



Sveučilište u Zagrebu
GRAFIČKI FAKULTET

Jelena Vlašić

**OPTIMIZACIJA GRAFIČKE PRIPREME SLIKE
ZA DIGITALNE I TISKANE MEDIJE**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF GRAPHIC ARTS

Jelena Vlašić

**OPTIMIZATION OF PREPRESS FOR IMAGES IN
DIGITAL AND PRINT MEDIA**

DOCTORAL DISSERTATION

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAFIČKI FAKULTET

Jelena Vlašić

**OPTIMIZACIJA GRAFIČKE PRIPREME SLIKE
ZA DIGITALNE I TISKANE MEDIJE**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Modrić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF GRAPHIC ARTS

Jelena Vlašić

**OPTIMIZATION OF PREPRESS FOR IMAGES IN
DIGITAL AND PRINT MEDIA**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:

Prof. Damir Modrić, PhD

Zagreb, 2024.

BIOGRAFIJA MENTORA

Prof. dr. sc. Damir Modrić rođen je u Zagrebu 1957. godine gdje je završio osnovno i srednjoškolsko obrazovanje. Po završenoj srednjoj školi 1975. godine upisuje studij fizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Nakon diplome zaposlio se u Elektrotehničkom institutu "Rade Končar", u odjelu energetske elektronike, a temeljem ugovora o suradnji EI "Rade Končar" i Instituta za fiziku Sveučilišta u Zagrebu radi s grupom za Fiziku ioniziranih plinova akademika dr. sc. Gorana Pichlera na temi "Istraživanje i razvoj fizikalnih osnova lasera za industrijske primjene".

1987. god. upisao je Poslijediplomski studij na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu (smjer: Atomska i molekularna fizika), a magistarski rad pod naslovom „Poluklasični račun spektara difuznih vrpca alkalijskih molekula“ obranio je 2001. god.

Početak 1991. god. zaposlio se na Grafičkom fakultetu u Zagrebu na Katedri fizike u grafičkoj tehnologiji gdje radi do umirovljenja 2022. godine. Poslijediplomski studij na Grafičkom fakultetu upisuje 2000. god., a doktorsku disertaciju pod naslovom: „Raspršenje i transport svjetlosti u tiskovnim podlogama” obranio je 2007. god.

Na Grafičkom fakultetu bio je voditelj Katedre za temeljna i opća znanja u grafičkoj tehnologiji tijekom ak. g. 2013./14. - 16./17. Od ak. g. 2012./13. do umirovljenja 2022. godine nositelj je i sunositelj tri kolegija na Poslijediplomskom doktorskom studiju Grafičko inženjerstvo i oblikovanje grafičkih proizvoda.

Predstavnik je (član i zamjenik) Grafičkog fakulteta u Zagrebu u Vijeću tehničkog područja Sveučilišta u Zagrebu (ak. god. 2013./14. – 16./17.). Predsjednik Povjerenstva za doktorski studij i znanost na Grafičkom fakultetu u Zagrebu bio je 2015./16. godine. Bio je suradnik na više projekata financiranih od strane Hrvatske zaklade za znanost. Glavni je urednik međunarodnog znanstvenog časopisa za tiskarstvo i grafičke komunikacije ACTA GRAPHICA od 2015. do 2022. godine, te član uređivačkog odbora u više znanstvenih časopisa. Član je više programskih i recenzijskih odbora međunarodnih konferencija i simpozija (Blaž Baromić, Tiskarstvo i dizajn, ...). Koordinator je i član HRZZ panela za vrednovanje projektnih prijedloga prijavljenih na natjecanje HRZZ (TZ-P3 i PTZ2). Član je suradnik Hrvatske akademije tehničkih znanosti od 20. svibnja 2019. Sudionik je i nosilac Spomenice domovinskog rata 1991/92.

Mojim roditeljima...

Prije svega, želim iskazati veliku zahvalnost mentoru prof. dr. sc. Damiru Modriću čija je stručnost, strpljenje i neprestana podrška bila ključna za završetak ovog rada.

Također, zahvaljujem se članovima povjerenstva za ocjenu doktorskog rada izv. prof. dr. sc. Mili Matijeviću, doc. dr. sc. Vladimiru Cviljušcu i doc. dr. sc. Marku Moriću na njihovim dragocjenim komentarima i sugestijama.

Posebnu zahvalnost dugujem svojim kolegicama i kolegama sa Sveučilišta Sjever za njihovu podršku, ohrabrenje i zajedništvo tokom cijelog ovog procesa. Vaša stručnost, savjeti i prijateljstvo su mi pomogli da savladam mnoge prepreke.

Osobito se zahvaljujem rektoru Sveučilišta Sjever prof. dr. sc. Marinu Milkoviću na izuzetnoj susretljivosti i na svim sugestijama koje su bile od neprocjenjive vrijednosti.

Hvala i svim studenticama i studentima koji su sudjelovali u pojedinim fazama istraživanja.

SAŽETAK

Cilj istraživanja provedenih u ovoj disertaciji je definirati smjernice za pripremu digitalne slike u sustavima koji generiraju sadržaje namijenjene prikazu na web stranici i za ispis na papiru. Priprema fotografije za objavu u web okruženju podrazumijeva optimizaciju zapisa kako bi se dobio optimalni omjer kvalitete i veličine slikovne datoteke. Ključni korak optimizacije je redukcija broja piksela koji čine sliku, a potom slijedi sažimanje slikovnih podataka primjenom odabranog algoritma. Očekivane smjernice dobivene su kvalitativnim i kvantitativnim ispitivanjem relevantnih grafičkih formata i pripadajućih metrika kompresije te određivanjem optimalnih postavki pri izradi slika za spomenuta dva različita slučaja primjene.

Razmatrana su dva grafička formata zapisa slike, JPEG i WebP. JPEG format zapisa slike koristi se već dugi niz godina, a iako postoji niz novijih formata, i dalje se često koristi zbog svoje široke podrške i jednostavnosti korištenja. WebP format, s druge strane, je noviji format koji se razvijao s ciljem poboljšanja učinkovitosti kompresije slika i brzine učitavanja web stranica. Prema dosadašnjim istraživanjima, WebP format je napredniji od JPEG-a u kontekstu mogućnosti, no i u samoj optimizaciji slikovnog zapisa. To se pokazalo i u ovoj disertaciji.

Poseban naglasak postavljen je na razmatranje utjecaja rezolucije i kompresije na subjektivni doživljaj kvalitete slike te utjecaj optimizacije na reprodukciju boja i veličinu slikovne datoteke. Subjektivne metode procjene najpouzdaniji su načini mjerenja obzirom da je ljudski vizualni sustav krajnji primatelj slikovnih informacija. Takva prosudba ocjene temeljena na percepciji promatrača ima važnu ulogu u sustavima vizualnih komunikacija.

Kako bi se znanstvenom metodom utvrdile činjenice na temelju kojih bi se nedvosmisleno i sveobuhvatno donijeli relevantni zaključci, razvijena je nova eksperimentalna metoda za ispitivanje kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika grafičkih formata na velikom broju uzoraka, koja obuhvaća subjektivne i objektivne pokazatelje reprodukcije slike u razmatranim okruženjima. Metodologija prikazana u eksperimentalnom dijelu rada obuhvaća niz jednostavno ponovljivih koraka koji su potpomognuti razvijenom programskom podrškom u vidu raznih programa čija je namjena automatizacija kompliciranih zadataka. Provedenim istraživanja potvrđene su sve predviđene hipoteze, uspješno su ostvareni svi očekivani znanstveni doprinosi i ostvaren je cilj doktorskog rada, odnosno definirane su smjernice za grafičku pripremu digitalnih slika u razmatranom kontekstu.

Ključne riječi: grafička priprema, JPEG, WebP, rezolucija, kompresija, ljudski vizualni sustav, smjernice, eksperimentalna metoda

EXTENDED ABSTRACT

The aim of the research conducted in this dissertation is to define guidelines for preparing digital images in systems that generate content intended for display on websites and for printing on paper. Preparing a photograph for publication in a web environment involves optimizing the file to achieve the optimal balance between quality and file size. The key optimization step involves reducing the number of pixels that make up the image, followed by compressing the image data using a selected algorithm. The expected guidelines were obtained through qualitative and quantitative examination of relevant graphic formats and compression metrics, as well as by determining the optimal settings for creating images for the two aforementioned different application scenarios.

Optimizing images for web and print requires a special approach due to the different characteristics of the end media. While web optimization focuses on transmission speed and on-screen display, high resolution and detail are crucial for printing. Therefore, it is important to adjust compression settings and image resolution according to the specificities of each medium. Additionally, the research identified optimal compression methods and file formats that ensure minimal loss of image quality. The combination of qualitative and quantitative analyses has facilitated the development of concrete guidelines to streamline the process of preparing digital images for various types of publications.

Two graphic file formats were considered: JPEG and WebP. JPEG has been used for many years and, despite the existence of newer formats, it is still frequently used due to its widespread support and ease of use. On the other hand, WebP is a newer format developed to improve image compression efficiency and web page loading speed. According to previous research, WebP format is more advanced than JPEG in terms of capabilities and image compression optimization, a finding supported by this dissertation.

The research extensively analyzed the characteristics of both formats across various aspects, including file size, image quality, and loading speed. The results confirmed that WebP format provides significantly better compression with minimal loss of quality compared to JPEG. Moreover, WebP stands out for its optimization capabilities for web environments, making it an attractive choice for digital content intended for online display. This dissertation provides further confirmation that WebP format is promising and could become the standard format for web graphics in the future.

Special emphasis was placed on considering the impact of resolution and compression on the subjective perception of image quality, as well as the impact of optimization on color

reproduction and file size. Subjective evaluation methods are the most reliable means of measurement since the human visual system is the end recipient of visual information. Such subjective assessment based on observer perception plays a crucial role in visual communication systems.

The research employed various subjective evaluation methods, including participant ratings and visual tests, to gain deeper insights into the perception of image quality in different scenarios. The results showed that even small changes in resolution and compression can significantly affect viewers' perception of image quality. Furthermore, optimizing resolution and file size are crucial factors in achieving an optimal balance between visual appeal and data transmission efficiency. Understanding the subjective aspects of image quality is essential for developing effective optimization strategies and improving user experience in digital media.

To scientifically establish facts upon which relevant conclusions could be unambiguously and comprehensively drawn, a new experimental method was developed to examine the qualitative and quantitative characteristics of graphic formats on a large number of samples, encompassing subjective and objective indicators of image reproduction in the considered environments. The methodology presented in the experimental section of the work includes a series of easily replicable steps aided by developed software support for automating complex tasks. The following research hypotheses were formulated:

H1: In the context of image display on a monitor screen, image quality will be perceived as high when the number of pixels constituting the image is greater than the number of pixels that fit within the frame in which the image is displayed.

H2: It is possible to significantly reduce the size of the image file by combining resolution reduction optimization with compression, while maintaining high subjective perception of quality and accurate color reproduction.

H3: Optimizations performed in the context of image display on a monitor screen are applicable to image preparation for printing, while maintaining a roughly equal high subjective perception of quality between optimized and unoptimized printed images.

Additionally, anticipated and expected scientific contributions are outlined:

C1: A new experimental method for examining the qualitative and quantitative characteristics of graphic formats on a large number of samples, encompassing subjective and objective indicators of image reproduction in the considered environments.

C2: Guidelines for graphic preparation of digital images in systems generating image content intended for two different environments, digital (websites) and printing.

C3: Determination of optimal resolution values and compression levels in the process of graphic image preparation using JPEG and WebP format for modern multimedia environments.

The conducted research confirmed all predicted hypotheses, successfully achieved all expected scientific contributions, and accomplished the goal of the doctoral thesis, i.e., defining guidelines for graphic preparation of digital images in the considered context.

Keywords: graphic preparation, JPEG, WebP, resolution, compression, human visual system, guidelines, experimental method

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Cilj i hipoteze istraživanja.....	4
1.2. Očekivani znanstveni doprinos	4
2. TEORIJSKI DIO	5
2.1. Digitalna slika	5
2.1.1. Uzorkovanje i kvantizacija.....	6
2.1.2. Prostorna i tonska rezolucija slike.....	10
2.2. Rezolucija uređaja	19
2.3. Česti formati datoteka piksel grafike na web stranicama.....	21
2.3.1. GIF	23
2.3.2. PNG.....	24
2.3.3. JPEG.....	24
2.3.4. WEBP.....	30
2.4. Teorije percepcije boje	34
2.4.1. Trikromatska teorija doživljaja boja	35
2.4.2. Teorija oponentnih procesa doživljaja boja	36
2.4.3. Zonska teorija doživljaja boja	36
2.5. Terminologija vidnog polja.....	37
3. EKSPERIMENTALNI DIO	39
4. RASPRAVA	83
5. ZAKLJUČAK	88
6. POPIS LITERATURE	91
7. PRILOZI	98
7.1. Popis tablica	98
7.2. Popis slika	100

7.3.	Popis kodova	102
8.	ŽIVOTOPIS S POPISOM OBJAVLJENIH RADOVA.....	103

1. UVOD

Multimedija je kombinacija više vrsta medija (tekst, slike, zvuk, animacije i video) koji zajedno tvore jedinstvenu smislenu cjelinu [1]. U ranijoj fazi primjene, multimedijски informatički proizvodi bili su uglavnom namijenjeni lokalnoj reprodukciji, što je podrazumijevalo nabavu fizičkog medija za pohranu podataka, instalaciju te potom korištenje istih isključivo na osobnom računalu. Razvojem brzine pristupa internetu i pripadajućih web tehnologija, distribucija i konzumacija multimedijских informatičkih proizvoda postupno se preselila u online okruženje [1], [2]. Danas je većina poslovnih i zabavnih aplikacija pretvorena u online inačice, što znači da ih nije potrebno preuzeti i instalirati, već se mogu koristiti izravno kroz web sučelje. Time se web postupno transformirao iz statičnog medija u globalnu multimedijску platformu, čime je ujedno ostvaren i značajan iskorak od prvobitnog modela komunikacije [2], [3]. Naime, u početku web je funkcionirao kao oglasna ploča, što se ponajviše odnosilo na jednosmjernan protok informacija između autora web sadržaja i krajnjih korisnika, odnosno ciljane publike. Međutim, uskoro je svim korisnicima postalo jasno kako web u takvome obliku nema budućnost, već da je potrebno izbrisati stroge uloge i korisnicima omogućiti aktivnije sudjelovanje u oblikovanju sadržaja kroz interakciju s web stranicom [2], [3], [4], [5]. Prihvatanje novog modela komunikacije u web okruženju, baziranog na socijalizaciji, kolaboraciji i interakciji, rezultiralo je realizacijom niza inovativnih multimedijских online projekata kao što su razni servisi za razmjenu datoteka, društvene mreže, online enciklopedije, te raznih specijaliziranih aplikacija za informatičku podršku poslovnim, edukacijskim i znanstvenim procesima [3], [4].

U akademskom okruženju sve se intenzivnije koriste multimedijски web alati kao potpora nastavnom procesu [1], [6]. Međutim, multimedijalni sadržaj sve više postaje i dio znanstvene komunikacije te kao takav treba pratiti određene zahtjeve koje pred autore postavljaju časopisi. Taj sadržaj također mora proći recenzijski postupak kao i tekstualni dio, što zahtijeva određeni stupanj standardizacije koji omogućava njegovom pristupu neovisno o platformi koju korisnik upotrebljava [7], [8]. Primjenom tih standarda značajno se pojednostavljuje administriranje, sistematizacija i arhiviranje članaka, odnosno podataka prikupljenih kroz kontinuirano praćenje rada studenata tijekom obrazovnog razdoblja, ako se koristi u nastavnom procesu. Obzirom da je broj časopisa koji aktivno objavljuje članke s multimedijalnim sadržajem izuzetno mali, u ovom radu će se fokusirati na primjenu sličnih standarda u web aplikacijama koje se koriste u obrazovnom procesu [6], [7], [8], [9], [10], [11]. Takvi dokumenti često nisu praktični za

preuzimanje i čitanje na mobilnim uređajima, pogotovo ako imaju inkorporirani multimedijски sadržaj (npr. animacije, video, zvuk i sl.), jer je za to potreban poseban preglednik [12], [13]. Obzirom da značajan udio korisnika sustavu pristupa pametnim telefonom ili tabletom, to negativno utječe na korisničko iskustvo i pristupačnost podataka. U kontekstu korištenja web sučelja, aspekt upotrebljivosti i pristupačnosti izrazito je značajan te bi kao takav trebao biti da i onim manje iskusnim korisnicima omogućuje jednostavnu, brzu i učinkovitu interakciju sa web sadržajem [14]. Loše korisničko iskustvo povezano je s otežanom navigacijom kroz dokument i čestom izmjenom potrebnih zaslona i aplikacija. Rješenje problema je predaja dokumenata u fleksibilnijem obliku, pri čemu se tekst i slike pohranjuju u pripadajuću bazu podataka i disk servera te potom pretvaraju u željeni format prikaza [15]. Ukoliko korisnici žele dokument pregledavati kroz web sučelje, sustav će generirati HTML dokument, odnosno ako ga žele preuzeti ili ispisati, sustav će pripremiti PDF datoteku. Takvi dokumenti bi se upisivali kroz posebno izrađen CMS sustav (engl. *Content Management System*) prema klasičnim načelima upravljanja sadržajem u web okruženju [16]. Pri izradi takvog sustava valja posvetiti posebnu pažnju upravljanju digitalnim slikama i vrednovanju funkcionalnih značajki standardiziranim sustava.

Zbog ograničenja tiskarskih strojeva, boje grafike namijenjene ispisu trebaju biti izražene u CMYK sustavu boja. Tražena boja izražava se postotkom zastupljenosti pojedine C, M, Y i K komponente, u iznosu od 0 do 100% [17], [18], [19]. Navedene komponente funkcioniraju kao filteri bijele svjetlosti, pomoću kojih se selektivno uklanjaju određene valne duljine (suptrakcija) i tako stvara doživljaj željene boje. Broj piksela u prikazu naziva se rezolucijom (broj piksela po mjernoj jedinici cm ili inch). Što je broj piksela veći, rezolucija je veća, a time i kvaliteta prikaza. Veličina prikazanog piksela određena je rezolucijom i dijagonalom ekrana. Gustoća piksela na ekranu (hardverski pojam) izražava se jedinicom ppi (engl. *pixels per inch*). Ukoliko se digitalna slika prisilno povećava, kvaliteta prikaza se smanjuje, odnosno slika postaje zrnata, pikselizirana. U tome slučaju, više piksela ekrana (hardverski pojam) čini jedan piksel digitalne slike (softverski pojam). Što je razlika veća, kvaliteta prikaza iste slike je lošija [17], [20], [21], [22].

Slike na webu mogu imati različita svojstva, ovisno o formatu zapisa. JPEG format prikladan je za grafičke zapise poput fotografija, GIF za transparentne slike i animacije do 256 boja, PNG za transparentne slike visoke kvalitete i SVG za vektorsku grafiku [17], [20], [23], [24], [25]. To su trenutno najpopularniji grafički formati koji se primjenjuju u web okruženju. Unazad nekoliko godina nastaju novi formati koji prema navodima proizvođača daju znatno

bolje rezultate u smislu kvalitete prikaza, uz značajno reduciranu veličinu izlazne datoteke [20], [23], [24], [26], [27]. Prema dostupnoj literaturi, najznačajniji novi format za primjenu u web okruženju je WebP, tvrtke Google Inc. [24], [26], [27]. WebP je, prema navodima proizvođača, primjeren za fotografije te transparentne i animirane slike visoke kvalitete, uz čak dvostruko manju izlaznu datoteku nego slika istih metrika kompresije u JPEG formatu, što je trenutno najpopularniji zapis bitmap slike na webu [26], [27], [28], [29]. Broj nezavisnih istraživanja karakteristika WebP formata je relativno mali, a potencijal izrazito velik, što ga čini dobrim izborom za eksperimentalni dio ovog rada, vezan za određivanje optimalnih postavki novog formata pri izradi grafike za web okruženje.

1.1. Cilj i hipoteze istraživanja

Cilj istraživanja je definirati smjernice za korištenje digitalne slike u sustavima koji generiraju sadržaj u dva različita okruženja (web i ispis). Očekivane smjernice dobit će se kvalitativnim i kvantitativnim ispitivanjem relevantnih grafičkih formata i pripadajućih metrika kompresije te određivanjem optimalnih postavki pri izradi slika za spomenuta dva različita slučaja primjene. Poseban naglasak postaviti će se na razmatranje utjecaja rezolucije i kompresije na subjektivni doživljaj kvalitete slike te utjecaj optimizacije na reprodukciju boja i veličinu slikovne datoteke, što je značajna stavka u kontekstu informacijsko-komunikacijskih sustava.

Postavljene su sljedeće hipoteze istraživanja:

H1: U kontekstu prikaza slike na zaslonu monitora, kvaliteta slike će biti percipirana kao visoka kada broj piksela koji čine sliku bude veći od broja piksela koji stanu u okvir unutar kojeg se slika prikazuje.

H2: Moguće je značajno smanjiti veličinu slikovne datoteke kombinirajući optimizaciju redukcijom rezolucije i potom kompresijom, a da subjektivna percepcija kvalitete ostane visoka, te da se boje reproduciraju vjerno originalu.

H3: Optimizacije provedene u kontekstu prikaza slike na zaslonu monitora primjenjive su i u kontekstu pripreme slika za ispis, a da pritom subjektivna percepcija kvalitete ispisane optimizirane i neoptimizirane slike bude približno jednako visoka.

1.2. Očekivani znanstveni doprinos

D1: Nova eksperimentalna metoda za ispitivanje kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika grafičkih formata na velikom broju uzoraka, koja obuhvaća subjektivne i objektivne pokazatelje reprodukcije slike u razmatranim okruženjima.

D2: Smjernice za grafičku pripremu digitalnih slika u sustavima koji generiraju slikovne sadržaje namijenjene primjeni u dva različita okruženja, digitalnom (web stranica) i za ispis.

D3: Utvrđivanje optimalnih vrijednosti rezolucije i stupnja kompresije u postupku grafičke pripreme slika primjenom JPEG i WebP formata zapisa, za potrebe modernog multimedijskog okruženja.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Digitalna slika

Pronalaženje metoda za opisivanje i procjenu karakteristika slike u središtu su znanosti o slici [30]. Za opisivanje slika često se koriste matematički modeli [31]. Slike su po svojoj prirodi analogne, a njihova upotreba u multimedijским sustavima podrazumijeva digitalnu interpretaciju. Matematički gledano analogna monokromatska slika može se definirati kao dvodimenzionalna funkcija dviju varijabli $f(x,y)$ gdje (x,y) koordinate opisuju prostorni položaj unutar okvira slike, a funkcija vrijednosti amplitude f proporcionalna je intenzitetu neke fizikalne veličine odnosno razini zračenja (sive) na bilo kojoj točki prostornih koordinata [30], [32] [33]. Ishodište $(0, 0)$ označeno na slici 1 prikazuje se u gornjem lijevom kutu, a vodoravni i okomiti pravac kroz ishodište predstavljaju x i y koordinatne osi [33].



Slika 1. Prikaz funkcije $f(x, y)$ analogne slike [33]

Vrijednost amplitude f na prostornim koordinatama (x, y) je pozitivna skalarna veličina čije značenje je određeno izvorom slike. Generiranjem slike iz fizičkog procesa njene vrijednosti proporcionalne su energiji koju zrači fizički izvor (npr. elektromagnetski valovi). Kao posljedica toga, vrijednosti $f(x, y)$ moraju biti različite od nule i konačno pa stoga vrijedi [34]:

$$0 < f(x, y) < \infty \quad (1)$$

Ako su (x, y) i vrijednost amplitude f konačne diskretne vrijednosti tada govorimo o digitalnoj slici [35].

Funkciju $f(x, y)$ mogu karakterizirati dvije komponente: (1) količina izvora osvjjetljenja koja pada na promatranu sliku i (2) količinu osvjjetljenja koju reflektiraju objekti na slici. One se prikladno nazivaju komponentama osvjjetljenja i refleksije i označavaju funkcijama $i(x, y)$, $r(x, y)$. Konačna formirana funkcija slike kao rezultat spajanja dviju funkcija na oblik $f(x, y)$ dana je jednadžbom:

$$f(x, y) = i(x, y) r(x, y) \quad (2)$$

gdje vrijedi:

$$0 \leq i(x, y) < \infty \quad (3)$$

i:

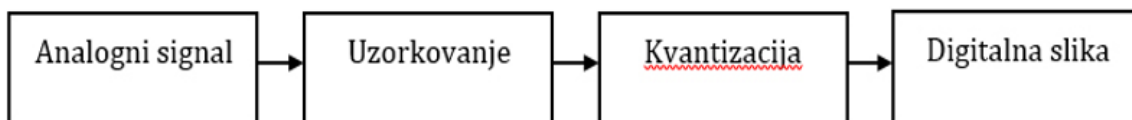
$$0 \leq r(x, y) \leq 1 \quad (4)$$

Dakle, refleksija je ograničena s vrijednosti 0 (ukupna apsorpcija) i vrijednosti 1 (ukupna refleksija). Aspekte funkcije $i(x, y)$ određuje izvor osvjjetljenja, a funkcije $r(x, y)$ karakteristike refleksije i transmisije objekta na slici [34].

2.1.1. Uzorkovanje i kvantizacija

U kontekstu multimedijalnih sustava digitalna slika može nastati renderiranjem vektorske slike ili pretvorbom analognog signala slike u njen digitalni oblik. Da bi reprezentacija slike postala prikladna za digitalni oblik, funkcija slike $f(x, y)$ mora biti digitalizirana i prostorno i amplitudno. Proces digitalizacije prikazan na slici 2 obuhvaća dva važna postupka:

1. Uzorkovanje koje predstavlja digitalizaciju koordinatnih vrijednosti slike, proces u kojem se kontinuirana slika pretvara u niz diskretnih podataka, čime se izvršava prostorna digitalizacija slike
2. Kvantizaciju koja predstavlja digitalizaciju vrijednosti amplitude slike, proces kojim se kontinuirane vrijednosti amplitude intenziteta ili boje svaka uzorkovana točka pretvara u diskretne vrijednosti, čime se izvršava amplitudna digitalizacija slike.



Slika 2. Proces formiranja digitalne slike

Opis postupka uzorkovanja i kvantizacije slikovnih podataka ključan je za razumijevanje kako analogne slike postaju digitalne. Temeljni princip postupka uzorkovanja i kvantizacije prikazan je na slici 3.

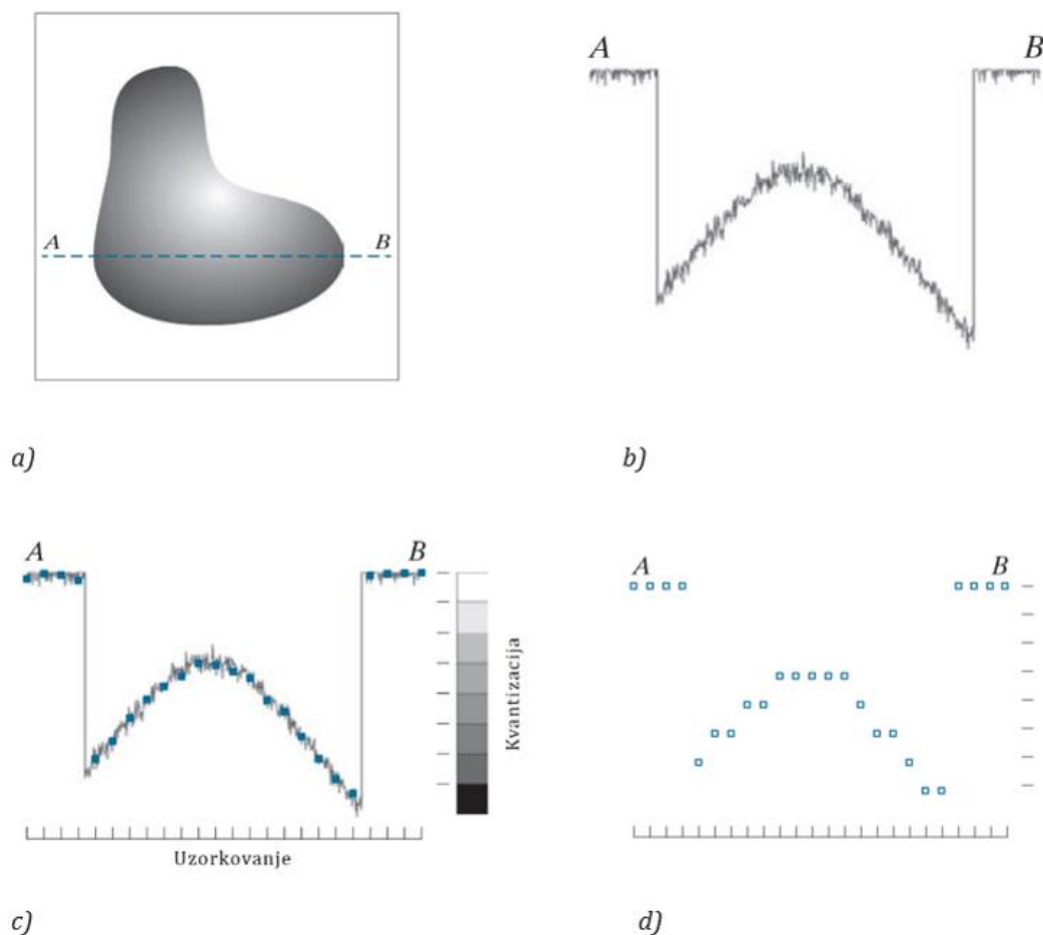
Slika 3a) prikazuje kontinuiranu sivu sliku (engl. *grayscale image*), koja se može interpretirati kao analogna slika gdje $f(x,y)$ predstavlja intenzitet sive boje na svakoj točki slike.

Funkcija prikazana na slici 3b) predstavlja dijagram amplitude intenziteta odnosno razine sive vrijednosti kontinuirane slike duž segmenta AB. Nasumične varijacije posljedica su aspekta šuma slike što implicira da će isto utjecati na točnost daljnje postignute kvantizacije.

Za uzorkovanje ove funkcije prikazani su jednako razmaknuti uzorci duž segmenta AB na slici 3c) gdje je lokacija svakog uzorka prikazana okomitom linijom u donjem dijelu prikaza slike. Uzorci su prikazani kao mali plavi kvadrati modulirani na funkciju. Skup prikazanih diskretnih lokacija predstavlja uzorkovanu funkciju. Međutim, vrijednosti uzoraka u okomitom smjeru i dalje obuhvaćaju kontinuirani raspon vrijednosti razine sive. Kako bi se u potpunosti formirala digitalna funkcija, vrijednosti razine sive također se moraju pretvoriti (kvantizirati) u diskretne veličine.

Desna strana slike 3c) prikazuje ljestvicu sivih tonova podijeljenih u osam diskretnih intervala u rasponu od crne do bijele. Okomite linije predstavljaju specifičnu vrijednost dodijeljenju svakoj od osam intervala sive skale. Kontinuirane razine sive kvantiziraju se dodjeljivanjem jedne od osam diskretnih razina sive za svaki uzorak. Postupak se odvija u zavisnosti o blizini okomitog uzorka s istom razinom linije.

Slika 3d) prikazuje bijele kvadrate digitalnih uzorka kao rezultat uzorkovanja i kvantizacije. Dvodimenzionalna digitalna slika stvara se realizacijom ovog postupka počevši od vrha slike i izvodeći ga redak po redak [34].

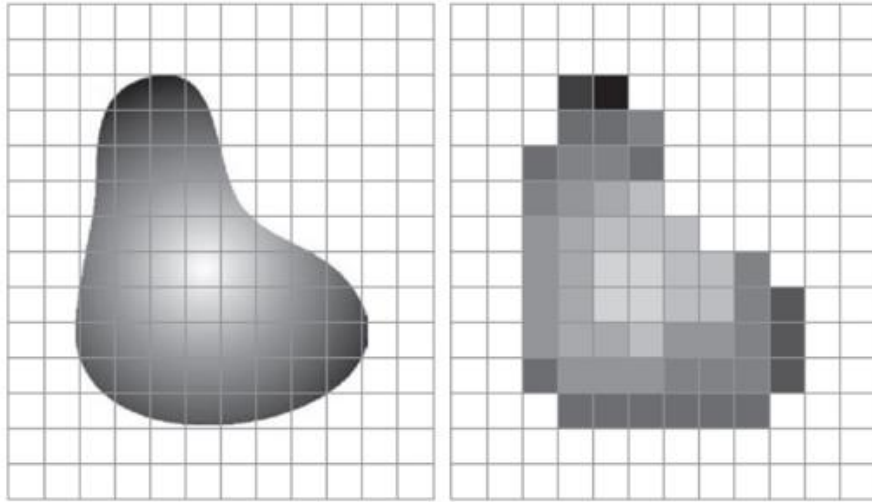


Slika 3. a) Kontinuirana slika, b) Amplituda intenziteta kontinuirane slike duž segmenta AB, c) Uzorkovanje i kvantizacija, d) Rezultat uzorkovanja i kvantizacije [34]

Izvor koji stvara vizualnu informaciju važan je čimbenik određivanja mnogih svojstava procesa uzorkovanja i kvantizacije slike. U praksi je najčešće način uzorkovanja određen rasporedom senzora (kao što su CMOS i CCD) koji se koristi za generiranje slike.

Ograničenja točnosti uzorkovanja samim time ogledaju se u kvaliteti optičke komponente koja se koristi za fokusiranje svjetlosne informacije na senzor [34]. Analogni signal iz senzora se zatim digitalizira pomoću A/D (Analogno Digitalni) pretvornika [30].

Kvantizacijom izlaza dovršava se proces generiranja digitalne slike kao što je ilustrirano na slici 4. Percipirana kvaliteta digitalne slike u velikoj je mjeri određena frekvencijom uzetih uzoraka i diskretnim vrijednostima intenziteta korištenim u uzorkovanju i kvantizaciji.



Slika 4. Lijevo kontinuirana slika projicirana na niz senzora, desno rezultat uzorkovanja i kvantizacije slike [34]

Digitalna slika kao rezultat uzorkovanja i kvantizacije može se prikazati kao matrica u kojoj prostorne koordinate (x, y) uzimaju vrijednosti iz skupova M redaka $\{0, 1, 2, \dots, M\}$ i N stupaca $\{0, 1, 2, \dots, N\}$ [34], [33]. Takvi elementi u digitalnom nizu (matrici) nazivaju se slikovni elementi ili pikseli (engl. *picture elements*) [33]. Upravo pikseli određuju sve o digitalnoj slici, uključujući veličinu datoteke, dimenzije, boje, prozirnost, oblik, format i mnoge druge karakteristike [36].

Dakle, digitalna slika sastavljena je od dvodimenzionalnih nizova konačnog broja slikovnih elemenata od kojih svaki ima određeno mjesto i vrijednost. Odnosno, svaki pojedinačni piksel adresiran je svojim prostornim koordinatama u kontekstu M redova i N stupaca. Pri tom, pikseli se izražavaju kao ljestvica cijelih brojeva i mogu poprimiti samo određene vrijednosti [30].

U obliku matrice numeričkog niza tipičnu digitalnu sliku veličine $M \times N$ možemo prikazati [33], [34]:

$$f(x, y) = \begin{pmatrix} f(0, 0) & f(0, 1) & \dots & f(0, N - 1) \\ f(1, 0) & f(1, 1) & \dots & f(1, N - 1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f(N - 1, 0) & f(N - 1, 1) & \dots & f(N - 1, M - 1) \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.1.2. Prostorna i tonska rezolucija slike

Kvaliteta slike i uređaja za prikaz mjeri se u smislu rezolucije koja je u zavisnosti od procesa uzorkovanja i kvantizacije. Sa brojem uzoraka uzetih u digitalizaciji slike povezan je koncept prostorne rezolucije slike [37].

U svojoj osnovi, prostorna rezolucija je mjera najmanjeg uočljivog detalja na slici [32]. Sposobnost predstavljanja sitnih detalja je kombinacija broja i veličine piksela u odnosu na veličinu područja slike (omjer površine piksela i površine prikaza slike) [30].

Nakon uzorkovanja slike s obzirom na x i y koordinate broj uzoraka korištenih duž x i y pravaca označavaju se s cjelobrojnim potencijama od 2 za N i M. Dimenzije stupca N i retka M definiraju broj piksela u jedinici površine slike stoga se N i M mogu prikazati matematičkom jednačinom [33]:

$$M = 2^n \quad (6)$$

i

$$N = 2^k \quad (7)$$

Prostorna rezolucija slike je broj piksela vodoravno i okomito predstavljena dimenzijama stupca N po redu M te je definirana na početku procesa snimanja slike od strane broja piksela izvornog slikovnog sustava, ali može se mijenjati povećanjem uzorkovanja (interpolacijom) ili smanjenjem uzorkovanja za promjenu veličine slike [30]. Obično se navodi kao M x N npr. 640x480, 800x600, 1024x768 itd.

Slično prostornoj rezoluciji, broj mogućih razina ili vrijednosti intenziteta koje piksel može imati povezan je sa konceptom kvantizacije slikovnih informacija. Finoća kvantizacije često se definira kao tonska rezolucija, rezolucija slike po intenzitetu ili rezolucija bita potrebnih za pohranu na određenoj razini kvantizacije. Kvantizacijom označenom sa L također dobivamo cjelobrojne vrijednosti potencije od 2 stoga vrijedi izraz:

$$L = 2^m \quad (8)$$

gdje m predstavlja broj bitova dodijeljenih po pikselu koji se koriste za prikaz različitih intenziteta na slikama. Stoga će jednačina za broj bitova potrebnih za pohranu digitalne slike veličine N x M piksela biti:

$$b = M \times N \times m \quad (9)$$

ako je:

$$N = M \quad (10)$$

tada vrijedi:

$$b = N^2 \times m \quad (11)$$

Broj piksela koji se mogu smjestiti u jedinici površine slike uvelike ovisi o:

- 1) broju vrijednosti za N
- 2) broju bitova m koji predstavljaju intenzitete piksela slike

Povećanjem vrijednosti N i m povećava se rezolucija slike, a samim time i potreban prostor za pohranu odnosno veličina datoteke digitalne slike. Iz navedenog proizlazi da je veličina datoteke u bitovima jednaka umnošku broja piksela i broja bitova dodijeljenih svakom pikselu [33]. Dijeljenje ove vrijednosti s 8 pretvara izlaz u bajtove [30].

Primjerice, broj bitova potrebnih za pohranu slike veličine 64×64 sa 16 razina sive (što odgovara $N = 64$ i $m = 4$) biti će $b = 64 \times 64 \times 4 = 16\,384$ bita = 2048 bajta. S druge strane, ako se poveća veličina slike $N = 256$ i $m = 6$ broj potrebnih bitova za pohranu biti će $b = 256 \times 256 \times 6 = 393\,216$ bita = 49 512 bajta [33]. Tablica 1 prikazuje broj potrebnih bajtova za pohranu kvadratnih slika s različitim vrijednostima N i b . Broj mogućih razina intenziteta piksela koji odgovaraju svakoj vrijednosti od b je prikazano u zagradama.

Tablica 1. Zahtjevi za pohranu slike u bajtovima s različitim vrijednosnim parametrima N i b

N/b	1 (L=2)	2 (L=4)	4 (L=16)	6 (L=64)	8 (L=256)
32 x 32	128	256	512	768	1 024
64 x 64	512	1 024	2 048	3 072	4 096
128 x 128	2 048	4 096	8 192	12 288	16 384
256 x 256	8 192	16 384	32 768	49 152	65 536
512 x 515	32 768	65 536	131 072	196 608	262 144
1024 x 1024	131 072	262 144	524 288	786 432	1 048 576
2048 x 2048	524 288	1 048 576	2 097 152	3 145 728	4 194 304

4096 x 4096	2 097 152	4 194 304	8 388 608	12 582 912	16 777 216
8192 x 8192	8 388 608	16 777 216	33 554 432	50 331 648	67 108 864

Percipirana kvaliteta slike uvelike će ovisiti o vrijednostima parametara N i m slike. Smanjenjem prostorne rezolucije slike i vrijednosti intenziteta piksela posljedično percipirana kvaliteta digitalne slike također se smanjuje. Tipični učinci smanjenja prostorne rezolucije prikazani su na slici 5 s različitim vrijednostima N održavajući m konstantnim (m= 8 bita).

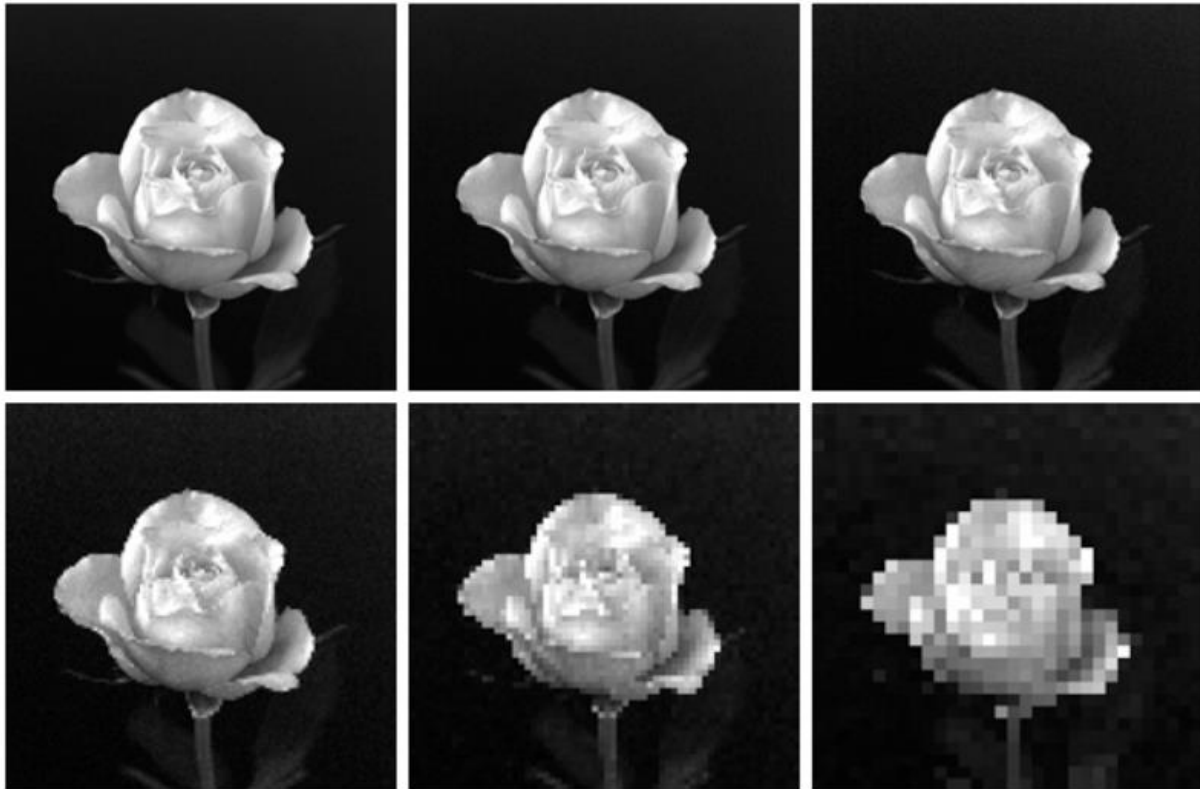
Originalna slika dimenzije je 1024x1024px čije su razine sive predstavljene sa 8 bita. Svaka slijedeća slika generirana je poduzorkovanjem odnosno brisanjem odgovarajućeg broja redaka i stupaca sa originalne slike. Odnosno, slika 512x512px realizirana je brisanjem svakog drugog reda i stupca sa slike 1024x1024px. Slika 256x256px realizirana je brisanjem svakog drugog retka i stupca na slici 512x512px itd. pri čemu svaka zadržava broj dopuštenih razina sive na 256.



Slika 5. Prikaz različitih prostornih rezolucija varijacijom broja uzoraka digitalne slike [32]

Slike pokazuju dimenzionalne omjere prostornih rezolucija pri čemu njihove razlike u veličini otežavaju vidljive učinke od smanjenja broja uzoraka. Za usporedbu ovih učinaka mijenjanjem vrijednosti N u svakoj slici korišteno područje prikaza jednako je originalnoj slici 1024x1024px kao što je prikazano na slici 6. Kada usporedimo originalnu sliku 1024x1024px sa 512x512px utjecaj varijacije broja uzoraka gotovo je neprimjetan stoga je percipirana kvaliteta slike vrlo dobra.

Na slici 256x256px vrlo mali pojedinačni pikseli počinju se pojavljivati na rubovima između cvjetnih latica i crne pozadine. Zrnatost na cijeloj slici počinje se pojavljivati na 128x128px, a postaje izraženiji na 64x64px i 32x32px. Dakle, kada smanjimo vrijednosti N vidljiv je fenomen degradacije pojedinačnih piksela što narušava percipiranu kvalitetu [32].



Slika 6. Utjecaj prostorne rezolucije na kvalitetu slike [32]

Drugi važan parametar percipirane kvalitete slike je tonska rezolucija koja predstavlja mjeru najmanje uočljive razlike između dva tona. Kvantizacijom digitalna slika kodira se kao binarni podatak s nizom binarnih znamenki koje predstavljaju jedan piksel. Binarna znamenka (bit) može uzeti samo vrijednost 0 ili 1, a raspored znamenki će definirati vrijednost piksela. Broj primijenjenih binarnih znamenki za svaki piksel će definirati koliko jedinstvenih kodova može biti kreirano i stoga koliko različitih vrijednosti piksela može biti zastupljeno. Primjerice, točno 2 bita mogu proizvesti četiri jedinstvena koda 00, 01, 10 i 11 pa se stoga mogu koristiti samo za predstavljanje četiri vrijednosti svjetline.

Veća vrijednost tonske rezolucije podrazumijeva veći raspon tonova uzimajući pri tom u obzir karakteristike digitalnog sustava za prikaz te njegova ograničenja reprodukcije tonova. Moderni digitalni sustavi često imaju 16 bita po pikselu, međutim njihova upotreba može biti

ograničena funkcijama dostupnima u softveru za obradu slika pa tako i nizom formata slikovnih datoteka koji će kodirati 16-bitne slike. Iz navedenih razloga tonska rezolucija najčešće se smanjuje na 8 bita po pikselu koja može imati vrijednosti $2^8 = 256$ različitih razina sive u rasponu od 0 (crno) do 255 (bijelo) [30]. Takav prikaz pruža više nego odgovarajuću rezoluciju svjetline u smislu zahtjeva ljudskog vizualnog sustava [38]. Maksimalan broj varijacije u boji u optimalnim uvjetima osvjetljenja koje može razlikovati ljudski vizualni sustav procijenjen je na 10 milijuna boja [39] i neusporedivo je veći od diskriminacije u neutralnim sivim tonovima koji je procijenjen na 30 nijansi sive [40]. Osim toga, 8-bitni prikaz je tipičan zbog činjenice da je bajt koji odgovara podacima s 8 bitova standardna najmanja jedinica pohrane podataka u računalnim sustavima [38].

Slika 7 prikazuje učinak smanjenja tonske rezolucije slike održavajući N konstantnim. Kada je broj vrijednosti razine sive L manji od 64 detalji prednjeg plana slike stapaju se s detaljima pozadine tvoreći pri tome fenomen degradacije između pojedinih tonova poznat kao lažno konturiranje (engl. *false contouring*) [33].

Fenomen lažnog konturiranja može se ispraviti upotrebom IGS (engl. *Improved Grey-Scale*) metode kvantizacije sivih tonova koja iskorištava osjetljivost ljudskog vizualnog sustava na rubove detalja slike dodavanjem slučajnog broja svakom pikselu prije kvantizacije u svrhu poboljšanja kvalitete rezultirajuće slike [38] [41].

Gonzales i Woods predložili su smjernicu za minimalnu prostornu i tonsku rezoluciju slike od 256×256 px sa 64 razine intenziteta svjetline reproducirane u formatu veličine 5×5 cm za koje se može očekivati da će biti bez vidljivih neželjenih efekata piksela i lažnih kontura [34].

a) $N = 256, m = 6, L = 64$ b) $N = 256, m = 4, L = 16$ c) $N = 256, m = 3, L = 8$ d) $N = 256, m = 2, L = 4$

Slika 7. Utjecaj tonske rezolucije na kvalitetu slike [33]

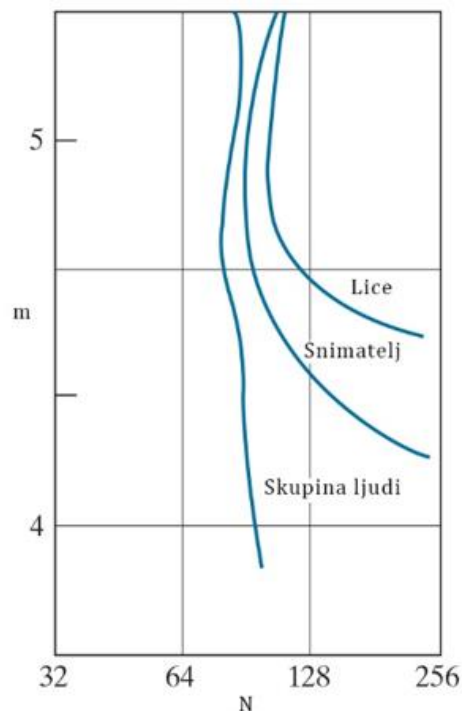
Iz slike 6 i 7 jasno je da će smanjenje prostorne i tonske rezolucije imati za posljedicu lošiju percipiranu kvalitetu slike. Međutim, danim rezultatima nisu razmatrani međusobni odnosi koji bi mogli postojati između ova dva parametra. Huangova rana studija (1965. godine) [42] eksperimentalno je kvantificirala utjecaj na kvalitetu slike koja nastaje međudjelovanjem ovih dviju varijabli. Eksperiment se sastojao od niza subjektivnih testova tri kategorija slika različitih količina detalja na istima prikazanih na slici 8. Lice žene predstavlja sliku s relativno malom količinom detalja, slika snimatelja sadrži srednju količinu detalja i slika skupine ljudi sadrži veliku količinu detalja. Skupine ove tri vrste slika generirane su variranjem N i m odnosno različitim prostornim i tonskim vrijednostima. Promatrači su imali za zadatak da rangiraju slike prema percipiranoj kvaliteti.

Na osnovi dobivenih rezultata konstruirane su izopreferencijske krivulje za N i m . Svaka točka na krivulji izopreferencije odgovara slikama koje postižu jednaku subjektivnu kvalitetu za

prostornu i tonsku rezoluciju. Rezultati na slici 9 pokazuju da krivulje izopreferencije postaju sve okomitije što se detalji unutar slika povećavaju što sugerira da je za slike s većom količinom detalja potrebno samo nekoliko razina intenziteta tonova. Odnosno, za međusoban odnos prostorne i tonske rezolucije sam sadržaj slike i količina detalja na istoj ima veliki utjecaj na odabir i ishod ovih parametara u percipiranoj kvaliteti slike [34].



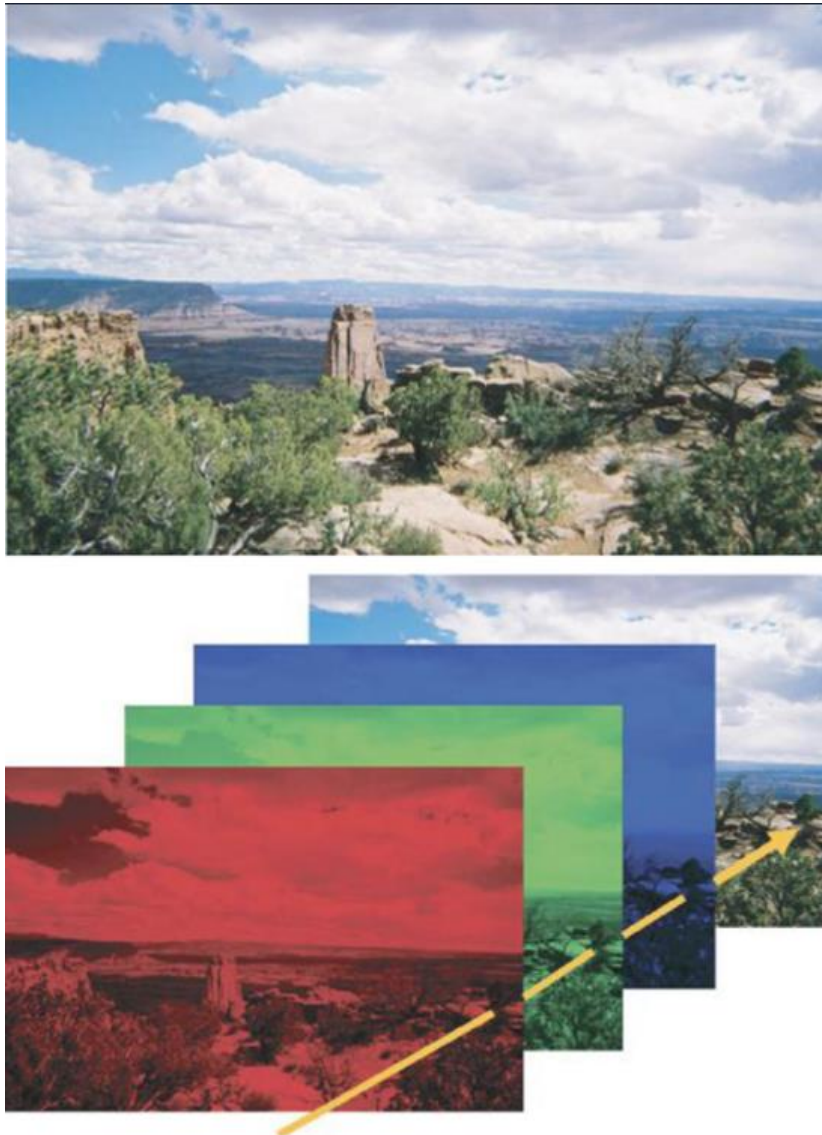
Slika 8. Slike različitih količina slikovnih informacija [34]



Slika 9. Izopreferencijske krivulje slika različitih količina slikovnih informacija [34]

Za digitalne slike u boji (slika 10), svaki piksel stvoren je kombinacijom triju osnovnih boja: crvene, zelene i plave (RGB). Svaka od osnovnih boja predstavljena je zasebnim kanalima

od kojih je svakom dodijeljen isti broj bitova kao i ekvivalentna slika u sivim tonovima. RGB slika stoga uobičajeno može sadržavati 2^8 tj. 256 različitih vrijednosti po kanalu što ukupno odgovara 16 777 216 pojedinačnih boja koristeći ukupno 24 bita po pikselu obzirom da je svaki piksel sastavljen od tri 8-bitna kanala boja. Primjer tipične slike u boji s tri odvojene komponente za crvenu, zelenu i plavu prikazan je na slici 10. Sada bi digitalna slika u boji dimenzije 512x512 piksela zauzimala potreban prostor pohrane $512 \times 512 \times 3$ bajta = 768 KB.



Slika 10. Slika u boji i njene R, G i B komponente [38]

Međutim, važno je napomenuti da se mnoge 24-bitne slike u boji zapravo pohranjuju kao 32-bitne slike s dodatnim bajtom podataka za svaki piksel koji se koristi za α – kanal kojim se označava transparentnost slike. Ako se uzme u obzir veliki potreban prostor pohrane i smanjenje

prijenosnih brzina ovakvih slika kao i činjenica da na svakoj slici nisu podjednako zastupljene više od 16 milijuna boja raspoloživih u 24-bitnim slikama pa i ograničenja ljudskog vizualnog sustava na varijacije u boji dolazimo do zaključka da se slike u boji mogu prikazati i s manjim vrijednostima od 3 bajta po pikselu uz eventualni gubitak na percipiranoj kvaliteti. Navedeno se postiže kvantizacijom odnosno redukcijom raspoloživih boja za prikaz čime se može smanjiti ne samo zahtjevi za pohranom već i vrijeme prijenosa slike. Ukoliko se slika kvantizira na 256 boja veličina datoteke biti će smanjena na jednu trećinu svoje izvorne veličine. Čuvanje informacija o boji provodi se pomoću pregledne LUT tabele (engl. *Look-up-table*) gdje se 256 boja pohranjuje u tablici, a jedan bajt (8 bita) se koristi kao indeks (adresa) u tablici za svaki piksel (slika 11). U ovom kontekstu koncept pregledne tabele odnosi se na indeksirane slike temeljene na paletama boja (kolor-mape) [38]. Postupak redukcije vrijednosti boja digitalne slike može biti od koristi u uređajima za prikazivanje sa ograničenim rasponom boja, za potrebe kompresije slike ili za potrebe vremena prijenosa slike u ograničenom mrežnom prometu [43].

<u>8-Bit index</u>	Red	Green	Blue
0	R ₀	G ₀	B ₀
1	R ₁	G ₁	B ₁
2	R ₂	G ₂	B ₂
⋮	⋮	⋮	⋮
254	R ₂₅₄	G ₂₅₄	B ₂₅₄
255	R ₂₅₅	G ₂₅₅	B ₂₅₅

Slika 11. LUT tabela za indeksirane 8-bitne slike u boji [38]

2.2. Rezolucija uređaja

Rezolucija uređaja odnosi se na broj piksela koji čine prikazni ili snimajući dio uređaja poput zaslona, kamere, skenera ili printera. Ovaj koncept se razlikuje od rezolucije slike koja se odnosi na broj piksela u digitalnoj slici vezana uz pojam prostorne rezolucije slike. Mjeri se horizontalnom i vertikalnom gustoćom piksela koja se izražava brojem piksela koji su raspoređeni po dužini od jednog inča (ppi – engl. *pixel per inch*) ili gustoćom točaka (dpi – engl. *dots per inch*) koji je tiskarski termin i odnosi se na broj točaka boje koje se mogu prikazati na jednom inču. Važno je napomenuti da se izrazi ppi i dpi često koriste sinonimno, iako se pravilno koriste u različitim kontekstima.

Na primjer, rezolucija računalnog zaslona može biti izražena kao 1920x1080 piksela što znači da ima 1920 piksela po širini i 1080 piksela po visini ili 4K rezolucija kao 3840x2160 piksela. Da bismo izračunali ppi računalnog zaslona, trebamo znati rezoluciju zaslona (W x H) i veličinu zaslona (dijagonala) izražena u inčima. Gustoća piksela ppi izračunava se kao omjer dijagonalne rezolucije u pikselima (d_p) i veličine dijagonale zaslona u inčima (d_i):

$$d_p = \sqrt{w_p^2 + h_p^2} \quad (12)$$

$$ppi = \frac{d_p}{d_i} \quad (13)$$

gdje w_p i h_p predstavljaju broj piksela u horizontalnom i vertikalnom smjeru, a d_i veličinu dijagonale zaslona izraženu u inčima. Formula omogućava izračunavanje gustoće piksela na temelju rezolucije i veličine zaslona te predstavlja korisnu mjeru za određivanje kvalitete prikaza na računalnom zaslonu. Veća gustoća piksela obično rezultira oštrijim i detaljnijim prikazom s manje vidljivih piksela slike. Međutim, važno je napomenuti da ova formula pretpostavlja da su pikseli kvadratni. Ukoliko su pikseli nepravilnog oblika, tada se može koristiti sličan pristup, ali s prilagodbama za oblik piksela.

Rezolucija uređaja ima važnu ulogu u određivanju detaljnosti i kvalitete slike ili prikaza. Što je veća rezolucija uređaja, to će biti veći broj piksela dostupan za prikazivanje ili snimanje slike, što može rezultirati boljim detaljima, oštrijim rubovima i bogatijim bojama te općenito boljom percipiranom kvalitetom. Kada se kontinuirana slika prikaže na uređaju s određenom rezolucijom, uređaj mora aproksimirati kontinuirane vrijednosti intenziteta na temelju dostupnih piksela. Svaki piksel predstavlja diskretnu vrijednost intenziteta koji aproksimira originalnu

kontinuiranu sliku. Što je veća rezolucija uređaja, to će više piksela biti dostupno za aproksimaciju i potencijalno bolju reprodukciju detalja slike.

U slučaju digitalnih kamera, rezolucija se obično izražava u megapikselima (milijun piksela) kao što su 12MP ili 24MP, a veća rezolucija kamere omogućuje snimanje fotografija s više detalja. Moderne inkjet printere karakterizira visoka rezolucija koja može varirati, a uobičajeni opseg rezolucije je od 300 dpi do 2400 dpi. Moderni laserski printeri obično imaju rezoluciju u opsegu 600 dpi do 2400 dpi. Pri odabiru vrste printera, rezolucija je jedan od važnih faktora koji treba uzeti u obzir naročito kod visoko kvalitetnih fotografskih slika i grafičkih sadržaja. Međutim, valja napomenuti da osim rezolucije i drugi faktori poput kvalitete i vrste papira koji se koristi te tehnologije i karakteristike samih printera mogu dodatno utjecati na kvalitetu i preciznost reprodukcije. Rezolucija skenera se također izražava brojem točaka po inču dpi, a ponekad i brojem uzoraka slike po inču spi (engl. – *samples per inch*) te predstavlja koliko detaljno skener može digitalizirati sliku. Rezolucija skenera može varirati ovisno o vrsti skenera i njegovoj namjeni. Na primjer, standardni kućni skeneri često imaju rezoluciju od 600 dpi do 1200 dpi. Skeneri visoke rezolucije, koji se koriste u profesionalne svrhe poput skeniranja fotografija mogu imati rezoluciju od 2400 dpi, 4800 dpi ili čak i više. Veća rezolucija skenera rezultira većom veličinom datoteke slike stoga treba uzeti u obzir i potrebe za prostorom za pohranom.

Rezolucija rasterske slike se odnosi na broj piksela u slici, ali sama slika nema intrinzičnu gustoću piksela, odnosno nije povezana sa fizičkim prostornim dimenzijama. Kada je riječ o digitalizaciji ili renderiranju (prikazivanju) slike, može se uspostaviti veza između rezolucije slike, rezolucije uređaja i fizičkih mjera slike. Pretvaranje fizičkih mjera slike u piksele uzimajući u obzir gustoću piksela uređaja za digitalizaciju izračunava se koristeći formulu:

$$dim[px] = ppi \times dim[in] \quad (14)$$

gdje je $dim[px]$ – dimenzija slike u pikselima, ppi – gustoća piksela uređaja za digitalizaciju i $dim[in]$ – dimenzija slike u inčima. Obratno, formula se može koristiti za pretvaranje rezolucije slike izražene u pikselima u fizičke dimenzije u inčima. Dakle, povećanjem vrijednosti ppi uz zadržavanje istih fizičkih dimenzija slike prouzrokovati će veću detaljnost i kvalitetu prikaza slike jer se više piksela koristi za prikazivanje istog fizičkog područja.

Sama veličina slike biti će obrnuto proporcionalna gustoći piksela (dpi) uređaja na kojem se prikazuje. To znači da će pri istoj rezoluciji slike, veća gustoća piksela rezultirati većom

veličinom prikazane slike. Primjerice, ako imamo sliku rezolucije 1200x800 piksela ispisom na uređaju rezolucije 300 dpi dobit ćemo sliku veličine $4 \times 2,67 = 10,68$ inča.

$$\dim(in) = \frac{\dim(px)}{dpi} \quad (15)$$

Formula pretpostavlja da se sva dostupna rezolucija slike koristi za prikaz na uređaju bez dodatnih skaliranja ili obrezivanja slike. Dakle, veličina rasterske slike u međusobno zavisnom je odnosu od postavki prikaza na samom uređaju i od promjene njene rezolucije.

2.3. Česti formati datoteka piksel grafike na web stranicama

Formati slikovnih datoteka pružaju standardiziranu metodu za organiziranje i pohranjivanje slikovnih podataka u datoteke [44]. Kada je slika spremljena u određenom formatu, njezini slikovni podaci pretvaraju se u binarni oblik koji je specifičan za taj format. Ova pretvorba omogućuje pohranu informacija povezanih s rasporedom piksela, vrijednosti boja, informacija o alfa kanalu (transparentnosti), rezolucijom, korištenih algoritama kompresije i drugih relevantnih karakteristika slike na način koji je kompatibilan sa softverskim programima i uređajima koji podržavaju taj određeni format.

Postoje brojni formati datoteka dostupni za pohranjivanje slika, a neki su tijekom godina zastarjeli. S napretkom tehnologije došlo je do smanjenja broja formata digitalnih slika koji se obično koriste. Trenutna kolekcija ovih formata dobro služi većini slikovnih aplikacija i uključuje niz značajki, prednosti i ograničenja, dopuštajući tako korisnicima da odaberu ono što je najprikladnije na temelju specifičnih potreba i zahtjeva. Prilikom odabira formata slikovne datoteke potrebno je uzeti u obzir mnogo čimbenika koji se temelje na svojstvima same slike, načinu na koji će se slika koristiti te određenim zahtjevima za veličinom i pohranom datoteke koji mogu biti potrebni [30].

Većina formata datoteka koji se trenutno koriste razvijena su kroz dugotrajan proces i postala su široko dostupni slikovni standardi. Korištenje standardiziranih slikovnih datoteka pruža konzistentnost i operabilnost među različitim programima, uređajima i platformama. Time je omogućeno korisnicima da pregledavaju, razmjenjuju i uređuju slike bez gubitka podataka i kompatibilnosti. Osim toga, tendencija ovih formata je fleksibilnost kako bi se omogućio daljnji razvoj i prilagodba promjenjivim potrebama tehnologije i sustava pa tako i zahtjevima korisnika. To znači da se mogu ažurirati ili proširiti kako bi podržavali novije tehnologije i bolje tehničke

karakteristike. U nekim slučajevima, određeni formati postaju de facto standardi (što nije nužno standardizirana datoteka) za određeni zadatak ili aplikaciju za obradu slike. To znači da su postali dominantni formati kao rezultat raširenosti upotrebe od strane proizvođača ili preferencije većine korisnika u odnosu na druge ekvivalentne formate.

Sam format slikovne datoteke ne samo da određuje organizaciju slikovnih podataka već također uključuje dodatne informacije i metapodatke potrebne za tumačenje i rad sa slikom [30].

Neki od ključnih aspekata vezanih uz format slikovnih datoteka su:

Zaglavlje: obično je smješteno na početku datoteke i pruža potrebne pojedinosti programima i sustavima pravilno tumačenje i dekodiranje slikovnih podataka. Sadržaj odjeljka zaglavlja varira u zavisnosti od formata slikovne datoteke, no obično pruža detalje o organizaciji podataka, vrsti i dimenziji slike, rezoluciji, prostoru boja, dubini bitova i metodi kompresije [38].

Vrsta podataka: koja se koristi za predstavljanje piksela što utječe na preciznost i raspon vrijednosti informacija slike koje se mogu pohraniti. Neki od tipičnih vrsta podataka koriste 8-bitne ili 16-bitne cjelobrojne brojeve, brojeve s pomičnim zarezom i vektorske formate.

Prostor boja: koji određuje kako se boje kodiraju i tumače unutar prikazanih slikovnih podataka. Svaki format datoteke može podržavati određeni prostor boja ili njihovu kombinaciju koja ovisi o verziji formata i specifičnim postavkama datoteke.

Metapodaci: predstavljaju dodatne opisne informacije koje je korisno uključiti u slikovne podatke. To može obuhvaćati podatke o snimanju slike, postavkama ekspozicije, datum i vrijeme, uvjete osvjetljenja i mnoge druge relevantne informacije. Jedna od niza specifikacija za pohranjivanje metapodataka je Exif (engl. *Exchangeable Image File Format*) koji se koristi u nizu različitih formata datoteka [30], [45].

Kompresija: postupak smanjenja veličine slikovne datoteke za obradu, potreban prostor pohrane i prijenos. Komprimirane datoteke mogu biti znatno manje od nekomprimiranih, ali to može utjecati na kvalitetu slike ovisno o korištenoj tehnici i primijenjenoj razini kompresije [44]. Kompresija se postiže uklanjanjem redundantnih ili nepotrebnih informacija iz slike te korištenjem algoritama koji predstavljaju preostale podatke na način koji zahtijeva manje prostora za pohranu. Postoje dvije vrste kompresije:

- a. Kompresija bez gubitaka (engl. *Lossless compression*) – smanjuje veličinu datoteke uz očuvanje svih informacija o slici uklanjanjem samo onih vrijednosti koje se ponavljaju.

Podaci se komprimiraju na način koji omogućava potpunu obnovu originalne (izvorne) slike.

- b. Kompresija s gubitkom (engl. *Lossy compression*) – smanjuje veličinu datoteke zamjenom podataka s ponovno uzorkovanim ili prediktivnim kodovima uz gubitak informacija o slici. Kada se komprimirana slika u ovom postupku dekomprimira ona više nije identična izvornoj slici jer su se određeni podaci slike trajno uklonili što može rezultirati određenim gubitkom kvalitete slike. Algoritam kompresije analizira sliku i identificira dijelove koji se mogu aproksimirati ili reprezentirati s manje detalja. Primjerice, može se smanjiti preciznost piksela ili se ukloniti fini detalji koji su manje vidljivi ljudskom oku. Na taj način se smanjuje količina podataka potrebnih za pohranu slike uz zadržavanje prihvatljive razine gubitka kvalitete za većinu primjena.

Dodatne značajke: podržane dodatne različite mogućnosti koje čine format datoteke prikladnim za određene sustave. Neki od dodatnih značajki su primjerice progresivni prikaz slike za web koja omogućuje da se slika postupno prikazuje i time poboljšava korisničko iskustvo, podrška za prozirnost, slojeve i animaciju, podrška za višu rezoluciju koja omogućava da se slika može spremati u visokoj rezoluciji ali i prikazati u nižoj rezoluciji smanjujući time potrebu za višestrukim spremanjem različitih veličina slikovnih datoteka [30].

Uobičajeni standardni grafički formati datoteke koji se koriste za piksel slike na web stranicama opisani su u nastavku.

2.3.1. GIF

Format GIF (engl. *Graphics Interchange Format*) je popularan format slike na web stranicama koji podržava animaciju i transparentnost. Osmislili su ga UNISYS Corporation i CompuServe [45] još 1987. godine [46] s ciljem prijenosa grafičkih slika putem telefonskih linija pomoću modema [45]. Koristi LZW (engl. *Lempel-Ziv-Welch*) metodu kompresije bez gubitaka informacija [47] u obliku grupiranja linija piksela [45]. Svaki piksel u GIF slici koristi 8-bitnu vrijednost boja što omogućuje indeksiranu boju iz palete od maksimalno 256 boja [46]. To ga čini prikladnim za jednostavne prikaze grafike poput ikona, logotipa, animiranih grafika i drugih jednostavnijih elemenata slike s manjim brojem boja. Još jedna značajka ovog formata je podrška za ispreplitanje slike što znači da se pikseli slike mogu prikazivati u nekoliko sekvenci u široko razmaknutim redovima postupkom prikaza u četiri prolaza pružajući pri tom postupno učitavanje slike. Dostupne su dvije verzije izvorna specifikacija GIF89a i kasnija verzija GIF9a koja

omogućuje jednostavnu animaciju putem bloka *Graphics Control Extension*. Navedeni blok omogućuje jednostavnu kontrolu nad vremenom kašnjenja između sličica, indeksom transparentnosti za prozirne dijelove slike i drugim aspektima animacije. Unatoč novijim formatima slike koji podržavaju veći broj boja i složenije značajke. GIF je i dalje u širokoj upotrebi zbog svoje jednostavnosti i podrške svih web preglednika i velikog broja softvera za obradu slike [45].

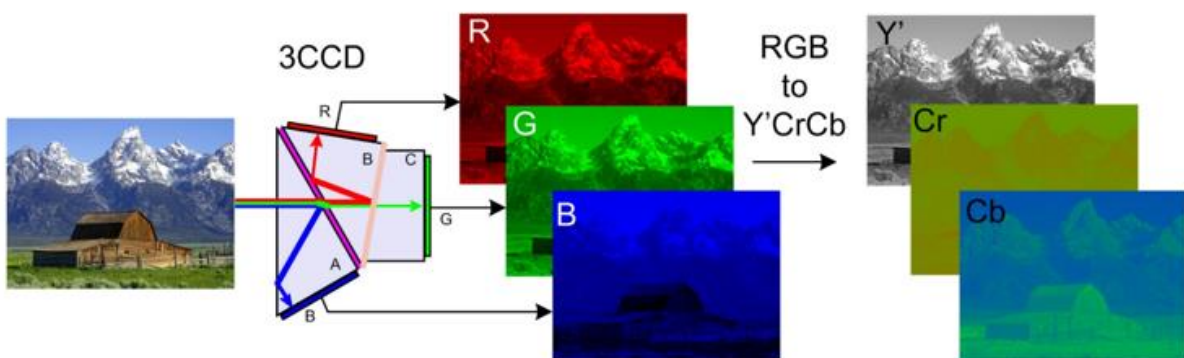
2.3.2. PNG

Format PNG (engl. *Portable Network Graphics*) razvijen je 1995. godine [46] s ciljem da naslijedi GIF standard i riješi probleme povezane s patentiranom LZW kompresijskom metodom kojeg koristi [45]. PNG koristi *DEFLATE* algoritam kompresije bez gubitka podataka koji kombinira LZ77 algoritam za eliminaciju redundancije i Huffmanovo kodiranje za daljnje smanjenje veličine podataka [46]. Pored toga, moguća je i kompresija sa gubitkom podataka. Podržava do 16 bita po pikselu za svaki kanal boje što rezultira 48-bitnom bojom. Također, PNG datoteke mogu sadržavati informacije o gama korekciji za ispravan prikaz slika u boji na različitim uređajima i podršku za alfa kanal (do 16 bita) za kontrolu prozirnosti piksela [45], [48]. Umjesto prikaza temeljenog na ispreplitanju redaka kao u GIF formatu omogućava progresivni prikaz slika. Pikseli se prikazuju progresivno u dvodimenzionalnom preplitanju tijekom sedam prolaza kroz blokove slika što rezultira preliminarnim učitavanjem slike niskokvalitetne verzije prije nego što se slika potpuno učita. PNG format je široko podržan u različitim web preglednicima što ga čini popularnim izborom za pohranu i prikaz slike na webu [45]. Danas predstavlja najčešće korišteni format zapisa slike na webu koja prema W3Tech izvješću, koja se bavi statističkom analizom korištenja različitih tehnologija na webu, iznosi 82% zastupljenosti [49]

2.3.3. JPEG

JPEG datira iz 1992. godine i predstavlja skraćenicu od Joint Photographic Experts Group prema radnoj organizaciji koja ga je kreirala s ciljem razvoja međunarodnog standarda za kompresiju statičnih slika. Na svoju 25.-tu obljetnicu četvorica članova originalnog JPEG razvojnog tima predstavili su informativni povijesni pregled razvoja standarda. Ideja je bila kombinirati transformacije slike i kvantizaciju kako bi se uklonili detalji slike koji su manje vidljivi ljudskom oku i iskoristili statističke metode za smanjenje količine podataka potrebnih za pohranu slike [50].

Naime, ljudski vizualni sustav ima određena ograničenja koja JPEG koristi za postizanje visokih stupnjeva kompresije. Navedena ograničenja odnose se na tendenciju veće osjetljivosti na promjene u svjetlini u odnosu na ton boje i bolju percepciju na šire promjene. Ukoliko se dogodi mnogo promjena unutar malog područja slike (nekoliko piksela) taj segment slike pri tome podrazumijeva visoku prostornu frekvenciju odnosno veliku promjenu u (x, y) prostoru. JPEG rješava ovo ograničenje tako da informacije o boji budu djelomično ispuštene, prosječne ili komprimirane [45]. Iz tog razloga u JPEG kompresiji koristi se transformacija boje iz RGB prostora boja u $Y_C_B C_R$ prostor boja. Ova transformacija ilustrirana na slici 12 omogućuje izdvajanje informacija o luminaciji (svjetlini) u Y kanal od informacija o kromatskim komponentama C_B i C_R kanal [51]. Na taj način se omogućava da se kompresija usredotoči na informaciju o luminaciji koja je važnija za percepciju slike dok se informacija o boji uzorkovanjem (engl. *downsampling*) može komprimirati s manjom prostornom rezolucijom.



Slika 12. Transformacija boja iz RGB u YCBCR prostor boja [74]

Najčešće se primjenjuje uzorkovanje 2h2v ili 4:1:1 u horizontalnom i vertikalnom smjeru što znači da se broj uzoraka u svakom redu i svakom stupcu prepolovi. No postoje i drugi načini primjerice 2h1v ili 4:2:2 u kojem se faktor uzorkovanja primjenjuje samo horizontalno. U tom slučaju broj uzoraka u svakom retku se prepolovi, dok se broj uzoraka u svakom stupcu ne mijenja. Varijanta 4:4:4 predstavlja slučaj kada se uzorkovanje ne radi što može rezultirati s većom veličinom datoteke [51].

JPEG kompresija izvodi se u tri faze kako bi se slika efikasno komprimirala [24]. Na ulazu u koder nalaze se uzorci izvorne slike grupirani u blokove 8x8 piksela koji su pretvoreni od cijelih brojeva bez predznaka u rasponu $[0, 2^P - 1]$ u cjelobrojne vrijednosti s predznakom u rasponu $[-2^{P-1}, 2^{P-1}-1]$ prije nego što se podvrgnu diskretnoj kosinusnoj transformaciji (DCT) [52].

U prvoj fazi provodi se diskretna kosinusna transformacija DCT (engl. *Discrete Cosine Transform*) na male blokove slika 8x8 [24], [45], [53] i analizira ih se u domeni prostorne frekvencije označenoj s (u, v) umjesto standardnoj (x, y) domeni. Analiza prostorne frekvencije izvršava se u smislu brzina promjene u x i y smjerovima od niskih do visokih frekvencija. Temeljem tih procjena svaki blok piksela se zatim transformira primjenom DCT-a čime se formiraju novi blokovi podataka koji grupiraju DCT koeficijente [45].

Jednadžbe koje predstavljaju matematički prikaz 8x8 DCT i 8x8 IDCT (inverzna diskretna kosinusna transformacija) za komprimiranje i dekomprimiranje slike u JPEG formatu prikazane su u nastavku.

Za blok piksela veličine 8x8 DCT se definira jednadžbom:

$$F(u, v) = \frac{1}{4} C(v) \left[\sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f(x, y) \cos \frac{(2y+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16} \right] \quad (16)$$

gdje $F(u, v)$ predstavlja vrijednost frekvencijske komponente na frekvencijskim koordinatama (u, v)

$C(u)$ i $C(v)$ su faktori normalizacije koji su jednaki $\frac{1}{\sqrt{2}}$ za $u = 0$ i $v = 0$, a inače su jednaki 1

$f(x, y)$ predstavlja vrijednost piksela na prostornim koordinatama (x, y) gdje su x i y indeksi piksela unutar bloka veličine 8x8

8x8 IDCT predstavlja inverznu diskretnu kosinusnu transformaciju i definira se jednadžbom:

$$F(u, v) = \frac{1}{4} \left[\sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 C(u)C(v)F(u, v) \cos \frac{(2y+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16} \right] \quad (17)$$

DCT se primjenjuje na svaki 8x8 blok uzoraka slike koji predstavlja diskretni signal od 64 elementa kao funkcija prostorne dimenzije x i y . Na ulazu u DCT tako oblikovani signal rastavlja se na 64 ortogonalna osnovna signala. Svaki od tih signala sadrži jedinstvenu dvodimenzionalnu (2D) prostornu frekvenciju koja čini spektar ulaznog signala. Visoke i niske frekvencije odnose se na prostornu raspodjelu intenziteta prikazane na slici 14 (lijevo). Visoke frekvencije nude više detalja na slici, dok niske frekvencije nude manje.

Na izlazu se pri tom dobiva skup od 64 amplituda osnovnih signala poznatih kao DCT koeficijenti. Vrijednosti tih koeficijenata stoga su jedinstveno određene količinom i svojstvima sadržanih dvodimenzionalnih prostornih frekvencije u ulaznom signalu od 64 točke. Koeficijent s vrijednosti 0 frekvencije u obje dimenzije predstavlja DC koeficijent, a preostala 63 koeficijenta nazivaju se AC koeficijenti [52]. U ovom koraku moguće je da dođe do malog gubitka informacija zbog ograničene aritmetičke preciznosti računala. Međutim, ovaj gubitak informacija obično je zanemariv i ima mali ili gotovo nikakav utjecaj na kvalitetu rekonstruirane slike [51].

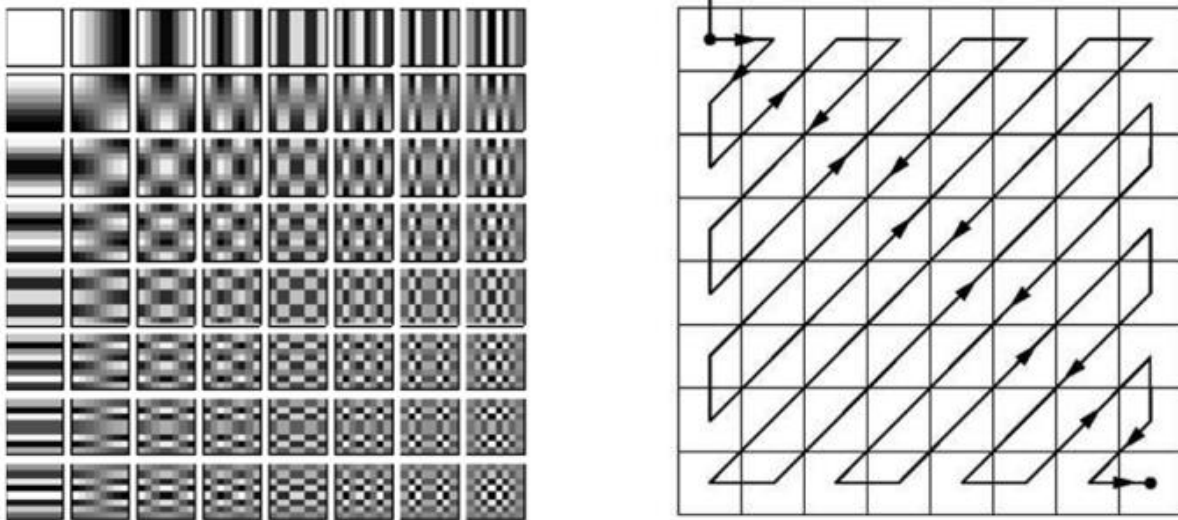
Druga faza uključuje preslagivanje podataka (kvantizaciju) usmjerenu na smanjenje ukupnog broja potrebnih bitova za komprimiranu sliku [24]. Sastoji se od jednostavnog dijeljenja svakog od 64 vrijednosti u frekvencijskom domenu s kvantizacijskim koeficijentom za određenu frekvenciju, a rezultat se potom zaokružuje.

Slika 13 prikazuje standardne kvantizacijske tablice za blokove luminacije (gornja tablica) i kromatske blokove (donja tablica). Veće kvantizacijske vrijednosti odražavaju veće stupnjeve kvantizacije za odgovarajuće prostorne frekvencije. Vrijednosti kvantizacije obično rastu s povećanjem prostorne frekvencije s lijeva na desno i odozgo prema dolje [54]. U ovom koraku dolazi do gubitka informacija jer se preciznost originalnih koeficijenata smanjuje.

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99
17	18	24	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

Slika 13. Standardne JPEG kvantizacijske tablice [55]

Nakon kvantizacije, većina koeficijenata u svakom bloku će biti nule, sa samo nekoliko brojeva različitih od nule u nižim frekvencijama kosinusne domene. Ova karakteristika omogućuje daljnju treću fazu kompresije koristeći entropijsko kodiranje. Koeficijenti se obično poredaju „zig-zag“ skeniranjem kao što je prikazano na slici 14 (desno) što znači da se brojevi različiti od nule smještaju na početak niza praćeni nizom nula. Ovaj korak olakšava primjenu RLE (engl. *Run- Length Encoding*) algoritma koji kodira uzastopna ponavljanja istih bitova [45].



Slika 14. Lijevo: prikaz 8x8 2D-DCT, horizontalne frekvencije rastu s lijeva na desno, vertikalne frekvencije rastu odozgo prema dolje [75], desno: zig-zag raspored DCT koeficijenata [76]

Naposljetku, primjenjuje se Huffmanovo kodiranje [51] koje pridružuje kraće kodove često ponavljanim brojevima (koeficijentima s višom vjerojatnošću pojave) i dulje kodove rjeđim brojevima (koeficijentima s nižom vjerojatnošću pojave). Ovaj korak doprinosi daljnjoj kompresiji slike.

Takav pristup smanjuje ukupnu količinu podataka potrebnih za pohranu i prijenos slike, čineći JPEG danas među korištenijim formatima zapisa slike na mrežnim stranicama koja prema W3Tech izvješću iznosi 77,8 % zastupljenosti [49]. Navedeno se može aproksimirati činjenicom da zauzima malo memorijskog prostora te ima podršku svih web preglednika. Posebno je učinkovito pri kompresiji slike u boji zbog manje osjetljivosti na fine detalje u boji u usporedbi sa percepcijom crno-bijelih slika [45]. Jedna od prednosti JPEG formata je mogućnost željenog odabira stupnja kompresije u vrijednostima unutar raspona od 0 do 100 kojom se ostvaruje optimalan omjer između kvalitete slike i njene izlazne veličine. Ovo se postiže omogućavanjem korisnicima da odaberu veličinu nazivnika, odnosno faktor kojim se dijele vrijednosti tijekom kompresije za postizanje optimalnog omjera između kvalitete slike i njene izlazne veličine. Postoji i način rada kompresije bez gubitka podataka u JPEG formatu bez degradacije kvalitete slike. Ipak, većina JPEG slika koristi kompresiju s gubitcima jer pruža značajno veće stupnjeve kompresije.

2.3.4. WEBP

Suvremena industrija grafičkih komunikacija uvelike se naslanja na web tehnologije i objavljivanje sadržaja prilagođenih za računala, tablete i mobilne uređaje. Upravo za te potrebe došlo je do razvoja novih formata zapisa digitalne fotografije koji osiguravaju manje zauzimanje memorijskog prostora i brži podatkovni prijenos.

Krajem rujna 2010. godine [28] tvrtka Google Inc. predstavlja novi format WebP (engl. *Web Picture*) kojem samo ime implicira da se radi o zapisu slika koje će se prezentirati u web okruženju [24]. Razvija se s ciljem da preuzme vodeću ulogu od sveprisutnog JPEG formata zapisa zadržavajući pri tome jednake tehničke karakteristike slike primarno imajući na umu reprodukciju boja. Prikladan je za sve vrste vizualnih sadržaja kao dobra alternativa drugim slikovnim formatima obzirom da podržava kompresiju s gubitcima i kompresiju bez gubitaka podataka, animaciju i transparentnost [56], [57]. Iako nije tako sveprisutan kao ustaljeni formati kao što su JPEG, PNG ili GIF koji imaju široku upotrebu na webu i podržani su od strane svih web preglednika, WebP se ističe boljom prikladnošću zbog svojih visokih performansi. To je prvenstveno zato što WebP slike obično koriste manje prostora za pohranu u usporedbi s drugim formatima ekvivalentne kvalitete vizualne sličnosti [58].

Prema izvješću W3Tech danas predstavlja najbrže rastući format datoteke s upotrebom od 7,9% od ukupnog broja svih web sjedišta [49]. U početku je imao samo uključenu podršku Google-ovih web preglednika [57], a danas dostiže vrijednost od 96,63% podrške web preglednika koji se koriste diljem svijeta [59].

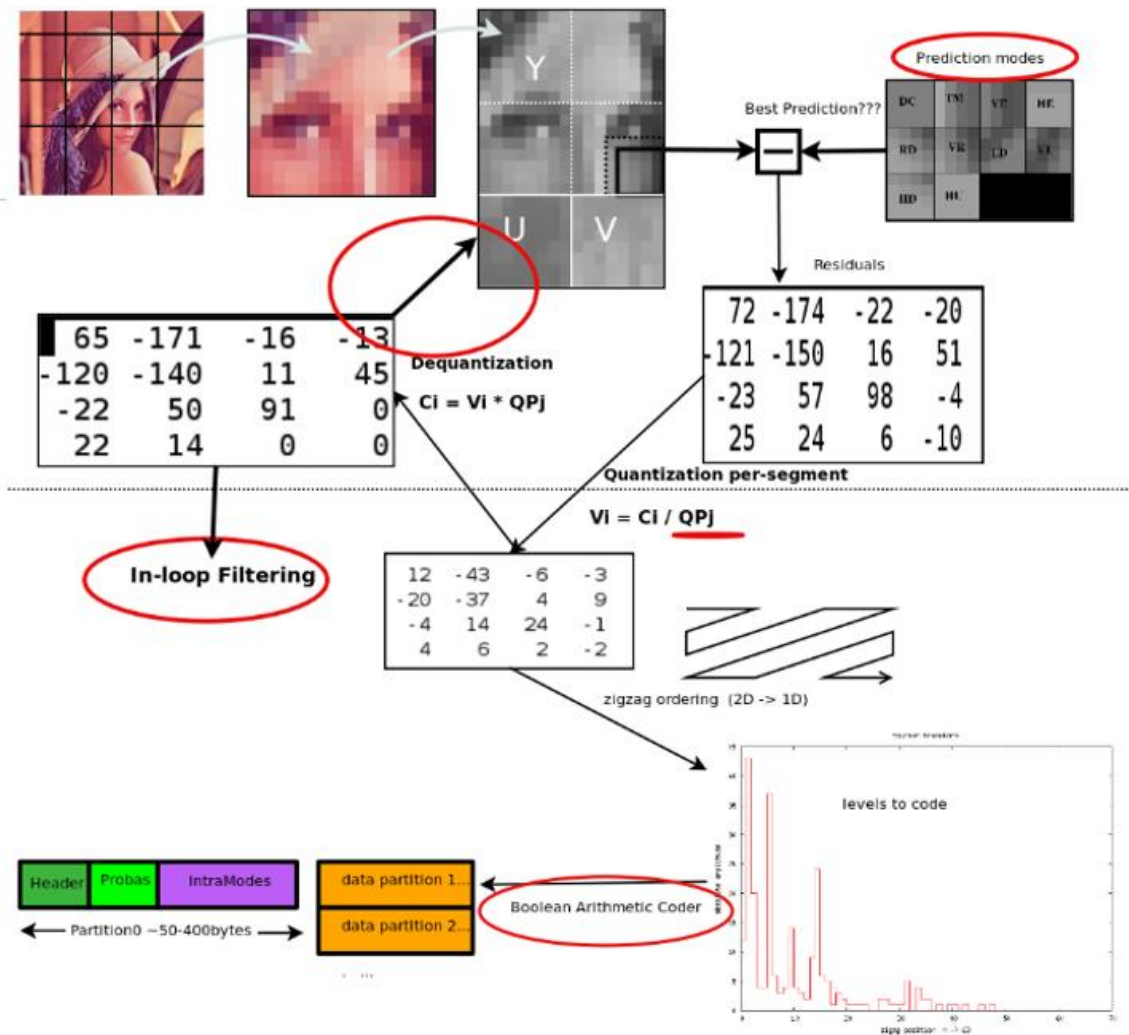
Prema navodima proizvođača WebP format slike komprimiran bez gubitka podataka može generirati sliku do 26% manje izlazne veličine datoteke u odnosu na istu sliku u PNG formatu, a slike komprimirane sa gubitkom podataka 25% do 34% u odnosu na JPEG format sa ekvivalentnim SSIM (engl. *Structural Similarity Indeks Measure*) indeksom kvalitete [24] [26][56]. Na temelju toga predviđa se povećanje brzine internet prijenosa prelaskom na WebP format što predstavlja značajniju prednost obzirom da se procjenjuje da danas oko 65% mrežnog prometa otpada na prijenos slikovnih sadržaja [24].

WebP kompresija s gubitcima nije reverzibilna, kao što je to slučaj i s JPEG-om, već trajno odbacuje podatke tijekom kodiranja što onemogućuje reproduciranje izvornog formata slike nakon konverzije u JPEG i WebP [60]. Razina kompresije kao i JPEG izražava se u vrijednostima unutar raspona od 0 do 100 kojom se ostvaruje optimalan omjer između kvalitete slike i njene

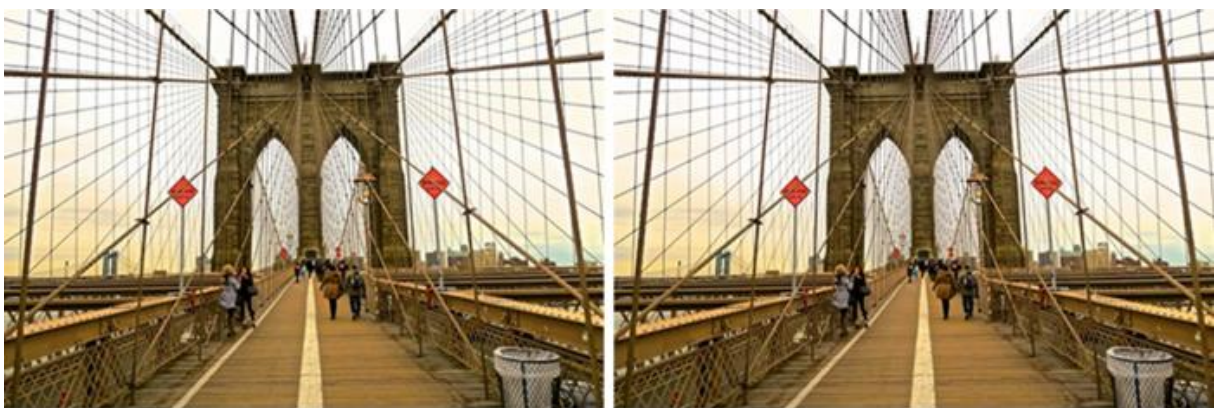
izlazne veličine. Kompresijski algoritam zasniva se na istoj metodologiji koju koristi VP8 otvoreni standard za kompresiju kadrova u videima, a koji se zasniva na tehnologiji On2 Technologies [28], [57], [60], [61]. Koristi datotečni spremnik za pohranu podataka zasnovan na RIFF formatu (engl. *Resource Interchange File Format*) koji je prvenstveno bio dizajniran za pohranu multimedije poput zvuka i videa [61]. Računalna podrška jedna je vrsta referentnog standarda VP8 objavljena pod BSD (engl. *Berkeley Software Distribution*) licencom koju je također objavio Google [60]. Na slici 15 prikazani su ključni koraci uključeni u WebP kompresiju sa gubitkom, a karakteristike koje se razlikuju u odnosu na JPEG zaokružene su crvenom bojom [62].

WebP format koristi metodu prediktivnog kodiranja pri kompresiji slikovnih informacija [24], analognu H.264 tehnologiji koja s VP8 ima mnogo sličnih karakteristika kao što su transformacija, predviđanje, procjena kretanja i mnoge druge [60]. Neposredno prije kompresije slike se pretvaraju u YUV prostor boja s 8 bitnom dubinom boja i formatom 4:2:0 prema ITU-R BT.601 standardu [56]. Slike su podijeljene u blokove piksela, kao i kod JPEG formata, promjenjivih veličina čije se vrijednosti predviđaju pomoću susjednih blokova kako bi se pretpostavila vrijednost promatranog bloka. Ovaj korak pomaže u izostavljanju ponavljajućih podataka i ostavlja samo manji dio piksela za daljnju obradu. Predviđanje blokova nudi četiri načina: okomito, horizontalno, *TrueMotion* i DC predikcija jednom bojom [60]. Stvorene pretpostavljene vrijednosti oduzimaju se od stvarnih vrijednosti pri čemu se pohranjuje samo razlika koja podliježe daljnjim promjenama. Razlika koja obično sadrži mnogo vrijednosti nula između stvarnih vrijednosti i predviđenih potom se vrlo učinkovito komprimiraju korištenjem DCT i Walsh-Handmardove transformacije [24], [28] [60]. Pri tome se koriste aritmetičke operacije fiksne točke kako bi se zanemarile pogreške zaokruživanja kod obje transformacije čime se minimalizira gubitak informacija. Entropijsko aritmetičko kodiranje kojeg koristi WebP format čini najznačajniju razliku u odnosu na Huffmanovo kodiranje kojeg koristi JPEG format.

Rezultat je da za pohranu slikovnih informacija WebP datoteke potrebno je manje vrijednosti piksela nego za istu sliku JPEG datoteke [60]. Entropijsko kodiranje ima prednost u boljoj kompresiji i omogućava smanjenje veličine izlazne datoteke i do 40% s dobrom kvalitetom [24]. Postotci mogu varirati ovisno o konkretnim slikama i njihovom sadržaju.



Slika 15. WebP kompresija s gubitkom podataka [63]



Slika 16. Lijevo JPEG (Q75) 136.1 KB, desno WebP (Q67) 94.69 KB [58]

Slika 16 prikazuje usporedbu JPEG formata pri postavci vrijednosti kompresije Q75 i WebP formata pri postavci vrijednosti kompresije Q67. WebP postiže izlaznu veličinu datoteke od 94,69 KB što je otprilike 30% manja veličina u odnosu na JPEG od 136,11 KB uz zadržavanje jednake vizualne kvalitete prikaza [58].

WebP kompresija bez gubitka temelji se na transformaciji slike pomoću nekoliko različitih tehnika. Nakon transformacije, parametri transformacije i transformirani slikovni podaci se entropijski kodiraju korištenjem LZ77 i Huffmanovo kodiranje.

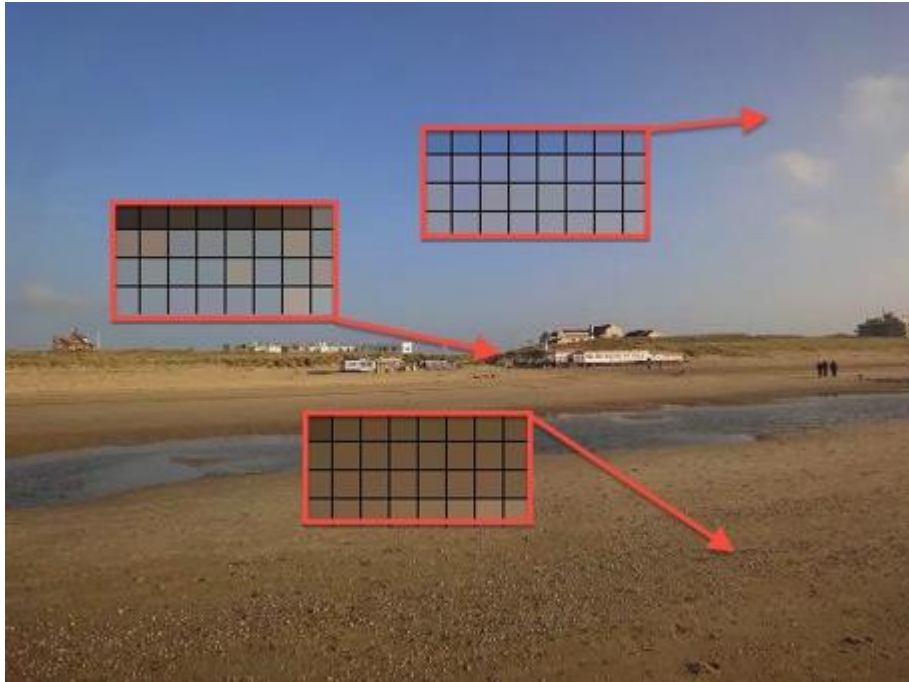
Transformacija prostorne predikcije (engl. *Spatial prediction transform*) iskorištava činjenicu da su susjedni pikseli najčešće u korelaciji. U ovom postupku, trenutna vrijednost piksela predviđa se iz već dekodiranih piksela, a samo se razlika između stvarne i predviđene vrijednosti kodira. Način predviđanja određuje vrstu predviđanja koja će se koristiti, a dijele se prema smjeru i prosječnoj vrijednosti. Slika je podijeljena na više kvadratnih područja pri čemu svi pikseli unutar jednog područja koriste isti način predviđanja.

Transformacija prostora boja (engl. *Color space transform*) ima za cilj smanjiti međusobnu zavisnost RGB vrijednosti svakog piksela. Zadržava se zelena vrijednost piksela netaknutom dok se crvena vrijednost transformira na temelju zelene, a plava vrijednost na temelju zelene i crvene vrijednosti. Također se prvo slika dijeli na više kvadratnih područja i isti način transformacije koristi se za sve piksele unutar jednog područja.

Transformacija oduzimanjem zelene (engl. *Subtract Green Transform*) koja oduzima zelene vrijednosti od crvenih i plavih vrijednosti svakog piksela. Kada se ova transformacija koristi, dekoder treba dodati zelenu vrijednost natrag u crvenu i plavu vrijednost za svaki piksel kako bi se obnovila originalna slika. Ova transformacija predstavlja specifičan slučaj opće transformacije prostora boja koja je dovoljno često u upotrebi i ima značajan učinak na redukciju slikovnih podataka što opravdava korištenje kao zasebnog koraka u procesu kodiranja.

Transformacija indeksiranja boja – paleta (engl. *Color Indexing palettes Transform*) primjenjuje se kada na slici nema puno jedinstvenih vrijednosti piksela odnosno kada ima ograničen broj boja. Ukoliko je broj jedinstvenih vrijednosti ispod određenog praga od najčešće 256 boja stvara se paleta koja se zatim koristi za zamjenu vrijednosti piksela s odgovarajućim indeksom. Time se značajno smanjuje veličina podataka potrebnih za pohranu, naročito u situacijama gdje slika ima ograničen broj boja kao što su neke jednostavnije grafike poput logotipa.

Kodiranje predmemorije boje (engl. *Color Cache Coding*) temelji se na pretpostavci da su već viđeni fragmenti slike vrlo vjerovatni za ponovno pojavljivanje. Umjesto da kodira svaki piksel neovisno koristi lokalnu predmemoriju boja koja sadrži nedavno korištene boje. Lokalna predmemorija boja ažurira se na temelju vrijednosti piksela trenutnog područja kao što je prikazano na slici 17 gdje se 32 korištene boje postupno ažuriraju odozgo prema dolje.



Slika 17. Kodiranje predmemorije boja [62]

LZ77 prefikasno kodiranje temelji se na zamijeni ponavljajućih uzoraka u podacima sa skraćenim referencama na prethodno viđene podatke. Reference se obično sastoje od vrijednosti koda duljine i koda udaljenosti. Duljina označava koliko uzoraka (piksela) u redosljedu je potrebno kopirati, udaljenost označava položaj s kojeg treba kopirati uzorke. LZ77 prefikasno kodiranje dijeli velike cjelobrojne vrijednosti u dva dijela: kod prefiksa i dodatne bitove. Kod prefiksa se obično pohranjuje pomoću Huffmanovog koda, dok se dodatni bitovi pohranjuju kakvi jesu (bez entropijskog koda). Sinteza kodiranja prefiksa i izravne pohrane dodatnih bitova omogućava učinkovitu kompresiju podataka bez značajnog gubitka kvalitete slike [62].

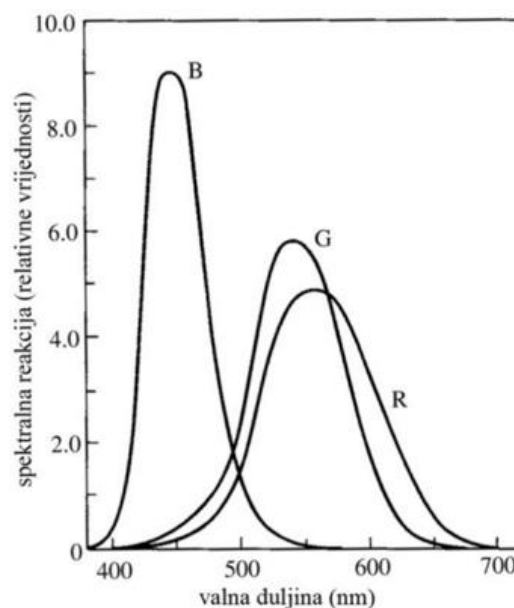
2.4. Teorije percepcije boje

Prvu teoriju prirode svjetlosti i percipiranje boja predložio je Isaac Newton 1672. godine. Naime, Newton je eksperimentalno pokazao da je sunčeva (bijela) svjetlost sastavljena od zraka

koje se mogu savijati i lomiti prilikom prolaska kroz staklenu optičku prizmu, tvoreći tako vidljivi spektar boja. Otkrićem je ustanovio da je raspon loma bijele svjetlosti od prizme kontinuiran te da boja objekta odgovara spektralnoj refleksiji s njegove površine [64]. Tri teorije podupiru današnje poimanje percepcije boje: trikromatska teorija, teorija oponentnih procesa i zonska teorija doživljaja boja.

2.4.1. Trikromatska teorija doživljaja boja

Trikromatska teorija doživljaja boja temelji se na znanstvenim radovima Maxwella, Younga i Helmholtza s kraja 19. stoljeća prema kojoj je osnova vidljivosti i percepcije boja trikromatska građa ljudskog oka [65]. Doživljaj boje prema trikromatskoj teoriji je funkcija tri vrste fotoreceptorskih mehanizama (čunjića) od kojih je svaki optimiziran na različiti raspon spektralne osjetljivosti prikazanih na slici 18 [66]. Prvi skup čunjića L (engl. *long-wave*) apsorbira duge valne duljine svjetlosti u crvenom rasponu, drugi skup čunjića M (engl. *middle-wave*) apsorbira srednje valne duljine u zelenom rasponu i treći skup čunjića S (engl. *short-wave*) apsorbira kratke valne duljine u plavom rasponu. Potencijalne boje moguće je uskladiti stupnjem aktivnosti triju fotoreceptora na svjetlo određene valne duljine. Primjerice, žutu boju vidimo kada je niska aktivacija S fotoreceptora, a visoka i podjednaka aktivacija M i L fotoreceptora [67]. Trikromatska teorija pruža prilično jednostavno i lako razumljivo objašnjenje doživljaja boje iz odgovarajućih omjera triju primara.



Slika 18. Spektralna distribucija crvenog (R), plavog (B) i zelenog (G) fotoreceptora u trikromatskoj teoriji [68]

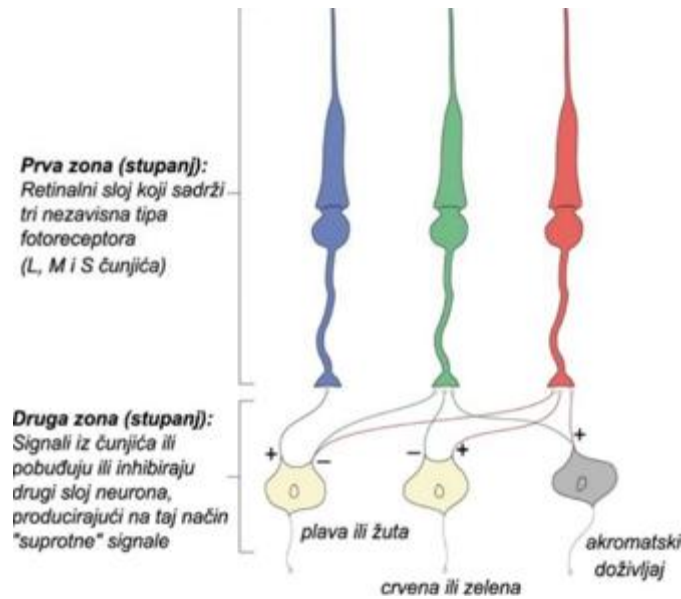
2.4.2. Teorija oponentnih procesa doživljaja boja

Iako trikromatska teorija dobro predviđa ishode u području viđenja boja poput njihova izjednačavanja i miješanja mnogi fenomeni ljudskog vida ostali su neobjašnjeni [67]. Teoriju oponentnih (suprotnih) boja predložio je njemački fiziolog Hering 1878. godine koja se oslanja na subjektivna opažanja u izgledu boje. Navedena opažanja uključivala su pojavnost boje, simultani kontrast, paslike (naknadne) slike i nedostatke u viđenju boja [69]. Heringova teorija predlaže postojanje tri vrste receptora s bipolarnim odgovorima na bijelo naspram crno, crveno naspram zeleno i plavo naspram žuto. Premisa ove teorije je da se određene boje nikada ne mogu zajedno percipirati. Na primjer, boje se nikad ne mogu opisati kao crvenkasto zelene ili žučkasto plave dok se kombinacije crvene i žute, crvene i plave, zelene i žute te zelene i plave lako mogu percipirati.

2.4.3. Zonska teorija doživljaja boja

Opis fizioloških mehanizama vidnog sustava dala je zonska teorija doživljaja boja koja povezuje trikromatsku teoriju i teoriju oponentnih procesa [65]. Također je poznata kao moderna teorija oponentnih procesa. Svojstva od obje teorije su spojene u dvije odvojene, ali uzastopne zone koje opisuju proces vizualnog podražaja u mrežnici oka. Prva zona odgovara Younge i Helmutzovoj teoriji trikromatskog doživljaja boja objašnjava postojanje tri nezavisna fotoreceptora. Druga zona odgovara Heringovoj teoriji koja objašnjava aspekte viđenja boja na neuronskoj razini kada se slike prenose od oka do mozga putem očnog živca [66] [70].

Sredinom 20. stoljeća znanstvenici su na mrežnici oka ustanovili postojanje zone suprotstavljenih (bipolarnih) neurona. Pretpostavlja se da postoje tri tipa bipolarnih neurona koja se povezuju s tri susjedna čunjića (S, M i L) za prijenos bijele ili crne, plave ili žute, crvene ili zelene boje. Navedeni neuroni reagiraju ekscitacijski ili inhibicijski na signale s čunjića mijenjajući pri tome svoju osjetljivost. Signali se kodiraju generirajući tri nova signala, jedan akromatski i dva kromatska signala. U zavisnosti o jačini signala suprotne informacije kromatskih signala, koje mogu biti pozitivne ili negativne (+ ili -), prenose se istim nervnim kanalom. Proces doživljaja boje u zonskoj teoriji odvija se u dvije faze. Prva faza podrazumijeva aktivaciju receptora na različite valne duljine (trikromatska teorija). Druga faza odnosi se na integraciju ekscitacijskih i inhibicijskih signala s receptora (teorija oponentnih procesa) [67].



Slika 19. Prikaz prijenosa signala čunjićima u zonskoj teoriji viđenja boje [65]

2.5. Terminologija vidnog polja

Uz standardnu terminologiju percepcija boja, također je važno razumijevanje svih komponenti koje se koriste za opisivanje scene u kojem se promatra pojavnost boje podražaja. Navedena scena poznatija je kao vidno polje ili češće kao uvjeti gledanja.

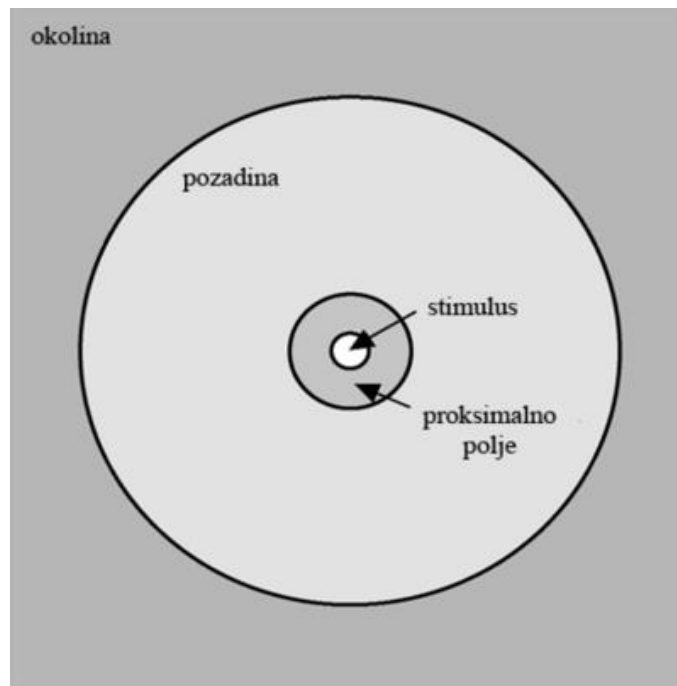
Različite konfiguracije vidnog polja rezultirati će različitim kognitivnim sposobnostima interpretacije podražaja, a samim time i različitoj percepciji boja. Pojava boje podražaja zavisi prvenstveno o samom podražaju, ali i o ostalim podražajima u njegovoj neposrednoj blizini bilo u prostoru ili vremenu. Vremenski učinci rješavaju se osiguravanjem da promatrači imaju adekvatno vrijeme prilagodbe okolini gledanja i prezentaciji podražaja. Budući da su oči stalno u pokretu nemoguće je u praktičnim situacijama razdvojiti prostorne i vremenske učinke. Idealni prostorni prikaz vidnog polja bio bi u slučaju potpuno specificirane slike promatrane scene zbog čega je prostorna konfiguracija vidnog polja uvijek od kritične važnosti [69]. Relevantno istraživanje vezano uz značaj odnosa prostorne konfiguracije podražaja i okoline objavio je Abramov sa suradnicima 1992. godine [71].

Pojednostavljene zajedničke elemente vidnog polja podijeljene na 4 komponente prikazane na slici 20 predstavio je Hunt 1991. godine [72]:

1. Podražaj – može se definirati kao aspekt boje od interesa za mjerenje. U standardnom kolorimetrijskom mjerenju podražaj se obično uzima kao veličina u rasponu vidnog kuta od

2°. Vrijednost podražaja od 2° usklađena je sa CIE 1931. standardni promatrač kojim se predlaže vidni kut u rasponu od 1° do 4° [69][73].

2. **Proksimalno polje** – može se definirati kao neposredno okruženje koje se proteže od podražaja za oko 2° od ruba podražaja u svim ili većini smjerova. Poznavanje proksimalnog polja neophodno je za detaljnu konfiguraciju vidnog polja, ali često ga je u praksi teško precizno specificirati. U slučajevima kada proksimalno polje nije definirano, njegova vrijednost biti će jednaka pozadini koja se proteže od samog podražaja [69][73].
3. **Pozadina** – može se definirati kao okruženje koje se proteže od podražaja ili proksimalnog polja ako je definirano za približno 10° u svim smjerovima [69] [73].
4. **Okolina** – može se definirati kao cjelokupno vidno polje izvan područja pozadine. U praktičnoj primjeni okolina se može razmatrati kao cijela prostorija ili prostorno područje u kojem se slika (ili drugi podražaj) promatra [69][73].



Slika 20. Prostorni prikaz vidnog polja [77]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Rezolucija je najznačajnija karakteristika pikselske slike. Definira se kao broj piksela u prikazu slike. Subjektivna percepcija kvalitete fotografije uvelike se temelji na njezinoj rezoluciji. Što je broj piksela veći, rezolucija je veća, a time i kvaliteta prikaza. Veličina prikazanog piksela određena je rezolucijom i dijagonalom ekrana. Gustoća piksela na ekranu (hardverski pojam) izražava se jedinicom ppi (engl. *pixels per inch*). Ukoliko se digitalna slika prisilno povećava, kvaliteta prikaza se smanjuje, odnosno slika postaje zrnata, pikselizirana. U tome slučaju, više piksela ekrana (hardverski pojam) čini jedan piksel digitalne slike (softverski pojam). Što je razlika veća, kvaliteta prikaza iste slike je lošija.

Priprema fotografije za objavu u web okruženju podrazumijeva optimizaciju zapisa kako bi se dobio optimalni omjer kvalitete i veličine slikovne datoteke. Ključni korak optimizacije je redukcija broja piksela koji čine sliku, a potom slijedi sažimanje slikovnih podataka primjenom odabranog algoritma. Redukcija rezolucije značajno utječe na veličinu slikovne datoteke. Postavlja se pitanje kako odabrati optimalnu rezoluciju fotografije koju želimo prikazati u web okruženju. Optimalna rezolucija nije univerzalna, stoga odluka o tome koja je prikladna ovisi o različitim kriterijima uključujući i željeni format prikaza slike na web stranici. Subjektivne metode procjene najpouzdaniji su načini mjerenja obzirom da je ljudski vizualni sustav krajnji primatelj slikovnih informacija. Takva prosudba ocjene temeljena na percepciji promatrača ima važnu ulogu u sustavima vizualnih komunikacija zbog postojanja raznih vrsta oštećenja slikovnih informacija. Pod oštećenjima podrazumijevamo izmjene i razine obrade slike, razne vrste sažimanja, prijenos i prikaz između različitih medija i slično.

Za osiguranje podudarnosti vizualnih podražaja izrađena je testna forma u obliku kolaža različitih kompleksnih fotografija i obojanih polja - crvenog, zelenog i plavog (RGB), zatim cijan, magenta, žutog i crnog (CMYK) te gradacije sivih nijansi. Izvorna rezolucija testne forme je 6000x4000px. Slijedi prikaz izrađene testne forme na slici 21.



Slika 21. Testna forma u obliku kolaža različitih kompleksnih fotografija, boja RGB i CMYK te gradacije sivih nijansi, datoteka test_forma.png

Pomoću programa ImageMagick izrađeno je sto varijanti testne forme različitih rezolucija koje su potom umetnute u okvir fiksnih dimenzija i tako prikazane u web pregledniku. Rezolucije varijanti testne forme kreću se u koracima od 60x40px. Dakle, prva varijanta ima rezoluciju 60x40px, druga 120x80px, treća 180x120px i tako dalje do stote varijante. Varijante su izrađene automatiziranim postupkom, pomoću programskog jezika PHP i *code editora* Visual Studio Code (VSC). Izrađena je PHP skripta `rezolucija_generator.php` koja iz izvorne slike `test_forma.png` pomoću programa *magick convert* izrađuje željene varijante različitih rezolucija, u dva različita formata zapisa slike – JPEG i WebP te ih pohranjuje u pripadajuće mape: `rezolucija/jpeg` i `rezolucija/webp`. Izlazne slike u nazivu datoteke sadrže širinu i visinu u pikselima kako bi ih se moglo razlikovati. Za promjenu rezolucije pojedine slike (opcija *resize*) koristi se algoritam Lanczos, indeks kvalitete *quality* je postavljen na vrlo visoku razinu 99/100 kako kompresija ne bi utjecala na zaključak o rezoluciji te su aplicirane uobičajene optimizacijske opcije pri izradi slika namijenjenih za reprodukciju u okviru digitalnih sustava: -sampling-factor 4:2:0 -colorspace sRGB -strip. Preduvjet za izvršavanje skripte je instaliran

ImageMagick paket alata i podrška za PHP u CLI (engl. *Command Line Interface*) modu rada. Skripta je izvršena kroz *Terminal* u editoru VSC, primjenom sljedeće naredbe:

```
C:\eksperiment> php rezolucija_generator.php
```

Naredba 1. Naredba za izvršavanje skripte rezolucija_generator.php pomoću PHP-CLI procesora

Slijedi prikaz izvornog koda predmetne PHP skripte.

```
<?php
    $source = "test_forma.png";
    $source_filename = preg_replace('/\.\w+$/','',$source);
    $output_dir_jpeg = "rezolucija/jpeg";
    $output_dir_webp = "rezolucija/webp";

    mkdir($output_dir_jpeg, 0777, true);
    mkdir($output_dir_webp, 0777, true);

    for($i=1;$i<=100;$i++) {
        $width = 6000*($i/100);
        $height = 4000*($i/100);

        $command = [
            "magick convert {$source}",
            "-filter Lanczos -resize {$width}x{$height}!",
            "-quality 99",
            "-sampling-factor 4:2:0",
            "-colorspace sRGB",
            "-strip",
            "{$output_dir_jpeg}/
            {$source_filename}_{$width}x{$height}.jpeg"
        ];

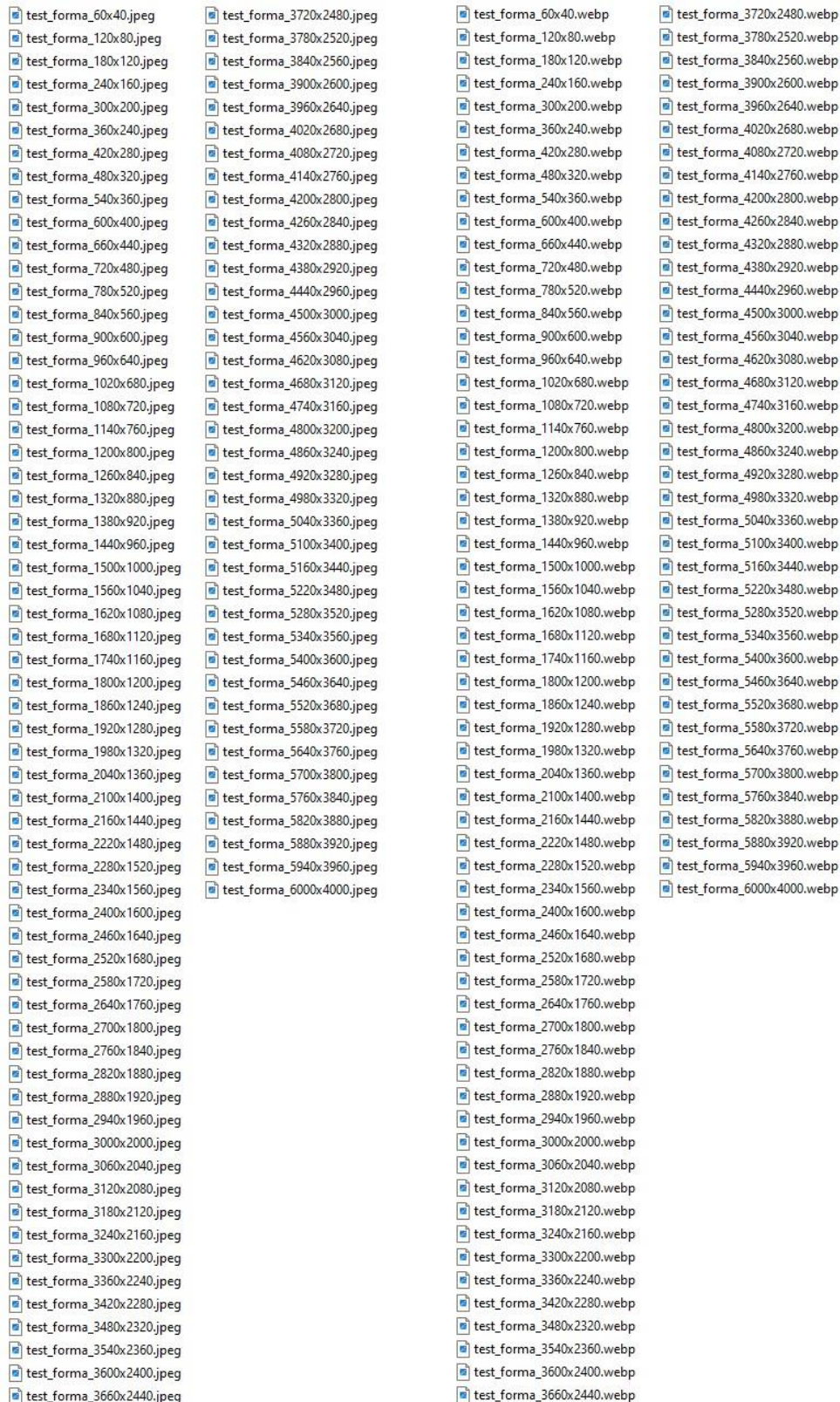
        exec(implode(" ", $command));

        $command = [
            "magick convert {$source}",
            "-filter Lanczos -resize {$width}x{$height}!",
            "-quality 99",
            "-sampling-factor 4:2:0",
            "-colorspace sRGB",
            "-strip",
            "{$output_dir_webp}/
            {$source_filename}_{$width}x{$height}.webp"
        ];

        exec(implode(" ", $command));
    }
?>
```

Kod 1. PHP skripta rezolucija_generator.php kojom se generiraju JPEG i WebP varijante testne forme

Po dovršenom izvršavanju, u pripadajućim mapama nalaze se izrađene varijante testne forme – 100 JPEG i 100 WebP slika, kako je prikazano na sljedećoj slici 22.



Slika 22. Opis datoteka izrađenih varijanti testne forme

Sve varijante umetnute su u okvir dimenzija 24x16cm, integriran u HTML dokument. Kako bi se okvir na zaslonu monitora prikazao u željenoj veličini, dimenzije okvira izračunate su u pikselima, primjenom funkcije za izračun DPI-a na temelju razlučivosti zaslona i veličine tj. dijagonale zaslona. Za potrebe istraživanja izvršila se kalibracija ekrana za boje, svjetlinu i kontrast primjenom spektrometra X-Rite i1Publish Pro 2 (slika 23) u i1Profile softveru (specijalizirani softver za mjerenje boja i svjetla te za kolor menadžment) s prilagođenim ICC profilom za ispitivani ekran. Po završetku kalibracije rezultati su se provjerili s nekolicinom testnih uzoraka slika kako bi se osiguralo da ekran isporučuje dosljedan i pravilan prikaz boja uz odgovarajuću svjetlinu i kontrast.



Slika 23 . Spektrometar X-Rite i1Publish Pro 2

Predviđeno je da se izrađeni dokument ispitanicima prikaže na laptopu dijagonale ekrana 15.6 inča, FHD rezolucije prikaza (1920x1080px). Stoga, te vrijednosti su uzete u obzir pri izračunu veličine okvira u pikselima. Slijedi prikaz primijenjenog algoritma koji je realiziran primjenom programskog jezika JavaScript.

```
<script>
  // Funkcija za izračun DPI-a na temelju razlučivosti zaslona i
  // veličine tj. dijagonale zaslona
  function calculateDPI(screenWidth, screenHeight, screenSizeInches) {
    var diagonalPixels = Math.sqrt(Math.pow(screenWidth, 2) +
      Math.pow(screenHeight, 2));
    var dpi = diagonalPixels / screenSizeInches;
    return dpi;
  }
}
```



```

// FHD rezolucija (px)
var screenWidth = 1920;
var screenHeight = 1080;

// Veličina tj. dijagonala zaslona u inčima
var screenSizeInches = 15.6;

// Izračunaj DPI
var dpi = calculateDPI(screenWidth, screenHeight, screenSizeInches);

// Izračunaj dimenzije u pikselima
var widthPx = 240 * dpi / 25.4; // Pretvori mm u inče
var heightPx = 160 * dpi / 25.4; // Pretvori mm u inče

// Postavi dimenzije u pikselima
document.getElementById('rectangle').style.width = widthPx + 'px';
document.getElementById('rectangle').style.height = heightPx + 'px';
</script>

```

Kod 2. Algoritam za izračun dimenzija okvira za prikaz slika na zaslonu monitora u formatu 24x16cm, realiziran pomoću jezika JavaScript

U svakoj fazi istraživanja vizualne procjene kvalitete slika ispitanici su podvrgnuti Ishihara testu (za ekranski prikaz i otisak) u svrhu eliminiranja pogrešnih rezultata uzrokovanih defektnostima vida. Radi postizanja objektivnosti i točnosti rezultata ekranskog prikaza osigurani su kontrolirani uvjeti promatranja u skladu sa ISO 3664:2009 međunarodnim standardom za grafičku tehnologiju i profesionalnu fotografiju:

- kut promatranja – 10 °
- udaljenost ispitanika od zaslona – 50cm
- boja ambijenta – neutralna mat siva
- zamračeni prostor u kojem se provodi istraživanje [78]

Za dosljednost i eliminaciju utjecaja okoline prilikom vizualne evaluacije otisaka osigurala se ravnomjerna neutralna svjetlost (standardna rasvjeta D65) pomoću kabine sa svjetlima GretagMacbeth (XRite) Judge II light booth, prikazane na slici 24. Ova profesionalna kabina koristi se u grafičkoj industriji, dizajnu i proizvodnji za postizanje kontroliranih uvjeta osvjetljenja uklanjajući pri tom vanjske utjecaje koji bi mogli ometati procjenu.



Slika 24. GretagMacbeth (XRite) Judge II light booth [79]

Istraživanje ekranskog prikaza je koncipirano tako da ispitanici pregledavaju izrađene varijante testne forme navigacijom pomoću tipki lijevo i desno na tipkovnici te odaberu prvu sliku u slijedu za koju smatraju da je visoke kvalitete prikaza. U svrhu jednostavnog vođenja evidencije odabranih slika, pri dnu ekrana ispisat će se naziv prikazane slikovne datoteke. Opisani mehanizam realiziran je primjenom jezika HTML, CSS i JavaScript. Slijedi prikaz izvornog koda konačno izrađenog HTML dokumenta sa svim željenim funkcionalnostima. Ovaj primjer učitava JPEG varijante testne forme iz mape rezolucija/jpeg i prikazuje ih u okviru dimenzija 24x16cm, centriranom na zaslonu monitora.

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
<title>Testna forma - JPEG, rezolucija</title>
<style>
  #rectangle {
    background-color: blue;
    position: absolute;
    top: 50%;
    left: 50%;
    transform: translate(-50%, -50%);
  }
  #image {
    position: absolute;
    top: 0;
    left: 0;
    width: 100%;
    height: 100%;
    object-fit: contain;
  }
</style>
</html>
```

```

}
#image-name {
  position: absolute;
  bottom: 0;
  left: 0;
  color: gray;
  font-size: 16px;
}
</style>
</head>
<body>
  <div id="rectangle">
    <img id="image" src="" alt="Image">
  </div>
  <div id="image-name"></div>

<script>
  function calculateDPI(screenWidth, screenHeight, screenSizeInches) {
    var diagonalPixels = Math.sqrt(Math.pow(screenWidth, 2) +
      Math.pow(screenHeight, 2));
    var dpi = diagonalPixels / screenSizeInches;
    return dpi;
  }

  var screenWidth = 1920;
  var screenHeight = 1080;
  var screenSizeInches = 15.6;

  var dpi = calculateDPI(screenWidth, screenHeight, screenSizeInches);

  var widthPx = 240 * dpi / 25.4;
  var heightPx = 160 * dpi / 25.4;

  document.getElementById('rectangle').style.width = widthPx + 'px';
  document.getElementById('rectangle').style.height = heightPx + 'px';

  var images = [
    "test_forma_60x40.jpeg",
    "test_forma_120x80.jpeg",
    "test_forma_180x120.jpeg",
    "test_forma_240x160.jpeg",
    "test_forma_300x200.jpeg",
    "test_forma_360x240.jpeg",
    "test_forma_420x280.jpeg",
    "test_forma_480x320.jpeg",
    "test_forma_540x360.jpeg",
    "test_forma_600x400.jpeg",
    "test_forma_660x440.jpeg",
    "test_forma_720x480.jpeg",
    "test_forma_780x520.jpeg",
    "test_forma_840x560.jpeg",
    "test_forma_900x600.jpeg",
    "test_forma_960x640.jpeg",
    "test_forma_1020x680.jpeg",
    "test_forma_1080x720.jpeg",
    "test_forma_1140x760.jpeg",
    "test_forma_1200x800.jpeg",
    "test_forma_1260x840.jpeg",
    "test_forma_1320x880.jpeg",
    "test_forma_1380x920.jpeg",
  ]

```

"test_forma_1440x960.jpeg",
"test_forma_1500x1000.jpeg",
"test_forma_1560x1040.jpeg",
"test_forma_1620x1080.jpeg",
"test_forma_1680x1120.jpeg",
"test_forma_1740x1160.jpeg",
"test_forma_1800x1200.jpeg",
"test_forma_1860x1240.jpeg",
"test_forma_1920x1280.jpeg",
"test_forma_1980x1320.jpeg",
"test_forma_2040x1360.jpeg",
"test_forma_2100x1400.jpeg",
"test_forma_2160x1440.jpeg",
"test_forma_2220x1480.jpeg",
"test_forma_2280x1520.jpeg",
"test_forma_2340x1560.jpeg",
"test_forma_2400x1600.jpeg",
"test_forma_2460x1640.jpeg",
"test_forma_2520x1680.jpeg",
"test_forma_2580x1720.jpeg",
"test_forma_2640x1760.jpeg",
"test_forma_2700x1800.jpeg",
"test_forma_2760x1840.jpeg",
"test_forma_2820x1880.jpeg",
"test_forma_2880x1920.jpeg",
"test_forma_2940x1960.jpeg",
"test_forma_3000x2000.jpeg",
"test_forma_3060x2040.jpeg",
"test_forma_3120x2080.jpeg",
"test_forma_3180x2120.jpeg",
"test_forma_3240x2160.jpeg",
"test_forma_3300x2200.jpeg",
"test_forma_3360x2240.jpeg",
"test_forma_3420x2280.jpeg",
"test_forma_3480x2320.jpeg",
"test_forma_3540x2360.jpeg",
"test_forma_3600x2400.jpeg",
"test_forma_3660x2440.jpeg",
"test_forma_3720x2480.jpeg",
"test_forma_3780x2520.jpeg",
"test_forma_3840x2560.jpeg",
"test_forma_3900x2600.jpeg",
"test_forma_3960x2640.jpeg",
"test_forma_4020x2680.jpeg",
"test_forma_4080x2720.jpeg",
"test_forma_4140x2760.jpeg",
"test_forma_4200x2800.jpeg",
"test_forma_4260x2840.jpeg",
"test_forma_4320x2880.jpeg",
"test_forma_4380x2920.jpeg",
"test_forma_4440x2960.jpeg",
"test_forma_4500x3000.jpeg",
"test_forma_4560x3040.jpeg",
"test_forma_4620x3080.jpeg",
"test_forma_4680x3120.jpeg",
"test_forma_4740x3160.jpeg",
"test_forma_4800x3200.jpeg",
"test_forma_4860x3240.jpeg",
"test_forma_4920x3280.jpeg",
"test_forma_4980x3320.jpeg",

```

    "test_forma_5040x3360.jpeg",
    "test_forma_5100x3400.jpeg",
    "test_forma_5160x3440.jpeg",
    "test_forma_5220x3480.jpeg",
    "test_forma_5280x3520.jpeg",
    "test_forma_5340x3560.jpeg",
    "test_forma_5400x3600.jpeg",
    "test_forma_5460x3640.jpeg",
    "test_forma_5520x3680.jpeg",
    "test_forma_5580x3720.jpeg",
    "test_forma_5640x3760.jpeg",
    "test_forma_5700x3800.jpeg",
    "test_forma_5760x3840.jpeg",
    "test_forma_5820x3880.jpeg",
    "test_forma_5880x3920.jpeg",
    "test_forma_5940x3960.jpeg",
    "test_forma_6000x4000.jpeg"
];

var currentIndex = 0;
var imageElement = document.getElementById("image");
var imageNameElement = document.getElementById("image-name");

function showImage(index) {
    var imageUrl = "rezolucija/jpeg/" + images[index];
    var imageName = images[index];
    imageElement.src = imageUrl;
    imageNameElement.textContent = imageName;
}

function showNextImage() {
    currentIndex = (currentIndex + 1) % images.length;
    showImage(currentIndex);
}

function showPreviousImage() {
    currentIndex = (currentIndex - 1 + images.length) % images.length;
    showImage(currentIndex);
}

showImage(currentIndex);

document.addEventListener("keydown", function(event) {
    if (event.key === "ArrowLeft") {
        showPreviousImage();
    } else if (event.key === "ArrowRight") {
        showNextImage();
    }
});

</script>
</body>
</html>

```

Kod 3. HTML dokument za prikaz JPEG varijanti testne forme u centriranom 24x16cm okviru

Izrađeni dokument prikazan je ispitanicima istraživanja, u web pregledniku Firefox, na ekranu laptopa dijagonale ekrana 15.6 inča, FHD rezolucije prikaza (1920x1080px). Cijeli postupak izveden je dva puta. Jednom za varijante izvedene u formatu JPEG, a drugi put za WebP varijante testne forme. HTML dokument za prikaz WebP varijanti se razlikuje od Izvorni kod 3 po tome što učitava slike iz mape rezolucija/webp te nazivi datoteka u varijabli *images* imaju ekstenziju *webp*, npr. „test_forma_60x40.webp“, „test_forma_120x80.webp“ itd. Ostali elementi dokumenta su identični.

Navedeni HTML dokumenti, *rezolucija_jpeg.html* i *rezolucija_webp.html* prikazani su u web pregledniku Firefox 120.0.1., u *fullscreen* modu rada, pomoću editora Visual Studio Code i ekstenzije Live Server. Dokument je otvoren u VSC i potom je kliknuto na opciju *Go Live*, čime se otvorila URL adresa dokumenta na lokalnom serveru - <http://127.0.0.1:5500/>. Slijedi prikaz dokumenta u web pregledniku na slici 25.



test_forma_1400x1080.jpeg

Slika 25. HTML dokument s varijantama testne forme, fullscreen prikaz u web pregledniku Firefox 120.0.1

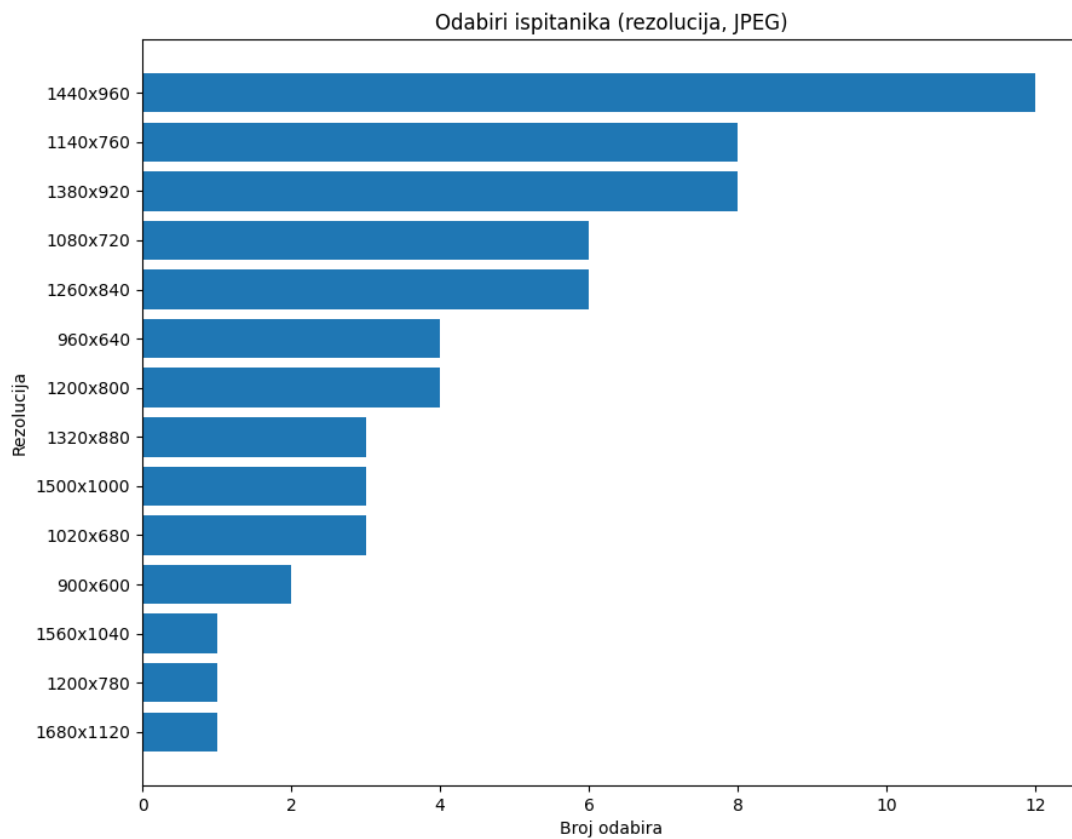
Ispitanici su u kontroliranom okruženju pregledavali izrađene varijante i odabrali prvu varijantu za koju smatraju da je visoke kvalitete prikaza. Rezolucija odabrane varijante je evidentirana. Odabiri ispitanika prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Odabiri ispitanika u istraživanju vezanom za odabir prve rezolucije visoke kvalitete prikaza testne forme

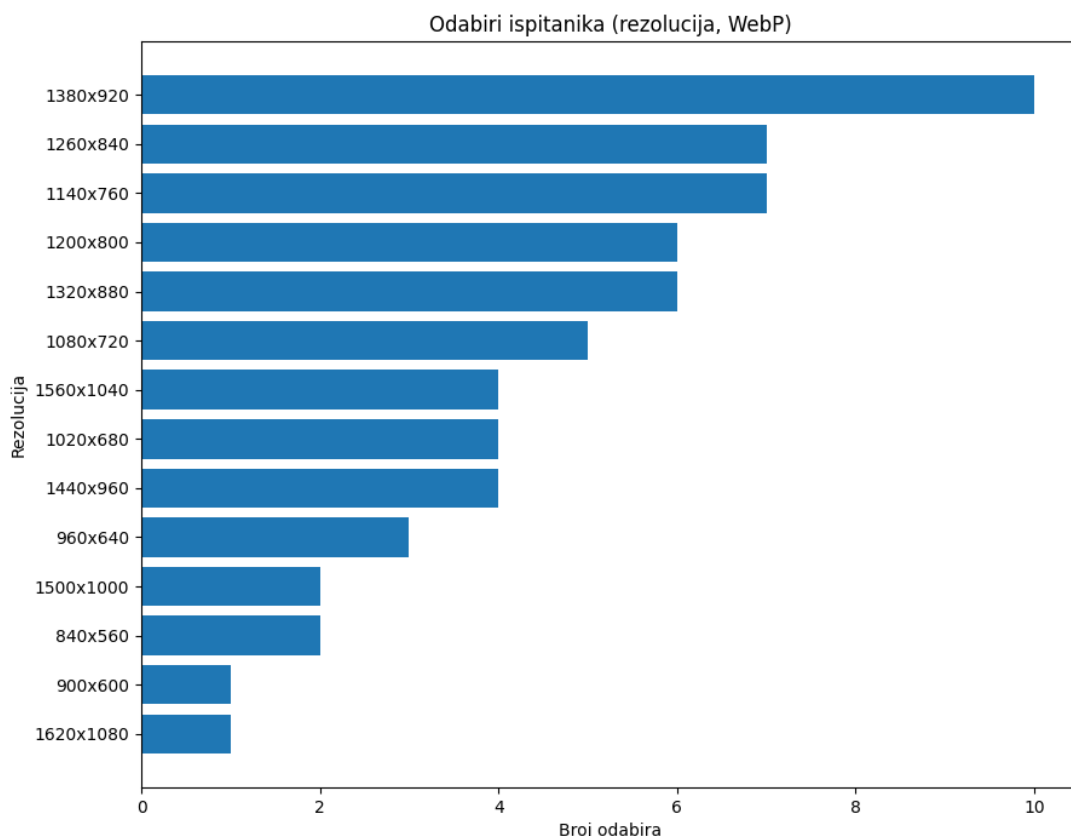
R. br.	JPEG		WebP	
	Rezolucija (px)			
	Širina	Visina	Širina	Visina
1	1140	760	1260	840
2	1380	920	1500	1000
3	1320	880	1260	840
4	1140	760	1140	760
5	1140	760	1080	720
6	1440	960	1560	1040
7	1440	960	1380	920
8	960	640	900	600
9	1380	920	1260	840
10	1080	720	1080	720
11	960	640	1020	680
12	960	640	840	560
13	1200	800	1380	920
14	1140	760	1080	720
15	1560	1040	1440	960
16	1440	960	1380	920
17	1260	840	1260	840
18	1260	840	1200	800
19	1440	960	1320	880
20	1380	920	1140	760
21	1200	800	1140	760
22	1500	1000	1380	920
23	1440	960	1560	1040
24	1140	760	1200	800
25	1140	760	1200	800

26	1440	960	1440	960
27	1200	800	1140	760
28	1380	920	1380	920
29	1380	920	1380	920
30	1080	720	1140	760
31	1320	880	1320	880
32	1440	960	1320	880
33	1380	920	1380	920
34	1440	960	1440	960
35	1320	880	1380	920
36	1500	1000	1260	840
37	1200	780	1260	840
38	1440	960	1500	1000
39	960	640	1020	680
40	1260	840	1200	800
41	1440	960	1560	1040
42	900	600	840	560
43	1080	720	1080	720
44	900	600	960	640
45	1020	680	960	640
46	1380	920	1320	880
47	1260	840	1260	840
48	1260	840	1440	960
49	1440	960	1380	920
50	1080	720	1140	760
51	1380	920	1320	880
52	1020	680	1140	760
53	1680	1120	1560	1040
54	1020	680	1080	720
55	1200	800	1200	800
56	1080	720	1020	680
57	1440	960	1620	1080
58	1080	720	1020	680
59	1260	840	1320	880

60	1140	760	960	640
61	1140	760	1200	800
62	1500	1000	1380	920



Slika 26. Odabiri ispitanika u istraživanju vezanom za odabir prve rezolucije visoke kvalitete prikaza JPEG testne forme



Slika 27. Odabiri ispitanika u istraživanju vezanom za odabir prve rezolucije visoke kvalitete prikaza WebP testne forme

Na temelju prikupljenih odabira ispitanika definirana je dominantna vrijednost, odnosno MOD (mode) podataka. Ta mjera u statistici predstavlja najčešću vrijednost u skupu podataka. Često se koristi u analizi podataka i ima važnu ulogu u opisivanju distribucije vrijednosti u skupu podataka. Prema zabilježenim odabirima, za JPEG format slika dominantna vrijednost rezolucije je 1440x960px, što je vidljivo na slici 26. S druge strane, za WebP format slika dominantna vrijednost rezolucije je 1380x920px, što je vidljivo na slici 27. JPEG format zapisa slike koristi se već dugi niz godina, a iako postoji niz novijih formata, i dalje se često koristi zbog svoje široke podrške i jednostavnosti korištenja. WebP format, s druge strane, je noviji format koji se razvijao s ciljem poboljšanja učinkovitosti kompresije slika i brzine učitavanja web stranica.

Iako u ovom koraku kompresija nije bila predmet razmatranja, pokazalo se da WebP format i pri minimalnoj kompresiji (q=99) pokazuje bolju učinkovitost u odnosu na JPEG format. To se ogleda u činjenici da su ispitanici kao prihvatljivu rezoluciju odabrali manju vrijednost za WebP sliku u usporedbi s JPEG slikom, no također i u veličini slikovne datoteke. Kako bismo ispitali

veliĉine slikovnih datoteka i utvrdili razlike, izraĉena je PHP skripta koja ĉita veliĉine izraĉenih JPEG i WebP varijanti te izraĉunava razliku izraĉenu u postocima. Slijedi izvorni kod navedene skripte.

```
<?php
    $dir_jpeg = "rezolucija/jpeg";
    $dir_webp = "rezolucija/webp";

    for($i=1;$i<=100;$i++) {
        $width = 6000*($i/100);
        $height = 4000*($i/100);

        $img = array();
        $img[0] = "test_forma_{$width}x{$height}";
        $file = $dir_jpeg.'/' . $img[0].'.jpeg';
        $img[1] = getFileSizeInKB($file);
        $file = $dir_webp.'/' . $img[0].'.webp';
        $img[2] = getFileSizeInKB($file);

        $abs_diff = abs($img[1] - $img[2]);
        $percent_diff = round(($abs_diff / $img[1]) * 100, 2);

        $img[1] = $img[1]. ' KB';
        $img[2] = $img[2]. ' KB';
        $img[3] = $percent_diff.' %';

        echo implode("\t", $img).PHP_EOL;
    }

    function getFileSizeInKB($file) {
        if (file_exists($file)) {
            $filesize_in_bytes = filesize($file);
            $filesize_in_kb = $filesize_in_bytes / 1024;
            return round($filesize_in_kb, 2);
        } else {
            die("File not found!");
        }
    }
}
?>
```

Kod 4. PHP skripta za usporedbu veliĉine datoteka JPEG i WebP varijanti testne forme, compare_filesize.php

Slijedi tabliĉni pregled veliĉina prikazanih slikovnih datoteka (engl. *filesize*) i razlike izraĉene u postocima u tablici 3.

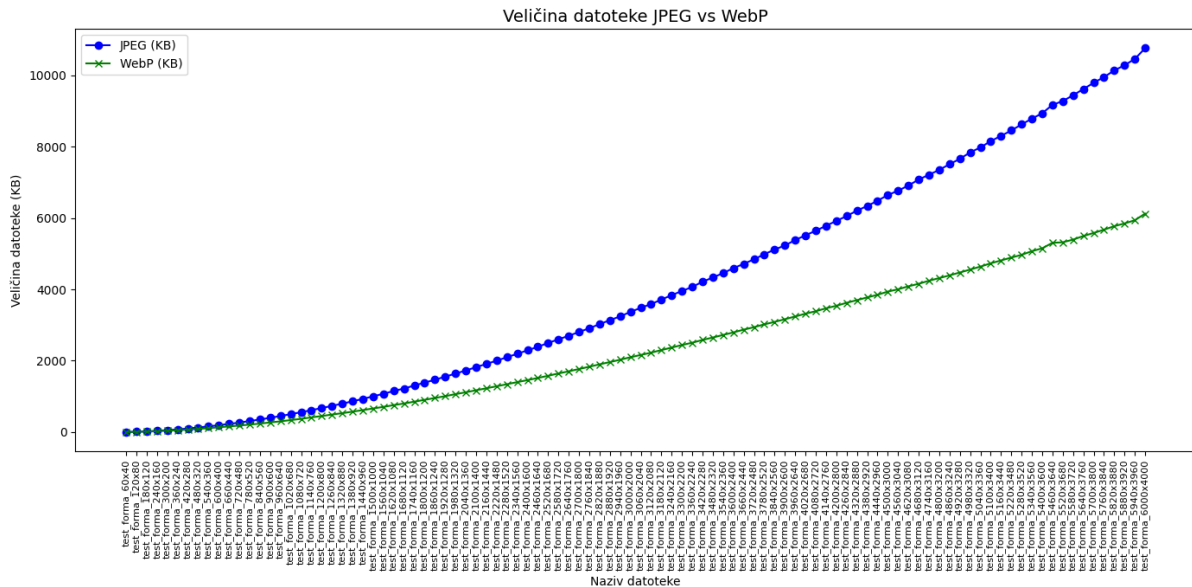
Tablica 3. Veličine prikazanih JPEG i WebP slikovnih datoteka (engl. filesize) i razlike izražene u postocima

R. br.	Naziv datoteke	JPEG	WebP	Razlika (%)
		Veličina datoteke (KB)		
1	test_forma_60x40	3,35	2,4	28,36
2	test_forma_120x80	10,51	7,35	30,07
3	test_forma_180x120	22,29	15,39	30,96
4	test_forma_240x160	36,46	24,92	31,65
5	test_forma_300x200	55,83	38,14	31,69
6	test_forma_360x240	76,1	53,19	30,11
7	test_forma_420x280	101,68	70,2	30,96
8	test_forma_480x320	128,54	88,55	31,11
9	test_forma_540x360	159,93	111,67	30,18
10	test_forma_600x400	192,95	134,3	30,4
11	test_forma_660x440	229,79	159,93	30,4
12	test_forma_720x480	266,3	184,41	30,75
13	test_forma_780x520	309,86	210,32	32,12
14	test_forma_840x560	352,77	238,93	32,27
15	test_forma_900x600	401,59	271,12	32,49
16	test_forma_960x640	450	302,41	32,8
17	test_forma_1020x680	503,6	337,39	33
18	test_forma_1080x720	558,38	371,47	33,47
19	test_forma_1140x760	615,56	413,34	32,85
20	test_forma_1200x800	672,81	450,14	33,1
21	test_forma_1260x840	736,2	491,54	33,23
22	test_forma_1320x880	796,99	530,94	33,38
23	test_forma_1380x920	863,47	573,43	33,59
24	test_forma_1440x960	931,13	616,45	33,8
25	test_forma_1500x1000	1002,91	662,83	33,91
26	test_forma_1560x1040	1074,67	706,94	34,22
27	test_forma_1620x1080	1151,26	756,98	34,25
28	test_forma_1680x1120	1222,59	802,11	34,39
29	test_forma_1740x1160	1305,13	853,06	34,64
30	test_forma_1800x1200	1386,55	904,31	34,78

31	test_forma_1860x1240	1467,91	956,62	34,83
32	test_forma_1920x1280	1553,91	1007,83	35,14
33	test_forma_1980x1320	1639,92	1064,61	35,08
34	test_forma_2040x1360	1726,71	1116,54	35,34
35	test_forma_2100x1400	1820,23	1172,99	35,56
36	test_forma_2160x1440	1911,19	1228,3	35,73
37	test_forma_2220x1480	2001,97	1285,25	35,8
38	test_forma_2280x1520	2099,57	1342,17	36,07
39	test_forma_2340x1560	2194,85	1401,95	36,13
40	test_forma_2400x1600	2292,11	1457,35	36,42
41	test_forma_2460x1640	2390,54	1518,14	36,49
42	test_forma_2520x1680	2499,69	1578,59	36,85
43	test_forma_2580x1720	2599,33	1644,01	36,75
44	test_forma_2640x1760	2700,73	1703,62	36,92
45	test_forma_2700x1800	2804,78	1769,23	36,92
46	test_forma_2760x1840	2911,74	1832,33	37,07
47	test_forma_2820x1880	3025,73	1899,96	37,21
48	test_forma_2880x1920	3137,86	1963,09	37,44
49	test_forma_2940x1960	3243,65	2029,24	37,44
50	test_forma_3000x2000	3370,05	2099,14	37,71
51	test_forma_3060x2040	3482,55	2162,51	37,9
52	test_forma_3120x2080	3588,66	2226,63	37,95
53	test_forma_3180x2120	3712,33	2299,48	38,06
54	test_forma_3240x2160	3840,2	2369,24	38,3
55	test_forma_3300x2200	3954,03	2441,39	38,26
56	test_forma_3360x2240	4070,16	2506,15	38,43
57	test_forma_3420x2280	4214,05	2582,81	38,71
58	test_forma_3480x2320	4334,01	2651,7	38,82
59	test_forma_3540x2360	4456,59	2723,3	38,89
60	test_forma_3600x2400	4595,58	2794,74	39,19
61	test_forma_3660x2440	4713,97	2872,53	39,06
62	test_forma_3720x2480	4844,06	2941,09	39,28
63	test_forma_3780x2520	4984,19	3019,78	39,41
64	test_forma_3840x2560	5116,77	3089,08	39,63

65	test_forma_3900x2600	5231,09	3164,31	39,51
66	test_forma_3960x2640	5383,02	3241,31	39,79
67	test_forma_4020x2680	5516,05	3318,81	39,83
68	test_forma_4080x2720	5643,48	3388,87	39,95
69	test_forma_4140x2760	5782,63	3470,59	39,98
70	test_forma_4200x2800	5920,03	3540,72	40,19
71	test_forma_4260x2840	6054,53	3624,58	40,13
72	test_forma_4320x2880	6208,19	3698,39	40,43
73	test_forma_4380x2920	6337,4	3776,51	40,41
74	test_forma_4440x2960	6483,62	3848,42	40,64
75	test_forma_4500x3000	6645,55	3938,81	40,73
76	test_forma_4560x3040	6766,2	4003,44	40,83
77	test_forma_4620x3080	6912,16	4086,41	40,88
78	test_forma_4680x3120	7078,25	4157,04	41,27
79	test_forma_4740x3160	7214,92	4243,35	41,19
80	test_forma_4800x3200	7349,32	4317,3	41,26
81	test_forma_4860x3240	7510,7	4393,28	41,51
82	test_forma_4920x3280	7658,53	4473,94	41,58
83	test_forma_4980x3320	7840,4	4556,68	41,88
84	test_forma_5040x3360	7978,04	4639,04	41,85
85	test_forma_5100x3400	8156,82	4731,54	41,99
86	test_forma_5160x3440	8302,06	4811,53	42,04
87	test_forma_5220x3480	8455,01	4892,22	42,14
88	test_forma_5280x3520	8625,09	4969,05	42,39
89	test_forma_5340x3560	8785,8	5071,79	42,27
90	test_forma_5400x3600	8936,31	5151,7	42,35
91	test_forma_5460x3640	9173,65	5305,91	42,16
92	test_forma_5520x3680	9278,89	5321,01	42,65
93	test_forma_5580x3720	9442,04	5395,73	42,85
94	test_forma_5640x3760	9615,39	5496,57	42,84
95	test_forma_5700x3800	9790,38	5582,3	42,98
96	test_forma_5760x3840	9950,41	5672,81	42,99
97	test_forma_5820x3880	10136,66	5773,06	43,05
98	test_forma_5880x3920	10283,57	5848,54	43,13

99	test_forma_5940x3960	10459,37	5938,55	43,22
100	test_forma_6000x4000	10760,3	6123,17	43,09



Slika 28. Odnosi veličina datoteka JPEG i WebP kod ispitivanja rezolucije

Prikazani podaci na slici 28 pokazuju da je u svim slučajevima WebP varijanta manje veličine datoteke (engl. *filesize*) u odnosu na JPEG varijantu testne forme, i to u prosjeku za 37,34%. Manja veličina slikovne datoteke upućuje na bolju učinkovitost WebP formata. Stoga, WebP format zapisa može se smatrati naprednijim i učinkovitijim grafičkim formatom u odnosu na JPEG, što je u skladu s prethodnim spoznajama o ovoj temi. Osim što je manja veličina datoteke poželjna zbog bržeg prijenosa slike, ona također može biti važna zbog ograničenja prostora za pohranu na uređajima ili web stranicama. Stoga, ako su brzina prijenosa slike i veličina datoteke važni parametri, a kvaliteta slike mora ostati na prihvatljivoj razini, WebP format je prihvatljiva i poželjna alternativa JPEG formatu.

Ispitanici su u kontroliranom okruženju pregledavali izrađene varijante i odabrali prvu varijantu za koju smatraju da je visoke kvalitete prikaza. Za JPEG to je rezolucija 1440x960px, a za WebP 1380x920px. Odabrana JPEG varijanta (1440x960px, 931,13 KB) je 91,34% manja od JPEG varijante najveće rezolucije (6000x4000px, 10760,3 KB). Također, odabrana WebP varijanta (1390x920px, 573,43 KB) je 90,64% manja od WebP varijante najveće rezolucije (6000x4000px, 6123,17 KB). Iz navedenog može se zaključiti da odabrane vrijednosti rezolucija nude dobar balans između kvalitete slike i veličine datoteke slike u razmatranom okruženju.

Također, obzirom da su rezolucije 1440x960px i 1390x920px vrlo bliske (razlika je tek u jednoj 60x40px iteraciji), može se odrediti jedinstvena rezolucija koja zadovoljava oba slučaja: 1440x960px. U kontekstu WebP formata, datoteka varijante rezolucije 1440x960px je tek 43,02 KB veća od varijante 1380x920px, odnosno tek 6,98%, što u kontekstu modernih informacijsko-komunikacijskih sustava ne predstavlja značajnije opterećenje resursa.

Uz rezoluciju i kompresiju, boja je također važan parametar grafičke reprodukcije. U razmatranom kontekstu zanima nas degradacija odabranih boja uslijed pretvorbe izvorne testne forme u JPEG i WebP varijante različitih rezolucija. Prethodno smo definirali jedinstvenu rezoluciju koja daje optimalni balans između kvalitete i veličine datoteke slike, u kontekstu JPEG i WebP formata zapisa: 1440x960px. Stoga, sljedeće valja provjeriti je li u tom slučaju došlo do degradacije boja. To će se provjeriti mjerenjem RGB vrijednosti obojanih polja na odabranoj varijanti testne forme. U tu svrhu korištena je Firefox ekstenzija ColorZilla 3.3. Vrijednosti su izmjerene u središtu obojanih polja, unutar okvira 25x25px. Slijede izmjerene veličine.

Tablica 4. Izmjerene RGB vrijednosti obojanih polja na odabranoj varijanti testne forme (1440x960px) JPEG formata zapisa

Polje	Referentno	1440x960px JPEG	ΔE
R - Crveno	rgb(255, 0, 0)	rgb(254, 0, 0)	0,3731
G - Zeleno	rgb(0, 255, 0)	rgb(0, 255, 1)	0,0766
B - Plavo	rgb(0, 0, 255)	rgb(0, 0, 254)	0,4232
C - Cijan	rgb(0, 255, 255)	rgb(0, 255, 255)	0
M - Magenta	rgb(255, 0, 255)	rgb(255, 0, 254)	0,4857
Y - Žuto	rgb(255, 255, 0)	rgb(255, 255, 0)	0
K - Crno	rgb(0, 0, 0)	rgb(0, 0, 0)	0

Tablica 5. Izmjerene RGB vrijednosti obojanih polja na odabranoj varijanti testne forme (1440x960px) WebP formata zapisa

Polje	Referentno	1440x960px WebP	ΔE
R - Crveno	rgb(255, 0, 0)	rgb(254, 0, 0)	0,3731
G - Zeleno	rgb(0, 255, 0)	rgb(0, 255, 1)	0,0766
B - Plavo	rgb(0, 0, 255)	rgb(0, 0, 254)	0,4232
C - Cijan	rgb(0, 255, 255)	rgb(0, 255, 255)	0

M - Magenta	rgb(255, 0, 255)	rgb(255, 0, 254)	0,4857
Y - Žuto	rgb(255, 255, 0)	rgb(255, 255, 0)	0
K - Crno	rgb(0, 0, 0)	rgb(0, 0, 0)	0

Iz priloženog može se zaključiti da na odabranoj varijanti testne forme (1440x960px) nije došlo do primjetne degradacije razmatranih boja (najveći ΔE je 0,4857), u oba primijenjena formata zapisa slike.

Po uzoru na prethodna istraživanja vezana za rezoluciju, provedeno je i istraživanje vezano za odabir prihvatljivog stupnja kompresije grafičkog zapisa kako bi se utvrdila smislenost dodatne optimizacije. Kompresija je aplicirana na prethodno utvrđenu jedinstvenu rezoluciju koja daje optimalni balans između kvalitete i veličine datoteke slike u razmatranom kontekstu, 1440x960px. Parameteri istraživanja su identični prethodno opisanome – iz testne forme izrađene su varijante za razmatranje i potom su prikazane ispitanicima. Varijante testne forme sada se nisu više razlikovale prema rezoluciji, već po stupnju kompresije, dok je odabrana rezolucija bila konstanta, 1440x960px. Stupnjevi kompresije izražavaju se brojem od 0 do 100, pri čemu je 0 najmanja kvaliteta prikaza, odnosno najviši stupanj kompresije, dok je 100 najveća kvaliteta prikaza, odnosno najmanji stupaj kompresije. Istraživanjem su obuhvaćeni stupnjevi kompresije od 1 do 99 kako bi se izbjegli rubni slučajevi. Izrađene su varijante testne forme u JPEG i WebP formatu zapisa slike. Varijante su generirane primjenom posebno izrađene PHP skripte. Skripta je izvršena kroz *Terminal* u editoru VSC, primjenom sljedeće naredbe:

```
C:\eksperiment> php kompresija_generator.php
```

Naredba 2. Naredba za izvršavanje skripte kompresija_generator.php pomoću PHP-CLI procesora

Slijedi prikaz izvornog koda predmetne PHP skripte.

```
<?php
$source = "test_forma.png";
$source_filename = preg_replace('/\/\.\w+$/','',$source);
$output_dir_jpeg = "kompresija/jpeg";
$output_dir_webp = "kompresija/webp";

mkdir($output_dir_jpeg, 0777, true);
mkdir($output_dir_webp, 0777, true);

for($i=1;$i<100;$i++) {
    $width = 1440;
    $height = 960;
```

```

$command = [
    "magick convert {$source}",
    "-filter Lanczos -resize {$width}x{$height}!",
    "-quality {$i}",
    "-sampling-factor 4:2:0",
    "-colorspace sRGB",
    "-strip",
    "{$output_dir_jpeg}/{$source_filename}_q{$i}.jpeg"
];

exec(implode(" ", $command));

$command = [
    "magick convert {$source}",
    "-filter Lanczos -resize {$width}x{$height}!",
    "-quality {$i}",
    "-sampling-factor 4:2:0",
    "-colorspace sRGB",
    "-strip",
    "{$output_dir_webp}/{$source_filename}_q{$i}.webp"
];

exec(implode(" ", $command));
}
?>

```

Kod 5. PHP skripta kompresija_generator.php kojom se generiraju JPEG i WebP varijante testne forme različitih stupnjeva kompresije

Po dovršenom izvršavanju, u pripadajućim mapama nalaze se izrađene varijante testne forme – 99 JPEG i 99 WebP slika. JPEG slike nalaze se u mapi kompresija/jpeg, a WebP u kompresija/webp. Jednako kao u prethodnom koraku, sve varijante umetnute su u okvir dimenzija 24x16cm, integriran u HTML dokument. Izrađena su dva HTML dokumenta, jedan za ispitivanje JPEG varijanti testne forme (kompresija_jpeg.html), a drugi za WebP (kompresija_webp.html). Izvorni kod HTML dokumenata je gotovo identičan onome prikazanom u Izvorni kod 3., s time da se JPEG varijante testne forme učitavaju iz mape kompresija/jpeg, a WebP iz kompresija/webp. U varijable *images* upisani nazivi datoteka koje se ispituju. Nazivi JPEG datoteka su od test_forma_q1.jpeg do test_forma_q99.jpeg, a WebP od test_forma_q1.webp do test_forma_q99.webp.

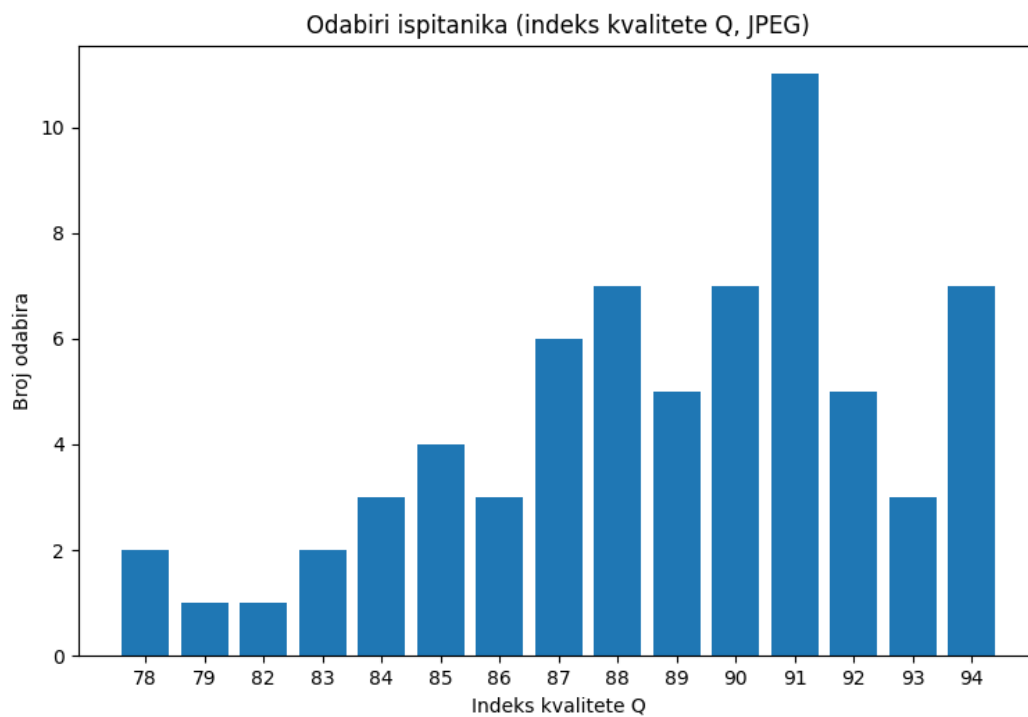
Ispitanici su u kontroliranom okruženju pregledavali izrađene varijante i odabrali prvu varijantu za koju smatraju da je visoke kvalitete prikaza. Parametri istraživanja su jednaki prethodnome. Stupanj kompresije odabrane varijante je evidentiran. Odabiri ispitanika prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Odabiri ispitanika u istraživanju vezanom za odabir prvog stupnja kompresije koji daje visoku kvalitetu prikaza testne forme

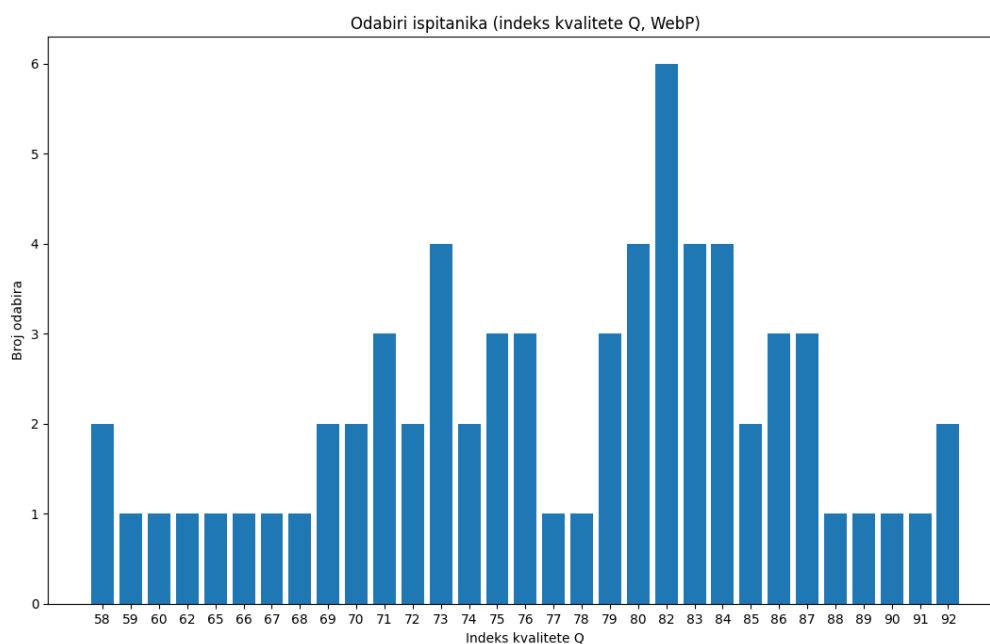
R. br.	JPEG	WEBP
	Stupanj kompresije (izraženo kao indeks kvalitete – Q)	
	Q	
1	82	59
2	90	84
3	93	86
4	85	65
5	79	60
6	87	72
7	83	71
8	89	74
9	87	69
10	94	88
11	88	80
12	88	76
13	87	74
14	88	85
15	94	89
16	85	68
17	78	71
18	92	83
19	91	82
20	93	87
21	90	82
22	91	73
23	94	92
24	88	80
25	91	86
26	92	84
27	88	79
28	92	84
29	90	79

30	87	82
31	89	75
32	93	87
33	89	82
34	92	80
35	89	80
36	91	83
37	87	77
38	94	90
39	78	67
40	91	73
41	90	76
42	84	62
43	90	82
44	86	73
45	91	83
46	89	92
47	85	69
48	91	85
49	94	87
50	84	70
51	83	58
52	90	79
53	91	75
54	90	84
55	94	83
56	88	86
57	92	78
58	94	91
59	91	76
60	86	66
61	91	71
62	85	73
63	84	58

64	87	70
65	86	72
66	91	82
67	88	75



Slika 29. Odabiri ispitanika vrijednosti indeksa kvalitete Q za JPEG



Slika 30. Odabiri ispitanika vrijednosti indeksa kvalitete Q za WebP

Na temelju prikupljenih odabira ispitanika definirana je dominantna vrijednost, odnosno MOD (mode) podataka. Prema zabilježenim odabirima, za JPEG format slika dominantna vrijednost indeksa kvalitete Q je 91 (slika 29). Za WebP format slika, dominantna vrijednost indeksa kvalitete Q je 82 (slika 30). Rezultati pokazuju da je nakon redukcije rezolucije sliku moguće dodatno optimizirati kompresijom slikovnog zapisa, odnosno primjenom manjeg indeksa kvalitete u postupku procesiranja ulaznih slika. Pri tome, dojam o kvaliteti neće se promijeniti – ispitanici su odabrali slike za koje smatraju da su visoke kvalitete prikaza. Također, u smislu percepcije kvalitete slike, WebP pokazuje značajno bolju učinkovitost u odnosu na JPEG format zapisa. To se ogleda u činjenici da prema odabiru ispitanika WebP format pri 9,81% manjem indeksu kvalitete daje sliku usporedive kvalitete JPEG formatu zapisa. Prethodno, u fazi istraživanja rezolucije utvrdili smo kako je u svim slučajevima WebP varijanta manje veličine datoteke (engl. *filesize*) u odnosu na JPEG varijantu testne forme, i to u prosjeku za 37,34%. Sada je zanimljivo utvrditi kako se veličina datoteka mijenja ovisno o primjeni indeksa kvalitete te što u tom kontekstu donosi ova dodatna optimizacija kompresijom slikovnog zapisa. Kako bismo ispitali veličine slikovnih datoteka i utvrdili razlike, modificirana je prethodno izrađena PHP skripta koja čita veličine izrađenih JPEG i WebP varijanti te izračunava razliku izraženu u postocima. Slijedi izvorni kod navedene skripte.

```

<?php
$dir_jpeg = "kompresija/jpeg";
$dir_webp = "kompresija/webp";

echo 'Filename; JPEG filesize (KB); WebP filesize (KB); Difference
(%)'.PHP_EOL;

for($i=1;$i<=99;$i++) {

    $img = array();
    $img[0] = "test_forma_q{$i}";
    $file = $dir_jpeg.'/'.$img[0].'.jpeg';
    $img[1] = getFileSizeInKB($file);
    $file = $dir_webp.'/'.$img[0].'.webp';
    $img[2] = getFileSizeInKB($file);

    $abs_diff = abs($img[1] - $img[2]);
    $percent_diff = round(($abs_diff / $img[1]) * 100, 2);

    $img[1] = $img[1];
    $img[2] = $img[2];
    $img[3] = $percent_diff;

    echo implode(";", $img).PHP_EOL;
}

function getFileSizeInKB($file) {
    if (file_exists($file)) {
        $filesize_in_bytes = filesize($file);
        $filesize_in_kb = $filesize_in_bytes / 1024;
        return round($filesize_in_kb, 2);
    } else {
        die("File not found!");
    }
}
?>

```

Kod 6. Modificirana PHP skripta za usporedbu veličine datoteka JPEG i WebP varijanti testne forme dobivenih u fazi istraživanja vezanom za kompresiju slikovnog zapisa, `compare_filesize_of_compressed_img.php`

Slijedi tablični pregled veličina analiziranih slikovnih datoteka (engl. *filesize*) i razlike izražene u postocima u tablici 7.

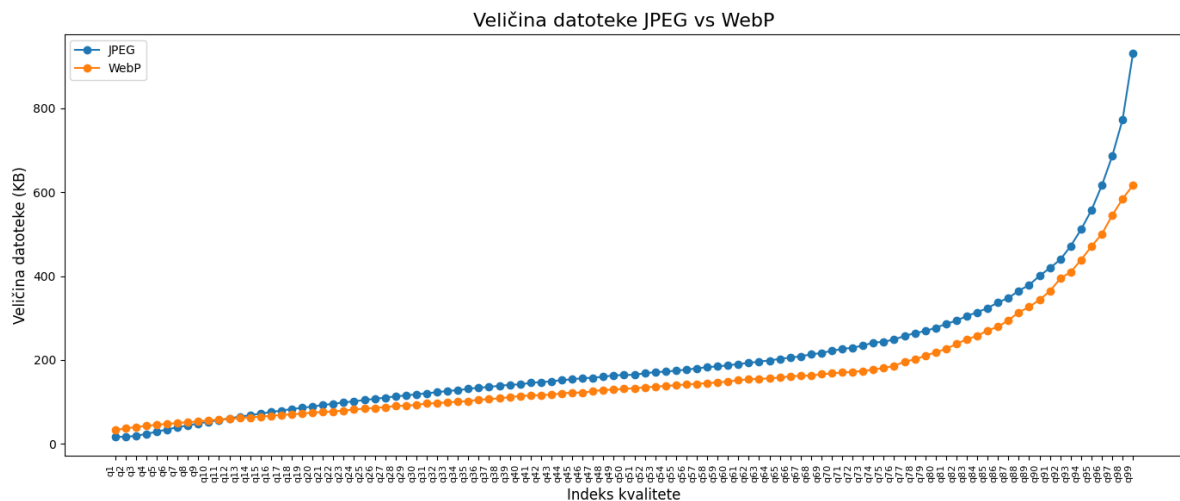
*Tablica 7. Veličine analiziranih JPEG i WebP slikovnih datoteka (engl. *filesize*) u fazi istraživanja utjecaja kompresije i razlike izražene u postocima*

		JPEG	WebP	
R. br.	Naziv datoteke	Veličina datoteke (KB)		Razlika (%)
1	test_forma_q1	16,57	32,75	97,65
2	test_forma_q2	16,58	36,6	120,75

3	test_forma_q3	18,77	40,02	113,21
4	test_forma_q4	23,57	42,57	80,61
5	test_forma_q5	28,75	45,34	57,7
6	test_forma_q6	34,07	47,3	38,83
7	test_forma_q7	39,37	49,43	25,55
8	test_forma_q8	43,85	51,38	17,17
9	test_forma_q9	48,26	53,37	10,59
10	test_forma_q10	52,58	55,85	6,22
11	test_forma_q11	56,66	57,63	1,71
12	test_forma_q12	60,47	59,22	2,07
13	test_forma_q13	64,58	61,31	5,06
14	test_forma_q14	68,13	63	7,53
15	test_forma_q15	71,97	64,54	10,32
16	test_forma_q16	75,64	66,66	11,87
17	test_forma_q17	79,19	68,49	13,51
18	test_forma_q18	82,74	70,4	14,91
19	test_forma_q19	85,73	71,75	16,31
20	test_forma_q20	88,81	74,59	16,01
21	test_forma_q21	92,38	75,55	18,22
22	test_forma_q22	95,37	77,29	18,96
23	test_forma_q23	98,42	79,09	19,64
24	test_forma_q24	101,43	81,68	19,47
25	test_forma_q25	104,19	83,71	19,66
26	test_forma_q26	107,15	85,53	20,18
27	test_forma_q27	110,02	87,51	20,46
28	test_forma_q28	113,09	89,97	20,44
29	test_forma_q29	115,31	91,07	21,02
30	test_forma_q30	117,98	92,77	21,37
31	test_forma_q31	120,44	95,96	20,33
32	test_forma_q32	122,91	96,78	21,26
33	test_forma_q33	125,93	98,73	21,6
34	test_forma_q34	127,77	100,19	21,59
35	test_forma_q35	131,05	101,96	22,2
36	test_forma_q36	133,78	104,9	21,59

37	test_forma_q37	135,33	106,52	21,29
38	test_forma_q38	138,44	108,41	21,69
39	test_forma_q39	140,46	111,2	20,83
40	test_forma_q40	141,68	113,96	19,57
41	test_forma_q41	145,25	114,98	20,84
42	test_forma_q42	147,08	116,06	21,09
43	test_forma_q43	148,77	117,3	21,15
44	test_forma_q44	151,94	120,28	20,84
45	test_forma_q45	153,63	121,92	20,64
46	test_forma_q46	156,39	122,11	21,92
47	test_forma_q47	157,54	125,18	20,54
48	test_forma_q48	159,77	128,32	19,68
49	test_forma_q49	163,22	129,16	20,87
50	test_forma_q50	163,84	131,05	20,01
51	test_forma_q51	164,61	132,38	19,58
52	test_forma_q52	168,19	134,82	19,84
53	test_forma_q53	170,73	135,95	20,37
54	test_forma_q54	172,14	138,09	19,78
55	test_forma_q55	174,27	139,51	19,95
56	test_forma_q56	176,86	141,41	20,04
57	test_forma_q57	179,74	143,09	20,39
58	test_forma_q58	182,73	144,37	20,99
59	test_forma_q59	184,65	146,35	20,74
60	test_forma_q60	186,88	148,23	20,68
61	test_forma_q61	190,32	151,87	20,2
62	test_forma_q62	192,51	153,73	20,14
63	test_forma_q63	196,25	154,88	21,08
64	test_forma_q64	198,55	155,73	21,57
65	test_forma_q65	202,5	157,8	22,07
66	test_forma_q66	205,5	161,08	21,62
67	test_forma_q67	208,74	161,83	22,47
68	test_forma_q68	213,06	162,73	23,62
69	test_forma_q69	216,62	165,91	23,41
70	test_forma_q70	221,62	167,86	24,26

71	test_forma_q71	226	169,91	24,82
72	test_forma_q72	229,21	171,78	25,06
73	test_forma_q73	234,25	173,62	25,88
74	test_forma_q74	241,35	176,95	26,68
75	test_forma_q75	243,16	180,9	25,6
76	test_forma_q76	248,77	185,55	25,41
77	test_forma_q77	256,96	195,86	23,78
78	test_forma_q78	263,78	201,09	23,77
79	test_forma_q79	268,92	210,02	21,9
80	test_forma_q80	276,41	218,16	21,07
81	test_forma_q81	285,83	225,97	20,94
82	test_forma_q82	293,73	238,18	18,91
83	test_forma_q83	304,63	249,38	18,14
84	test_forma_q84	313,71	257,26	17,99
85	test_forma_q85	323,41	270,36	16,4
86	test_forma_q86	337,25	278,89	17,3
87	test_forma_q87	347,56	294,58	15,24
88	test_forma_q88	364,91	313,49	14,09
89	test_forma_q89	378,59	326,16	13,85
90	test_forma_q90	400,53	343,44	14,25
91	test_forma_q91	419,1	363,95	13,16
92	test_forma_q92	439,2	394,19	10,25
93	test_forma_q93	471,49	409,39	13,17
94	test_forma_q94	511,14	438,49	14,21
95	test_forma_q95	556,91	470,67	15,49
96	test_forma_q96	616,09	500,11	18,83
97	test_forma_q97	686,06	544,62	20,62
98	test_forma_q98	773,35	584,33	24,44
99	test_forma_q99	931,13	616,45	33,8



Slika 31. Odnosi veličina datoteka JPEG i WebP kod ispitivanja indeksa kvalitete Q

Zanimljivo, pri vrlo niskim indeksima kvalitete, odnosno pri najvećoj kompresiji WebP datoteke su veće od JPEG datoteka, što se može vidjeti na slici 31. U slučaju Q2 čak 120,75%. Međutim, razlika se progresivno smanjuje do Q12 i potom JPEG datoteke postaju veće. Od Q12 do Q99 WebP datoteke su u prosjeku 19,48% manje u odnosu na JPEG datoteke. Na odabranim indeksima kvalitete, WebP datoteka (Q82, 238,18 KB) je 34,56% manja od JPEG datoteke (Q91, 363,95 KB). Dakle, WebP format zapisa daje sliku vizualno usporedive visoke kvalitete uz značajno reduciriranu veličinu datoteke od 34,56%. U odnosu na podatke u tablici 2, dodatna optimizacija kompresijom zapisa smanjila je 1440x960px JPEG datoteku (931,13 KB > 363,95 KB) za 60,91%, a WebP (616,45 KB > 238,18 KB) za 61,36%. Zanimljivo, komprimirana 1440x960px WebP datoteka (Q82, 238,18 KB) je 74,42% manja od nekomprimirane 1440x960px JPEG datoteke (931,13 KB), a percepcija vizualne kvalitete slike ostala je visoka.

I u ovom slučaju zanima nas degradacija odabranih boja uslijed primjene odabranog stupnja kompresije slikovnog zapisa. To će se provjeriti mjerenjem RGB vrijednosti obojanih polja na odabranim varijantama testne forme: JPEG Q91 i WebP Q82. U tu svrhu također je korištena Firefox ekstenzija ColorZilla 3.3. Vrijednosti su izmjerene u središtu obojanih polja, unutar okvira 25x25px. Slijede izmjerene veličine u tablicama 8 i 9.

Tablica 8. Izmjerene RGB vrijednosti obojanih polja na odabranoj varijanti testne forme JPEG Q91

Polje	Referentno	JPEG Q91	ΔE
R - Crveno	rgb(255, 0, 0)	rgb(254, 0, 0)	0,3731
G - Zeleno	rgb(0, 255, 0)	rgb(0, 255, 1)	0,0766
B - Plavo	rgb(0, 0, 255)	rgb(0, 0, 254)	0,4232
Bijelo	rgb(255, 255, 255)	rgb(255, 255, 255)	0
C - Cijan	rgb(0, 255, 255)	rgb(0, 255, 255)	0
M - Magenta	rgb(255, 0, 255)	rgb(255, 0, 254)	0,4857
Y - Žuto	rgb(255, 255, 0)	rgb(255, 255, 0)	0
K - Crno	rgb(0, 0, 0)	rgb(0, 0, 0)	0

Tablica 9. Izmjerene RGB vrijednosti obojanih polja na odabranoj varijanti testne forme WebP Q82

Polje	Referentno	WebP Q82	ΔE
R - Crveno	rgb(255, 0, 0)	rgb(255, 1, 0)	0,0727
G - Zeleno	rgb(0, 255, 0)	rgb(0, 255, 1)	0,0766
B - Plavo	rgb(0, 0, 255)	rgb(0, 0, 255)	0
Bijelo	rgb(255, 255, 255)	rgb(255, 255, 255)	0
C - Cijan	rgb(0, 255, 255)	rgb(1, 255, 255)	0,0202
M - Magenta	rgb(255, 0, 255)	rgb(255, 1, 255)	0,0681
Y - Žuto	rgb(255, 255, 0)	rgb(255, 255, 0)	0
K - Crno	rgb(0, 0, 0)	rgb(0, 0, 0)	0

Iz priloženog može se zaključiti da na odabranim varijantama testne forme JPEG Q91 i WebP Q82 nije došlo do primjetne degradacije razmatranih boja (najveći ΔE je 0,4857), u oba primijenjena formata zapisa slike. Također, zanimljivo je da je prosječni ΔE odabranih boja WebP varijante (0,169825) 82,51% manji od prosječnog ΔE boja JPEG varijante (0,0297). Iz navedenog može se zaključiti da odabrane varijante testne forme JPEG Q91 i WebP Q82 zadovoljavaju visoke kriterije reprodukcije boja u razmatranom kontekstu.

Može se zaključiti da optimizacija grafičkog zapisa prvo redukcijom rezolucije, a potom aplikacijom odabranog stupnja kompresije daje JPEG i WebP datoteke koje su svojim

kvalitativnim i kvantitativnim karakteristikama primjerene za korištenje u web okruženju, što je potvrđeno ovim istraživanjem. Posebno se ističe WebP Q82 varijanta rezolucije 1440x960px koja među razmatranim alternativama daje najbolji omjer percipirane kvalitete i veličine slikovne datoteke.

Završni korak istraživanja vezan je za ispitivanje otisnutih varijanti testne forme. Cilj ovog koraka je utvrditi mogu li se prethodno odabrane varijante, odnosno pripadajuće postavke koristiti u pripremi slika za ispis.

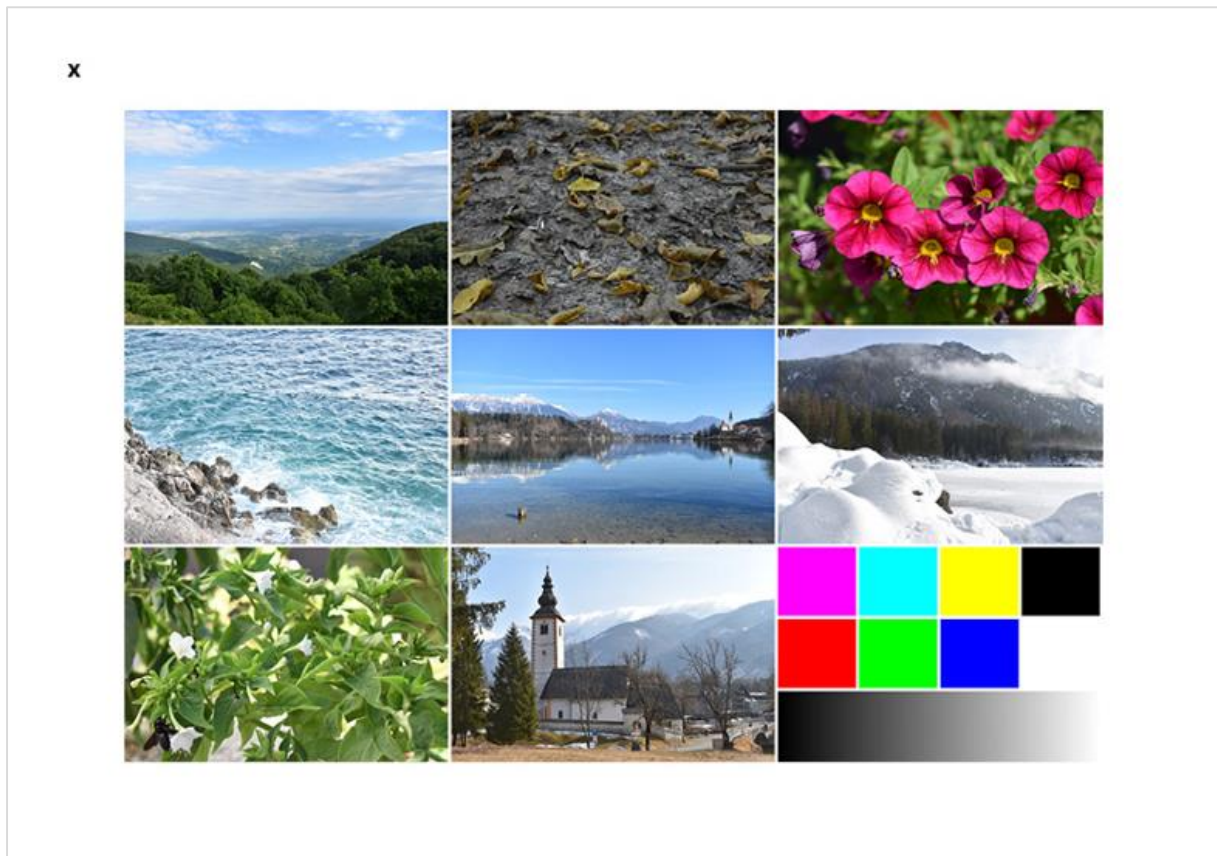
Konkretno, namjera je utvrditi jesu li otisnute varijante testne forme JPEG Q91 i WebP Q82 rezolucije 1440x960px vizualno kvalitativno usporedive s neoptimiziranim JPEG i WebP varijantama (JPEG 6000x4000px Q99 i WebP 6000x4000px Q99) te djelomično optimiziranim (samo reducirana rezolucija uz maksimalni indeks kvalitete) - JPEG 1440x960px Q99 i WebP 1440x960px Q99. Osim navedenih, kao kontrolni mehanizam u istraživanje su uvrštene četiri slike niže kvalitete prikaza (zamućene i s vidljivim artefaktima kompresije): JPEG 600x400px Q99, WebP 600x400px Q99, JPEG 1440x960px Q20 i WebP 1440x960px Q20.

Istraživanje je koncipirano tako da ispitanici pregledavaju ispisane slike nasumičnim redoslijedom i kvalitetu ocjenjuju ocjenom od 1 (loša) do 5 (izvrsna). Identično kao u istraživanju vezanom za prikaz slike na zaslonu monitora, format slika je 24x16cm i centrirane su na standardnom A4 papiru. Rezolucija ispisa je 600dpi. U svrhu jednostavnog vođenja evidencije odabranih slika, svaki list je označen nasumičnim slovom, kako slijedi:

- JPEG 600x400px Q99, kod: J
- WebP 600x400px Q99, kod: G
- JPEG 1440x960px Q20, kod: W
- WebP 1440x960px Q20, kod: X
- JPEG 1440x960px Q91, kod: T
- WebP 1440x960px Q82, kod: K
- JPEG 1440x960px Q99, kod: B
- WebP 1440x960px Q99, kod: M
- JPEG 6000x4000px Q99, kod: P
- WebP 6000x4000px Q99, kod: E

Slike su pripremljene za ispis pomoću programa Adobe InDesign. Na položenom listu formata A4 izrađen je okvir dimenzija 24x16cm te je u gornjem lijevom kutu izrađeno mjesto za

upis koda slike. Prethodno navedene slike su potom pojedinačno umetnute u okvir, upisan je pripadajući kod i datoteka je eksportirana u PDF formatu. Pri eksportu odabran je *preset High Quality Print*, pod stavkom *Compression* isključene su sve dodatne kompresije kako se kvaliteta slike ne bi dodatno degradirala, a pod stavkom *Output > Color* postavljena je opcija *No Color Conversion*. Na sljedećoj slici 32 može se vidjeti primjer izrađenog PDF dokumenta.



Slika 32. Primjer izrađenog PDF dokumenta s ugrađenom varijantom testne forme

Ispitanici su u kontroliranim uvjetima pregledavali ispisane slike nasumičnim redoslijedom i kvalitetu ocijenili ocjenom od 1 (loša) do 5 (izvrсна). Ocjene su prikazane u tablici 10.

Tablica 10. Ocjene kvalitete koje su ispitanici dodijelili ispisanim slikama.

R. br.	Ocjene									
	J	G	W	X	T	K	B	M	P	E
1	1	2	3	2	4	3	5	3	4	4
2	1	1	3	4	4	4	5	5	3	5
3	1	1	2	2	3	3	4	5	4	5

4	1	1	2	3	2	3	4	5	3	4
5	3	2	2	2	4	4	5	4	5	5
6	1	2	3	3	4	4	3	4	5	4
7	2	2	3	3	4	4	5	4	5	5
8	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4
9	1	1	2	2	4	4	3	3	5	4
10	3	2	3	3	4	4	5	4	4	5
11	1	1	2	2	3	3	4	4	3	5
12	1	2	2	4	3	4	5	3	5	5
13	1	1	1	2	4	3	2	4	3	3
14	1	1	4	3	4	4	4	3	5	5
15	1	2	4	3	3	3	4	4	5	4
16	2	1	3	2	4	3	5	3	2	4
17	2	1	3	2	3	3	4	4	5	3
18	1	1	1	1	3	2	3	3	4	3
19	1	1	3	3	2	3	5	3	2	4
20	2	1	3	3	4	3	4	4	4	3
21	1	1	2	2	3	3	5	4	5	5
22	1	1	3	3	4	4	5	3	4	5
23	2	1	2	4	4	4	4	3	5	4
24	2	1	3	2	3	3	5	4	4	4
25	1	1	2	2	4	4	5	4	5	5
26	1	2	3	2	4	3	2	4	5	4
27	2	2	3	4	4	4	5	5	5	4
28	2	2	3	3	4	3	3	3	5	5
29	1	1	2	3	4	3	4	3	5	5
30	1	1	3	3	4	3	2	4	4	4
31	1	1	1	3	2	4	4	3	4	5
32	2	2	3	2	4	5	4	5	5	4
33	1	1	2	3	3	4	3	3	4	5
34	1	1	2	2	4	4	4	3	5	3
35	1	1	3	3	5	4	5	4	4	5
36	1	2	3	3	4	3	3	3	4	5
37	2	1	2	3	4	4	3	3	5	5

38	1	1	3	2	4	4	4	4	5	5
39	1	1	4	3	4	4	3	3	5	4
40	1	1	2	3	3	3	4	3	5	3
41	2	1	3	2	3	3	4	5	4	5
42	1	1	2	2	4	3	4	4	4	4
43	1	1	1	4	3	3	4	5	3	5
44	1	1	2	3	4	5	3	5	3	4
45	1	2	1	3	2	3	2	4	5	5
46	1	1	2	2	4	4	4	4	4	4
47	1	1	1	2	4	4	3	3	5	4
48	1	1	3	2	2	3	3	4	5	3
49	1	1	3	4	5	5	5	4	4	5
50	1	1	3	3	3	4	3	2	5	3
51	1	1	3	2	4	4	4	4	5	5
52	1	1	3	4	4	3	5	3	4	4
53	1	1	4	2	4	4	4	3	4	5
54	1	1	3	4	3	4	4	3	5	5
55	2	2	3	3	5	4	4	4	5	5
56	1	1	1	2	3	4	2	4	5	5
57	1	1	2	3	4	4	4	4	5	5
58	1	1	2	3	4	4	4	4	5	5
59	1	1	1	2	2	4	3	5	5	4
60	1	1	1	2	3	3	3	3	5	5
61	1	1	1	2	2	3	2	3	4	4
62	1	1	4	4	2	3	3	3	2	5
63	1	1	2	3	5	3	4	3	5	4
64	1	2	2	2	3	4	4	3	3	5
65	1	1	1	2	4	3	2	3	5	4

Na temelju ocjena ispitanika izračunate su prosječne ocjene za svaku ispisanu sliku, kako slijedi u tablici 11.

Tablica 11. Prosječne ocjene kvalitete ispisanih slika

R. br.	Naziv slike / kod	Prosječna ocjena
1	JPEG 600x400px Q99, kod: J	1,246153846
2	WebP 600x400px Q99, kod: G	1,230769231
3	JPEG 1440x960px Q20, kod: W	2,4
4	WebP 1440x960px Q20, kod: X	2,676923077
5	JPEG 1440x960px Q91, kod: T	3,538461538
6	WebP 1440x960px Q82, kod: K	3,569230769
7	JPEG 1440x960px Q99, kod: B	3,8
8	WebP 1440x960px Q99, kod: M	3,676923077
9	JPEG 6000x4000px Q99, kod: P	4,338461538
10	WebP 6000x4000px Q99, kod: E	4,384615385

Prikazane prosječne ocjene su zaokružene na dvije decimale i potom su dobivene opisne ocjene za svaku sliku prema sljedećoj skali:

- < 2: Nedovoljan (1)
- 2,01 – 2,5: Dovoljan (2)
- 2,51 – 3,5: Dobar (3)
- 3,51 – 4,5: Vrlo dobar (4)
- > 4,51: Izvrstan (5)

Slijedi prikaz opisnih ocjena u tablici 12.

Tablica 12. Opisne ocjene kvalitete ispisanih slika

R. br.	Naziv slike / kod	Prosječna ocjena	Opisna ocjena
1	JPEG 600x400px Q99, kod: J	1,25	Nedovoljan (1)
2	WebP 600x400px Q99, kod: G	1,23	Nedovoljan (1)
3	JPEG 1440x960px Q20, kod: W	2,4	Dovoljan (2)
4	WebP 1440x960px Q20, kod: X	2,68	Dobar (3)
5	JPEG 1440x960px Q91, kod: T	3,54	Vrlo dobar (4)
6	WebP 1440x960px Q82, kod: K	3,57	Vrlo dobar (4)
7	JPEG 1440x960px Q99, kod: B	3,8	Vrlo dobar (4)

8	WebP 1440x960px Q99, kod: M	3,68	Vrlo dobar (4)
9	JPEG 6000x4000px Q99, kod: P	4,34	Vrlo dobar (4)
10	WebP 6000x4000px Q99, kod: E	4,38	Vrlo dobar (4)

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da rezolucija ima najznačajniji utjecaj na percepciju kvalitete ispisane slike. Slike najmanje rezolucije uvrštene u istraživanje (600x400px) ocijenjene su najnižim prosječnim ocjenama, odnosno opisna ocjena im je nedovoljan (1) bez obzira što je pri njihovoj izradi korišten najviši indeks kvalitete Q99/100. Također, slike najveće rezolucije (6000x4000px) ocijenjene su najvišim prosječnim ocjenama (4,34 i 4,38). Pri njihovoj izradi također je korišten najviši indeks kvalitete Q99/100. Zanimljivo, iako su to najkvalitetnije slike uvrštene u ovo istraživanje, ispitanici su ih ocijenili ocjenom vrlo dobar (4). Slike rezolucije 1440x960px su od najvećeg značaja u ovom istraživanju. Q20 varijante su ocijenjene najlošije, ocjenama dovoljan (2) i dobar (3). Q99 varijante su ocijenjene najvišim prosječnim ocjenama.

Zanimljivo, optimizirane varijante (JPEG 1440x960px Q91 i WebP 1440x960px Q82) ocijenjene su jednakom opisnom ocjenom vrlo dobar (4) kao Q99 varijante i najkvalitetnije slike uvrštene u istraživanje (JPEG 6000x4000px Q99 i WebP 6000x4000px Q99), što ukazuje da provedene optimizacije ne utječu značajno na percepciju kvalitete ispisane slike. Odnosno, optimizacija provedena u smislu prikaza slike na ekranu primjenjiva je i u kontekstu pripreme slika za ispis.

U ovom slučaju zanima nas degradacija odabranih boja uslijed reprodukcije slika na papiru, odnosno prilikom ispisa. To je provjereno mjerenjem CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanim varijantama. U tu svrhu korišten je spektrometar X-Rite i1Publish Pro 2 te i1Profile softver. Korišten izvor svjetlosti prilikom mjerenja je D65 - 6504K (standardizirana dnevna svjetlost), a kut mjerenja je 2°. Slijede izmjerene vrijednosti.

Tablica 13. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanoj varijanti testne forme JPEG 600x400px Q99, kod: J

Polje	Referentno			JPEG 600x400px Q99, kod: J			ΔE
	L	a	b	L	a	b	
R - Crveno	53,24	80,09	67,2	43,3	59	43,1	33,5321
G - Zeleno	87,73	-86,18	83,18	61,1	-40,5	51,1	61,8461

B - Plavo	32,3	79,19	-107,86	30	13,8	-42,3	92,6243
W - Bijelo	100	0	0	93,8	2,4	-9,2	11,3508
C - Cijan	91,11	-48,09	-14,13	70,8	-18,3	-24,4	37,4888
M - Magenta	60,32	98,23	-60,8	45	44,2	-21,8	68,3736
Y - Žuto	97,14	-21,55	94,48	85,1	-11,9	83	19,2321
K - Crno	0	0	0	15,9	0,7	-1,4	15,9769
Prosječni ΔE:							42,5531

Tablica 14. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanjoj varijanti testne forme WebP 600x400px Q99, kod: G

Polje	Referentno			WebP 600x400px Q99, kod: G			ΔE
	L	a	b	L	a	b	
R - Crveno	53,24	80,09	67,2	43,6	61,1	46,1	29,9793
G - Zeleno	87,73	-86,18	83,18	60,8	-41,3	51,6	61,1288
B - Plavo	32,3	79,19	-107,86	28,7	15,3	-43,2	90,9715
W - Bijelo	100	0	0	93,8	2,4	-9,1	11,2699
C - Cijan	91,11	-48,09	-14,13	70,2	-19	-26,5	37,9008
M - Magenta	60,32	98,23	-60,8	43,8	45,1	-22,1	67,7746
Y - Žuto	97,14	-21,55	94,48	80,5	-11,8	87,3	20,5792
K - Crno	0	0	0	10,8	0,6	-1,2	10,883
Prosječni ΔE:							41,3109

Tablica 15. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanjoj varijanti testne forme JPEG 1440x960px Q20, kod: W

Polje	Referentno			JPEG 1440x960px Q20, kod: W			ΔE
	L	a	b	L	a	b	
R - Crveno	53,24	80,09	67,2	43,6	61,7	45,7	29,8893
G - Zeleno	87,73	-86,18	83,18	61,5	-41,6	51,4	60,7071
B - Plavo	32,3	79,19	-107,86	29,7	14,1	-43	91,9254
W - Bijelo	100	0	0	93,9	2,4	-8,5	10,7341
C - Cijan	91,11	-48,09	-14,13	70,5	-18,7	-26,5	37,9679
M - Magenta	60,32	98,23	-60,8	44,1	45	-21,5	68,125

Y - Žuto	97,14	-21,55	94,48	87,2	-11,6	86,7	16,0728
K - Crno	0	0	0	14,7	0,7	-1,4	14,7831
Prosječni ΔE:							41,2756

Tablica 16. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanjoj varijanti testne forme WebP 1440x960px Q20, kod: X

Polje	Referentno			WebP 1440x960px Q20, kod: X			ΔE
	L	a	b	L	a	b	
R - Crveno	53,24	80,09	67,2	42,9	60,4	45,3	31,2125
G - Zeleno	87,73	-86,18	83,18	61,1	-40,7	50,3	62,1183
B - Plavo	32,3	79,19	-107,86	29	15,8	-44,4	89,7572
W - Bijelo	100	0	0	93,8	2,5	-8,7	10,9718
C - Cijan	91,11	-48,09	-14,13	70,7	-18,6	-26,4	37,9049
M - Magenta	60,32	98,23	-60,8	43,2	46,2	-22,3	66,9512
Y - Žuto	97,14	-21,55	94,48	87	-11,7	86,2	16,3829
K - Crno	0	0	0	14,1	0,8	-1,6	14,213
Prosječni ΔE:							41,189

Tablica 17. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanjoj varijanti testne forme JPEG 1440x960px Q91, kod: T

Polje	Referentno			JPEG 1440x960px Q91, kod: T			ΔE
	L	a	b	L	a	b	
R - Crveno	53,24	80,09	67,2	43,2	61,9	46	29,6836
G - Zeleno	87,73	-86,18	83,18	61,1	-41	50,8	61,6348
B - Plavo	32,3	79,19	-107,86	28,5	15,4	-43,8	90,4836
W - Bijelo	100	0	0	92,6	2,1	-8,1	11,1705
C - Cijan	91,11	-48,09	-14,13	70,4	-18,7	-26,4	37,9899
M - Magenta	60,32	98,23	-60,8	44,2	45,8	-22,2	67,0725
Y - Žuto	97,14	-21,55	94,48	86,7	-11,7	86,2	16,5703
K - Crno	0	0	0	13,7	1	-1,4	13,8076
Prosječni ΔE:							41,0516

Tablica 18. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanjoj varijanti testne forme WebP 1440x960px Q82, kod: K

Polje	Referentno			WebP 1440x960px Q82, kod: K			ΔE
	L	a	b	L	a	b	
R - Crveno	53,24	80,09	67,2	43,5	60,9	45,1	30,8469
G - Zeleno	87,73	-86,18	83,18	60,5	-41,6	50,1	61,8315
B - Plavo	32,3	79,19	-107,86	28,6	14,9	-44,2	90,551
W - Bijelo	100	0	0	93,8	2,3	-8,8	11,0077
C - Cijan	91,11	-48,09	-14,13	70,8	-18,9	26,3	53,8436
M - Magenta	60,32	98,23	-60,8	44,4	44,7	-21,2	68,4622
Y - Žuto	97,14	-21,55	94,48	87,1	-11,4	87,1	16,0714
K - Crno	0	0	0	14	0,8	-1,2	14,0741
Prosječni ΔE:							43,3361

Tablica 19. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanjoj varijanti testne forme JPEG 1440x960px Q99, kod: B

Polje	Referentno			JPEG 1440x960px Q99, kod: B			ΔE
	L	a	b	L	a	b	
R - Crveno	53,24	80,09	67,2	44,9	64,4	46,4	27,3564
G - Zeleno	87,73	-86,18	83,18	60,3	-40,6	47,3	64,1663
B - Plavo	32,3	79,19	-107,86	29,6	13,8	-41,8	92,9896
W - Bijelo	100	0	0	93,7	2,6	-8,6	10,9731
C - Cijan	91,11	-48,09	-14,13	70,4	-19,4	-26,6	37,5169
M - Magenta	60,32	98,23	-60,8	45,1	45,8	-19,4	68,5165
Y - Žuto	97,14	-21,55	94,48	87,1	-10,7	83,9	18,1786
K - Crno	0	0	0	14,3	1,1	-1,5	14,4205
Prosječni ΔE:							41,7647

Tablica 20. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanjoj varijanti testne forme WebP 1440x960px Q99, kod: M

Polje	Referentno			WebP 1440x960px Q99, kod: M			ΔE
	L	a	b	L	a	b	
R - Crveno	53,24	80,09	67,2	43,8	61,2	45,3	30,4229
G - Zeleno	87,73	-86,18	83,18	61	-41	50,1	62,0485
B - Plavo	32,3	79,19	-107,86	29,5	13,8	-42,7	92,3554
W - Bijelo	100	0	0	93,7	2,5	-9	11,2668
C - Cijan	91,11	-48,09	-14,13	70,4	-19	-26,3	37,7259
M - Magenta	60,32	98,23	-60,8	44,6	44,7	-21,7	68,1277
Y - Žuto	97,14	-21,55	94,48	86,9	-11,9	86,3	16,2755
K - Crno	0	0	0	14,8	0,7	-1,4	14,8825
Prosječni ΔE:							41,6382

Tablica 21. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanjoj varijanti testne forme JPEG 6000x4000px Q99, kod: P

Polje	Referentno			JPEG 6000x4000px Q99, kod: P			ΔE
	L	a	b	L	a	b	
R - Crveno	53,24	80,09	67,2	43,4	61,4	44,7	30,8608
G - Zeleno	87,73	-86,18	83,18	61,1	-40,1	51,7	61,8346
B - Plavo	32,3	79,19	-107,86	29,2	14,8	-43	91,4467
W - Bijelo	100	0	0	90,8	1,8	-7,6	12,0681
C - Cijan	91,11	-48,09	-14,13	70,7	-18,7	-26,5	37,8597
M - Magenta	60,32	98,23	-60,8	44,7	44,5	-21	68,6654
Y - Žuto	97,14	-21,55	94,48	87	-11,8	86,4	16,2225
K - Crno	0	0	0	14,3	0,7	-1,5	14,3955
Prosječni ΔE:							41,6692

Tablica 22. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanjoj varijanti testne forme WebP 6000x4000px Q99, kod: E

Polje	Referentno			WebP 6000x4000px Q99, kod: E			ΔE
	L	a	b	L	a	b	
R - Crveno	53,24	80,09	67,2	44,7	64,9	47,8	26,0773
G - Zeleno	87,73	-86,18	83,18	60,3	-41,3	48,3	63,1129
B - Plavo	32,3	79,19	-107,86	29,2	13,7	-43,2	92,084
W - Bijelo	100	0	0	93,9	2,4	-8,8	10,9731
C - Cijan	91,11	-48,09	-14,13	70	-19,8	-26,9	37,537
M - Magenta	60,32	98,23	-60,8	45,1	45,3	-19,5	68,8398
Y - Žuto	97,14	-21,55	94,48	87	-10,9	84,9	17,5505
K - Crno	0	0	0	14,1	1	-1,3	14,1951
Prosječni ΔE:							41,2962

Prosječni ΔE iznosi 41,7085. Promatrajući iz apsolutne perspektive, to je razlika unesena reprodukcijom boja prilikom ispisa. Najmanji ΔE je 41,0516 (JPEG 1440x960px Q91, kod: T), a najveći 43,3361 (WebP 1440x960px Q82, kod: K). Promatrajući iz relativne perspektive, najveća razlika ΔE na promatranom uzorku je 2,2845, što je primjetno, no ne značajno.

4. RASPRAVA

U prethodno prikazanom eksperimentalnom dijelu rada, prvi dio istraživanja vezan je za pripremu slika za prikaz na zaslonu monitora. U konkretnom slučaju radi se o ekranu laptopa dijagonale 15.6 inča, FHD rezolucije prikaza (1920x1080px). Danas većina korisnika posjeduje laptope takvih karakteristika, odnosno monitore FHD rezolucije pa su te specifikacije uzete kao standard koji se ugradio u provedeno istraživanje. U kontekstu pripreme slika za digitalno okruženje razmatrana su dva formata zapisa slike - JPEG i WebP. JPEG format zapisa slike koristi se već dugi niz godina, a iako postoji niz novijih formata, i dalje se često koristi zbog svoje široke podrške i jednostavnosti korištenja. WebP format, s druge strane, je noviji format koji se razvijao s ciljem poboljšanja učinkovitosti kompresije slika i brzine učitavanja web stranica. Prema dosadašnjim istraživanjima, WebP format je napredniji od JPEG-a u kontekstu mogućnosti (transparencija, animacija...), no i u samoj optimizaciji slikovnog zapisa. To se pokazalo i u ovom istraživanju.

Prvo je ispitan utjecaj rezolucije na percepciju kvalitete slike na zaslonu monitora. Slike su umetnute u okvir dimenzija 24x16cm i tako su prikazane ispitanicima, u web pregledniku Firefox. Prema zabilježenim odabirima, za JPEG format slika dominantna vrijednost (MOD, mode) rezolucije je 1440x960px, dok je za WebP format slika to 1380x920px. Iako u ovom koraku kompresija nije bila predmet razmatranja, pokazalo se da WebP format i pri minimalnoj kompresiji (q=99) pokazuje bolju učinkovitost u odnosu na JPEG format. To se ogleda u činjenici da su ispitanici kao prihvatljivu rezoluciju odabrali manju vrijednost za WebP sliku u usporedbi s JPEG slikom, no također i u veličini slikovne datoteke. U svim slučajevima WebP varijanta je manje veličine datoteke (engl. *filesize*) u odnosu na JPEG varijantu testne forme, i to u prosjeku za 37,34%. Manja veličina slikovne datoteke upućuje na bolju učinkovitost WebP formata. Stoga, WebP format zapisa može se smatrati naprednijim i učinkovitijim grafičkim formatom u odnosu na JPEG, što je u skladu s prethodnim spoznajama o ovoj temi. Osim što je manja veličina datoteke poželjna zbog bržeg prijenosa slike, ona također može biti važna zbog ograničenja prostora za pohranu na uređajima ili web stranicama. Stoga, ako su brzina prijenosa slike i veličina datoteke važni parametri, a kvaliteta slike mora ostati na prihvatljivoj razini, WebP format je prihvatljiva i poželjna alternativa JPEG formatu. Odabrana JPEG varijanta (1440x960px, 931,13 KB) je 91,34% manja od JPEG varijante najveće rezolucije (6000x4000px, 10760,3 KB). Također, odabrana WebP varijanta (1390x920px, 573,43 KB) je 90,64% manja od WebP varijante najveće rezolucije (6000x4000px, 6123,17 KB). Iz

navedenog može se zaključiti da odabrane vrijednosti rezolucija nude dobar balans između kvalitete slike i veličine datoteke slike u razmatranom okruženju. Također, obzirom da su rezolucije 1440x960px i 1390x920px vrlo bliske (razlika je tek u jednoj 60x40px iteraciji), može se odrediti jedinstvena rezolucija koja zadovoljava oba slučaja: 1440x960px. U kontekstu WebP formata, datoteka varijante rezolucije 1440x960px je tek 43,02 KB veća od varijante 1380x920px, odnosno tek 6,98%, što u kontekstu modernih informacijsko-komunikacijskih sustava ne predstavlja značajnije opterećenje resursa.

Zatim je ispitan utjecaj kompresije na percepciju kvalitete slike na zaslonu monitora. Jednako kao u prethodnom koraku, ispitanici su u kontroliranom okruženju pregledavali izrađene varijante testne forme i odabrali prvu varijantu za koju smatraju da je visoke kvalitete prikaza. U ovom slučaju varijante su imale fiksnu rezoluciju 1440x960px, no izrađene su primjenom varijabilnog indeksa kvalitete, od Q1 do Q99/100. Kao najviši indeks kvalitete odabran je Q99, a ne Q100 kako bi se izbjegle anomalije koje se događaju na rubnim slučajevima. Prema zabilježenim odabirima, za JPEG format slika dominantna vrijednost (MOD, mode) indeksa kvalitete Q je 91, a za WebP 82. Rezultati pokazuju da je nakon redukcije rezolucije sliku moguće dodatno optimizirati kompresijom slikovnog zapisa, odnosno primjenom manjeg indeksa kvalitete u postupku procesiranja ulaznih slika. Pri tome, dojam o kvaliteti neće se promijeniti – ispitanici su odabrali slike za koje smatraju da su visoke kvalitete prikaza. Također, u smislu percepcije kvalitete slike, WebP pokazuje značajno bolju učinkovitost u odnosu na JPEG format zapisa. To se ogleda u činjenici da prema odabiru ispitanika WebP format pri 9,81% manjem indeksu kvalitete daje sliku usporedive kvalitete JPEG formatu zapisa. I u ovom koraku je provedeno ispitivanje veličine slikovnih datoteka. Zanimljivo, pri vrlo niskim indeksima kvalitete, odnosno pri najvećoj kompresiji WebP datoteke su veće od JPEG datoteka. U slučaju Q2 čak 120,75%. Međutim, razlika se progresivno smanjuje do Q12 i potom JPEG datoteke postaju veće. Od Q12 do Q99 WebP datoteke su u prosjeku 19,48% manje u odnosu na JPEG datoteke. Na odabranim indeksima kvalitete, WebP datoteka (Q82, 238,18 KB) je 34,56% manja od JPEG datoteke (Q91, 363,95 KB). Dakle, WebP format zapisa daje sliku vizualno usporedive visoke kvalitete uz značajno reduciranu veličinu datoteke od 34,56%. U odnosu na podatke u tablici 2, dodatna optimizacija kompresijom zapisa smanjila je 1440x960px JPEG datoteku (931,13 KB > 363,95 KB) za 60,91%, a WebP (616,45 KB > 238,18 KB) za 61,36%. Zanimljivo, komprimirana 1440x960px WebP datoteka (Q82, 238,18 KB) je 74,42% manja od nekomprimirane 1440x960px JPEG datoteke (931,13 KB), a percepcija vizualne kvalitete slike ostala je visoka.

Uz rezoluciju i kompresiju, boja je također važan parametar grafičke reprodukcije. U razmatranom kontekstu zanima nas degradacija odabranih boja uslijed pretvorbe izvorne testne forme u JPEG i WebP varijante različitih rezolucija, a potom i uslijed primjene različitih indeksa kvalitete. Degradacija boja provjerena je mjerenjem RGB vrijednosti obojanih polja na relevantnim varijantama testne forme. Uslijed pretvorbe iz više u nižu rezoluciju, na odabranoj varijanti testne forme (1440x960px) nije došlo do primjetne degradacije razmatranih boja (najveći ΔE je 0,4857). To se odnosi na oba razmatrana formata zapisa, JPEG i WebP. Također, uslijed primjene nižih indeksa kvalitete (JPEG Q91, WebP Q82) isto nije došlo do primjetne degradacije razmatranih boja (najveći ΔE je 0,4857), u kontekstu oba razmatrana formata zapisa slike. Također, zanimljivo je da je prosječni ΔE odabranih boja WebP varijante (0,169825) 82,51% manji od prosječnog ΔE boja JPEG varijante (0,0297). Iz navedenog može se zaključiti da odabrane varijante testne forme JPEG Q91 i WebP Q82 zadovoljavaju visoke kriterije reprodukcije boja u razmatranom kontekstu. Također, može se zaključiti da optimizacija grafičkog zapisa prvo redukcijom rezolucije, a potom aplikacijom odabranog stupnja kompresije daje JPEG i WebP datoteke koje su svojim kvalitativnim i kvantitativnim karakteristikama primjerene za korištenje u web okruženju, što je potvrđeno ovim istraživanjem. Posebno se ističe WebP Q82 varijanta rezolucije 1440x960px koja među razmatranim alternativama daje najbolji omjer percipirane kvalitete i veličine slikovne datoteke.

Završni korak istraživanja vezan je za ispitivanje otisnutih varijanti testne forme. Cilj ovog koraka bio je utvrditi mogu li se prethodno odabrane varijante, odnosno pripadajuće postavke koristiti u pripremi slika za ispis. Ispitanici su pregledavali ispisane slike nasumičnim redoslijedom i kvalitetu ocijenili ocjenom od 1 (loša) do 5 (izvrsna). Identično kao u istraživanju vezanom za prikaz slike na zaslonu monitora, format slika je 24x16cm i centrirane su na standardnom 80g A4 papiru. Ispisane su uređajem Canon imagePress C265, a rezolucija ispisa bila je 600dpi. Na temelju ocjena ispitanika izračunate su prosječne ocjene za svaku ispisanu sliku. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da rezolucija ima najznačajniji utjecaj na percepciju kvalitete ispisane slike. Slike najmanje rezolucije uvrštene u istraživanje (600x400px) ocijenjene su najnižim prosječnim ocjenama, odnosno opisna ocjena im je nedovoljan (1) bez obzira što je pri njihovoj izradi korišten najviši indeks kvalitete Q99/100. Također, slike najveće rezolucije (6000x4000px) ocijenjene su najvišim prosječnim ocjenama (4,34 i 4,38). Pri njihovoj izradi također je korišten najviši indeks kvalitete Q99/100. Zanimljivo, iako su to najkvalitetnije slike uvrštene u ovo istraživanje, ispitanici su ih ocijenili

ocjenom vrlo dobar (4). Slike rezolucije 1440x960px su najvećeg značaja u ovom istraživanju. Q20 varijante su ocijenjene najlošije, ocjenama dovoljan (2) i dobar (3). Q99 varijante su ocijenjene najvišim prosječnim ocjenama. Zanimljivo, optimizirane varijante (JPEG 1440x960px Q91 i WebP 1440x960px Q82) ocijenjene su jednakom opisnom ocjenom vrlo dobar (4) kao Q99 varijante i najkvalitetnije slike uvrštene u istraživanje (JPEG 6000x4000px Q99 i WebP 6000x4000px Q99), što ukazuje da provedene optimizacije ne utječu značajno na percepciju kvalitete ispisane slike. Odnosno, optimizacija provedena u smislu prikaza slike na ekranu primjenjiva je i u kontekstu pripreme slika za ispis. I u ovom slučaju ispitana je razina degradacije odabranih boja, sada uslijed reprodukcije slika na papiru, odnosno prilikom ispisa. Promatrajući iz apsolutne perspektive, najveća razlika u odnosu na boje prikazane na ekranu unesena reprodukcijom je boja prilikom ispisa, koja prosječno iznosi 41,7085. Promatrajući iz relativne perspektive, najveća razlika ΔE na promatranom uzorku je 2,2845, što je primjetno, no nije značajno.

Konačno, slijedi sažetak najznačajnijih zaključaka, odnosno smjernice za grafičku pripremu slika u razmatranom kontekstu koje proizlaze iz provedenih istraživanja:

- WebP format i pri minimalnoj kompresiji (q=99) pokazuje bolju učinkovitost u odnosu na JPEG format.
- U kontekstu redukcije rezolucije slike, u svim slučajevima WebP varijanta je manje veličine datoteke (engl. *filesize*) u odnosu na JPEG varijantu testne forme iste rezolucije, i to u prosjeku za 37,34%.
- U kontekstu odabranih rezolucija, redukcija rezolucije smanjila je veličinu JPEG i WebP slikovne datoteke u prosjeku za 91% u odnosu na JPEG i WebP slike najveće rezolucije, dok je percepcija kvalitete ostala visoka.
- U kontekstu prikaza slike u okviru dimenzija 24x16cm na zaslonu monitora dijagonale 15.6 inča, FHD rezolucije 1920x1080px, može se definirati jedinstvena rezolucija koja zadovoljava visoke kvalitativne i kvantitativne kriterije u okviru oba razmatrana formata zapisa slike JPEG i WebP. To je rezolucija 1440x960px.
- Dodatna optimizacija kompresijom zapisa smanjila je veličinu JPEG datoteke za 60,91%, a WebP za 61,36%, dok je percepcija kvalitete ostala visoka.
- Uslijed pretvorbe iz više u nižu rezoluciju, na odabranim JPEG i WebP slikama nije došlo do primjetne degradacije razmatranih boja. To se odnosi na oba razmatrana formata zapisa, JPEG i WebP.

- Optimizacija grafičkog zapisa prvo redukcijom rezolucije, a potom aplikacijom odabranog stupnja kompresije daje JPEG i WebP datoteke koje su svojim kvalitativnim i kvantitativnim karakteristikama primjerene za korištenje u web okruženju.
- Posebno se ističe WebP Q82 varijanta rezolucije 1440x960px koja među razmatranim alternativama daje najbolji omjer percipirane kvalitete i veličine slikovne datoteke.
- U kontekstu ispisanih slika, iz dobivenih rezultata može se zaključiti da rezolucija ima najznačajniji utjecaj na percepciju kvalitete ispisane slike. Slike najmanje rezolucije uvrštene u istraživanje ocijenjene su najnižim prosječnim ocjenama, a slike najveće rezolucije najvišim.
- Optimizacija provedena u smislu prikaza slike na ekranu primjenjiva je i u kontekstu pripreme slika za ispis. To se ogleda u činjenici da su optimizirane varijante (JPEG 1440x960px Q91 i WebP 1440x960px Q82) ocijenjene jednakom opisnom ocjenom vrlo dobar (4) kao Q99 varijante i najkvalitetnije slike uvrštene u istraživanje (JPEG 6000x4000px Q99 i WebP 6000x4000px Q99), što ukazuje da provedene optimizacije ne utječu značajno na percepciju kvalitete ispisane slike.
- Degradacija boja uslijed reprodukcije slika na papiru, odnosno prilikom ispisa je značajna i u razmatranom kontekstu prosječni ΔE iznosi 41,7085. No, to je razlika unesena reprodukcijom boja prilikom ispisa i normalno je da se ispisane boje značajno razlikuju u odnosu na boje prikazane na zaslonu monitora. Promatrajući iz relativne perspektive najveća razlika ΔE na promatranom uzorku je 2,2845, što je primjetno, no u mjeri koja bi značajno utjecala na percepciju kvalitete reprodukcije razmatranih JPEG i WebP slika.

5. ZAKLJUČAK

Cilj provedenih istraživanja u ovom radu bio je definirati smjernice za korištenje digitalne slike u sustavima koji generiraju slikovne sadržaje namijenjene reprodukciji u dva različita okruženja, za web stranice i za ispis na papiru. Kako bi se znanstvenom metodom utvrdile činjenice na temelju kojih bi se nedvosmisleno i sveobuhvatno donijeli relevantni zaključci, razvijena je nova eksperimentalna metoda za ispitivanje kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika grafičkih formata na velikom broju uzoraka, koja obuhvaća subjektivne i objektivne pokazatelje reprodukcije slike u razmatranim okruženjima. Metodologija prikazana u eksperimentalnom dijelu rada obuhvaća niz jednostavno ponovljivih koraka koji su potpomognuti razvijenom programskom podrškom u vidu raznih programa čija je namjena automatizacija kompliciranih zadataka. Na taj način je omogućeno da se istraživanje provede na velikom broju slikovnih uzoraka, što značajno doprinosi relevantnosti i točnosti dobivenih rezultata. Također, prikazana metodologija, odnosno eksperimentalna metoda nije striktno vezana samo za razmatrane JPEG i WebP formate, već se može primijeniti i za ispitivanja u kontekstu drugih formata zapisa slike. Univerzalnost i jednostavnost aplikacije prikazanih koraka značajno podiže vrijednost znanstvenog doprinosa razvijene eksperimentalne metode. Time je uspješno ostvaren prvi očekivani znanstveni doprinos D1: Nova eksperimentalna metoda za ispitivanje kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika grafičkih formata na velikom broju uzoraka, koja obuhvaća subjektivne i objektivne pokazatelje reprodukcije slike u razmatranim okruženjima.

Poseban naglasak postavljen je na razmatranje utjecaja rezolucije i kompresije na subjektivni doživljaj kvalitete slike te utjecaj optimizacije na reprodukciju boja i veličinu slikovne datoteke, što je značajna stavka u kontekstu informacijsko-komunikacijskih sustava. Kako bi istraživanje bilo relevantno, odnosno u skladu s modernim standardima u smislu reprodukcije slike u digitalnom okruženju, eksperiment je dizajniran za ekran laptopa dijagonale 15.6 inča, FHD rezolucije prikaza (1920x1080px). Razmatrane varijante slika ispitanicima su prikazane u okviru dimenzija 24x16cm, koji je integriran u HTML dokument i prikazan u web pregledniku Firefox. Obzirom da se u kontekstu web stranice ne mogu vjerno reproducirati jedinice veličine poput cm i mm, već samo pikseli, izrađen je algoritam koji je 24x16cm pretvorio u ekvivalent izražen u pikselima. Na temelju rezolucije prikaza 1920x1080px i dijagonale ekrana 15.6 inča izračunat je DPI, a potom i vrijednosti u pikselima. Po širini to je 1334px, a po visini 889px. Ispitanici su odabrali prvu varijantu koja je po

njihovom mišljenju visoke kvalitete prikaza. Prema zabilježenim odabirima, za JPEG format slika dominantna vrijednost (MOD, mode) rezolucije je 1440x960px, dok je za WebP format slika to 1380x920px. Time je potvrđena prva hipoteza istraživanja H1: U kontekstu prikaza slike na zaslonu monitora, kvaliteta slike će biti percipirana kao visoka kada broj piksela koji čine sliku bude veći od broja piksela koji stanu u okvir unutar kojeg se slika prikazuje. Odnosno, primjerena rezolucija slike je relativna u odnosu na dijagonalu zaslona monitora i rezoluciju prikaza.

U kontekstu odabranih rezolucija, redukcija rezolucije smanjila je veličinu JPEG i WebP slikovne datoteke u prosjeku za 91% u odnosu na JPEG i WebP slike najveće rezolucije. Dodatna optimizacija kompresijom zapisa smanjila je veličinu JPEG datoteke za 60,91%, a WebP za 61,36%. U oba slučaja subjektivna percepcija kvalitete ostala je visoka. Također, na odabranim JPEG i WebP slikama nije došlo do primjetne degradacije razmatranih boja. Time je potvrđena druga hipoteza H2: Moguće je značajno smanjiti veličinu slikovne datoteke kombinirajući optimizaciju redukcijom rezolucije i potom kompresijom, a da subjektivna percepcija kvalitete ostane visoka, te da se boje reproduciraju vjerno originalu.

Optimizacija provedena u smislu prikaza slike na ekranu primjenjiva je i u kontekstu pripreme slika za ispis. To se ogleda u činjenici da su optimizirane varijante (JPEG 1440x960px Q91 i WebP 1440x960px Q82) ocijenjene jednakom opisnom ocjenom vrlo dobar (4) kao Q99 varijante i najkvalitetnije slike uvrštene u istraživanje (JPEG 6000x4000px Q99 i WebP 6000x4000px Q99), što ukazuje da provedene optimizacije ne utječu značajno na percepciju kvalitete ispisane slike. Time je potvrđena i treća hipoteza H3: Optimizacije provedene u kontekstu prikaza slike na zaslonu monitora primjenjive su i u kontekstu pripreme slika za ispis, a da pritom subjektivna percepcija kvalitete ispisane optimizirane i neoptimizirane slike bude približno jednako visoka.

Evaluacijom rezultata istraživanja izvedene su smjernice za grafičku pripremu digitalnih slika u sustavima koji generiraju slikovne sadržaje namijenjene primjeni u dva različita okruženja, digitalnom (web stranica) i za ispis. Time je uspješno ostvaren drugi znanstveni doprinos D2.

U kontekstu modernog multimedijskog okruženja utvrđene su optimalne vrijednosti rezolucije i stupnja kompresije u postupku grafičke pripreme primjenom JPEG i WebP formata zapisa. Za JPEG format to je rezolucija 1440x960px i stupanj kompresije Q91, a za WebP format također rezolucija 1440x960px i stupanj kompresije Q82. Navedene postavke pokazale

su se primjerenima i u kontekstu pripreme slika za ispis, što je potvrđeno ocjenama ispitanika. Time je uspješno ostvaren i treći očekivani znanstveni doprinos D3.

Može se zaključiti da su provedenim istraživanjem potvrđene sve predviđene hipoteze, uspješno su ostvareni svi očekivani znanstveni doprinosi i ostvaren je cilj doktorskog rada, odnosno definirane su smjernice za grafičku pripremu digitalnih slika u razmatranom kontekstu.

6. POPIS LITERATURE

- [1] Costello, V., „Multimedia Foundations: Core Concepts for Digital Design“, 2nd edition, Routledge, 2016.
- [2] Funk, T., „Web 2.0 and Beyond: Understanding the New Online Business Models, Trends and Technologies“, Praeger, 2008.
- [3] Shelly, G. B., Frydenberg, M., „Web 2.0. Concepts and Applications“, 1st edition, Course Technology, 2010.
- [4] Burrows, T., „Blogs, Wikis, MySpace, and more: everything you want to know about using Web 2.0 but are afraid to ask“, Chicago Review Press, 2008.
- [5] Governor, J., Hinchcliffe, D., Nickull, D., „Web 2.0. Architectures“, O'Reilly Media, Inc., 2009.
- [6] Solomon, G., Schrum, L. „Web 2.0: new tools, new schools“, 1st edition, International Society for Technology in Education, 2007.
- [7] Barros, R. H., „Publish in Journals 3.0: From Manuscript to Citations“, Independently published , 2017.
- [8] Liebowitz, J., „A Guide to Publishing for Academics: Inside the Publish or Perish Phenomenon“, 1st edition, Auerbach Publications, 2015.
- [9] McHaney, R., „The New Digital Shoreline: How Web 2.0 and Millennials Are Revolutionizing Higher Education“, Stylus Publishing, LLC, 2011.
- [10] Elkins, D., Pinder, D., „E-Learning Fundamentals: A Practical Guide“, Association for Talent Development , 2015.
- [11] Mrvac, N., Tomiša, M., Milković, M., „Developing a Modern Model of Higher Education“, TTEM - Technics technologies education management, vol. 5, no. 4, pp. 700–709, 2010, [Mrežno]. Dostupno: https://www.academia.edu/87257369/Developing_a_modern_model_of_higher_education?uc-sb-sw=44110028.
- [12] Whittington, J., „PDF Explained: The ISO Standard for Document Exchange“, 1st edition, O'Reilly Media, 2011.

- [13] Kyrnin, J. „Best Practices for Using PDFs on Web Pages“ ,ThoughtCo, 2023., [Mrežno]. Dostupno: <https://www.thoughtco.com/pdf-best-practices-3469170> [Pristup: 14.02.2024.].
- [14] Krug, S., „Don't Make Me Think, Revisited: A Common Sense Approach to Web Usability“, 3rd edition, New Riders, 2013.
- [15] Gothelf, J., Seiden, J. „Lean UX: Applying Lean Principles to Improve User Experience“, 1st edition, O'Reilly Media, 2013.
- [16] Pool, J. H., Walton, J. N., Brewis, E. G., Uldall, P. R., Wright, A. E., Gardner, P. S., „Benign myalgic encephalomyelitis in Newcastle upon Tyne“, *Lancet*, vol. 277, no. 7180, pp. 733–737, 1961., [Mrežno]. Dostupno: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(61\)92892-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(61)92892-6).
- [17] Tomiša, M., Milković, M., „Grafčki dizajn i komunikacija“, Varaždin: Veleučilište u Varaždinu, 2013.
- [18] Greenwald, M. L., Luttrupp, J. C., „Designing for Print Production: Essential Concepts (Graphic Design/Interactive Media“, 1st edition, Course Technology, 2008.
- [19] Krause, J., „Color for Designers: Ninety-five things you need to know when choosing and using colors for layouts and illustrations“, 1st edition, New Riders, 2014.
- [20] Lynch, P. J., Horton, S., „Web Style Guide: Basic Design Principles for Creating Web Sites“, 3rd edition, Yale University Press, 2009.
- [21] „WIRED, Web Graphics for Beginners“, [Mrežno]. Dostupno: <https://www.wired.com/2010/02/web-graphics-for-beginners/> [Pristup: 22.10.2023.].
- [22] Miano, J., „Compressed Image File Formats: JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP“, Addison-Wesley Professional, 1999.
- [23] Milleson, J., „Partial Image Decoding On The GPU For Mobile Web Browsers“, MSc Thesis in Computer Science - algoritams, languages and logic, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2014., [Mrežno]. Dostupno: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/d5d0578e-f3e7-4420-a075-d30e2099535e/content> [Pristup: 13.09.2023.].
- [24] Matijević, M., Mikota, M., Čačić, M., „Utjecaj JPEG-WebP konverzije na

- karakteristike fotografske slike“, Tehnički Vjesnik, vol. 23, no. 2, pp. 505–509, 2016., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.17559/TV-20141208110946>.
- [25] Rhyne, T-M., „Applying Color Theory to Digital Media and Visualization“, CRC Press, 2016.
- [26] „Google Inc. and WebP, An image format for the Web, WebP, Google Developers“, [Mrežno]. Dostupno: <https://developers.google.com/speed/webp/> [Pristup: 12.05.2023.].
- [27] „Google Inc. and WebP, Frequently Asked Questions, WebP, Google Developers“, [Mrežno]. Dostupno: <https://developers.google.com/speed/webp/faq> [Pristup: 12.05.2023.].
- [28] Pintus, M., Ginesu, G., Atzori, L., Giusto, D. D., „Objective Evaluation of WebP Image Compression Efficiency“, Mobile Multimedia Communications, MobiMedia 2011. Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol. 79, pp. 252–265, 2012., [Mrežno]. Dostupno: https://doi.org/10.1007/978-3-642-30419-4_22.
- [29] Zhanjun, S., Shen, K., „Research on WebP image format“, Advanced Graphic Communications, Packaging Technology and Materials., pp. 271–277, 2016., [Mrežno]. Dostupno: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0072-0_35.
- [30] Allen, E., Triantaphillidou, S., „The Manual of Photography“, 10th edition, Focal Press, 2010.
- [31] Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R., „Image Processing, Analysis, and Machine Vision“, 3rd edition, CL Engineering, 2007.
- [32] Gonzalez, R. C., Woods, R. E. „Digital Image Processing“, 2nd edition, Prentice Hall, 2002.
- [33] Annadurai, S., Shanmugalakshmi, R., „Fundamentals of Digital Image Processing“, 1st edition, Pearson India, 2006.
- [34] Gonzalez, R. C., Woods, R. E., „Digital Image Processing“, 4th edition, Pearson India, 2019.
- [35] Pritha, A., Santhi Jeslet, D., „A Study on Sampling and Quantization Techniques of

- Image Processing“, International Journal of Trend in Research and Development (IJTRD), 2015., [Mrežno]. Dostupno: <https://www.ijtrd.com/papers/IJTRD1320.pdf>.
- [36] Jackson, W., „Digital Image Compositing Fundamentals“, 1st edition, Apress, 2015.
- [37] Tyagi, V. „Understanding Digital Image Processing“, 1st edition, CRC Press, 2018.
- [38] Umbaugh, S. E., „Digital Image Processing and Analysis: Human and Computer Vision Applications with CVPTools“, 2nd edition, CRC Press, 2010.
- [39] Sharma, G., Trussell, H. J., „Digital Color Imaging“, IEEE Transactions on Image Process, vol. 6, no. 7, pp. 901–932, 1997., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.1109/83.597268>.
- [40] Kreit, E., Mäthger, M. L., Hanlon, T.R., Dennis, B.P., Naik, R.R, Forsythe, E., Heikenfeld, J., „Biological versus electronic adaptive coloration: How can one inform the other?“, J. R. Soc. Interface, vol. 10, no. 78, 2013., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0601>.
- [41] Artemi, M., Liu, H., „Image Optimization using Improved Gray-Scale Quantization for Content-Based Image Retrieval“, 2020 IEEE 6th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), Beni Mellal, Morocco, pp. 1-6, 2020. [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.1109/ICOA49421.2020.9094507>.
- [42] Huang, T. S., „PCM picture transmission“, IEEE Spectrum, vol. 2, no. 12, pp. 57–63, 1965., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.1109/MSPEC.1965.6501034>.
- [43] Rahkar Farshi, T., „Color image quantization with peak-picking and color space“, Multimedia System, vol. 26, no. 6, pp. 703–714, 2020., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.1007/s00530-020-00682-5>.
- [44] Zhang, A., Gourley, D., „Creating Digital Collections: A Practical Guide“, 1st edition, Chandos Publishing, 2008.
- [45] Li, Ze-N., Drew, S. M., Liu, J., „Fundamentals of Multimedia“, 3rd edition, Springer, 2021.
- [46] Wiggins, R. H., Davidson, H. C., Harnsberger, H. R., Lauman, J. R., Goede, P. A., „Image file formats: past, present, and future“, Radiographics, vol. 21, no. 3, pp. 789-798, 2001. [Mrežno]. Dostupno:

<https://doi.org/10.1148/radiographics.21.3.g01ma25789>.

- [47] Qasim, A. J., Din, R., Alyousuf, F. Q. A., „Review on techniques and file formats of image compression“, *Bulletin of Electrical Engineering Informatics (BEEI)*, vol. 9, no. 2, pp. 602–610, 2020., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.11591/eei.v9i2.2085>.
- [48] McAndrew, A., „A Computational Introduction to Digital Image Processing“, 2nd edition, Chapman and Hall/CRC, 2015.
- [49] „W3Techs World Wide Web Technology Surveys“ [Mrežno]. Dostupno: <https://w3techs.com/technologies/details/im-webp> [Pristup: 11.02.2023.].
- [50] Hudson, G., Léger, A., Niss, B., Sebestyen, I., „JPEG at 25: Still Going Strong“, *IEEE MultiMedia.*, vol. 24, no. 2, pp. 96–103, 2017., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.1109/mmul.2017.38>.
- [51] Poljičak, A. „Zaštita vlasništva reproducirane slike umetanjem digitalnog vodenog žiga“, doktorski rad, Grafički fakultet, Zagreb, 2011.
- [52] Wallace, G. K., „The JPEG Still Picture Compression Standard“, *IEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 38., no. 1, pp. xviii-xxxiv, 1992., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.1109/30.125072>.
- [53] Khayam, S. A., „The Discrete Cosine Transform (DCT): Theory and Application“, Department of Electrical & Computer Engineering, Michigan State University 114.1:31., 2003. [Mrežno]. Dostupno: <http://cs.uccs.edu/~cs525/video/dctKhayam.pdf>.
- [54] Lukac, R., „Perceptual Digital Imaging: Methods and Applications“, 1st edition, CRC Press, 2012.
- [55] Kornblum, J. D., „Using JPEG quantization tables to identify imagery processed by software“, *Digital Investigation*, vol. 5, pp. S21–S25, 2008., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.1016/j.diin.2008.05.004>.
- [56] Presnyakov, S., Boyarshinov, G., Borovskaya, T., Rybkina, A. „Graphic File Formats for Web Virtual Globe“, 31th International Conference on Computer Graphic and Vision, vol. 3027, pp. 580–588, 2021., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.20948/graphicon-2021-3027-580-588>.
- [57] Jakopc, T., Hrkač, Ž., „Use of Image File Format WebP on Websites in Croatian top

- Domains“, 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), pp. 507–512, 2021., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.23919/MIPRO52101.2021.9596819>.
- [58] Wagner, J., „The WebP Manual“, Freiburg, Germany: Smashing Media AG, 2018.
- [59] „WebP image format | Can I use... Support tables for HTML5, CSS3“, [Mrežno]. Dostupno: <https://caniuse.com/webp> [Pristup: 09.01.2023.]
- [60] Tahmid, M., Uddin M. M., „Image Comparison of WebP , JPEG and PNG“, 2013., [Mrežno]. Dostupno: https://www.researchgate.net/publication/355174626_Image_Comparison_of_WebP_JPEG_and_PNG#fullTextFileContent.
- [61] Hu, J., Song, S., Gong, Y., „Comparative performance analysis of web image compression“, 2017 10th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), Shanghai, China, 2017., pp. 1-5, 2018., [Mrežno]. Dostupno:<https://doi.org/10.1109/CISP-BMEI.2017.8301939>.
- [62] „Google for Developers, Compression Techniques, WebP“, [Mrežno]. Dostupno: https://developers.google.com/speed/webp/docs/compression#lossy_webp, [Pristup: 01.06.2023.].
- [63] „Google for Developers, Compression Techniques, WebP“, [Mrežno]. Dostupno: <https://developers.google.com/speed/webp/docs/compression>, [Pristup: 04.06.2023.].
- [64] Wade, N. J., Swanston, M. T., „Visual Perception: An Introduction“, 2nd edition, Psychology Press, 2001.
- [65] Milković, M., Zjakić, I., Vusić, D., „Kolorimetrija u multimedijским komunikacijama“, Veleučilište u Varaždinu, 2001.
- [66] Rhyne, T. M., „Applying Color Theory to Digital Media and Visualization, Boca Raton, USA: CRC Press; 1st edition, 2016.
- [67] Goldstein, E. B., „Sensation and Perception“, 7th edition, Thomson, 2006.
- [68] Judd, D. B., Wyszecki, G., „Color in Business, Science, and Industry“, 3rd edition, New York: Wiley, 1975.
- [69] Fairchild, M. D. „Color Appearance Models“, Wiley; 2nd edition, 2005.

- [70] Kumar, A., Choudhury, R. „Principles of colour and appearance measurement: Object appearance, colour perception and instrumental measurement“, 1st edition, Woodhead Publishing, 2014.
- [71] Abramov, I., Gordon, J., Chan, H. „Color appearance across the retina: effects of a white surround“, *J. Opt. Soc. Am. A.*, vol. 9, no. 2, p.p. 195-202, 1992., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.1364/josaa.9.000195>.
- [72] Hunt, R. W. G., „Revised colour-appearance model for related and unrelated colours“, *Color Research & Application.*, vol. 16, no. 3, pp. 146–165, 1991., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.1002/col.5080160306>.
- [73] Sharma, G., „Digital color handbook“, CRC Press, 1st edition, 2003.
- [74] „YCbCr“ [Mrežno]. Dostupno: <https://en.wikipedia.org/wiki/YCbCr> [Pristup: 11.02.2023.].
- [75] Rabie, T., Kamel, I., „On the embedding limits of the discrete cosine transform“, *Multimedia Tools and Applications*, vol. 75, pp 5939-5957, 2015., [Mrežno]. Dostupno: <https://doi.org/10.1007/s11042-015-2557-x>.
- [76] Karuppanagounder, S., Revathy, T. S., Praveenkumar, S., Thiruvankadam, K., „A study on the effect of truncating the Discrete Cosine Transform (DCT) coefficients for image compression“, *International Journal of Computer Science and Engineering (IJCSSE)*, vol. 7, pp. 23-30, 2018.
- [77] Milković, M., Mrvac, N., Vusić, D., „Vizualna psihofizika i dizajn“, Veleučilište u Varaždinu, 2010.
- [78] „ISO 3664:2009 Graphic technology and photography-Viewing conditions“ [Mrežno]. Dostupno: <https://www.iso.org/standard/43234.html>.
- [79] Vlašić, J., Zjakić, I., Zlatić, S., „Determining of smallest useful font size in product labelling“, *Technical Journal*, vol. 7, no 2, pp. 154-161, 2013. [Mrežno] Dostupno: <https://hrcak.srce.hr/clanak/155341>.

7. PRILOZI

7.1. Popis tablica

Tablica 1. Zahtjevi za pohranu slike u bajtovima s različitim vrijednosnim parametrima N i b	11
Tablica 2. Odabiri ispitanika u istraživanju vezanom za odabir prve rezolucije visoke kvalitete prikaza testne forme	50
Tablica 3. Veličine prikazanih JPEG i WebP slikovnih datoteka (engl. <i>filesize</i>) i razlike izražene u postocima	55
Tablica 4. Izmjerene RGB vrijednosti obojanih polja na odabranoj varijanti testne forme (1440x960px) JPEG formata zapisa.....	59
Tablica 5. Izmjerene RGB vrijednosti obojanih polja na odabranoj varijanti testne forme (1440x960px) WebP formata zapisa	59
Tablica 6. Odabiri ispitanika u istraživanju vezanom za odabir prvog stupnja kompresije koji daje visoku kvalitetu prikaza testne forme	62
Tablica 7. Veličine analiziranih JPEG i WebP slikovnih datoteka (engl. <i>filesize</i>) u fazi istraživanja utjecaja kompresije i razlike izražene u postocima	66
Tablica 8 . Izmjerene RGB vrijednosti obojanih polja na odabranoj varijanti testne forme JPEG Q91	71
Tablica 9. Izmjerene RGB vrijednosti obojanih polja na odabranoj varijanti testne forme WebP Q82	71
Tablica 10. Ocjene kvalitete koje su ispitanici dodijelili ispisanim slikama.	73
Tablica 11. Prosječne ocjene kvalitete ispisanih slika	76
Tablica 12. Opisne ocjene kvalitete ispisanih slika.....	76
Tablica 13. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanjoj varijanti testne forme JPEG 600x400px Q99, kod: J	77

Tablica 14. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanoj varijanti testne forme WebP 600x400px Q99, kod: G	78
Tablica 15. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanoj varijanti testne forme JPEG 1440x960px Q20, kod: W	78
Tablica 16. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanoj varijanti testne forme WebP 1440x960px Q20, kod: X	79
Tablica 17. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanoj varijanti testne forme JPEG 1440x960px Q91, kod: T	79
Tablica 18. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanoj varijanti testne forme WebP 1440x960px Q82, kod: K	80
Tablica 19. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanoj varijanti testne forme JPEG 1440x960px Q99, kod: B	80
Tablica 20. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanoj varijanti testne forme WebP 1440x960px Q99, kod: M.....	81
Tablica 21. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanoj varijanti testne forme JPEG 6000x4000px Q99, kod: P.....	81
Tablica 22. Izmjerene CIELab vrijednosti obojanih polja na ispisanoj varijanti testne forme WebP 6000x4000px Q99, kod: E.....	82

7.2. Popis slika

Slika 1. Prikaz funkcije $f(x, y)$ analogne slike [33].....	5
Slika 2. Proces formiranja digitalne slike.....	7
Slika 3. a) Kontinuirana slika, b) Amplituda intenziteta kontinuirane slike duž segmenta AB, c) Uzorkovanje i kvantizacija, d) Rezultat uzorkovanja i kvantizacije [34]	8
Slika 4. Lijevo kontinuirana slika projicirana na niz senzora, desno rezultat uzorkovanja i kvantizacije slike [34]	9
Slika 5. Prikaz različitih prostornih rezolucija varijacijom broja uzoraka digitalne slike [32]	12
Slika 6. Utjecaj prostorne rezolucije na kvalitetu slike [32]	13
Slika 7. Utjecaj tonske rezolucije na kvalitetu slike [33]	15
Slika 8. Slike različitih količina slikovnih informacija [34]	16
Slika 9. Izopreferencijske krivulje slika različitih količina slikovnih informacija [34].....	16
Slika 10. Slika u boji i njene R, G i B komponente [38].....	17
Slika 11. LUT tabela za indeksirane 8-bitne slike u boji [38].....	18
Slika 12. Transformacija boja iz RGB u YCBCR prostor boja [74].....	25
Slika 13. Standardne JPEG kvantizacijske tablice [55]	28
Slika 14. Lijevo: prikaz 8×8 2D-DCT, horizontalne frekvencije rastu s lijeva na desno, vertikalne frekvencije rastu odozgo prema dolje [75], desno: zig-zag raspored DCT koeficijenata [76].....	29
Slika 15. WebP kompresija s gubitkom podataka [63]	32
Slika 16. Lijevo JPEG (Q75) 136.1 KB, desno WebP (Q67) 94.69 KB [58]	32
Slika 17. Kodiranje predmemorije boja [62].....	34

Slika 18. Spektralna distribucija crvenog (R), plavog (B) i zelenog (G) fotoreceptora u trikromatskoj teoriji [68]	35
Slika 19. Prikaz prijenosa signala čunjićima u zonskoj teoriji viđenja boje [65]	37
Slika 20. Prostorni prikaz vidnog polja [77]	38
Slika 21. Testna forma u obliku kolaža različitih kompleksnih fotografija, boja RGB i CMYK te gradacije sivih nijansi, datoteka test_forma.png	40
Slika 22. Popis datoteka izrađenih varijanti testne forme	42
Slika 23 . Spektrometar X-Rite i1Publish Pro 2.....	43
Slika 24. GretagMacbeth (XRite) Judge II light booth [79]	45
Slika 25. HTML dokument s varijantama testne forme, fullscreen prikaz u web pregledniku Firefox 120.0.1	49
Slika 26. Odabiri ispitanika u istraživanju vezanom za odabir prve rezolucije visoke kvalitete prikaza JPEG testne forme	52
Slika 27. Odabiri ispitanika u istraživanju vezanom za odabir prve rezolucije visoke kvalitete prikaza WebP testne forme	53
Slika 28. Odnosi veličina datoteka JPEG i WebP kod ispitivanja rezolucije	58
Slika 29. Odabiri ispitanika vrijednosti indeksa kvalitete Q za JPEG	64
Slika 30. Odabiri ispitanika vrijednosti indeksa kvalitete Q za WebP.....	65
Slika 31. Odnosi veličina datoteka JPEG i WebP kod ispitivanja indeksa kvalitete Q	70
Slika 32. Primjer izrađenog PDF dokumenta s ugrađenom varijantom testne forme	73

7.3. Popis kodova

Kod 1. PHP skripta rezolucija_generator.php kojom se generiraju JPEG i WebP varijante testne forme	41
Kod 2. Algoritam za izračun dimenzija okvira za prikaz slika na zaslonu monitora u formatu 24x16cm, realiziran pomoću jezika JavaScript.....	44
Kod 3. HTML dokument za prikaz JPEG varijanti testne forme u centriranom 24x16cm okviru.	48
Kod 4. PHP skripta za usporedbu veličine datoteka JPEG i WebP varijanti testne forme, compare_filesize.php.....	54
Kod 5. PHP skripta kompresija_generator.php kojom se generiraju JPEG i WebP varijante testne forme različitih stupnjeva kompresije.....	61
Kod 6. Modificirana PHP skripta za usporedbu veličine datoteka JPEG i WebP varijanti testne forme dobivenih u fazi istraživanja vezanom za kompresiju slikovnog zapisa, compare_filesize_of_compressed_img.php	66

8. ŽIVOTOPIS S POPISOM OBJAVLJENIH RADOVA

Jelena Vlašić rođena je 24. rujna 1984. u Malom Lošinj, Republika Hrvatska. Osnovnu školu završila je 1999., a srednjoškolsko obrazovanje 2003. u Gimnaziji Mali Lošinj, opći smjer. Iste godine upisuje Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Diplomski rad pod naslovom "Utjecaj kalibracijskih krivulja na deformaciju rasterskih elemenata u tisku" izradila je pod mentorstvom prof. dr. sc. Igora Zjakića te ga obranila 2011. čime stječe akademski naziv diplomirani inženjer grafičke tehnologije. Poslijediplomski sveučilišni doktorski studij Grafičko inženjerstvo i oblikovanje grafičkih proizvoda nastavlja na Grafičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Za vrijeme diplomskog studija obavljala je posao honorarnog suradnika u tiskari Grafing u razdoblju od 2005. do 2010. gdje je stekla praktično iskustvo u struci na poslovima grafičke pripreme i dorade. Godine 2011. izabrana je u naslovno zvanje asistent visoke škole na Veleučilištu u Varaždinu gdje radi u svojstvu vanjskog suradnika do 2012. Iste godine zapošljava se u kumulativnom radnom odnosu na Veleučilištu u Varaždinu u suradničkom zvanju asistenta na odjelu Multimedija, oblikovanja i primjena. Godine 2014. prelazi na Sveučilište Sjever u punom radnom odnosu na radno mjesto asistenta na odjelima Multimedija, oblikovanje i primjena i Medijski dizajn. Trenutno radi kao predavač za znanstveno područje tehničkih znanosti, polje grafička tehnologija, grana procesi grafičke tehnologije.

Tijekom rada sudjeluje u kreiranju i izvođenju nastave na stručnim kolegijima vezanim za područje grafičkog dizajna i reprodukcije boja u multimedijским sustavima. Mentor je na završnim radovima na stručnom prijediplomskom studiju Multimedija, oblikovanje i primjena. Aktivna je sudionica na znanstvenim i stručnim skupovima gdje je objavila više znanstvenih i stručnih radova.

Popis znanstvenih i stručnih radova:

Znanstveni radovi u drugim časopisima

1. Vlašić, Jelena; Zjakić, Igor; Zlatić, Sanja.

Determining of smallest useful font size in product labelling. // Tehnički glasnik – Technical Journal, vol. 7, no. 2, pp. 154-161, 2013. [Mrežno]. Dostupno: <https://hrcak.srce.hr/clanak/155340> (izvorni znanstveni članak)

2. Miljković, Petar; Vlašić, Jelena; Hajdek, Krunoslav.

Implementation of a simulation information technology through printing processes.

//Tehnički glasnik – Technical Journal, vol.7, no.2, pp. 182-186, 2013. [Mrežno].

Dostupno: <https://hrcak.srce.hr/clanak/155348> (izvorni znanstveni članak)

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

1. Vlašić, Jelena; Milković, Marin; Morić, Marko.

Influence of calibration curves on dot gain in offset printing. // Proceedings of 16th International Conference on Printing, Design and Graphic Communications / Zagreb: Croatian Society of Graphic Artists, pp. 253.-261., 2012. (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

2. Morić, Marko; Modrić, Damir; Vlašić, Jelena.

Influence of implementation methodology of ERP information system for full functionality production process. // Proceedings of 16th International Conference on Printing, Design and Graphic Communications / Senj: Croatian Society of Graphic Artists, pp. 224.-233., 2012. (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

3. Morić, Marko; Vlašić, Jelena; Čačić, Marko.

Utjecaj mikro i makro klimatskih uvjeta na ponašanje PVC materijala u procesu izrade kartica. // Proceedings of 17th International Conference on Printing, Design and Graphic Communications / Senj: Croatian Society of Graphic Artists, pp. 224.-233., 2013. (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

4. Čerepinko, Darijo; Vlašić, Jelena.

Strukturalna analiza tehnoloških rješenja u području mobilnih osobnih računala: Preduvjeti za izradu sučelja za dnevne novine za tablet izdanja. // Proceedings of 18th International Conference on Printing, Design and Graphic Communications / Senj: Croatian Society of Graphic Artists, pp. 196.-201., 2014. (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

5. Pavlović, Ivana; Žeželj, Teo; Mikota, Miroslav; Vlašić, Jelena.

Analysis of manipulation of portrait photographs with changes in R channel value. // Proceedings of 17th International conference MATRIB / Vela Luka: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, pp. 278.-284., 2016. (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom

1. Modrić, Damir; Milković, Marin; Geček, Robert; Vlašić, Jelena.

The effects of triboluminescence in everyday materials. // Proceedings of 16th International conference MATRIB / Vela Luka: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, pp. 270.-279., 2015. (predavanje, međunarodna recenzija, ostalo).

Kongresno priopćenje (sažeci) u zbornicima skupova

1. Čerepinko, Darijo; Periša, Mario; Vlašić, Jelena.

Utjecaj audio-video formata, fotografije, animacije i ilustracije na čitavost sadržaja unutar simulirane IPAD aplikacije. // Zbornik radova 21. Međunarodne konferencije tiskarstva, dizajna i grafičkih komunikacija Blaž Baromić / Varaždin: Hrvatsko društvo grafičara, 2017., (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak izlaganja sa skupa).

2. Vlašić, Jelena; Čačić Marko; Milković, Marin; Geček, Robert.

Automatizacija obrade fotografija primjenom ImageMagick alata. // Zbornik radova 26. Međunarodne konferencije tiskarstva, dizajna i grafičkih komunikacija Blaž Baromić / Zagreb: Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2022., (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak izlaganja sa skupa).