranu upadne zrake. Ovisno o modulaciji svjetla, hologrami se mogu podijeliti na amplitudne i fazne. Kod amplitudnih dolazi do modulacije intenziteta što znači da je difrakcijsko polje djelomično oslabljeno apsorpcijom prilikom prolaska svjetla kroz interferentnu strukturu. Za razliku od njih, fazni hologrami imaju modulaciju refrakcijskog indeksa pri čemu intenzitet svjetlosti koja prolazi kroz hologram nije oslabljen što može dovesti do veće učinkovitosti. Treća podjela je obzirom na količinu interakcije svjetlosti s centrima raspršenja na površini holograma pa se tako dijele na tanke i debele holograme [3].





*Slika 2: Shema snimanja transmisijskog holograma*



*Slika 3: Shema snimanja refleksijskog holograma*

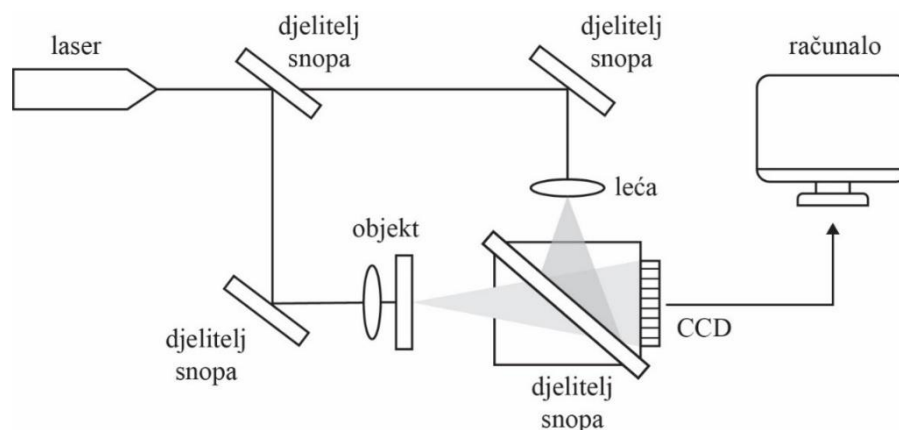
## 2.2. Računalno generirani hologrami

Računalno generirana holografija je postupak upotrebe računala za simulaciju valne optike i procesa snimanja kod klasične holografije. Na taj se način fizikalni principi prebacuju u digitalno područje, te je moguće izbjeći veliki broj nedostataka klasične holografije. Ideja o digitalnoj rekonstrukciji optičkih valnih fronti pojavila se davne 1960., a 1971. se prvi puta spominje koncept „digitalne holografije“ [9].

Znamo da su u holografiji vrlo bitna tri osnovna elementa: objekt, izvor svjetlosti te hologram. Ukoliko su dva elementa ranije poznata, treći se može lako izračunati

korištenjem računala. Zbog toga, računalno generirani hologrami pojednostavljaju proizvodnju u odnosu na klasične holograme jer se njihov difrakcijski uzorak ne dobiva snimanjem, nego se izračunava na osnovu integralnih jednažbi difrakcije. Računalom je moguće generirati holograme predmeta koji ne postoje ili koje eksperimentalno nije moguće izvesti. To omogućava generiranje holograma unosom željenih parametara (realna veličina, gustoća, pozicija u 3D prostoru) raznih trodimenzionalnih modela. Računalno generiranje holograma zahtjeva značajne računalne resurse kako bi se u optimalnom vremenu izračunao hologram [3][5].

Digitalna holografija, za razliku od klasične analogne holografije, snima svjetlost pomoću CCD (Charge – Coupled Device) ili CMOS (Complementary Metal – Oxide Semiconductor) senzora, na način da zamjenjuje fotografski film CCD ili CMOS kamerom. Takva kamera prenosi sliku na računalo koje ju kasnije spremi kao hologram. CCD je zapravo elektronički uređaj koji se koristi za zapisivanje slika predmeta, pohranu podataka ili prijenos električnog naboja. CCD uređaji sastavljeni su od stotina tisuća fotoosjetljivih dioda koje bilježe jakost svjetla koje prime te onda tu vrijednost pretvaraju u električni naboj. Jakost naboja proporcionalna je jakosti svjetla koje dioda primi. Naboj koji se očita s pojedine diode pretvara se u piksel. CCD uređaji se mogu podijeliti na tri vrste: uređaji s izravnim iščitavanjem, uređaji s prijenosom slike te uređaji s međulinijskim prijenosom. Sve tri vrste pogodne su za digitalnu holografiju, ovisno o primjeni koju zahtjeva. Digitalna je holografija pronašla brojne primjene koje su uglavnom usmjerene na mikromjerenja, međutim postoji i nekoliko multimedijских aplikacija [10][11][12].



**Slika 4:** Postava digitalne holografije - snimanje na CCD

Osnovne faze u sintezi računalno generiranih holograma su:

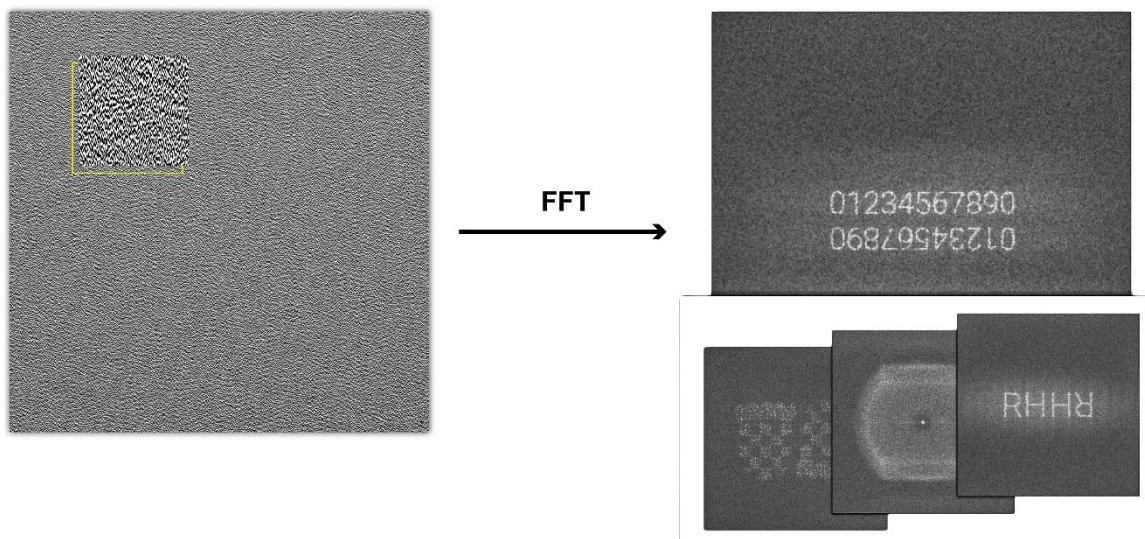
- Formuliranje matematičkih modela predmeta i upotrebe holograma
- Izračunavanje matematičkog holograma ili raspodjele amplitude i faze vala u hologramskoj ravnini
- Kodiranje uzoraka matematičkog holograma zbog snimanja na fizički medij
- Izrada holograma

Matematički modeli objekta namijenjeni su specificiranju amplitude i fazne raspodjele vala objekta. Tako se razlikuju dvije vrste modela: dvodimenzionalni i trodimenzionalni skupovi točaka te modeli koji predstavljaju objekte kao kompozicije elementarnih difrakcijskih elemenata poput raspršenih točaka, dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih krivulja, proreza i tako dalje. Računanje matematičkih modela simulira numeričko širenje valova za odabrane modele predmeta i upotrebu holograma. To dovodi do matematičkih holograma to jest matrica složenih brojeva koji predstavljaju amplitude i faze hologramskih uzoraka. Za izradu holograma te brojeve treba pretvoriti u niz brojeva koji kontroliraju optička svojstva snimljenog fizičkog medija korištenog za snimanje, generiranje holograma [6]. Obzirom na aproksimaciju koja se koristi za izračunavanje interferencijskog uzorka, računalno generirani hologrami dijele se na Fourierove ili Fresnelove. Fourierovi hologrami difraktiraju dvodimenzionalnu sliku u beskonačnost, a za približavanje slike je potrebna leća, dok s druge strane Fresnelovi hologrami mogu reproducirati trodimenzionalni aspekt scene, a slika se može generirati bez upotrebe leće [7].

### **2.2.1. Numerička rekonstrukcija holograma**

Kako bi se dobio računalno generirani hologram, potrebno je slijediti dva koraka. Prvi je izračunati složenu amplitudu objektnog vala unutar holografske ravnine ili drugim riječima Fourierovu transformaciju amplitude u objektnom prostoru. Drugi korak uključuje upotrebu dobivenih vrijednosti Fourierove transformacije za stvaranje holograma koji rekonstruira objektni val kada je pravilno osvjetljen [5]. Fourierova

transformacija (FT) predstavlja jedan od najkorisnijih matematičkih alata prilikom analize digitalnih holograma. Ona omogućuje opis gotovo svakog signala kao superpozicije ponderiranih periodičnih funkcija u određenom opsegu frekvencija. Prilikom rekonstrukcije holograma koristi se diskretna Fourierova transformacija ili skraćeno DFT koja se može smatrati nizom jednako raspoređenih delta funkcija čija je amplituda modulirana Fourierovim koeficijentima. Diskretna Fourierova transformacija poznata je kao vrlo dugotrajna operacija koja prilikom izračuna s  $N$  točaka uzoraka daje računalnu složenost od  $N^2$ . Takva složenost smanjuje se upotrebom brze Fourierove transformacije (FFT) odnosno algoritma razvijenijeg u novije doba koji brže i jednostavnije izračunava diskretnu Fourierovu transformaciju niza te njegovu inverznu funkciju [3][8].



*Slika 5: Prikaz numeričke rekonstrukcije holograma*

## **2.2.2. Metode kodiranja i snimanja holograma**

Mediji za snimanje računalno generiranih holograma mogu biti klasificirani u tri kategorije: amplitudni mediji, fazni mediji te kombinacija prethodna dva. Kontrolirani optički parametar amplitudnih medija je faktor intenziteta svjetlosti ili refleksije. Kod faznih se medija optička debljina može kontrolirati primjerice mijenjanjem indeksa loma ili fizičke debljine. Kombinirani mediji, kao što sama riječ kaže, su kombinacija

amplitudnih i faznih medija što znači da omogućuju neovisnu kontrolu intenziteta svjetlosti i optičke debljine. Za moduliranje optičkih parametara gore navedenih medija potrebni su posebni digitalno kontrolirani uređaji za snimanje holograma. Međutim, takvi uređaji još uvijek nisu dostupni pa se umjesto njih koriste računala dizajnirana za ispis znakova, grafikona i slika u sivim ili tonovima u boji. Karakteristika takvih uređaja je ta što izvode binarnu odnosno dvorazinsku modulaciju optičkih parametara medija. Tako se amplitudni i fazni mediji nazivaju binarnim medijima. Proces izvođenja binarne modulacije znatno pojednostavljuje proizvodnju holograma jer njegova propusnost ima samo dvije razine – nula i jedan [5][6].

### **2.2.3. Prednosti i nedostaci računalno generiranih holograma**

Glavna prednost računalno generirane holografije je upravo računalo. Za razliku od klasične holografije koja zahtjeva laboratorij i skupocjenu opremu kako prisutnost malih vibracija i nečistoća u zraku ne bi narušavali kvalitetu holograma, računalnoj holografiji je potrebno dovoljno jako računalo i odgovarajući softver. To uklanja prepreku poznavanja fizike i laboratorijske opreme što znači da holografija postaje pristupačnija širem krugu ljudi. Nadalje, u računalno generiranoj holografiji je moguće za svaku točku holograma posebno odrediti kakvu informaciju sadrži. Na taj se način u holograme mogu implementirati razni efekti koji u stvarnosti nisu mogući, primjerice animacije ili 3D scene. Osim kao prednost naspram klasične holografije, to je velika prednost kod kreiranja sigurnosnih holograma [3][13].

Nedostaci računalno generirane holografije leže u velikoj količini podataka koji moraju biti izračunati. Sljedeći nedostatak je manjak komercijalnih softverskih alata za generiranje i rekonstrukciju holograma. Prilikom kreiranja klasičnih holograma dobiva se materijalni, opipljivi hologram dok je rezultat računalno generiranih holograma slikovna datoteka. Takvu je datoteku potrebno prebaciti u materijalni oblik raznim tehnikama tiska [13].

### 2.3. Zaštitni elementi na dokumentima

Hologrami su tijekom godina evoluirali od ukrasnih slika do vjerodostojnih sigurnosnih elemenata. Holografija je, tako, svoju komercijalnu primjenu pronašla u sigurnosnoj industriji prvenstveno jer stvara visoku razinu zaštite od krivotvorenja. Hologrami su atraktivne optičke komponente kod kojih postoji mnoštvo mogućnosti za pogreške, a samo će najiskusniji izbjeći takve zamke [14][15] [18]. Može se reći da je najbrže rastuće područje za upotrebu holograma sigurnost i provjera autentičnosti proizvoda. Dodavanje holograma dokumentima, novčanicama, kreditnim karticama, zaštitnim naljepnicama pokazalo se kao nenadmašiva zaštita. Međutim, kako je ta tehnologija postala dostupna gotovo svima, postoji potreba za poboljšanjem otpornosti holograma na krivotvorenje što znači korištenje vizuala koji se teško krivotvore, a s druge strane koje je lako primijetiti [16][17].



*Slika 6: Primjeri holograma kao zaštitnih elemenata*

*Izvor: <https://images.app.goo.gl/NNxWgE3VRtjn5PqU8>*

Hologrami spadaju u skupinu poznatu kao difraktivni optički varijabilni slikovni uređaji ili skraćeno DOVID, a zbog svoje visoke cijjenjenosti i načina izrade, u koji se podrazumijeva skupa, specijalizirana i tehnološki napredna oprema, ne mogu se kopirati kopirnim uređajima ili skenerima. Najnaprednije tehnologije iz te skupine obično su zasnovane na tehnikama mikrolitografije te zbog toga nude niz svojstava nemogućih za kopiranje pomoću klasičnih holografskih tehnika. Važnost stavljanja sigurnosnih značajki na proizvod ili dokument zapravo ovisi o veličini potencijalnog gubitka. Jednostavnije, hologram neće spriječiti krivotvorenje proizvoda, ali će ga znatno otežati

[3]. Najvažnije vrste optički varijabilnih uređaja su profili s rubnim rešetkama (trokutasta rešetka) te rešetke nultog reda (sinusoidna rešetka). Profili s rubnim rešetkama difraktiraju dolazno svjetlo samo u jednom smjeru, dok rešetke nultog reda formiraju element koji mijenja boju u izravnom odrazu. Obje vrste su iznimno osjetljive u proizvodnji pa se tako koriste samo za vrhunske sigurnosne aplikacije [17].

Kako bi hologram bio učinkovit, mora biti dio sigurnosnog programa čiji je zadatak informirati o dizajnu i razvoju stvarnog holograma. To se postiže dobrim planiranjem i artikulacijom problema koji se želi riješiti, a zatim definiranjem sigurnosnih ciljeva [18]. Optički elementi imaju veliku prednost zbog visokog stupnja slobode dizajna gdje se komplicirane i nepostojeće slike mogu rekonstruirati uz visoku difrakcijsku učinkovitost. Tako bi se hologram slikovnog tipa trebao koristiti za jednostavnu provjeru autentičnosti pomoću izvora bijele svjetlosti, a Fresnelovi i Fourierovi tipovi holograma za uređaje protiv krivotvorenja kao što su primjerice složena provjera autentičnosti i kriptogrami s koherentnim monokromatskim izvorom svjetlosti [15]. DOVID elementi na bazi rešetke dobro su zastupljeni u sigurnosnoj industriji ponajprije zbog jasnoće slike i dobrog ponašanja na hrapavim površinama poput papira novčanice. Korištenjem računalno generiranih holograma kao zaštitnih elemenata omogućava se korištenje kompliciranih 3D modela i višestrukih scena, unos specifičnih parametara te uključivanje skrivenih informacija. Skrivena su informacije vrlo popularne jer ih je jednostavno kreirati, a krivotvoritelj ne može znati za njih niti ih lako pronaći. Takvi podaci imaju ograničenu vrijednost osim ako ih je moguće detektirati u trenutku korištenja dokumenta [3][17].

2007. godine predstavljena je nova metoda kreiranja tajnih kodova unutar zaštitnih holograma koja bi trebala unaprijediti borbu protiv krivotvorenja. Kreiranje tajnih kodova olakšava višestupanjsku provjeru autentičnosti kao i lakše premještanje sigurnosnog holograma kroz određeni Moireov obrazac generiran tijekom postupka provjere. Za razliku od vidljivih sigurnosnih holograma, tajni kodovi koji su u obliku varijacija čiste faze ne mogu biti otkriveni instrumentom osjetljivim na intenzitet što je u ovom slučaju velika prednost. Takvi se kodovi stvaraju ometanjem fazno moduliranog objektnog vala interferometrijskim referentnim valom izvedenim iz posebno proizvedenog hologramskog ključa. Tijekom sigurnosne provjere holograma osvjetljenje izvornim referentnim valom generira specifičan Moireov uzorak u promatračkoj ravnini. Glavna karakteristika tog uzorka je da nestaje samo savršenim premještanjem izvornog

sigurnosnog holograma. Prednost korištenja ovakvih kodova je što oni ostaju skriveni sve dok se na rekonstruiranoj fronti vala ne izvrši postupak dekodiranja kako bi se njihove faze pretvorile u varijacije intenziteta [19]. Druga inovacija je primjena vodenog žiga u sklopu računalno generiranih holograma. Vodeni žig dizajniran je tako da „nadgleda“ cjelovitost slike to jest da dokaže cjelovitost slike ako sadržaj slike nije narušen. Međutim, ako se dijelovi slike zamjene, podaci o vodenom žigu bi trebali ukazati na krivotvorenje. Kako bi se postigla bolja sigurnost koristi se metoda tajnog ključa. Korištenje vodenog žiga u sklopu računalno generirane holografije ima važnu prednost jer se može otkriti svaka manipulacija kojom se mijenja vizualni sadržaj [20].

Glavne prednosti izrade sigurnosnih zaštitnih računalno generiranih holograma zasigurno su mogućnost kontrole generiranja objektnog i referentnog vala te korištenje različitih digitalnih elemenata kao model i generiranja sitnih detalja (primjerice kodova) oko njega koje nije moguće realizirati u realnom okruženju. Takve je detalje moguće generirati nasumice što znači da ni kreator ne zna gdje se nalaze. Osim toga, računalno generirana holografija omogućava izradu jeftinih i jednostavnih sigurnosnih uređaja za očitavanje ili dekodiranje koji pouzdano otkrivaju autentičnost dokumenta [3].



### 3. CILJEVI RADA

Fizička svojstva dokumenata trpe određene promjene uslijed različitih vanjskih utjecaja koji se događaju za vrijeme korištenja dokumenata. Shodno tome, promjene se događaju i na zaštitnim elementima što može narušiti informaciju koja je pohranjena u tim elementima, a samim time i zaštitu od krivotvorenja.

Cilj rada je utvrditi koliko će računalno generirani hologram, kao zaštitni element na dokumentu, zadržati postojanost informacija prilikom vremenskog starenja samog dokumenta u uvjetima specifičnim za Europu (ISO/IEC 24789 – 2), a sve sa svrhom implementacije bolje i sigurnije zaštite na dokumentima te sprječavanja krivotvorenja.

Specifični ciljevi rada su:

- a) Utvrditi postojanost informacija na hologramima kroz mikroskopska i optička mjerenja
- b) Provesti istraživanje utjecaja starenja na otisak, specifično na njegov pigment
- c) Odrediti kako se ponašaju polimerni materijala prilikom starenja.

Na temelju iznesenog postavljene su sljedeće hipoteze:

1. Moguće je napraviti zadovoljavajuću optičku rekonstrukciju računalno generiranog holograma tiskanog ofset tehnikom tiska na transparentne materijale UV bojom.
2. Nakon postupka starenja očekuje se da će hologram zadržati optimalnu kvalitetu informacija.
3. Dobiveni rezultati dati će smjernice za potrebne korekcije u procesu pripreme za tisak obzirom na namjenu, korištene materijali i tehniku ispisa.

## 4. METODOLOGIJA

Eksperiment se sastoji od dva dijela. Prvi dio eksperimenta odvija se u digitalnom okruženju gdje se vrši proračunski dio generiranja holograma i priprema predloška za tisak. Drugi dio eksperimenta orijentiran je na realno okruženje što znači tisak, proces starenja, optičke rekonstrukcije te mikroskopska mjerenja. Nakon drugog dijela ponovo se vraća u digitalno okruženje u svrhu realizacije i usporedbe rezultata dobivenih prethodnim metodama.

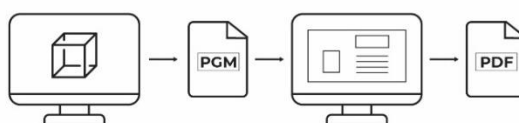
Prvi korak eksperimenta bio je generirati holograme prilikom čega su dobiveni transmisijski amplitudni hologrami koji su se koristili za daljnji rad. Nakon što se izgenerirao hologram, bilo je potrebno napraviti pripremu za tisak, odnosno predložak osobne iskaznice s ugrađenim elementima u obliku holograma. Treći korak je tisak, nakon čega je bilo potrebno izrezati uzorke i pripremiti ih za postupak starenja.

Prije stavljanja uzoraka u komoru za starenje, uzeta su referentna mjerenja (mikroskopska i optička rekonstrukcija). Proces starenja trajao je sveukupno 528 sati. Važno je napomenuti da su se prvih pet mjerenja provodila svakih 72 sata, a za potrebe šestog mjerenja uzorci su ostavljeni unutar komore 168 sati. Nakon svakog vađenja uzorka provodila su se potrebna mjerenja te su ponovo vraćeni na starenje. Zadnji koraci eksperimenta uključuju realizaciju i proučavanje dobivenih rezultata.

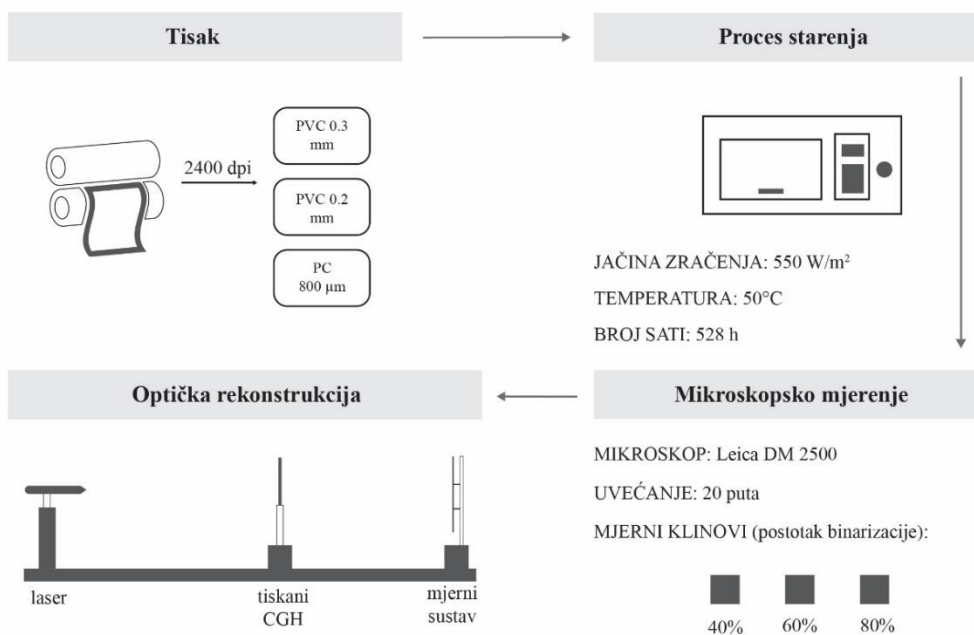
Na slici 7 vizualno su prikazani postupci rada eksperimenta.

## DIGITALNO OKRUŽENJE

### Priprema na računalu



## REALNO OKRUŽENJE



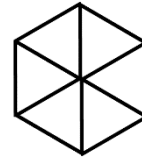
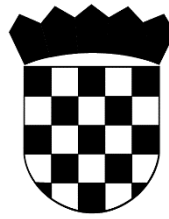
*Slika 7: Vizualni prikaz postupka eksperimenta*

### 4.1. Računalno generiranje holograma

Kao ulazni modeli prilikom računanja holograma korišteni su točkasti 2D i 3D modeli (grb, kocka, brojevi, slova RH). Volumen 3D modela je ispunjen točkama opisanima pozicijom u prostoru. Iz takvog modela izračunat je transmisijski amplitudni hologram koji se koristio u daljnjem eksperimentu.

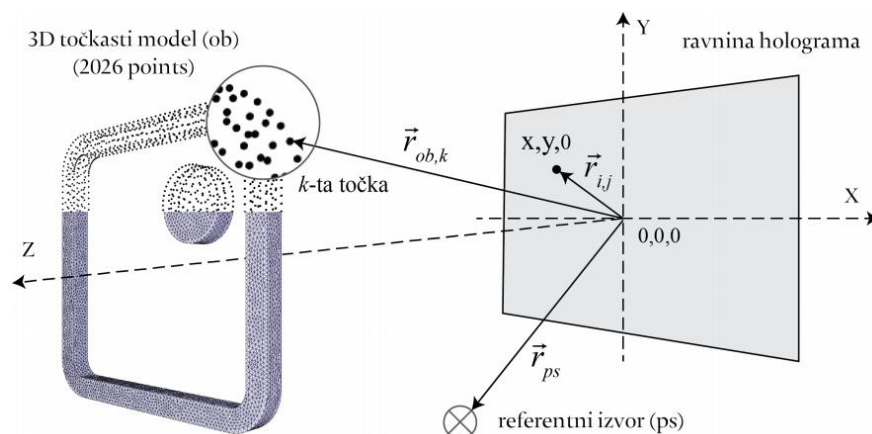
RH

0123456789



*Slika 8: Prikaz korištenih slika iz kojih su se generirali 2D i 3D točkasti modeli*

Postupak dobivanja transmisijskog amplitudnog holograma je sljedeći; izračunata je interferencija, koja predstavlja superpoziciju doprinosa svih svjetlosnih valova točaka 3D modela, s referentnim valom točkastog izvora iste valne duljine u svakom pojedinom pikselu holograma [3]. Dobiveni rezultat je interferencijska rešetka koja prolaskom svjetla daje rekonstrukciju snimanog objekta, odnosno *grayscale image* koja se pomoću binarizacije prilagođava tehnici ispisa.



*Slika 9: Primjer grafičke interpretacije vrijednosti*

*Izvor: V. Cviljušac, Razvoj sustava rekonstrukcije tiskanih računalno generiranih holograma, doktorski rad, Grafički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2020*

## 4.2. Izrada pripreme za tisak

Prvi korak pripreme za tisak je izrada predloška prema izgeneriranom rezultatu proračuna programa u kojeg su unešeni potrebni parametri ovisno o mogućnostima tiskarskog stroja. Rezultat izračuna programa je binarna datoteka u PGM formatu (*Portable Gray Map*)

koja nema fizičku veličinu. Poželjno je koristiti PGM format kako bi se izbjegle neželjene promjene prilikom kompresije slike i jer zadovoljava potreban raspon vrijednosti za pohranu digitalnih holograma [3].

Predložak za tisak osmišljen je da prezentira osobnu iskaznicu, njenu prednju i stražnju stranu, s odgovarajućim elementima te implementiranim hologramima. Njegov dizajn rađen je u *Adobe Photoshop* programu u dvije rezolucije, 2400 dpi te 6400 dpi. Radni dokument u *Photoshop*-u mora biti namješten na *grayscale* način jer takav digitalni hologram ima raspon od 0 do 255, a zatim se nad njime vrši binarizacija ovisno o mogućnostima tehnike ispisa. Osim toga, *grayscale*, za razliku od binarnog ima finije prijelaze tonova sive te time ima veću iskoristivost, odnosno veću količinu spremljenih informacija. Nadalje, kada svjetlo prođe kroz interferentnu strukturu digitalnog holograma (*grayscale*) mijenja se propusnost količine svjetla u ovisnosti o količini zacrnjenja, dok kod binarnog holograma postoje isključivo dvije vrijednosti. U eksperimentu je korišten binarni pristup generiranja holograma zbog ograničenja korištene grafičke tehnike ispisa i materijala [3].

Ranije spomenuti izračunati i izgenerirani hologrami u PGM formatu te drugi elementi (osobni podaci, potpis...) osobne iskaznice postavljeni su na odgovarajuće (planirane) pozicije zamišljenog izgleda iskaznice. Pritom je važno da se hologram ne preklapa s drugim elementom kako ne bi došlo do narušavanja informacija. Prilikom tog postupka ujedno se definira fizička veličina svakom pikselu što znači da minimalni binarni element poprima realnu veličinu.

S obzirom da je rezultat proračuna binarne vrijednosti vrlo je važno postaviti postavke boje dokumenta da se prilikom ispisa koristi jedan ton – *Color Mode: Bitmap*. Osim toga valja pripaziti da se kod procesa manipulacije i pretvorbe ne koristi *antialiasing* koji može generirati tonove sive po oštrim rubovima optičkih elemenata koji zbog finalnog jednotonskog zapisa prelaze u crni ton te time mogu narušiti izgled interferentne strukture [3].

Nadalje, hologrami na predlošku mogu imati razne oblike, poput onih klasičnih kao što su krug, kvadrat, pravokutnik ili mogu biti maskirani unutar kompleksnijih grafičkih rješenja kao što je u ovom slučaju grb i slika.



Veličina pojedinačnog minimalnog elementa ( $P_r$ ) definirana je tehničkim zahtjevima i mogućnostima odabrane tehnike ispisa te ju je potrebno izmijeniti.  $F$  predstavlja prirast izražen u postocima odnosno razliku koja se dogodila tijekom procesa ispisa, a treba ju nadoknaditi u proračunima i tiskarskoj pripremi kako bi se postigla željena kvaliteta tiskanih računalno generiranih holograma [3].

$$P_r = \frac{C}{R} * \left(1 + \frac{F}{100}\right)$$

### 4.3. Tisak računalno generiranih holograma

#### TEHNIKA ISPISA

Tehnologija tiska koja je korištena u ovom eksperimentu je ofsetni tisak. Ova tehnologija je česti izbor za tisak dokumenata i vrijednosnica zbog svoje preciznosti i mogućnosti tiska na različite materijale. Nadalje, to je tehnika plošnog neizravnog tiska, korištenjem CtP tehnologije. Priprema tiskovnih formi izrađuje se korištenjem *Kodak – Super SecuPlate UHR* stroja koji je pouzdan, robustan i svestran CtP stroj, poboljššan za izradu tiskovnih formi za visoko zaštićeni tisak. *Super SecuPlate UHR* karakterizira jednostavno upravljanje, stabilnost, jednostavno održavanje i superiorno osvjetljavanje ploča. U tablici 1 navedene su specifikacije uređaja koji se koristio prilikom ovog eksperimenta.

**Tablica 1:** Specifikacije CtP uređaja

REZOLUCIJA	6400 dpi
MAKSIMALNA VELIČINA PLOČE	990 x 838 mm
MINIMALNA VELIČINA PLOČE	270 x 215 mm
DEBLJINA PLOČE	0.15 - 0.4 mm
ODSTRANJIVANJE OTPADAKA	Tijekom osvjetljavanja tiskovnih formi
DIMENZIJE STROJA	1600 (v) x 2000 (š) x 1200 (d)

## BOJE

U procesu tiska korištene su *SunChemical* boje, točnije *Starluxe Process UV Cyan*, *Starluxe Process UV Magenta*, *Starluxe Process UV Yellow*, *Starluxe Process UV Black*. *SunChemical Starluxe* paleta UV otvrdnjujućih litografskih boja namijenjena je za tisak na razne površine. Neke od značajki boja su široki raspon otpornih boja, prijanjanje na različite podloge, izvrsna svojstva za visoku kvalitetu ispisa, pogodne su za štancanje folijom i laminiranje [22]. UV boje pogodne su za ovakvu namjenu, to jest tisak holograma jer jedine mogu fiksirati boju na plastičnu podlogu.

## MATERIJALI

*Tablica 2: Specifikacije materijala*

MATERIJAL	DEBLJINA	DIMENZIJE	DETALJI	OZNAKA U TEKSTU
<b>PVC FOLIJA KALANDER</b>	0.3 mm	50 x 70 cm	otisak na površini	<b>PVC0.3</b>
<b>PVC FOLIJA KALANDER</b>	0.2 mm	70 x 100 cm	otisak na površini	<b>PVC0.2</b>
<b>PC MAKROFOL ID 6 - 2 000000</b>	800 $\mu$ m	70 x 100 cm	laminirani (8 slojeva) - otisak na 3. sloju	<b>PC800</b>

### 4.4. Proces starenja

Proces starenja uzoraka odvija se pomoću *Solarbox 1500e* uređaja koji simulira uvjete sunčevog zračenja, u ovom slučaju, u unutarnjem, zatvorenom prostoru. Takvo okruženje predstavlja situaciju indirektnog sunčevog zračenja na predmet. Energiju ujednačenog zračenja pruža zrakom hlađena ksenonska lampa koja stvara zračenje dva puta veće nego sunčevo. Takva jačina zračenja omogućava brzo dobivanje rezultata za koje bi inače trebalo proći puno više vremena. Raspon zračenja uređaja kreće se između 250 do 1100



$W/m^2$  (290 – 800 nm). Temperatura također igra važnu ulogu u procesu starenja. S obzirom da je uzorak koji je izložen na direktnoj sunčevoj svjetlosti uvijek topliji od zraka koji ga okružuje, takav se proces dobiva i u uređaju. Raspon temperature je između  $35^{\circ}C$  i  $100^{\circ}C$  [21].

Uzorci su stavljeni u uređaj i podvrgnuti zračenju od sveukupno 528 sati. Prvih pet mjerenja uzorci su vađeni van uređaja svakih 72 sata u svrhu mikroskopskog mjerenja i optičkih rekonstrukcija te su nakon tog procesa ponovno vraćeni u uređaj na idućih 72 sata. Za potrebe šestog mjerenja uzorci su ostavljeni 168 sati u uređaju te nakon toga podvrgnuti standardnim, ranije navedenim mjerenjima. Postavke uređaja su bile u skladu s ISO standardom za Europu (ISO/IEC 24789 – 2), to jest, namještene na  $550 W/m^2$  i  $50^{\circ}C$ .



*Slika 12: Solarbox 1500e, uređaj za starenje uzoraka*



*Slika 13: Izgled uzoraka prije i poslije procesa starenja, u uređaju za starenje*

## 5. ANALIZA I OBRADA PODATAKA

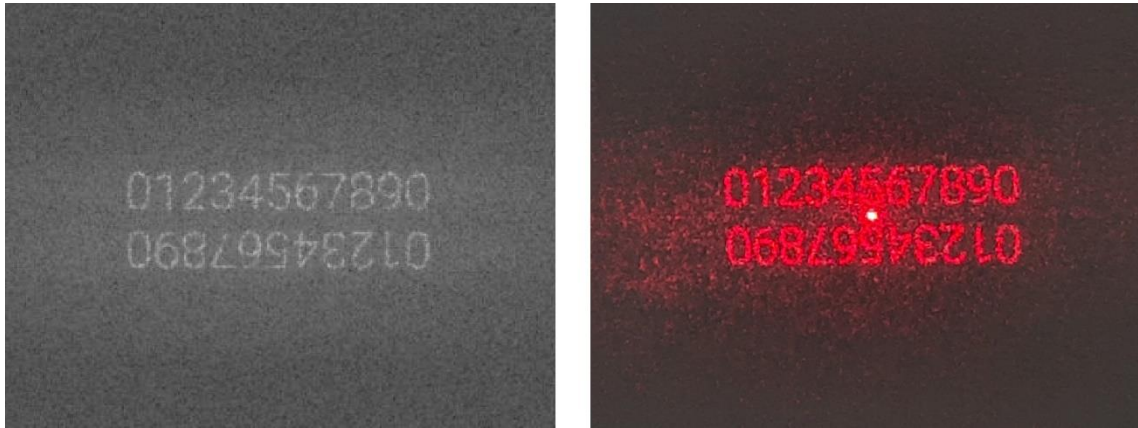
Prije početka obrade i usporedbe podataka, određeno je da će se provjeravati materijali PVC 0.2, PVC 0.3 i PC 800 sa binarizacijama interferentnih uzoraka 40%, 60% i 80%. Analiza rezultata je podijeljena u dva dijela. Prvi dio je obrada rezultata optičkih rekonstrukcija gdje su se promatrali signal i šum na rekonstruiranoj slici, a u drugom su se dijelu uspoređivale mikroskopske snimke i digitalne rešetke holograma.

### 5.1. OPTIČKA REKONSTRUKCIJA

Hologram je optička rešetka koja ima vrlo složenu strukturu interferencijskih pruga, a kada se obasjava svjetlošću reproducira sliku objekta [3]. Takva reprodukcija naziva se optička rekonstrukcija što je prikazano i na slici 14, dok se na slici 15 prikazuje usporedba numeričke i optičke rekonstrukcije.



*Slika 14: Prikaz optičkih rekonstrukcija tiskanog uzorka*



*Slika 15: Usporedba numeričke i optičke rekonstrukcije*

### **5.1.1. SIGNAL**

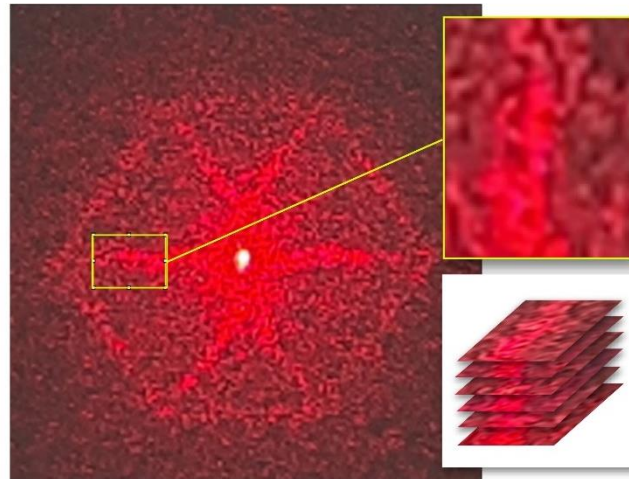
Analiziranjem istog dijela optičke rekonstrukcije tiskanih računalno generiranih holograma, pratila se promjena intenziteta definiranog uzorka referentnog i 6 narednih mjerenja tijekom starenja. Za materijale PVC 0.2 i PVC 0.3 je odabran srednji lijevi brid, dok je za materijal PC 800 odabran donji lijevi brid kocke. Svaki isječak brida s optičkih rekonstrukcija rotiran je na način da je središnja točka holograma u donjem dijelu isječka, kako bi se ostvarili bolji prikazi uspoređivanja intenziteta.

Podaci o intenzitetu analizirane površine optičke rekonstrukcije pretvoreni su u grafički prikaz zbog lakše vizualizacije dobivenih podataka kojeg se zatim prilagođava Gauss krivuljom. Preklapanjem grafičkih prikaza svih mjerenja usporedno s referentnim, a zatim selekcijom točaka najviših intenziteta, ostvaren je grafički prikaz na kojemu je vidljiva promjena intenziteta tijekom procesa starenja. Za generiranje grafova te prilagodbu i statističku obradu podataka korišten je program *OriginPro*.

#### **a) PVC 0.2**

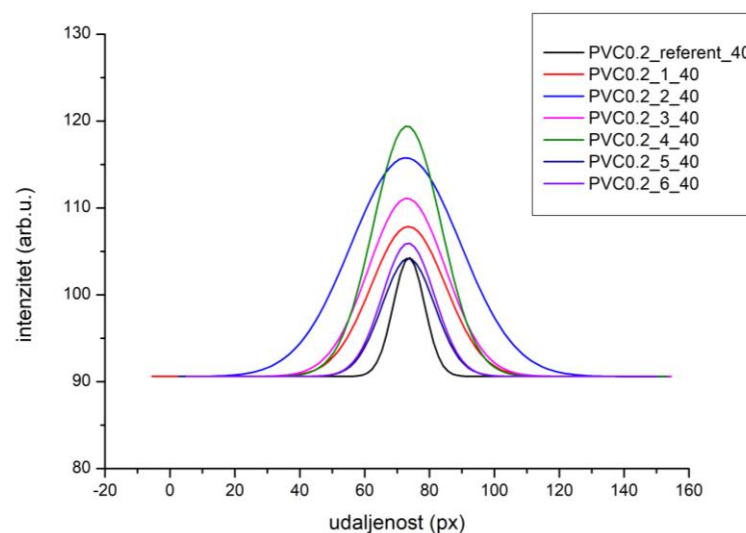
Materijal PVC 0.2, kroz sve binarizacije i mjerenja, u intenzitetu oscilira u rasponu od 95 do 125 jedinica, što bi iznosilo 11% ukupnog intenziteta. Usporedbom najviših intenziteta

mjerenja, iz grafova je vidljivo da se promjene u intenzitetu događaju, ali su unutar statističke pogreške mjerenja. Obzirom na dobivene rezultate, jasno je da se dio intenziteta kroz proces starenja mijenjao, ali sveobuhvatno, informacija je ostala vidljiva i jasna, i to vrijedi za sve analizirane interferentne uzorke različitih binarizacija.



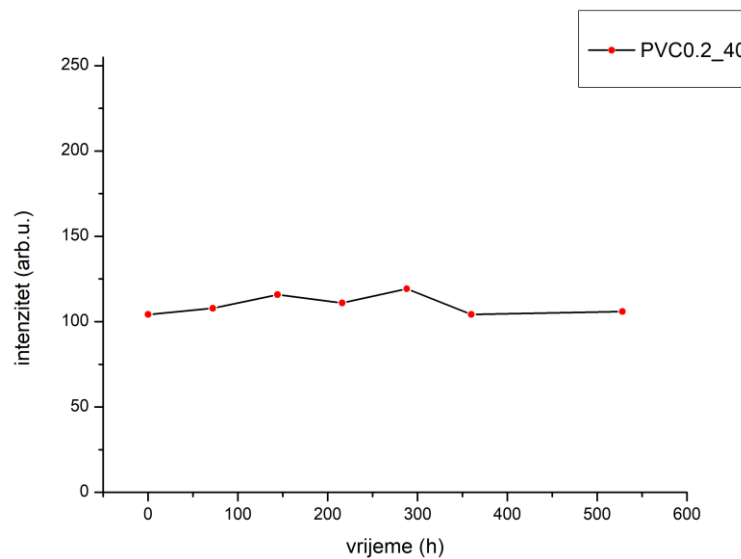
*Slika 16: Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 60% na materijalu PVC 0.2, za analizu signala*

Slika 17 prikazuje krivulje intenziteta svih mjerenja binarizacije 40% materijala PVC 0.2. Promatranjem krivulja najmanja promjena intenziteta u odnosu na referentno mjerenje vidljiva je kod 5. mjerenja, dok se značajni porast bilježi kod 4. mjerenja.



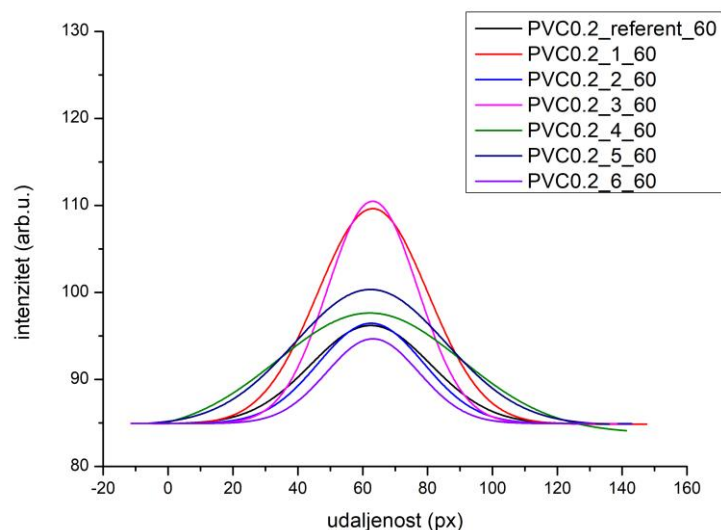
*Slika 17: Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC0.2 materijalu za sva mjerenja*

Slika 18 prikazuje točke najviših intenziteta za svako mjerenje u odnosu na vrijeme starenja. Intenzitet se kroz vrijeme mijenja u rasponu od 103 do 118 jedinica, odnosno 5,8%.



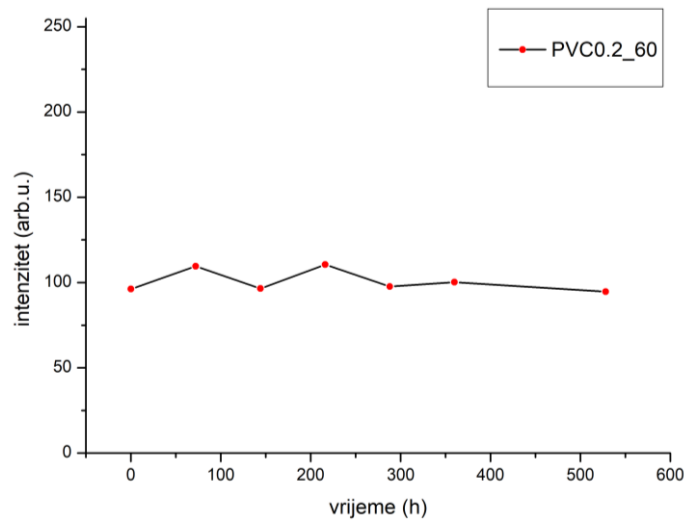
**Slika 18:** Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC 0.2 materijalu u vremenu mjerenja

Slika 19 prikazuje krivulje intenziteta svih mjerenja binarizacije 60% materijala PVC 0.2. Promatranjem krivulja najmanja promjena intenziteta u odnosu na referentno mjerenje vidljiva je kod 2. mjerenja, dok se značajni porast bilježi kod 3. mjerenja.



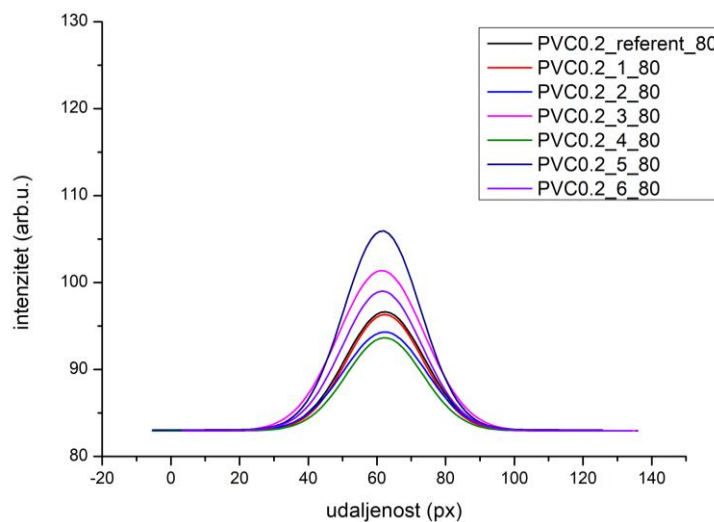
**Slika 19:** Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC0.2 materijalu za sva mjerenja

Slika 20 prikazuje točke najviših intenziteta za svako mjerenje u odnosu na vrijeme starenja. Intenzitet se kroz vrijeme mijenja u rasponu od 95 do 110 jedinica, što iznosi 5,8% .



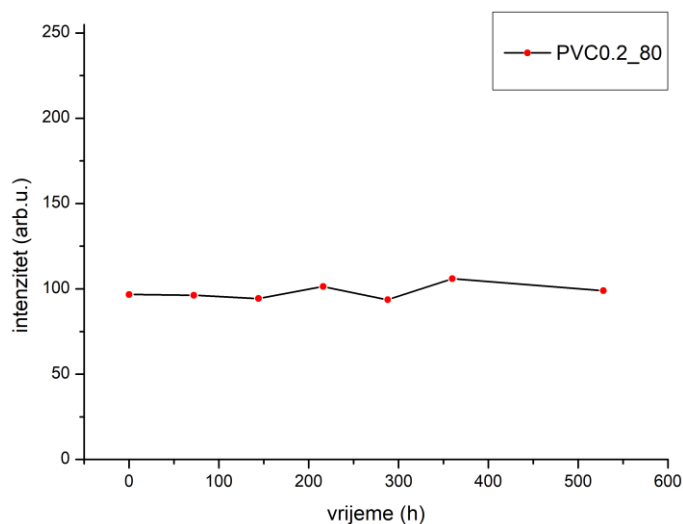
**Slika 20:** Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC 0.2 materijalu u vremenu mjerenja

Slika 21 prikazuje krivulje intenziteta svih mjerenja binarizacije 80% materijala PVC 0.2. Promatranjem krivulja najmanja promjena intenziteta u odnosu na referentno mjerenje vidljiva je kod 1. mjerenja, dok se značajni porast bilježi kod 5. mjerenja.



**Slika 21:** Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC0.2 materijalu za sva mjerenja

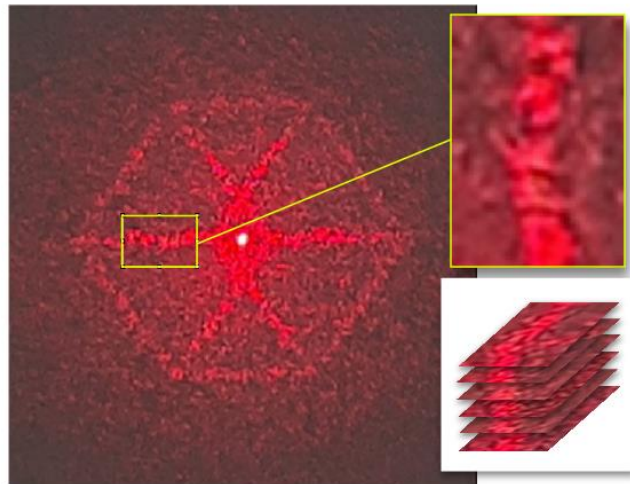
Slika 22 prikazuje točke najviših intenziteta za svako mjerenje u odnosu na vrijeme starenja. Intenzitet se kroz vrijeme mijenja u rasponu od 94 do 106 jedinica, što bi iznosilo 4,7% .



*Slika 22: Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC 0.2 materijalu u vremenu mjerenja*

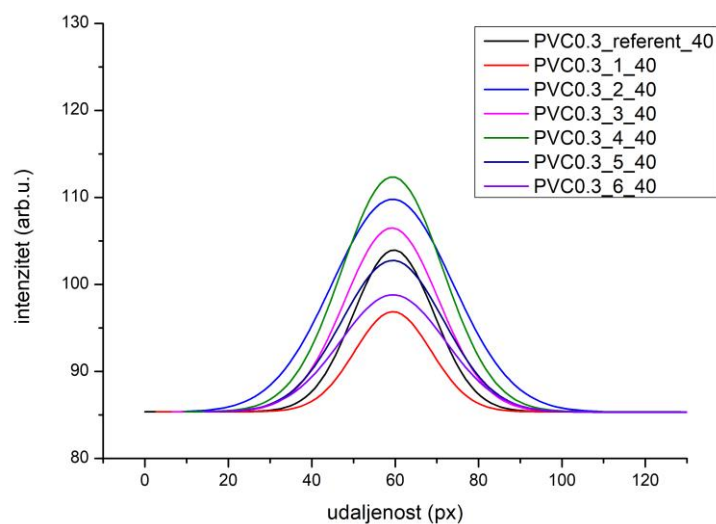
## **b) PVC 0.3**

Materijal PVC 0.3, kroz sve binarizacije i mjerenja, u intenzitetu oscilira u rasponu od 90 do 115 jedinica, to jest 9,8%. Slično kao i kod prethodnog materijala, zajednički graf najviših intenziteta za sve binarizacije je prilično horizontalan, što ukazuje na kontinuitet u optičkoj rekonstrukciji. Najbolji krajnji rezultat je vidljiv kod binarizacije 60%, koja usporedno s binarizacijama 40% i 80% ima najbliži najviši intenzitet referentnog mjerenja i posljednjeg mjerenja.



**Slika 23:** Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 40% na materijalu PVC 0.3, za analizu signala

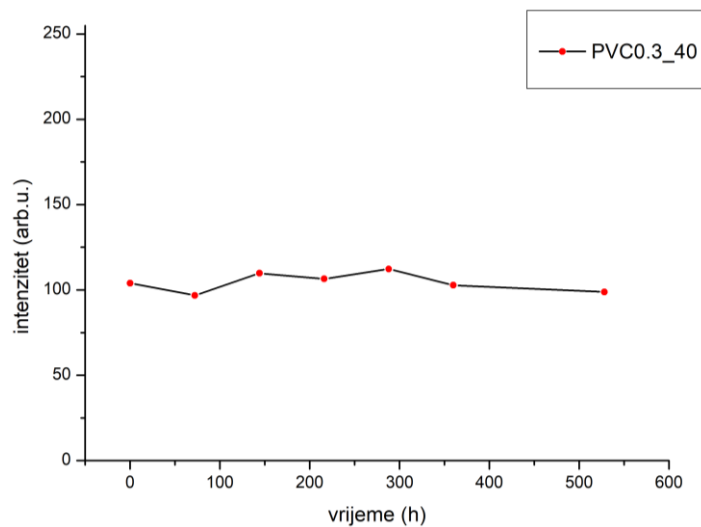
Slika 24 prikazuje krivulje intenziteta svih mjerenja binarizacije 40% materijala PVC 0.3. Promatranjem krivulja najmanja promjena intenziteta u odnosu na referentno mjerenje vidljiva je kod 5. mjerenja, dok se značajni porast bilježi kod 4. mjerenja.



**Slika 24:** Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC0.3 materijalu za sva mjerenja

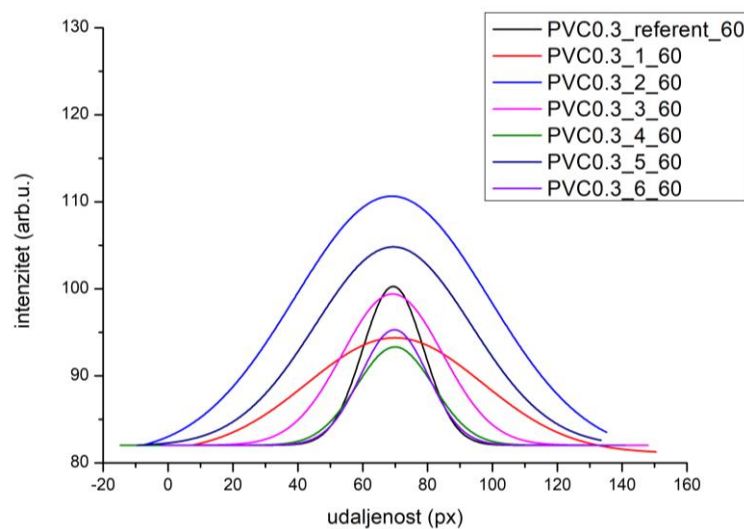


Slika 25 prikazuje točke najviših intenziteta za svako mjerenje u odnosu na vrijeme starenja. Intenzitet se kroz vrijeme mijenja u rasponu od 96 do 112 jedinica, odnosno 6,3%.



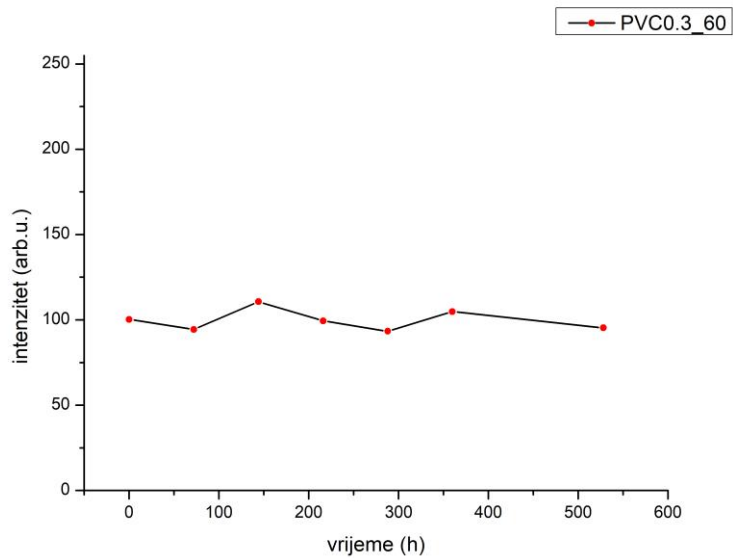
**Slika 25:** Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC 0.3 materijalu u vremenu mjerenja

Slika 26 prikazuje krivulje intenziteta svih mjerenja binarizacije 60% materijala PVC 0.3. Promatranjem krivulja najmanja promjena intenziteta u odnosu na referentno mjerenje vidljiva je kod 3. mjerenja, dok se značajni porast bilježi kod 2. mjerenja.



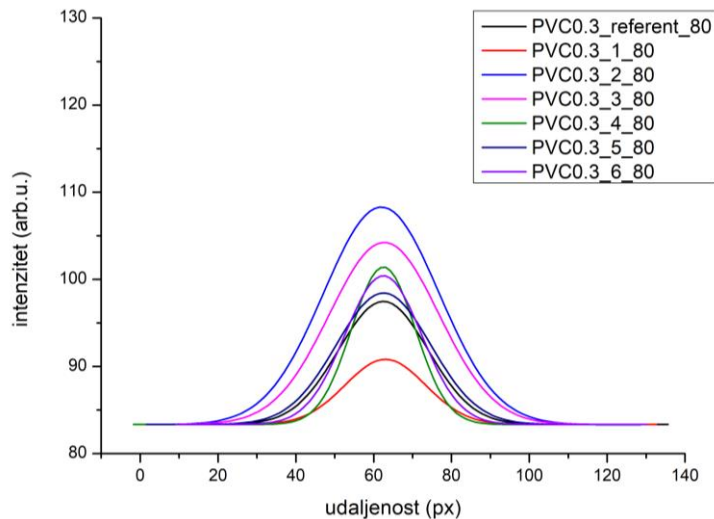
**Slika 26:** Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC0.3 materijalu za sva mjerenja

Slika 27 prikazuje točke najviših intenziteta za svako mjerenje u odnosu na vrijeme starenja. Intenzitet se kroz vrijeme mijenja u rasponu od 93 do 110 jedinica, to jest 6,6%.



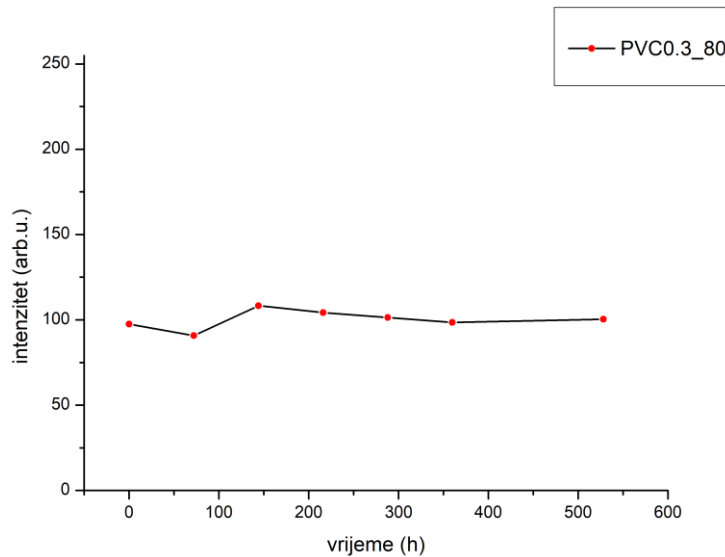
**Slika 27:** Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC 0.3 materijalu u vremenu mjerenja

Slika 28 prikazuje krivulje intenziteta svih mjerenja binarizacije 80% materijala PVC 0.3. Promatranjem krivulja najmanja promjena intenziteta u odnosu na referentno mjerenje vidljiva je kod 5. mjerenja, dok se značajni porast bilježi kod 2. mjerenja.



**Slika 28:** Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC0.3 materijalu za sva mjerenja

Slika 29 prikazuje točke najviših intenziteta za svako mjerenje u odnosu na vrijeme starenja. Intenzitet se kroz vrijeme mijenja u rasponu od 90 do 108 jedinica, što iznosi 7%.

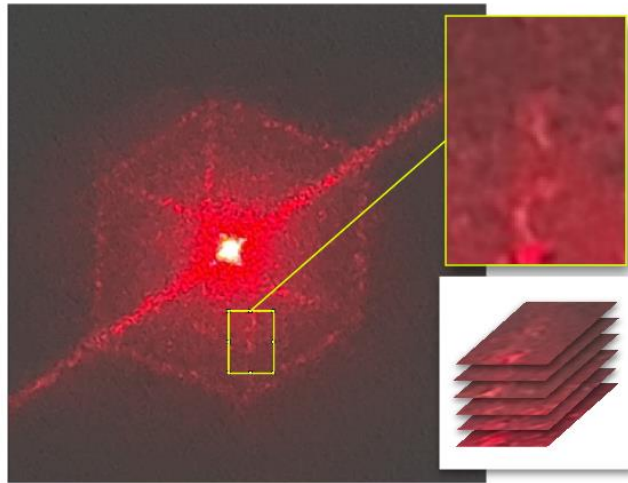


*Slika 29: Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC 0.3 materijalu u vremenu mjerenja*

### c) PC 800

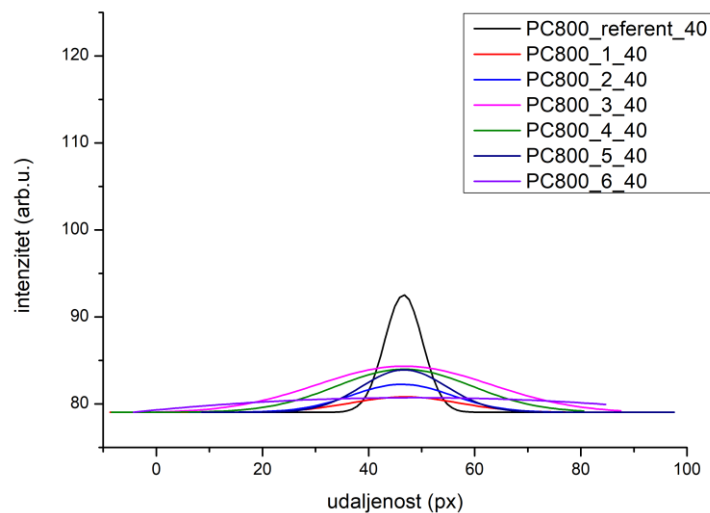
Kao što je već navedeno, za materijal PC 800 je odabran donji lijevi brid kocke. Razlog tome je taj što se na mjestu prethodno odabranog brida događa polarizacija svjetla koja značajno povećava količinu intenziteta na mjestu istog.

Usporedno s prethodnim materijalima, optičke rekonstrukcije interferentnih uzoraka na ovom materijalu pokazuju nešto značajnije varijacije u gubitku intenziteta i to na binarizacijama 40% i 60%, dok binarizacija 80% varira u mnogo manjim razmjerima. Bez obzira na opisana događanja u promjenama, zajednički grafovi svih mjerenja i dalje drže prilično horizontalan smještaj na grafu što govori o tome da je informacije i dalje postojana.



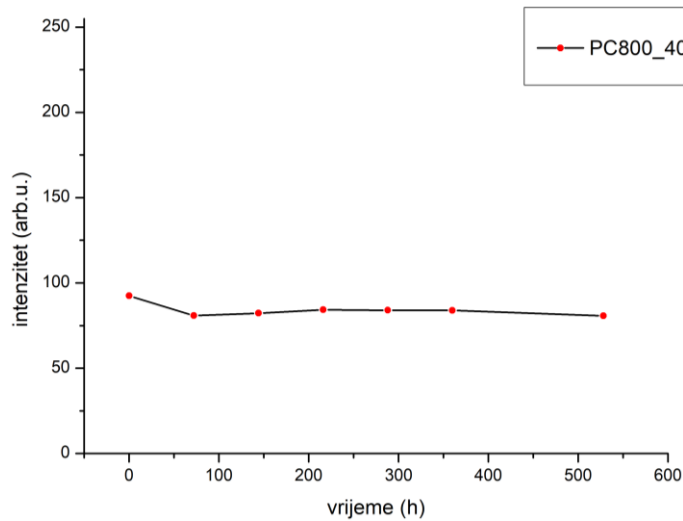
*Slika 30: Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 80% na materijalu PC 800, za analizu signala*

Slika 31 prikazuje krivulje intenziteta svih mjerenja binarizacije 40% materijala PC 800. Promatranjem krivulja najmanja promjena intenziteta u odnosu na referentno mjerenje vidljiva je kod 3. mjerenja, dok se značajni porast bilježi kod 6. mjerenja.



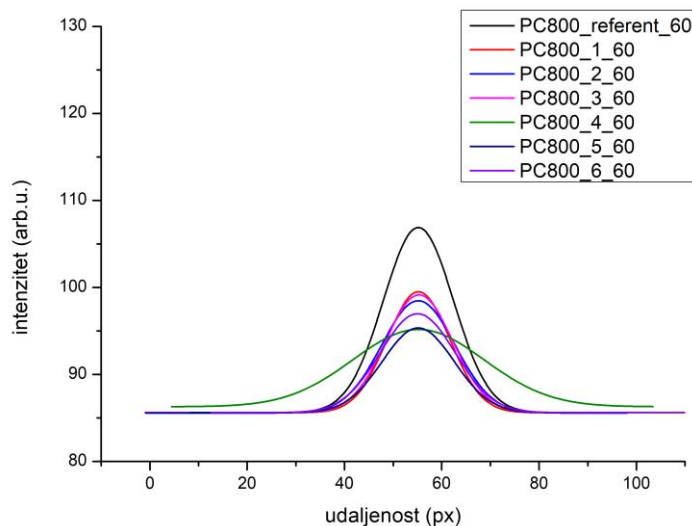
*Slika 31: Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PC 800 materijalu za sva mjerenja*

Slika 32 prikazuje točke najviših intenziteta za svako mjerenje u odnosu na vrijeme starenja. Intenzitet se kroz vrijeme mijenja u rasponu od 80 do 92 jedinica, odnosno 4,7%.



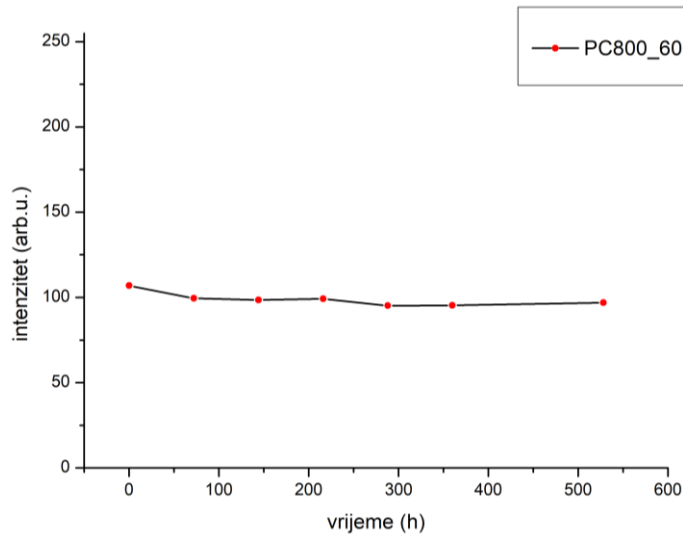
*Slika 32: Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PC 800 materijalu u vremenu mjerenja*

Slika 33 prikazuje krivulje intenziteta svih mjerenja binarizacije 60% materijala PC 800. Promatranjem krivulja najmanja promjena intenziteta u odnosu na referentno mjerenje vidljiva je kod 2. mjerenja, dok se značajni porast bilježi kod 4. mjerenja.



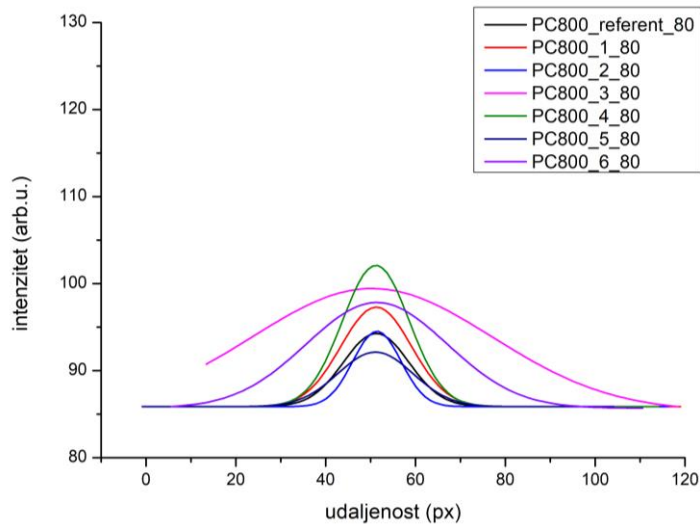
*Slika 33: Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PC 800 materijalu za sva mjerenja*

Slika 34 prikazuje točke najviših intenziteta za svako mjerenje u odnosu na vrijeme starenja. Intenzitet se kroz vrijeme mijenja u rasponu od 94 do 107 jedinica, to jest 5%.



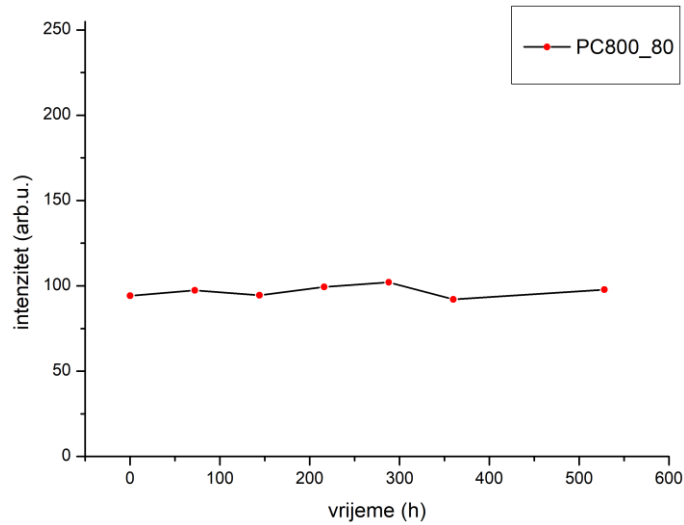
*Slika 34: Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PC 800 materijalu u vremenu mjerenja*

Slika 35 prikazuje krivulje intenziteta svih mjerenja binarizacije 80% materijala PC 800. Promatranjem krivulja najmanja promjena intenziteta u odnosu na referentno mjerenje vidljiva je kod 2. mjerenja, dok se značajni porast bilježi kod 4. mjerenja.



*Slika 35: Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PC 800 materijalu za sva mjerenja*

Slika 36 prikazuje točke najviših intenziteta za svako mjerenje u odnosu na vrijeme starenja. Intenzitet se kroz vrijeme mijenja u rasponu od 92 do 101 jedinica, što iznosi 3,5%.



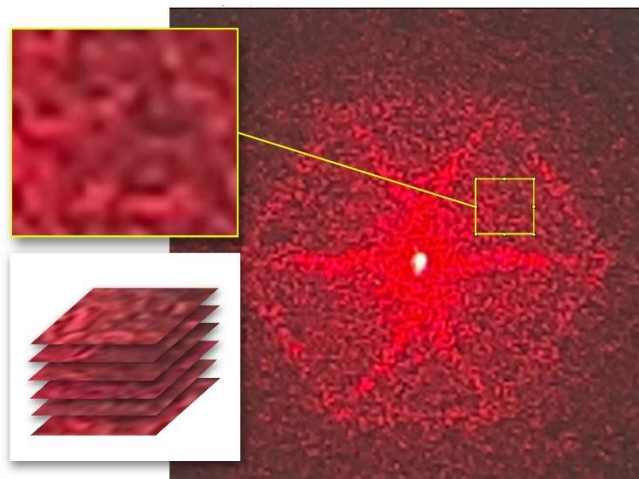
*Slika 36: Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PC 800 materijalu u vremenu mjerenja*

### 5.1.2. ŠUM

Analiziranjem područja između bridova kocke, označenim na slikama, ispitivala se količina šuma na optičkoj rekonstrukciji koja nastaje prilikom prolaska svjetla kroz tiskani računalno generirani hologram. Za svaki materijal i binarizaciju je odabrano isto područje vidljivo na slikama. Isječci šumova su zatim pretvoreni u graf promjene intenziteta po površini isječka. Nadalje, preklapanjem grafova svih mjerenja, analizirala se oscilacija šuma čije su se vrijednosti kasnije koristile u izračunu srednjeg šuma. Graf srednjeg šuma je izveden od aritmetičke sredine svih mjerenja po površini isječka, koji prikazuje liniju srednjeg šuma i standardu devijaciju istog.

## a) PVC 0.2

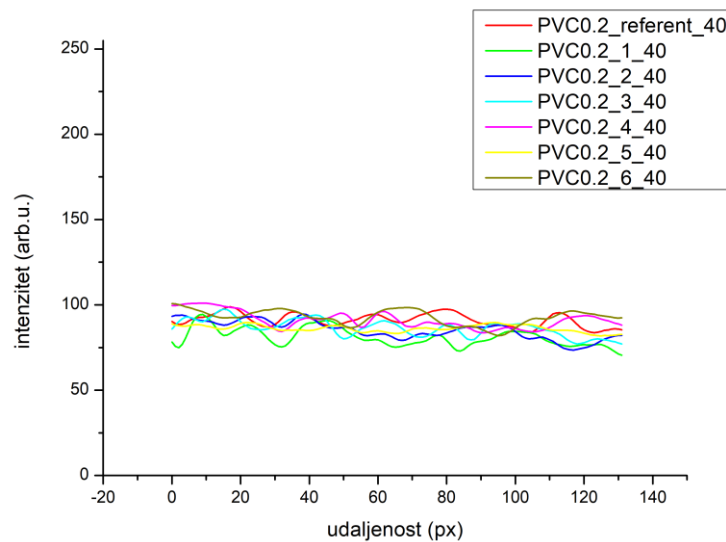
Materijal PVC 0.2 i kod analiziranja šumova pokazuje kontinuitet prilikom analize svih mjerenja. Grafovi srednjeg šuma svih mjerenja za binarizacije 40% i 60% variraju u rasponu od 90 do 105 jedinica intenziteta (5,8%) zajedno sa standardnim devijacijama. No, graf srednjeg šuma binarizacije 80% prikazuje nešto veću standardnu devijaciju koja proizlazi iz 5. mjerenja, a koje se postavilo vidljivo niže od ostalih na zajedničkom grafu šumova. Radi se o pogrešci prilikom snimanja optičke rekonstrukcije što je prouzročilo da neoštra snimka pokaže drugačiji rezultat šuma u odnosu na druga mjerenja. Nastavno na to, 6. mjerenje to potvrđuje obzirom da se ponovno nalazi u sličnom rasponu kao i prethodna mjerenja.



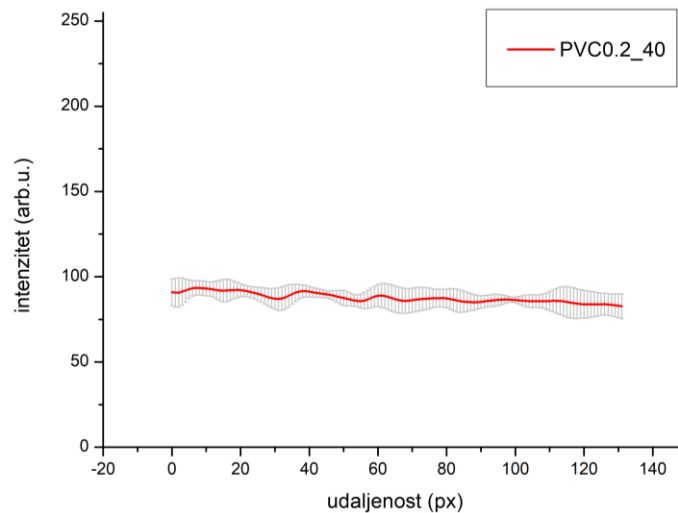
*Slika 37: Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 60% na materijalu PVC 0.2, za analizu šuma*



Na slici 38 prikazuju se promjene intenziteta šuma po površini optičke rekonstrukcije binarizacije 40% za materijal PVC 0.2 kroz svako mjerenje. U odnosu na referentno mjerenje najznačajnija promjena intenziteta vidljiva je kod 1. mjerenja. Slika 39 prikazuje srednji šum svih mjerenja. Crvena linija predstavlja srednji šum dok siva površina prikazuje standardnu devijaciju.

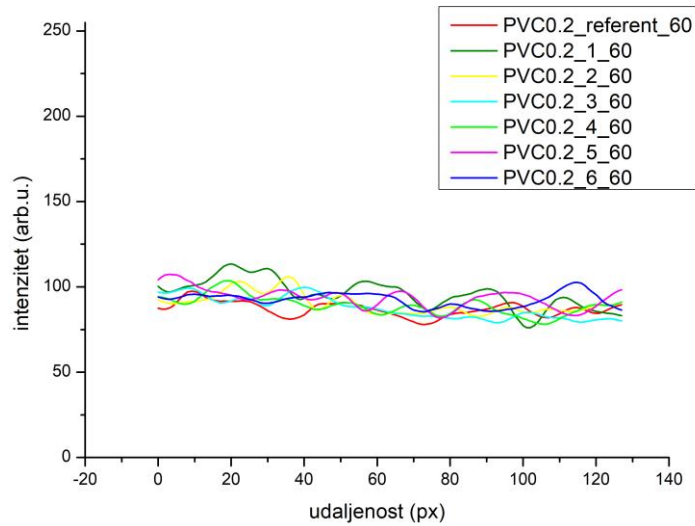


**Slika 38:** Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC 0.2 materijalu za sva mjerenja

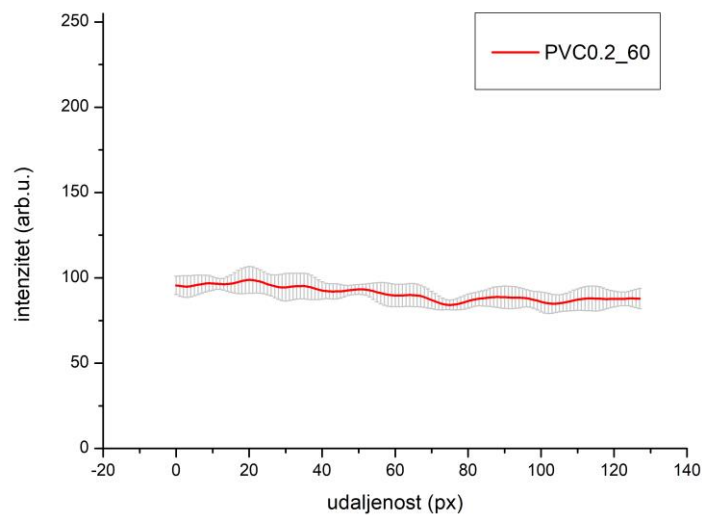


**Slika 39:** Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na materijalu PVC 0.2

Na slici 40 prikazuju se promjene intenziteta šuma po površini optičke rekonstrukcije binarizacije 60% za materijal PVC 0.2 kroz svako mjerenje. U odnosu na referentno mjerenje najznačajnija promjena intenziteta vidljiva je kod 1. mjerenja.

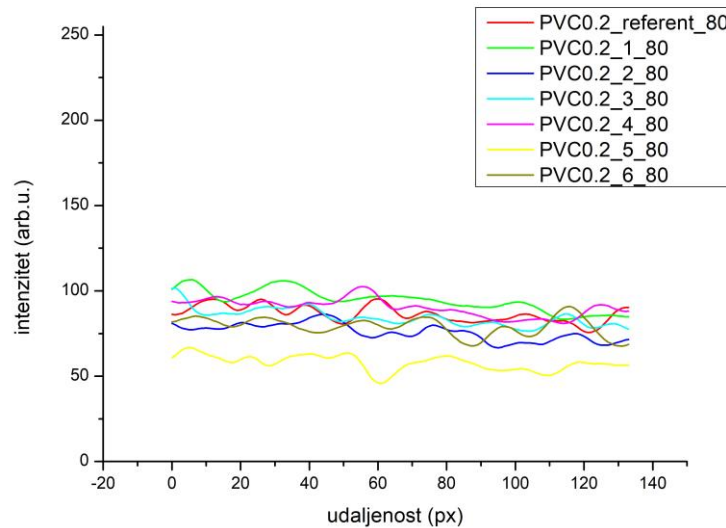


**Slika 40:** Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC 0.2 materijalu za sva mjerenja

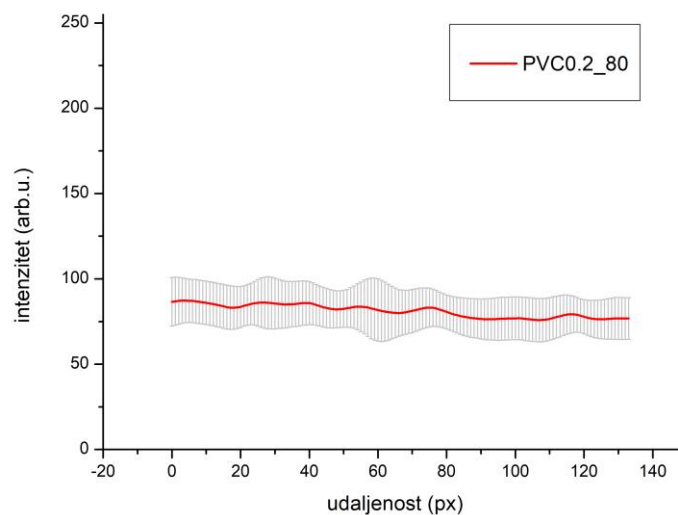


**Slika 41:** Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na materijalu PVC 0.2

Na slici 42 prikazuju se promjene intenziteta šuma po površini optičke rekonstrukcije binarizacije 80% za materijal PVC 0.2 kroz svako mjerenje. U odnosu na referentno mjerenje najznačajnija promjena intenziteta vidljiva je kod 5. mjerenja zbog pogreške snimanja i obrade optičke rekonstrukcije.



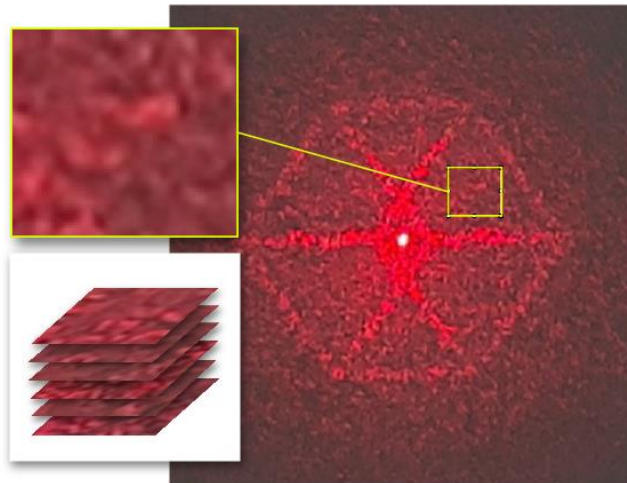
**Slika 42:** Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC 0.2 materijalu za sva mjerenja



**Slika 43:** Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na materijalu PVC 0.2

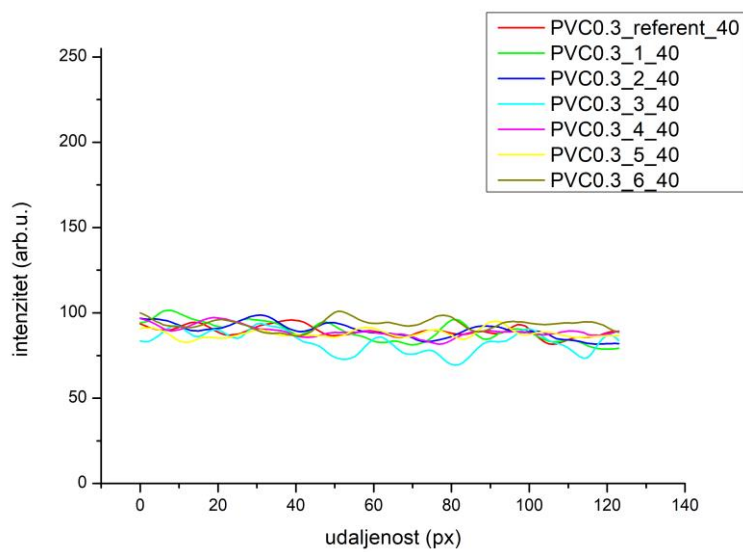
## b) PVC 0.3

Materijal PVC 0.3 kroz sva mjerenja i binarizacije prikazuje prilično slično ponašanje u promjeni intenziteta. Naime, graf srednjeg šuma za svaku binarizaciju oscilira u rasponu od 90 do 100 jedinica (3,9%), gdje se ta oscilacija može proširiti kod standardne devijacije, dok se linija grafova srednjih šumova giba prilično horizontalno. Binarizacija 60% pak pokazuje najpovoljniji rezultat, gdje se događaju manje promjene usporedno sa preostale dvije binarizacije.

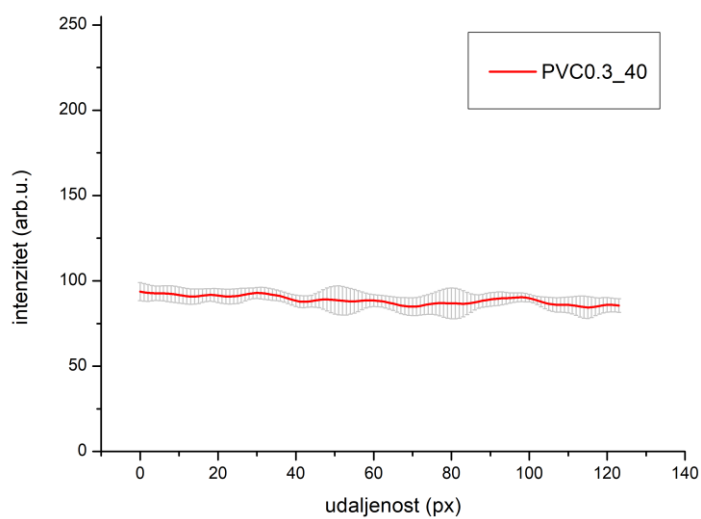


*Slika 44: Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 40% na materijalu PVC 0.3, za analizu šuma*

Na slici 45 prikazuju se promjene intenziteta šuma po površini optičke rekonstrukcije binarizacije 40% za materijal PVC 0.3 kroz svako mjerenje. U odnosu na referentno mjerenje najznačajnija promjena intenziteta vidljiva je kod 3. mjerenja.

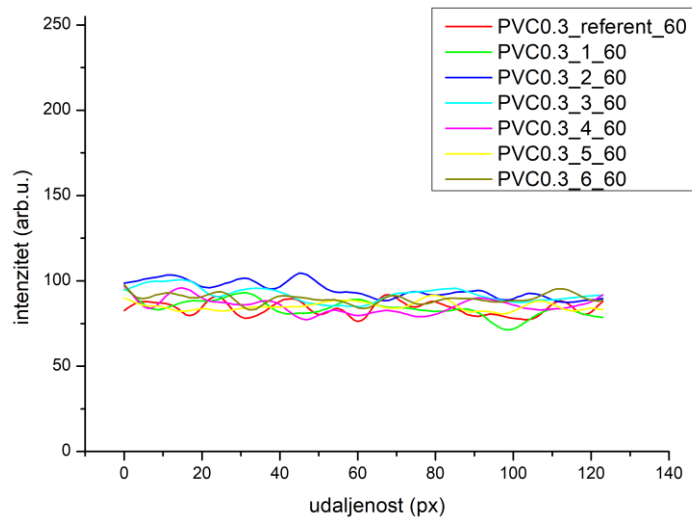


**Slika 45:** Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC 0.3 materijalu za sva mjerenja

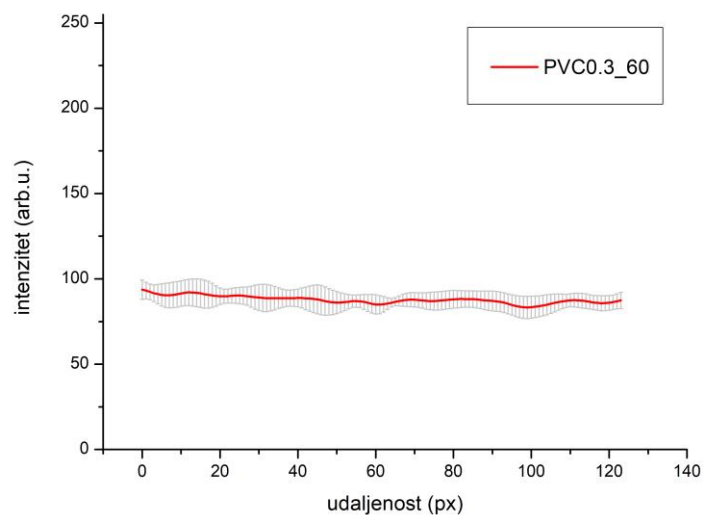


**Slika 46:** Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na materijalu PVC 0.3

Na slici 47 prikazuju se promjene intenziteta šuma po površini optičke rekonstrukcije binarizacije 60% za materijal PVC 0.3 kroz svako mjerenje. U odnosu na referentno mjerenje najznačajnija promjena intenziteta vidljiva je kod 2. mjerenja.

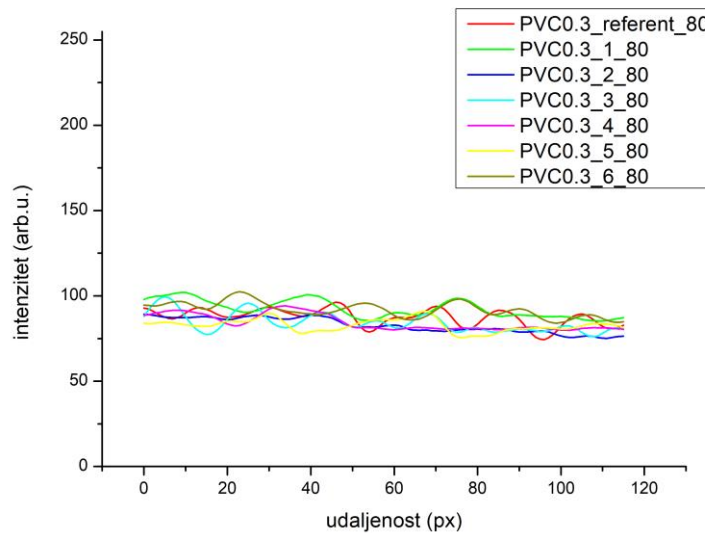


**Slika 47:** Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC 0.3 materijalu za sva mjerenja

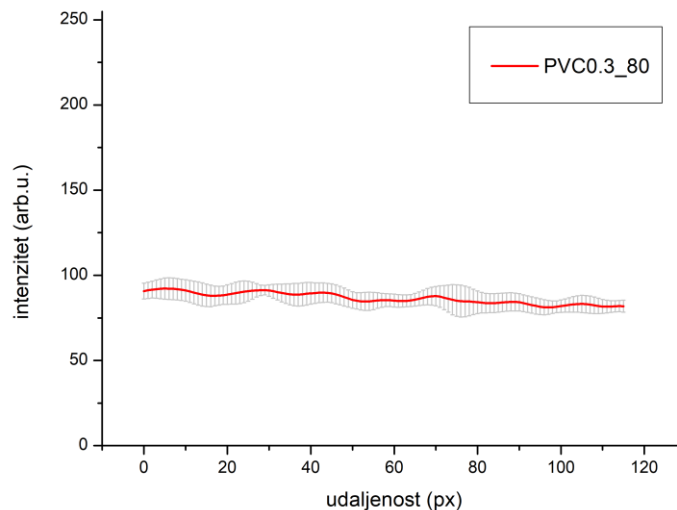


**Slika 48:** Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na materijalu PVC 0.3

Na slici 49 prikazuju se promjene intenziteta šuma po površini optičke rekonstrukcije binarizacije 80% za materijal PVC 0.3 kroz svako mjerenje. U odnosu na referentno mjerenje najznačajnija promjena intenziteta vidljiva su kod 2. i 4. mjerenja.



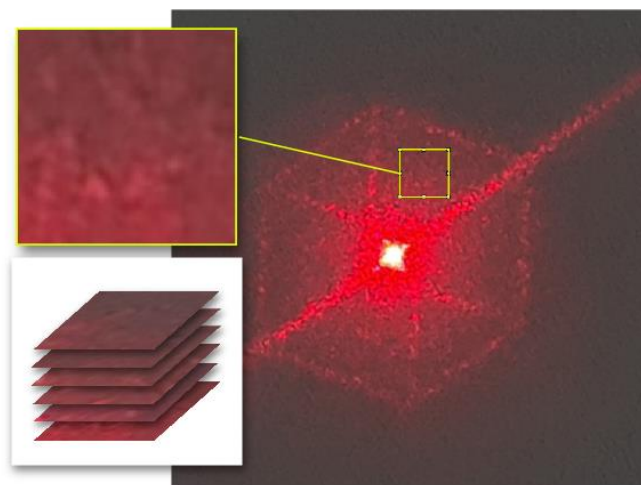
*Slika 49: Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC 0.3 materijalu za sva mjerenja*



*Slika 50: Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na materijalu PVC 0.3*

### c) PC 800

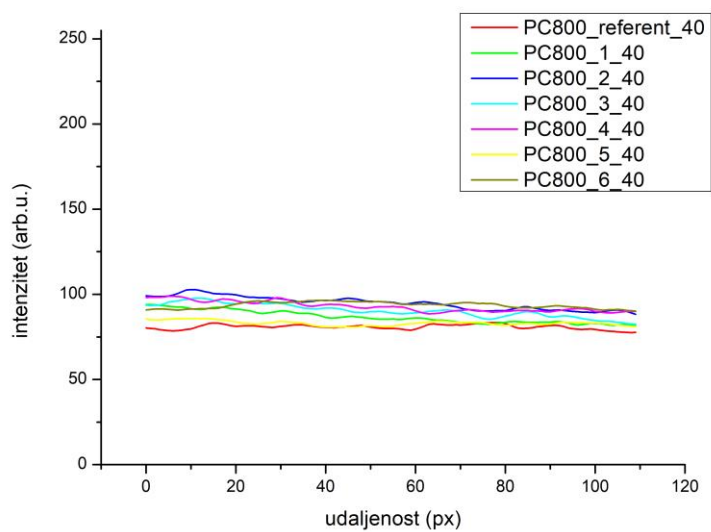
Materijal PC 800 na grafovima srednjih šumova prikazuje bolje rezultate nego prethodni materijali, obzirom da su linije grafova gotovo horizontalne. Intenziteti grafova srednjeg šuma osciliraju u rasponu od 90 do 100 jedinica, što bi iznosilo 3,9% ukupnog intenziteta. Nema pretjeranih oscilacija u optičkoj rekonstrukciji kod svih binarizacija, a to ukazuje na jednoličnost šuma i njegovu neznačajnu promjenjivost kroz mjerenja.



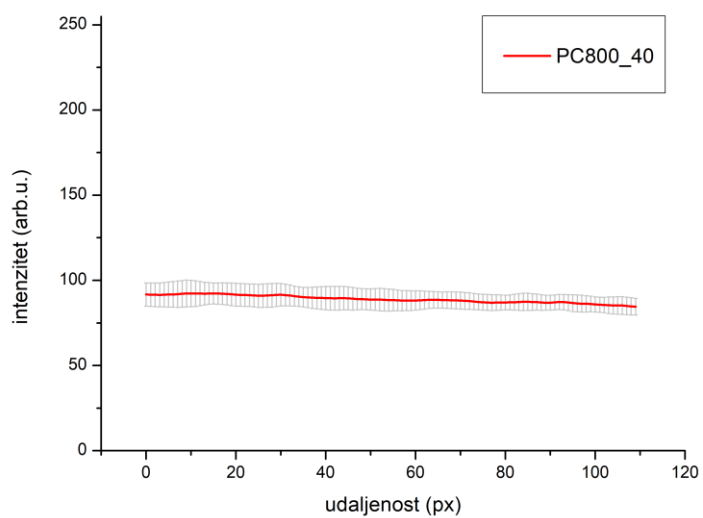
*Slika 51: Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 80% na materijalu PC 800, za analizu šuma*

Na slici 52 prikazuju se promjene intenziteta šuma po površini optičke rekonstrukcije binarizacije 40% za materijal PC 800 kroz svako mjerenje. U odnosu na referentno mjerenje najznačajnija promjena intenziteta vidljiva je kod 2. mjerenja.



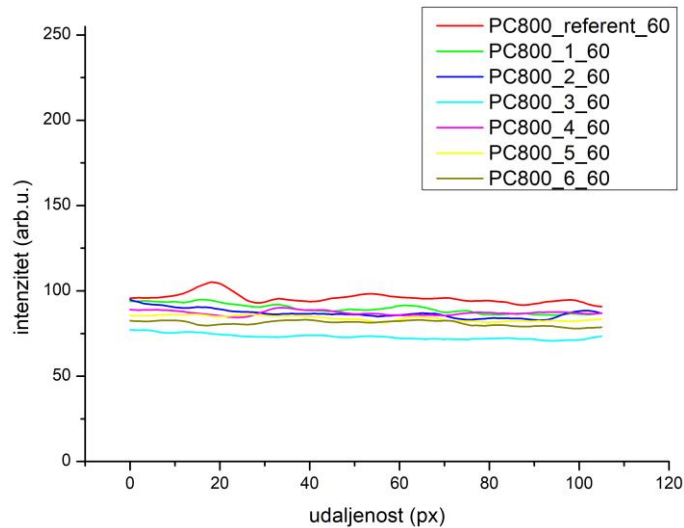


*Slika 52: Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PC 800 materijalu za sva mjerenja*

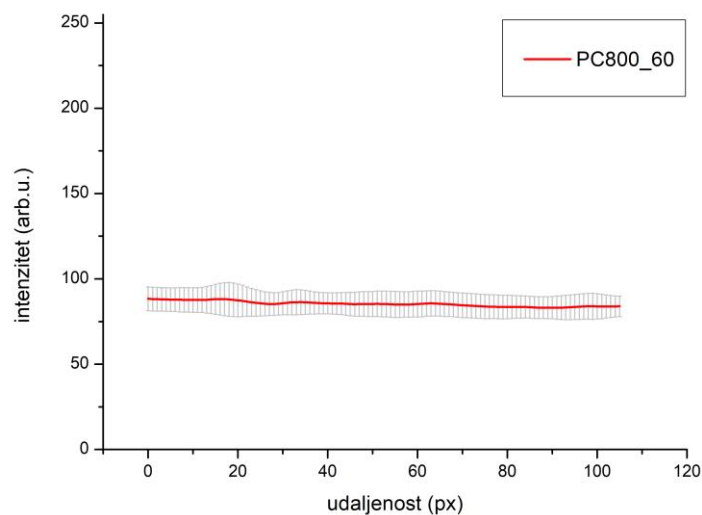


*Slika 53: Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na materijalu PC 800*

Na slici 54 prikazuju se promjene intenziteta šuma po površini optičke rekonstrukcije binarizacije 60% za materijal PC 800 kroz svako mjerenje. U odnosu na referentno mjerenje najznačajnija promjena intenziteta vidljiva je kod 3. mjerenja.

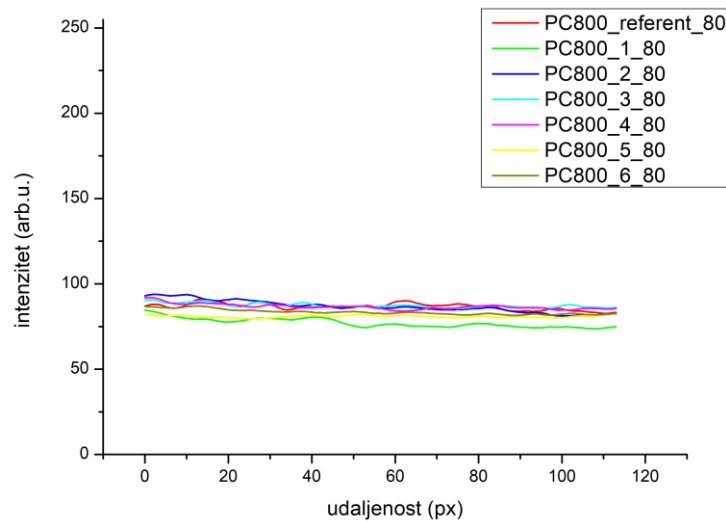


*Slika 54: Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PC 800 materijalu za sva mjerenja*

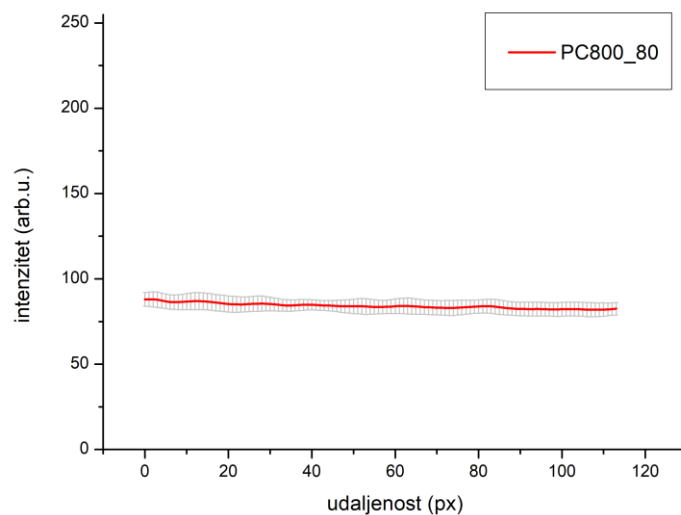


*Slika 55: Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na materijalu PC 800*

Na slici 56 prikazuju se promjene intenziteta šuma po površini optičke rekonstrukcije binarizacije 80% za materijal PC 800 kroz svako mjerenje. U odnosu na referentno mjerenje najznačajnija promjena intenziteta vidljiva je kod 1. mjerenja.



*Slika 56: Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PC 800 materijalu za sva mjerenja*



*Slika 57: Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na materijalu PC 800*

## 5.2. MIKROSKOPSKO MJERENJE

Mikroskopska mjerenja uzoraka provodila su se pomoću Leica DM2500 mikroskopa koji se koristi za mikroskopiranje otisaka, papira i tiskovnih formi. Mikroskop ima mogućnost uvećanja 2.5, 10, 20 i 40 puta, no u svrhu ovog istraživanja koristio se objektiv uvećanja 20 puta jer su se dobiveni rezultati pokazali najpovoljnijima. Osim samog holograma, snimala se i površina materijala koja se u postupku obrade podataka oduzimala od holograma kako bi se dobio što točniji rezultat ispitivanja.

Prilikom analize mikroskopskih mjerenja, važno je uzeti u obzir potencijalno narušavanje kvalitete mikroskopskih snimaka i ograničenje programskih kalkulacija. Dobiveni rezultati su radi lakšeg pregleda stavljeni u tablice (Tablica 3, Tablica 4, Tablica 5). Rezultati koji imaju predznak + (plus) označavaju proširenje rešetke holograma što znači prolazak manje svjetla, dok predznak - (minus) označava suženje odnosno prolazak više svjetla kroz tiskanu površinu. Prolazak svjetla ujedno je povezan s kvalitetom optičke rekonstrukcije odnosno šumom koji se stvara oko iste. Mikroskopski uzorci uspoređeni su s digitalnom interferentnom strukturom sljedećom formulom, gdje su  $I$  i  $A$  slike, a  $m$  i  $n$  njihove dimenzije:

$$Diff = \frac{\|I - A\|_F}{\sqrt{m \times n}} = \sqrt{\frac{(I_{1,1} - A_{1,1})^2 + (I_{1,2} - A_{1,2})^2 + \dots + (I_{m,n} - A_{m,n})^2}{m \times n}}$$

### a) PVC 0.2



*Slika 58: Usporedba interferentne strukture referentnog mjerenja; mikroskopski, digitalni i tresholdani prikaz, PVC 0.2*

U tablici (Tablica 3) su prikazani podaci o postotnim odstupanjima mikroskopske interferentne rešetke od digitalne za materijal PVC 0.2.

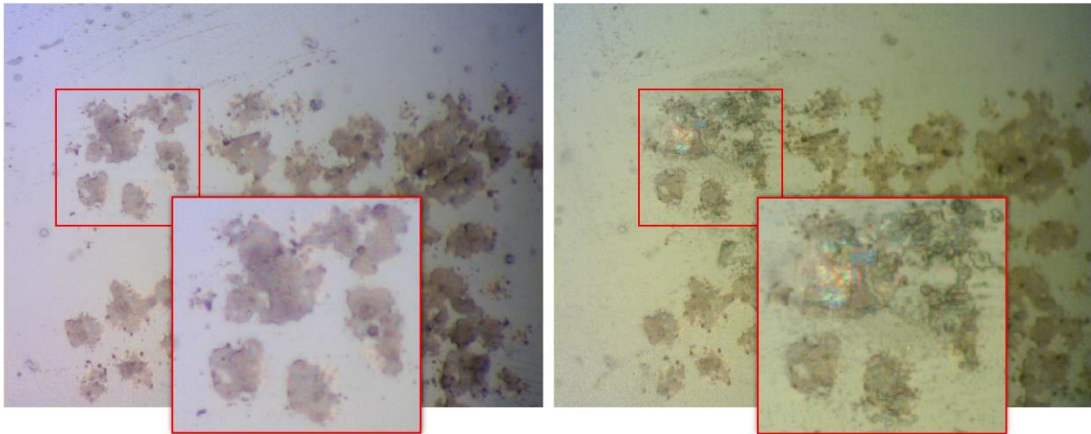
**Tablica 3:** Analiza promjena binarizacije, PVC 0.2 sva mjerenja

<b>PVC 0.2</b>			
<i>postotak propuštenog svjetla / broj mjerenja</i>	<b>40%</b>	<b>60%</b>	<b>80%</b>
<b>postotak pokrivenosti površine otiskom</b>	<b>60%</b>	<b>40%</b>	<b>20%</b>
referentno mjerenje	+ 17,54%	+ 23,12%	+ 16,41%
1. mjerenje	+ 15,44%	+ 22,04%	+ 13,97%
2. mjerenje	+ 16,34%	+ 20,26%	+ 13,18%
3. mjerenje	+ 13,04%	+ 20,49%	+ 13,03%
4. mjerenje	+ 16,89%	+ 19,57%	+ 13,42%
5. mjerenje	+ 17,06%	+ 20,17%	+ 16,78%
6. mjerenje	+ 15,84%	+ 19,85%	+ 28,41%

Očekivano je da se struktura narušila prilikom starenja, no i dalje zadržava vjerodostojan prikaz. Važno je naglasiti da se postotak promjene binarizacije mijenja u prihvatljivim razmjerima s obzirom na kvalitetu optičke rekonstrukcije. Promjena između referentnog i ostalih mjerenja mijenja se u rasponu od 3 do 4% razlike, što znači da se površina otiska holograma nije značajno mijenjala tijekom procesa starenja. Binarizacija 40% se u referentnom mjerenju razlikuje za +17,54% što nam ukazuje da je već proces tiska utjecao na promjenu rešetke.

Tijekom procesa starenja, promjena u postotcima se mijenja u rasponu od 13 do 18%, što je zanemariva razlika u postojanosti informacija optičke rekonstrukcije. Informacija koju optička rekonstrukcija prikazuje i dalje je postojana. Slična situacija je i kod optičke

rekonstrukcije 60% i 80% binarizacije, no možemo primijetiti povećanu razliku u postotku 6. mjerenja binarizacije 80%. Takva razlika proizlazi iz oštećenja prilikom starenja i mjerenja uzoraka (slika 59), no i dalje je zanemariva obzirom na prethodne postotke.



*Slika 59: Prikaz razlike referentnog i 6. mikroskopskog mjerenja, binarizacije 80%*

### **b) PVC 0.3**



*Slika 60: Usporedba interferentne strukture referentnog mjerenja; mikroskopski, digitalni i tresholdani prikaz, PVC 0.3*

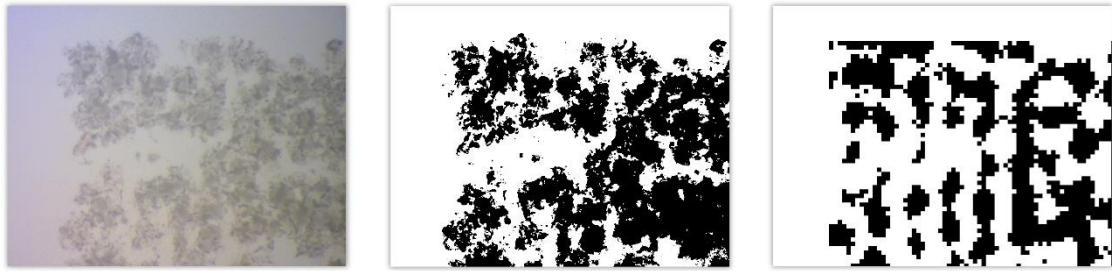
U tablici (Tablica 4) su prikazani podaci o postotnim odstupanjima mikroskopske interferentne rešetke od digitalne za materijal PVC 0.3.

**Tablica 4:** Analiza promjena binarizacije, PVC 0.3 sva mjerenja

<b>PVC 0.3</b>			
<i>postotak propuštenog svjetla / broj mjerenja</i>	<b>40%</b>	<b>60%</b>	<b>80%</b>
<b>postotak pokrivenosti površine otiskom</b>	<b>60%</b>	<b>40%</b>	<b>20%</b>
referentno mjerenje	+ 11,50%	+ 15,39%	+ 12,49%
1. mjerenje	+ 12,89%	+ 16,26%	+ 12,29%
2. mjerenje	+ 14,72%	+ 15,91%	+ 9,60%
3. mjerenje	+ 12,69%	+ 11,60%	+ 11,45%
4. mjerenje	+ 18,71%	+ 19,07%	+ 8,17%
5. mjerenje	+ 19,27%	+ 15,81%	+ 13,71%
6. mjerenje	+ 19,16%	+ 18,89%	+ 12,25%

Jednako kao i prethodni materijal, PVC 0.2, vidljive su očekivane postotne promjene u binarizacijama, no i dalje u zanemarivom rasponu. U odnosu na PVC 0.2, kod materijala PVC 0.3 postotci osciliraju u nezamjetno većem iznosu, između 5 i 8%. Binarizacija 80% se pokazala kao najpovoljnijom uzevši u obzir najmanje oscilacije i jednako tako najmanje razlike s originalom.

### c) PC 800



*Slika 61: Usporedba interferentne strukture referentnog mjerenja; mikroskopski, digitalni i tresholdani prikaz, PC 800*

U tablici (Tablica 5) su prikazani podaci o postotnim odstupanjima mikroskopske interferentne rešetke od digitalne za materijal PC 800.

*Tablica 5: Analiza promjena binarizacije, PC 800 sva mjerenja*

<b>PC 800</b>			
<i>postotak propuštenog svjetla / broj mjerenja</i>	<b>40%</b>	<b>60%</b>	<b>80%</b>
<b>postotak pokrivenosti površine otiskom</b>	<b>60%</b>	<b>40%</b>	<b>20%</b>
referentno mjerenje	+ 5,89%	+ 0,51%	+ 4,58%
1. mjerenje	+ 8,95%	- 15,57%	- 1,49%
2. mjerenje	+ 3,88%	- 6,37%	+ 1,59%
3. mjerenje	+ 1,71%	- 0,30%	+ 3,01%
4. mjerenje	+ 17,27%	+ 4,88%	+ 6,47%
5. mjerenje	+ 18,50%	+ 3,67%	+ 10,73%
6. mjerenje	+ 18,27%	+ 3,07%	+ 13,62%

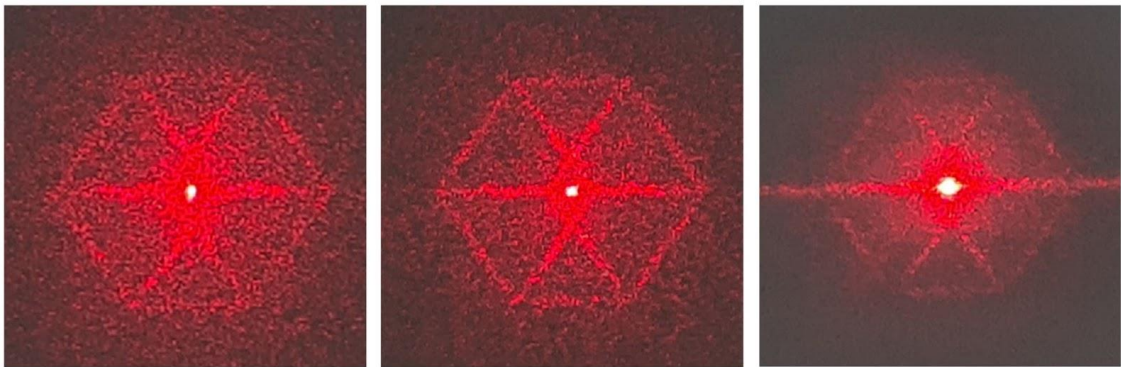


Materijal PC 800 ima značajne oscilacije kroz mjerenja, od 14 do 19%. Za razliku od prethodnih materijala, kod ovog materijala je vidljiv i negativan predznak. Varijacije pozitivnog i negativnog predznaka kroz mjerenja se mogu pripisati utjecaju tehnike tiska i deformacijama nastalim prilikom laminacije otiska, koje narušavaju površinu holograma, a naposljetku i optičku rekonstrukciju. Najvjerniji prikaz zadržava binarizacija 60%, koja ujedno pokazuje i najbolji rezultat od svih mjerenih binarizacija.

## 6. RASPRAVA

Analiziranjem optičkih rekonstrukcija tiskanih računalno generiranih holograma i njihovih mikroskopskih snimki za materijale PVC 0.2, PVC 0.3 i PC 800, željelo se utvrditi zadržava li se postojanost informacije kako je očekivano prije samog istraživanja.

Prilikom referentnih mjerenja tiskanih holograma, a u svrhu utvrđivanja može li se koristiti ofsetni tisak za ove potrebe, optičke rekonstrukcije su pokazale da jasno zadržavaju informaciju: materijali PVC 0.2 i PVC 0.3 jasnije u odnosu na materijal PC 800, kod kojeg se i očekivalo narušavanje obzirom na laminaciju.



*Slika 62: Referentna optička rekonstrukcija materijala PVC 0.2, PVC 0.3 i PC 800*

Prilikom analize signala optičke rekonstrukcije tiskanog računalno generiranog holograma, utvrđeno je sljedeće:

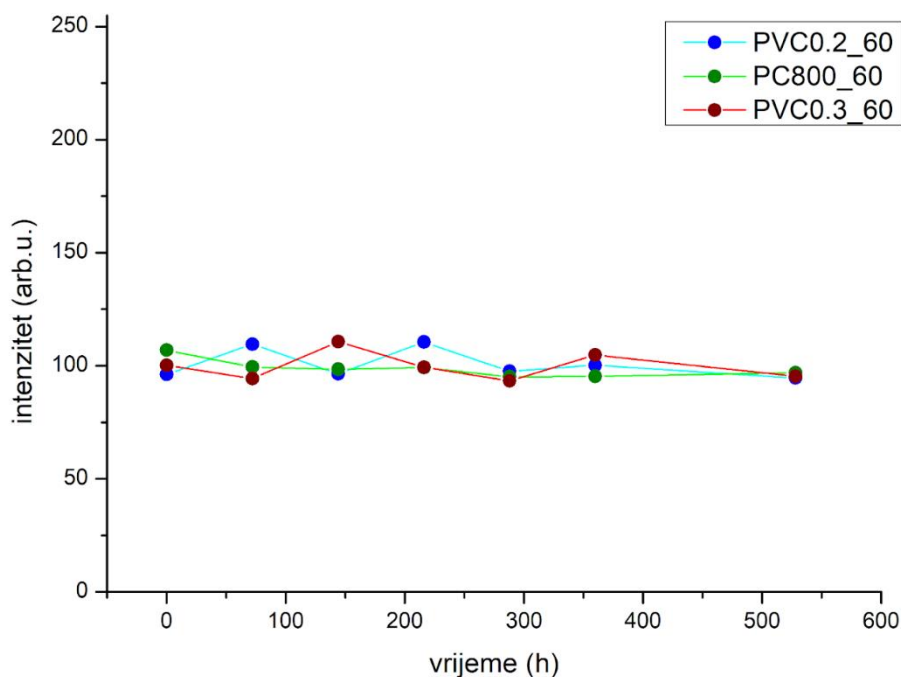
Računalno generirani hologram otisnut na materijalu PVC 0.2 je tijekom procesa starenja kod svih binarizacija zadržao sličan intenzitet prilikom optičke rekonstrukcije. Ako se usporede referentno i završno mjerenje, a uzmu u obzir i među mjerenja, najmanju razliku u intenzitetu je pokazao hologram binarizacije 60%, koji na kraju pokazuje razliku u slabljenju intenziteta za 2 jedinice, što je gotovo zanemarivo.

Hologram na materijalu PVC 0.3 slično kao i kod prethodnog materijala zadržava prilično horizontalan zajednički graf za svaku binarizaciju. Iako binarizacija 80% tijekom procesa

mjerenja ima najmanje oscilacije, binarizacija 60% daje najvjerniji rezultat ako se usporede referentno i krajnje mjerenje, gdje je razlika u intenzitetu 5 jedinica.

Hologram na materijalu PC 800 je već na početku mjerenja imao slabiji intenzitet od prethodnih materijala, obzirom na utjecaj laminacije. Sve binarizacije osciliraju maksimalno 10 jedinica intenziteta, a najbolji prikaz zadržava binarizacija 80% čija je razlika početnog i završnog intenziteta 5 jedinica.

Ukoliko se usporede sva tri materijala za binarizacije 60%, vidljivo je kako hologram materijala PC 800 rezultira najmanjom promjenom tijekom procesa starenja. No, zanimljivo je za istaknuti kako se intenzitet tijekom cijele analize ne mijenja samo u jednom smjeru, odnosno nije slučaj da isključivo samo slabi, već varira između slabijeg i jačeg intenziteta pri optičkoj rekonstrukciji. Za primijetiti je kako se u prvom dijelu procesa starenja vide veće razlike u promjeni intenziteta, dok se približavanjem kraju, odnosno na posljednjem mjerenju, intenziteti gotovo preklapaju u svojim vrijednostima.



*Slika 63: Usporedba signala svih mjerenja binarizacije 60%*

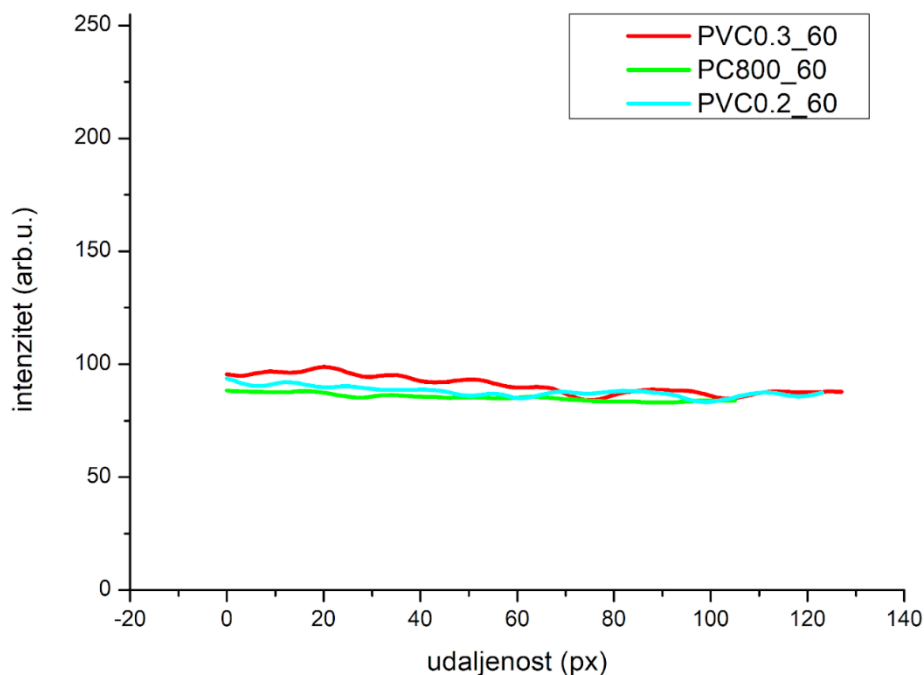
Prilikom analize šuma optičke rekonstrukcije tiskanog računalno generiranog holograma, utvrđeno je sljedeće:

Šum holograma na materijalu PVC 0.2 za binarizacije 40% i 60% rezultira grafovima koji osciliraju, ali ne u značajnim razmjerima, obzirom da se oscilacije događaju u malom rasponu. To dovodi do zaključka da nije bilo značajne promjene u intenzitetu, odnosno u kvaliteti optičke rekonstrukcije tijekom starenja uzoraka. Graf binarizacije 80% ima značajniju oscilaciju standardne devijacije zbog problema opisanog tijekom analize, no ona ne utječe na njegov krajnji izgled te i dalje zadržava dobru formu koja ukazuje da nema velikih promjena u kvaliteti optičke rekonstrukcije.

Kod optičke rekonstrukcije na materijalu PVC 0.3, grafovi svih binarizacija pokazuju slično razvijanje kroz vrijeme, a to je da zadržavaju horizontalu kod intenziteta šuma. Jednako kao i kod prethodnog materijala, takav graf prikazuje neznčajnu varijaciju u količini šuma. Krajnji rezultat koji se da iščitati iz grafova nam govori kako se informacija nije narušila tijekom procesa starenja.

Hologrami na materijalu PC 800 odnosno njihovi grafovi srednjeg šuma su nakon analize pokazali najblaže promjene te najmanji utjecaj procesa starenja na promjenu intenziteta. Usporedno s prethodna dva materijala, grafovi za ovaj materijal su najidealniji, obzirom da imaju minimalne oscilacije, gotovo neprimjetne. Sam intenzitet je nešto slabiji nego kod prethodnih, ali i dalje postojan.

Usporedbom grafova srednjeg šuma za binarizaciju 60% sva tri materijala, da se iščitati takav rezultat koji govori kako su promjene u intenzitetu slične u sva tri slučaja. Najjači intenzitet je pak vidljiv kod PVC 0.3 materijala, no ako se uzme u obzir da su sva tri materijala u rasponu od 90 do 105, za zaključiti je da su to potpuno prihvatljive oscilacije koje gotovo ne utječu na kvalitetu optičke rekonstrukcije.



**Slika 64:** Usporedba šuma svih mjerenja binarizacije 60%

Prilikom analize i usporedbe mikroskopskih prikaza tiskane rešetke s digitalnom, rezultiralo je sljedeće:

PVC 0.2 materijal je kroz usporedbu mjerenja pokazivao pozitivan predznak, što znači da je došlo do pozitivnog prirasta (*dot gain*). Najveću razliku je pak imala binarizacija 80%, čija vrijednost razlike u postotku binarizacije je varirala između 13 i 28%. Binarizacija 80% ima nagli skok kod 6. mjerenja zbog ranije opisane pogreške, no ako se izuzme ta vrijednost, ova binarizacija rezultira najmanje promjenjivom u odnosu na početnu rešetku. Bez obzira na to, važno je da je varijacija kroz proces starenja u tako minimalnom rasponu, što znači da zadržava kontinuitet informacije bez posebnog narušavanja. Binarizacije 40% i 60% variraju između 13 i 18% te 19 i 24%.

Slično kao i prethodni materijal, PVC 0.3 kod svih binarizacija ima pozitivne predznake. Najmanje promjene su vidljive kod binarizacije 80%, no takvo nešto je i za očekivati obzirom da sadrži najmanju tiskanu površinu. Binarizacija 80% kroz mjerenja oscilira u rasponu od 9 do 14%, binarizacija 60% u rasponu od 11 do 19%, a binarizacija 40% u

rasponu od 11 do 20% - što je još jedan pokazatelj na najbolju postojanost informacije kod binarizacije 80%.

Materijal PC 800 za binarizacije 60% i 80% kroz mjerenja izmjenjuje pozitivne i negativne predznake, što znači da se površina proširivala i reducirala već pod utjecajem laminacije, a zatim i starenja. Binarizacija 40% je zadržala samo pozitivan predznak, a varirala je u rasponu između 1 i 19%. Binarizacija 80% mijenja vrijednosti od -2 do 14%, a na najveće promjene nailazila je tijekom mjerenja binarizacija 60% koja oscilira u rasponu -16 do 5%. Iako je kroz mjerenja imala najveće oscilacije, binarizacija 60% je u završnom mjerenju pokazala najbolji rezultat uzevši u obzir sve materijale i binarizacije, te usporedno sa početnom rešetkom ima razliku od tek 3,07%.

## 7. ZAKLJUČAK

Primjena tiskanih računalno generiranih holograma kao zaštitnih elemenata na dokumentima sve je češća zbog potrebe povećanja razine sigurnosti od krivotvorenja. Njihova mogućnost pohrane složenih elemenata omogućuje kompleksnu zaštitu koja predstavlja prepreku krivotvoriteljima. Nastavno na to, ovaj rad je ispitao postojanost informacija u tiskano računalno generiranom hologramu tijekom procesa starenja.

Prije samog ispitivanja postavljene su hipoteze koje će poslužiti za donošenje zaključka.

**HIPOTEZA 1: Moguće je napraviti zadovoljavajuću optičku rekonstrukciju računalno generiranog holograma tiskanog ofset tehnikom tiska na transparentne materijale UV bojom.**

Ofsetni tisak koji je najčešća tehnika ispisa vrijednosnica i dokumenata, do sada nije bio istraživan u vidu tiska računalno generiranih holograma. Obzirom na učestalo korištenje cilj je bio ispitati kvalitetu otiska holograma, odnosno optičke rekonstrukcije istih. Nakon ispisa, a prilikom analize optičke rekonstrukcije referentnog uzorka dolazi se do zaključka da se rekonstrukcija holograma blago narušila, ali i dalje zadržava postojanost informacija. Materijali PVC 0.2 i PVC 0.3 imaju veću postojanost informacija u odnosu na materijal PC 800 kod kojeg proces laminacije utječe na površinu otisnutog holograma. Unatoč tome, materijal PC 800 i dalje ima dovoljno jasnu optičku rekonstrukciju. Naravno, u obzir se treba uzeti da ovaj zaključak vrijedi isključivo za uređaj, materijale i boje korištene u ovome radu te su moguće razlike ukoliko se odaberu drugačije specifikacije.

**HIPOTEZA 2: Nakon postupka starenja očekuje se da će hologram zadržati optimalnu kvalitetu informacija.**

Analiziranjem signala i šuma optičke rekonstrukcije holograma dolazi se do zaključka da nema značajnih promjena u intenzitetu optičke rekonstrukcije i količini propuštenog svjetla kroz otisnutu površinu prilikom procesa starenja što ukazuje na to da hologram i dalje zadržava postojanost prvotne informacije.

**HIPOTEZA 3: Dobiveni rezultati dati će smjernice za potrebne korekcije u procesu pripreme za tisak obzirom na namjenu, korištene materijali i tehniku ispisa.**

Završni prikazi rezultata jasno ukazuju na to gdje bi se trebale vršiti promjene i korekcije u procesu generiranja i pripreme za tisak koje bi nakon tih dorada za ove specifikacije ofsetnog tiska bile idealne i zadržavale postojanost informacija još kvalitetnije.

Zaključno, specifični ciljevi rada definirani na početku eksperimenta su ispunjeni, a nastavno na to potvrđene su sve postavljene hipoteze: moguće je napraviti zadovoljavajuću optičku rekonstrukciju računalno generiranog holograma tiskanog ofset tehnikom tiska koja će i nakon starenja zadržati optimalnu kvalitetu informacija, a istovremeno će nam dobiveni rezultati ukazati na potrebne korekcije u procesu izrade pripreme za tisak.

Daljnijim istraživanjem bi trebalo utvrditi kako prilagoditi parametre holograma za što idealniji rezultat prilikom ofsetnog tiska. Nadalje, osim prilagodbe parametara potrebno je provesti istraživanje utjecaja dužeg perioda starenja na postojanost informacija.



## **8. ZAHVALA**

Posebna zahvala našim mentorima izv. prof. dr. sc. Damiru Modriću i dr. sc. Vladimiru Cviljušcu na iskazanom povjerenju i izdvojenom vremenu. Hvala Vam što ste nas vodili svojim stručnim savjetima i omogućili nam ostvariti zadani cilj.

Veliko hvala Agenciji za komercijalnu djelatnost (AKD) na omogućavanju provedbe eksperimentalnog dijela ovog rada.

Zahvaljujemo se izv. prof. dr. sc. Igoru Majnariću i doc. dr. sc. Marini Vukoje na ustupljenim uređajima koji su korišteni u fazama ispitivanja uzoraka.

U konačnici, zahvaljujemo se i našim obiteljima, partnerima i prijateljima na podršci i razumijevanju koje su imali za nas tijekom procesa izrade ovog rada.

## 9. LITERATURA

- [1] G.K. Ackermann i J. Eichler, *Holography: A Practical Approach*, Weinheim: WILEY – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- [2] D. Gabor, A New Microscopic Principle, *Nature*, Vol. 161, pp. 777 – 778, 1948.
- [3] V. Cviljušac, Razvoj sustava rekonstrukcije tiskanih računalno generiranih holograma, doktorski rad, Grafički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2020.
- [4] E. N. Leith i J. Upatnieks, Reconstructed Wavefronts and Communication Theory, *Journal Of The Optical Society Of America*, Vol. 52, pp. 1123 – 1130, 1962.
- [5] P. Hariharan, *Basics of Holography*, University of Sydney, Cambridge University Press, 2002.
- [6] L. Yaroslavsky, *Digital Holography and Digital Image Processing: Principles, Methods, Algorithms*, Springer Science + Business Media, LLC., 2004.
- [7] P. – A. Blanche, *Field Guide to Holography*, SPIE PRESS, Bellingham, 2014.
- [8] K. Matsushima, *Introduction to Computer Holography: Creating Computer – Generated Holograms as the Ultimate 3D Image*, Springer, 2020.
- [9] P. Picart, *New Techniques in Digital Holography*, United States: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [10] M. Sutowski, M. Kujawinska, M. Stadnik, Holovideo based on digitally stored holograms, *Practical Holography XVI and Holographic Materials VIII*, Vol. 4659, No. 786, pp. 309 – 318, 2002.
- [11] G. Nehmetallah, R. Aylo, L. Williams, *Analog and digital holography with matlab*, SPIE PRESS, Bellingham, 2015.
- [12] U. Schnars, W. Jueptner, *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction and Related Techniques*, Springer, 2005.
- [13] V. Cviljušac, A. Divjak, D. Modrić, Computer Generated Holograms of 3D Points Cloud, *Techincal Gazette*, Vol. 25, No. 4, pp. 1020 – 1027, 2018.

- [14] M. J. Richardson i J. D. Wiltshire, *The Hologram: Principles and Techniques*, John Wiley and Sons Ltd, 2018.
- [15] N. Yoshikawa, M. Itoh, T. Yatagai, Binary computer – generated holograms for security applications from a synthetic double – exposure method by electron – beam lithography, *Optics Letters*, Vol.23, No. 18, pp. 1483 – 1485, 1998.
- [16] J. R. Vacca, *Holograms & Holography: Design, Techniques, Commercial Applications*, Charles River Media, INC., 2001.
- [17] P. Stepien i R. Stachowiak, Visual hologram security, *Proceedings of SPIE*, Vol. 5566, pp. 38 – 40, 2004.
- [18] R. James, M. Long, D. Newcomb, Designing security holograms, *Proceedings of SPIE*, Vol. 5310, pp. 264 – 274, 2004.
- [19] R. Kumar, D. Mohan, A. K. Aggarwal, Interferometric key readable security holograms with secrete – codes, *PRAMANA – journal of physics*, Vol. 68., No. 3, pp. 443 – 450, 2007.
- [20] G. Schrippa Spagnolo, M. De Santis, Computer Generated Hologram for SemiFragile Watermarking with Encrypted Images, *International Journal of Computer and Information Engineering*, Vol. 2, No. 11, pp. 3829 – 3837, 2008.
- [21] SOLARBOX\_Depliant,  
[http://www.cofomegra.it/www.cofomegra.it/documents/SOLARBOX\\_Depliant.pdf](http://www.cofomegra.it/www.cofomegra.it/documents/SOLARBOX_Depliant.pdf)  
[23.05.2021.]
- [22] SunCure Starluxe EU Technical Data Sheet,  
<http://www.totalgraphics.co.uk/downloads/tdssuncurestarluxe1.pdf> [23.05.2021.]

## 10. POPIS SLIKA I TABLICA

<b>Slika 1:</b> Prvi hologram (lijevo), rainbow hologram (desno) .....	4
<b>Slika 2:</b> Shema snimanja transmisijskog holograma.....	5
<b>Slika 3:</b> Shema snimanja refleksijskog holograma .....	5
<b>Slika 4:</b> Postava digitalne holografije - snimanje na CCD.....	6
<b>Slika 5:</b> Prikaz numeričke rekonstrukcije holograma .....	8
<b>Slika 6:</b> Primjeri holograma kao zaštitnih elemenata.....	10
<b>Slika 7:</b> Vizualni prikaz postupka eksperimenta .....	15
<b>Slika 8:</b> Prikaz korištenih slika iz kojih su se generirali 2D i 3D točkasti modeli.....	16
<b>Slika 9:</b> Primjer grafičke interpretacije vrijednosti .....	16
<b>Slika 10:</b> Izgled predloška osobne iskaznice sa pozicioniranim hologramima .....	18
<b>Slika 11:</b> Korekcije u pripremi za tisak holograma.....	18
<b>Slika 12:</b> Solarbox 1500e, uređaj za starenje uzoraka.....	21
<b>Slika 13:</b> Izgled uzoraka prije i poslije procesa starenja, u uređaju za starenje .....	21
<b>Slika 14:</b> Prikaz optičkih rekonstrukcija tiskanog uzorka.....	22
<b>Slika 15:</b> Usporedba numeričke i optičke rekonstrukcije.....	23
<b>Slika 16:</b> Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 60% na materijalu PVC 0.2, za analizu signala .....	24
<b>Slika 17:</b> Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC0.2 materijalu za sva mjerenja.....	24
<b>Slika 18:</b> Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC 0.2 materijalu u vremenu mjerenja.....	25
<b>Slika 19:</b> Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC0.2 materijalu za sva mjerenja.....	25
<b>Slika 20:</b> Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC 0.2 materijalu u vremenu mjerenja.....	26
<b>Slika 21:</b> Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC0.2 materijalu za sva mjerenja.....	26
<b>Slika 22:</b> Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC 0.2 materijalu u vremenu mjerenja.....	27
<b>Slika 23:</b> Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 40% na materijalu PVC 0.3, za analizu signala .....	28
<b>Slika 24:</b> Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC0.3 materijalu za sva mjerenja.....	28
<b>Slika 25:</b> Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC 0.3 materijalu u vremenu mjerenja.....	29
<b>Slika 26:</b> Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC0.3 materijalu za sva mjerenja.....	29
<b>Slika 27:</b> Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC 0.3 materijalu u vremenu mjerenja.....	30

<b>Slika 28:</b> Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC0.3 materijalu za sva mjerenja.....	30
<b>Slika 29:</b> Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC 0.3 materijalu u vremenu mjerenja.....	31
<b>Slika 30:</b> Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 80% na materijalu PC 800, za analizu signala.....	32
<b>Slika 31:</b> Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PC 800 materijalu za sva mjerenja.....	32
<b>Slika 32:</b> Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PC 800 materijalu u vremenu mjerenja.....	33
<b>Slika 33:</b> Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PC 800 materijalu za sva mjerenja.....	33
<b>Slika 34:</b> Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PC 800 materijalu u vremenu mjerenja.....	34
<b>Slika 35:</b> Prikaz Gauss krivulja signala za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PC 800 materijalu za sva mjerenja.....	34
<b>Slika 36:</b> Prikaz promjena najviših intenziteta za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PC 800 materijalu u vremenu mjerenja.....	35
<b>Slika 37:</b> Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 60% na materijalu PVC 0.2, za analizu šuma.....	36
<b>Slika 38:</b> Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC 0.2 materijalu za sva mjerenja .....	37
<b>Slika 39:</b> Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na materijalu PVC 0.2.....	37
<b>Slika 40:</b> Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC 0.2 materijalu za sva mjerenja .....	38
<b>Slika 41:</b> Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na materijalu PVC 0.2.....	38
<b>Slika 42:</b> Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC 0.2 materijalu za sva mjerenja .....	39
<b>Slika 43:</b> Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na materijalu PVC 0.2.....	39
<b>Slika 44:</b> Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 40% na materijalu PVC 0.3, za analizu šuma.....	40
<b>Slika 45:</b> Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PVC 0.3 materijalu za sva mjerenja .....	41
<b>Slika 46:</b> Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na materijalu PVC 0.3.....	41
<b>Slika 47:</b> Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PVC 0.3 materijalu za sva mjerenja .....	42
<b>Slika 48:</b> Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na materijalu PVC 0.3.....	42

<b>Slika 49:</b> Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PVC 0.3 materijalu za sva mjerenja .....	43
<b>Slika 50:</b> Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na materijalu PVC 0.3.....	43
<b>Slika 51:</b> Prikaz odabranog područja optičke rekonstrukcije holograma binarizacije 80% na materijalu PC 800, za analizu šuma.....	44
<b>Slika 52:</b> Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na PC 800 materijalu za sva mjerenja .....	45
<b>Slika 53:</b> Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 40% na materijalu PC 800 .....	45
<b>Slika 54:</b> Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na PC 800 materijalu za sva mjerenja .....	46
<b>Slika 55:</b> Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 60% na materijalu PC 800 .....	46
<b>Slika 56:</b> Prikaz šuma za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na PC 800 materijalu za sva mjerenja .....	47
<b>Slika 57:</b> Prikaz srednjeg šuma sa standardnom devijacijom za optičku rekonstrukciju holograma binarizacije 80% na materijalu PC 800 .....	47
<b>Slika 58:</b> Usporedba interferentne strukture referentnog mjerenja; mikroskopski, digitalni i tresholdani prikaz, PVC 0.2 .....	48
<b>Slika 59:</b> Prikaz razlike referentnog i 6. mikroskopskog mjerenja, binarizacije 80% ...	50
<b>Slika 60:</b> Usporedba interferentne strukture referentnog mjerenja; mikroskopski, digitalni i tresholdani prikaz, PVC 0.3 .....	50
<b>Slika 61:</b> Usporedba interferentne strukture referentnog mjerenja; mikroskopski, digitalni i tresholdani prikaz, PC 800 .....	52
<b>Slika 62:</b> Referentna optička rekonstrukcija materijala PVC 0.2, PVC 0.3 i PC 800....	54
<b>Slika 63:</b> Usporedba signala svih mjerenja binarizacije 60% .....	55
<b>Slika 64:</b> Usporedba šuma svih mjerenja binarizacije 60% .....	57
<b>Tablica 1:</b> Specifikacije CtP uređaja.....	19
<b>Tablica 2:</b> Specifikacije materijala .....	20
<b>Tablica 3:</b> Analiza promjena binarizacije, PVC 0.2 sva mjerenja.....	49
<b>Tablica 4:</b> Analiza promjena binarizacije, PVC 0.3 sva mjerenja.....	51
<b>Tablica 5:</b> Analiza promjena binarizacije, PC 800 sva mjerenja.....	52

## 11. SAŽETAK

### Utjecaj procesa starenja na postojanost informacija u tiskanim računalo generiranim hologramima

Ana Čaćić, Tea Čapko

Holografija je fotografska tehnika koja omogućuje snimanje i kasniju rekonstrukciju valne fronte svjetlosti raspršene s predmeta. Holografija je najpoznatija kao metoda generiranja trodimenzionalnih slika, ali ima i široki spektar drugih primjena. Računalna holografija, odnosno računalo generirani hologrami predstavljaju jednostavniji način izrade holograma bez upotrebe specifične laboratorijske opreme. Upravo zbog dostupnosti i relativne jednostavnosti izrade postaju sve primjenjiviji, posebice u područjima zaštite informacija, dokumenata, vrijednosnica i proizvoda. Široka primjena potaknula je razne pristupe izračunu i proizvodnim metodama, što je rezultiralo proizvodnjom tiskanih holograma specifičnih karakteristika. Njihove su se karakteristike pokazale da se mogu koristiti kao element visoke razine zaštite prilikom njihove implementacije na dokumente, no postojanost informacija, kao posljedica starenja samih materijala korištenih u određenoj tehnici tiska, do sada nije ispitana.

U ovom radu cilj je bio ispitati postojanost informacija u računalo generiranim hologramima tiskanim ofset tehnikom tiska, na tri materijala, tijekom procesa starenja uzoraka. U prvom dijelu rada dan je teorijski uvod u holografiju i računalo generirane holograme. Drugi, eksperimentalni dio, bavio se ispitivanjem postojanosti informacija optičke rekonstrukcije holograma s različitim postocima propusnosti svjetla. Istraživanje je pokazalo da je moguće realizirati zadovoljavajuću optičku rekonstrukciju računalo generiranog holograma tiskanog ofset tehnikom tiska koja će i nakon starenja zadržati optimalnu kvalitetu informacija, a istovremeno će nam dobiveni rezultati dati smjernice za potrebne korekcije u procesu izrade pripreme za tisak.

**KLJUČNE RIJEČI:** tiskani računalo generirani hologrami, proces starenja, postojanost informacija, ofsetni tisak, zaštitni elementi na dokumentima

## 12. SUMMARY

### **The influence of aging process on information stability in printed computer – generated holograms**

Ana Čaćić, Tea Čapko

Holography is a photographic technique that allows the capture and subsequent reconstruction of the wavefront of light of a scattered subject. Holography is best known as a method of generating three - dimensional images, but it also has a wide range of other applications. Computer holography or computer – generated holograms are an easier way of making a hologram without the use of specific laboratory equipment. Because of the availability and relative ease of their production, they are becoming more applicable, especially in the areas of protection of information, documents, securities and products. Widespread application has prompted various approaches to calculation and production methods resulting in the production of printed holograms of specific characteristics. Their characteristics have shown that they can be used as a high level of protection feature when implemented on documents, but the stability of information, as a result of aging of the materials used in a particular printing technique, has not been studied.

In this paper, the aim was to examine the stability of information in computer – generated holograms printed by offset printing, on three materials, during the aging process. The first part of the paper gives a theoretical introduction to holography and computer – generated holograms. The second, experimental part, dealt with the examination of the information temporal stability of holograms optical reconstruction with different percentages of light transmission. The research has shown that it is possible to realize a satisfactory optical reconstruction of a computer – generated holograms, printed with offset printing technique, which will maintain the optimal quality of information after the aging process. At the same time, the obtained results will give us guidelines for the necessary corrections in the prepress process.

**KEYWORDS:** *printed computer – generated holograms, aging process, information stability, offset printing, security elements on documents*



