

# MacAdamsovi elipsoidi u dizajnu

---

**Ripić, Martina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2014**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts / Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:532601>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAFIČKI FAKULTET

# ZAVRŠNI RAD

Martina Ripić



Sveučilište u Zagrebu  
Grafički fakultet

Smjer: Dizajn grafičkih proizvoda

# ZAVRŠNI RAD

MACADAMSOVI ELIPSOIDI U DIZAJNU

Mentor:  
doc. dr. sc., Igor Zjakić

Student:  
Martina Ripić

Zagreb, 2014



**ZAHVALA:**

*Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Igoru Zjakiću, na stručnom vođenju kroz izradu ovog rada, doc.dr.sc. Damiru Modriću na pomoći oko izračuna i konstrukcije elipsoida, Grafičkom fakultetu na mogućnosti korištenja praktikuma u svrhe istraživanja, te svim ispitanicima koji su dragovoljno pristali sudjelovati u istraživanju.*

## SAŽETAK

Za svaki dizajn je vrlo bitno da idejno rješenje bude točno i precizno prenešeno u gotov proizvod, te da određeni uvjeti ne ometaju doživljaj istoga. Boja je jedan od osnovnih elemenata dizajna. U grafičkom dizajnu, uz simbol i riječi određenog proizvoda, te ilustraciju jednako je bitna i boja koja će upotpuniti proizvod. Kvalitetu reprodukcije tiskanih grafičkih proizvoda smanjuje pojava metamerizma, koja je uvjetovana različitim fizikalnim pojavama, ali i individualnim doživljajem boja ljudskog oka. To je pojava kod koje dvije različite boje pod određenim uvjetima promatranja, primjerice različitim izvorom osvjetljenja, možemo doživjeti kao dvije iste boje. Zamislite, na primjer, da vaš plakat kao gotov proizvod s željenim bojama u tiskari, pod umjetnim izvorom svjetla, izgleda točno onako kako ste zamislili i jednako idejnom rješenju, međutim kad se postavi na predviđeno mjesto, pod dnevno osvjetljenje, boje izgledaju drugačije od željenih. Time možemo izazvati kontra efekt i od reklame napraviti antireklamu jer je psihologija boja bitna za uspješan marketing. Do nepoželjne pojave može doći na bilo kojem tiskanom grafičkom proizvodu i zato je svakom grafičkom dizajneru bitno da raspolaže znanjem o tome, kako bi unaprijed mogao spriječiti neuspješne projekte i nezadovoljne klijente.

U ovom radu proučena je problematika pojave metamerizma na višebojnim otiscima na kojima je prevladavao dominantni ton žute boje, a koja je uvjetovana promjenom promatrača i izvora osvjetljenja D50, D75, LED i dnevnog svijetla. Ispitivanje je provedeno na nekoliko desetaka ispitanika kako bi dobili što bolje i preciznije rezultate, a cijeli rad je popraćen slikama i tablicama, te formulama za kolorimetrijske vrijednosti i izračun metamerizma. Kvalitativne evaluacije pojave metamerizma objašnjene su pomoću MacAdamsovih elipsoida u trodimenzionalnom CIE  $L^*a^*b^*$  sustavu.

Ovim radom istražena je i opisana metoda kojom se može ustanoviti količina pojave metamerizma kod digitalnih tehnika tiska, inkjeta i elektrofotografije. Istraživanjem u ovome radu dokazali su se principi ustanovljavanja metamerizma koji su primjenjivi i u ostalim tehnikama tiska. Istraživanjima je dokazano da je suvremenim znanstvenim metodama uz pomoć kolorimetrije i matematičkog proračuna i konstrukcije MacAdamsovih elipsoida moguće ustanoviti pojavu metamerizma ne samo

na čistim definiranim bojama, već na višebojnim i višetonskim otiscima, što predstavlja preduvjet za istraživanja kojima će se u budućnosti moći i valorizirati metamerizam kod većeg broja dominantnih tonova, odnosno prilikom definiranja kvalitete tiska, moći će se postići veća kvaliteta finalnog proizvoda. A svaki dizajner će moći garantirati svom klijentu da će njegov proizvod ostati nepromjenjen, odnosno da će publika, to jest promatrač, jednako doživjeti boju neovisno o izvoru osvjetljenja i vanjskom podražaju.

Upravo je i cilj rada skrenuti dizajnerima pažnju na bitnu pojavu metamerizma, te pomoću McAdamsovih elipsoida pokazati na koji način mogu doći do spoznaje o zastupljenosti te pojave ovisno o određenoj boji, tehnici tiska i uvjetima promatranja, pa čak i samog promatrača, kako bi mogli predvidjeti i sprječiti neželjeni efekt, te unaprijed uvidjeti koliko je bitno prilagoditi svoj dizajn, odabir i kompoziciju boja samoj svrsi tog grafičkog proizvoda. Pripaziti kako i pod kojim uvjetima će predstavljati i izlagati svoje radove kako bi određena boja postigla željeni marketinški efekt. Odnosno, kako bi se njihov rad istaknuo u moru proizvoda i reklamnih poruka, te prepoznatljive boje i proizvodi i ostali prepoznatljivi.

**Ključne riječi:** *boja, doživljaj boja, metamerizam, CIE L\*a\*b\* sustav, MacAdamsove elipsoide*

## SADRŽAJ RADA:

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. TEORIJSKI DIO</b> .....	2
<b>2.1. Boje i dizajn</b> .....	2
<b>2.2. Videnje boja</b> .....	3
2.2.1. Teorija suprotnih procesa.....	4
2.2.2. Individualni doživljaj boja.....	5
<b>2.3. CIE L*a*b* sustav boja</b> .....	5
2.3.1. Kolorimetrijska razlika ili ukupna razlika boja $\Delta E^*ab$ .....	6
2.3.2. Sivi balans.....	7
<b>2.4. Metamerizam</b> .....	8
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	10
<b>3.1. Materijali ispitivanja</b> .....	10
<b>3.2. Metoda ispitivanja</b> .....	11
<b>3.3. Metoda ispitivanja MacAdamsovim elipsoidama</b> .....	11
<b>4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA</b> .....	13
4.1. Komparativna vizualna analiza i diskusija usporedbe originalnih i testnih uzorak..	13
4.2. Diskusija vizualne analize usporedbe originalnih i testnih uzoraka.....	18
<b>5. ZAKLJUČCI</b> .....	18
<b>6. LITERATURA</b> .....	20



## 1.UVOD

Boja se može definirati kao psihofizički fenomen induciran svjetlom ili doživljaj koji u mozgu izaziva svjetlost emitirana od nekog izvora ili reflektirana s površine nekog tijela [1]. Boja se može različito doživjeti promatrajući otiske otisnute različitim tehnikama tiska, ovisno o izvoru svjetla pod kojim se gleda određeni otisak. To je pojava metamerizma, kada dvije različite boje pod određenim uvjetima (primjerice različiti izvori svjetla) daju dojam da se radi o dvije iste boje. Znači da boje koje su u stvarnosti različite, ljudima mogu izgledati isto radi određenih uvjeta. Takva pojava je vrlo nepoželjna u grafičkoj industriji, jer se dobiva neželjeni učinak neke boje i time takva boja nema prvobitnu funkciju. Svim grafičkim dizajnerima je bitno da idejno rješenje bude točno realizirano u gotov proizvod, te isto tako doživljeno sa strane ciljane publike. U ovom radu proučena je pojava metamerizma na višebojnim otiscima s dominantnim jednim tonom kod dvije tehnike tiska, elektrofotografije i inkjeta, te prikazana pomoću McAdamsovih elipsoida u trodimenzionalnom CIE L\*a\*b\* sustavu.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Boje i dizajn

Boja je jedan od osnovnih elemenata dizajna. U grafičkom dizajnu, uz simbol i riječi određenog proizvoda, te ilustraciju jednako je bitna i boja koja će upotpuniti proizvod. Korištenje i prihvaćanje boja uvjetovano je s više parametara. Kada govorimo o grafičkom dizajnu odabir boje najprije ovisi o samoj kompoziciji tj. \_bojom dajemo ravnotežu proizvodu kako bi vizualno bio privlačan i ugodan oku. Svake sezone pojavljuju se određene boje koje se prate kao modni trendovi, što također može utjecati na dizajnerov odabir. Naučeno značenje i simbolika boja tu imaju veliku ulogu, pa tako određene boje povezujemo s određenim predmetima i osjećajima. Npr. Crvenu boja je boja vatre i krvi pa je povezana s energijom, ratom, moći i odlučnosti, kao i sa strašću, željom i ljubavi. Crvena boja se zbog svog intenziteta koristi kod prometnih znakova (semafori, vatrogasna oprema) te općenito za označavanje opasnosti. U dizajnu crvenom bojom možemo privući pažnju, upozoriti ili naglasiti senzualnost proizvoda. Za razliku od crvene plava boja je boja mirnoće, stabilnosti, neba i mora. Koristi se u reklamiranju proizvoda i usluga povezanih sa čistoćom (sredstva za čišćenje), kao i sa zrakom i nebom (aviokompanije), vodom i morem (reklame za vodu). Žuta ima najveću refleksiju od svih boja, te se kao takva prva primjećuje. To je boja sunca i povezujemo je sa srećom, radosti i energijom. Često se koristi za reklamiranje dječijih proizvoda i zbog svoje efektivnosti kod isticanja. Zelena boja je boja prirode i simbolizira rast, svježinu, eneriju i plodnost. U marketingu obilježava zdrave, prirodne, organske i eko proizvode. Simbolički, bijela označava čistoću, dobrotu i neutralnost. Odgovarajuća je za dobrotvorne organizacije i medicinsku opremu. Bijela je najprodavanija boja gledano sveukupno kroz različite proizvode na tržištu [2]. Crna boja je apsolutna suprotnost bijeloj, smatra se vrlo formalnom, elegantnom kao i bojom uspjeha, te je usko povezana sa sofisticiranim visoko tehnološkim tržištem. Poznavanje boja jedno je od najvažniji stavki i polazišna točka za izradu kvalitetnog grafičkog dizajna. Osim simbolike i značenja boja , pri odabiru boje dizajner treba paziti i na zemljopisni položaj, jer se jednake boje doživljavaju drugačije u različitim zemljama i kulturama. Voljenje i promatranje boje osim spomenutih parametara ovisno je i o uvjetima promatranja boja. Stoga je najvažniji zaključak da doživljaj boje ne ovisi toliko o samoj

boji koliko o njenom intenzitetu. Dakle, najvažniji parametri koji definiraju osjećaj boje su: naučena predrasuda, varijacije intenziteta boje, interakcija s pozadinom i osvjetljenjem u prostoru, kontrast boja koje su u blizini, veličina polja promatranja. Boja u marketingu može izazvati predodređeno ponašanje pa ju koristimo kako bi povećali prodaju različitih proizvoda. Čovjek je dnevno bombardiran s puno marketinških poruka pa je vrlo važno da kupac u tom moru informacija zamjeti baš proizvod koji želimo. U marketingu je važno da određena boja postigne željeni efekt.

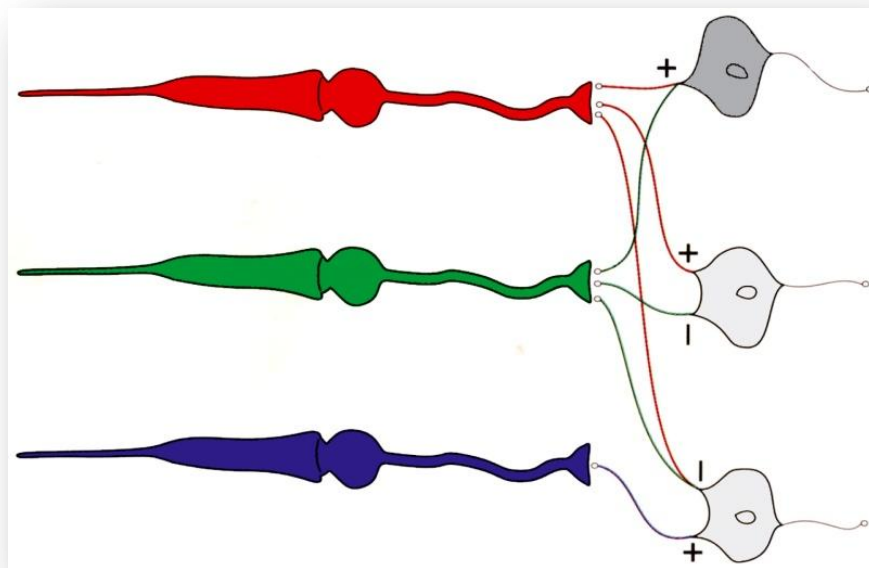
## 2.2. Videnje boja

Proces doživljaja boja odigrava se u mozgu. Oko je vidni organ koji upija svjetlost, tj. elektromagnetske valove. Uloga oka je da ulaznu svjetlost u ovisnosti o njezinoj snazi propušta kroz rožnicu koja je zakrivljena i koja fokusira svjetlost na stražnji dio oka dajući umanjenu i obrnutu sliku. S prednje strane oka nalazi se šarenica unutar koje se nalazi zjenica koja mijenjajući svoj oblik regulira ulaznu energiju svjetlosti. Na stražnjem dijelu oka smještena je mrežnica u čijih se devet slojeva nalaze vidni receptori koji se nazivaju *štapići* i *čunjići* [3].

Doživljaj boje ovisi o tome kako mozak reagira na stimulaciju. Ulazna elektromagnetska energija iz svjetlosti se pretvara u živčane impulse koji se preko milijun živčanih vlakana prenose ka zatiljnom dijelu kore velikog mozga i interpretiraju kao slika. Optičkim živcima signal putuje do dijela mozga zaduženog za vid i negdje na tom putu između fotoreceptora i mozga, informacija se o boji, pokretu, svjetlini i sjajnosti kodira i dekodira, te stvara vidni osjećaj. Informacija o intenzitetu svjetlosti dobiva se preko štapića kojih u oku ima oko sto milijuna i koji se nalaze na periferiji mrežnice. Osjetljivost štapića omogućuje monokromatski vid uz osvjetljenje veće od 0,2 lx-a koje se dobiva fotoosjetljivim pigmentom nazvanim *rodopsin*. Na intenzitete osvjetljenja veće od 30 lx-a, u oku reagiraju čunjići koji su kraći i deblji koji ujedno omogućuju vidni osjećaj boje [4]. Čunjića u oku ima oko šest milijuna i suprotnim krajem svoje osjetljivosti spojeni su na živčana vlakna u mrežnici, koja u slijepoj pjegi formiraju optički živac i spajaju se s mozgom. Količina čunjića najveća je u centralnom dijelu oka, te opada prema periferiji.

### 2.2.1. Teorija suprotnih procesa

Viđenje boja objašnjeno je teorijom suprotnih procesa. Prema toj teoriji, pojedini čunjići osjetljivi su na široka valna područja, koja imaju svoje spektralne maksimume na točno definiranim valnim dužinama. Stoga, čunjići koji se sada mogu nazivati stanice, osjetljivi su na duge, srednje i kratke valne dužine. Prema toj teoriji, neke živčane stanice su uvijek u aktivnom stanju i frekvencijom podražaja, puls se povećava, tj. smanjenjem frekvencije podražaja puls se smanjuje. Na taj način različite informacije mogu biti prenijete istim živcem. Određene skupine stanica povezane trima čunjićima mogu djelovati kao suprotne stanice. Podražajni potencijali, nazvani S-potencijalima nastaju u dvije vrste horizontalnih stanica: L i C stanice [5]. L stanice su odgovorne za koordiniranje informacija i reagiraju jednolično na sve valne duljine osvjetljenosti, dok se C stanicama frekvencija mijenja ovisno o valnoj dužini svjetla kojom su pobuđene, te tako daju osnovni signal za boju. Signal koji dolazi do L stanica dobiva se iz sve tri vrste fotoreceptora, dok C stanice reagiraju u ovisnosti podražaja crvenih, zelenih ili plavih čunjića ( *Slika 1*).



*Slika 1. Čunjići*  
(Igor Zjakić, *Psihologija boja, Varaždin, Veleučilište, 2010.*)

### 2.2.2. Individualni doživljaj boja

Bitno je napomenuti da ljudski doživljaj boja nije jednak. On ovisi o osjetljivosti čunjića u srednjim i dugim valnim dužinama, koji se razlikuje i do 20 nm. Razlike u spektralnoj apsorpciji pojedinih vrsta čunjića najčešće se dešavaju uslijed kemijskih reakcija na mrežnici oka koje uzrokuje različita koncentracija vitamina A [6]. Ovakva vrsta osjetljivosti čunjića ovisna je o starosti oka. Individualni doživljaj boje ovisi o još nekim parametrima, kao što su različita propusnost svjetlosti u ovisnosti o različitim valnim dužinama ulazne spektralne energije vidljivog dijela spektra i u apsorpciji svjetlosti na oko 450 nm za što su odgovorni pigmenti u oku koji se nalaze neposredno ispred fotoreceptora [7]. Na ovu vrstu pigmenta ne utječe starosna dob promatrača, nego individualna osjetljivost oka. CIE je s obzirom na individualni doživljaj boje i populaciju koja ima defektno viđenje boje preporučuje izraz: prosječni standardni promatrač.

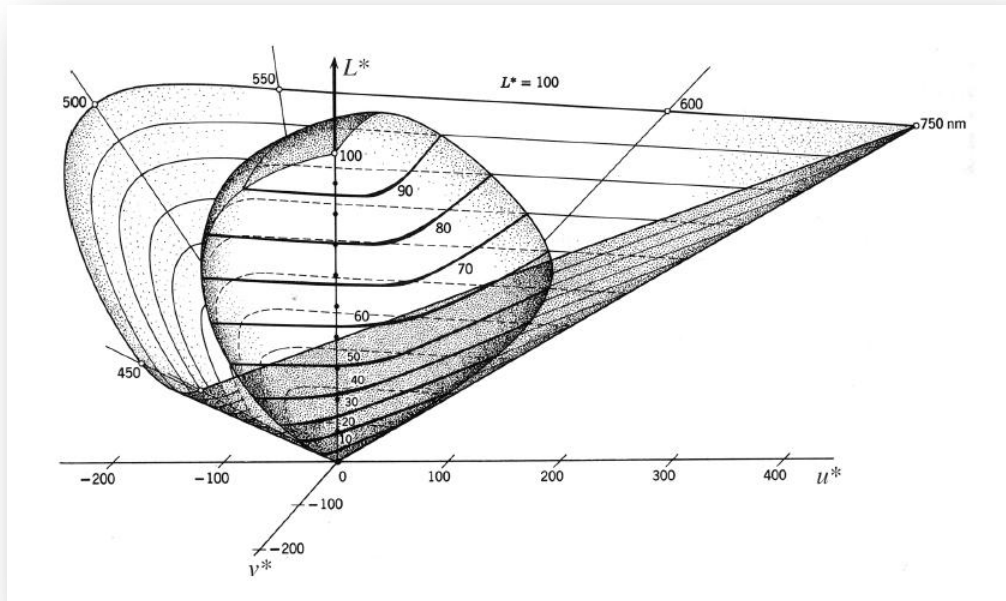
### 2.3. CIE L\*a\*b\* sustav boja

CIE L\*a\*b\* sustav boja je trodimenzionalni prostor boja temeljen na objektivnom vrednovanju boja i najbliži je vizualnoj percepciji, a koji je definiran pravokutnim koordinatama koje se mogu definirati odnosom:

$$\begin{aligned}L^* &= 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16 \\a^* &= 500\left[\left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3}\right] \\b^* &= 200\left[\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3}\right]\end{aligned}\quad [1]$$

gdje su X, Y, Z tristimulusne vrijednosti refleksije određene boje, a  $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$ , tristimulusne vrijednosti refleksije s neotisnute površine.

Izračunom navedenih vrijednosti boje je moguće prikazati u trodimenzionalnom uniformiranom sustavu kako je prikazano *slikom 2*, gdje  $L^*$  označava svjetlinu L(luminance),  $a^*$  akromatsku os a(crveno-zeleno) i  $b^*$  kromatsku os b(žuto-plavo) [8].



Slika 2. Prikaz CIE L\*a\*b\* sustava

(G. Wyszecki, W.S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, second ed., Wiley-Interscience Publication, New York, 1982.*)

### 2.3.1. Kolorimetrijska razlika ili ukupna razlika boja $\Delta E^*_{ab}$

Kolorimetrijska razlika je razlika između dvije boje u CIE sustavu. Izračunava se kao srednja vrijednost razlika između  $L^*$ ,  $a^*$  i  $b^*$  vrijednosti standarda (referentna vrijednost) i vrijednosti izmjerene na uzorku (uspoređivana vrijednost).

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

$$\Delta L^* = L^*_1 - L^*_2$$

$$\Delta a^* = a^*_1 - a^*_2$$

$$\Delta b^* = b^*_1 - b^*_2$$

[2]

Gledajući s grafičke struke, kolorimetrijska razlika opisuje kvalitetu reprodukcije, tj. odstupanje reprodukcije od originala [9]. Jednostavan prikaz odstupanja boja prema Schlöpferovom kriteriju je sljedeći:

$\Delta E < 0,2$                       razlika boja se ne vidi

$\Delta E = (0,2-1)$                       razlika boja se primjećuje

$\Delta E = (1-3)$	razlika boja se vidi
$\Delta E = (3-6)$	razlika boja se dobro vidi
$\Delta E > 6$	očigledna odstupanja boja.

### 2.3.2. Sivi balans

Parametri i uvjeti u procesu tiska nisu konstantni kroz tisak cijele naklade. Na različitu kvalitetu otiskivanja može djelovati neujednačenost dotoka bojila na tiskovnu podlogu, ali i različite adhezije te kohezije sile koje se pojavljuju u procesu tiska između tiskovnog materijala i bojila, odnosno unutar samog bojila. Problem može izazvati i motivi na otiscima koji mogu biti potpuno različiti po količini informacija i potrebnog obojenja od kojih se otisak sastoji.

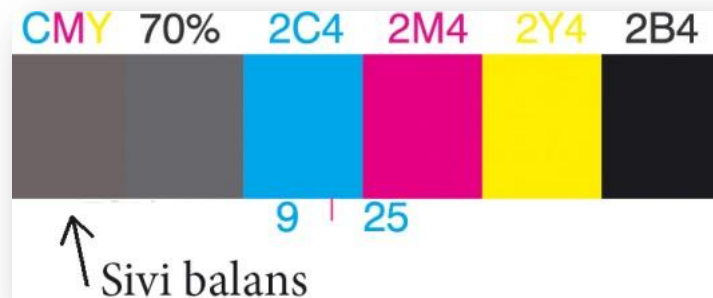
Zbog nekonstantnih uvjeta prilikom otiskivanja za dobivanje kvalitetnog otiska preporučuje se korištenje različitih standarda koji definiraju gustoće obojenja te CIE  $L^*a^*b^*$  vrijednosti osnovnih tiskarskih boja. Ponekad ni te vrijednosti nisu dovoljne kako bi zadovoljile kriterij kvalitete kroz cijelu nakladu [10].

Moguće je vrlo kvalitetno reproducirati kromatične boje i boje koje se nalaze vrlo blizu osi svjetline CIE  $L^*a^*b^*$  sustava višebojnim tiskom. Kad se reproduciraju motivi koji sadrže većinu vrlo kromatičnih boja kontrolu kvalitete tiska moguće je obavljati mjerenjem gustoće obojenja punog polja. Dok se reprodukcija motiva koji imaju veliki udio tiskovne površine u malim kromatskim vrijednostima, kvaliteta tiska se može kontrolirati mjerenjem polja koja na sebi imaju točno definirane RTV dobivene iz C, M i Y boja [11].

Pošto ljudsko oko vrlo dobro reagira na promjene akromatskog tonaliteta, RTV u navedenim poljima su takve da se prilikom optimalnog obojenja i uvjeta tiska dobiva osjećaj sivog tona [12]. Kako bi mogli usporediti akromatski osjećaj tog polja sa stvarnom akromatskom bojom, pored tog polja tiska se i akromatsko polje s crnom bojom koja daje približno isti osjećaj reflektiranih tristimulusnih vrijednosti kao i polje otisnuto s definiranim C, M i Y bojama.

Neutralno sivo polje sastavljeno od tri osnovne tiskarske boje neće dati osjećaj neutralne sive boje kao i polje otisnuto crnom bojom u točno određenoj RTV kada su uvjeti i odnosi parametara u tisku poremećeni. Tako definirana polja nazivamo polja

sivog balansa (*Slika 3*). Pomoću tri osnovne boje koje mogu biti definirane s nekoliko vrijednosti dobiva se neutralne siva boja.



*Slika 3. Kontrolni strip – sivi balans*

Polja različitih vrijednosti mogu se kontrolirati vizualno ili spektrofotometrom. Kod vizualnog ocjenjivanja okolina promatranog polja mora biti takva da ne utječe na doživljaj kromatičnosti navedenog polja. Stoga se uz takvo polje tiska i neutralno sivo polje, dok šarena polja nisu u okolini (*Slika 4*). Kada mjerimo obojenje polja sivog balansa uz pomoć spektrofotometra dobivaju se CIE L\*a\*b\* vrijednosti koje se uz izračun  $\Delta E$  uspoređuju sa RTV crne boje [13]. Odstupanja neutralno sive boje sivog balansa mogu se definirati uz određene tolerancije odstupanja od polja crne boje. U takvim se slučajevima ne događa korekcija vrijednosti obojenja za vrijeme tiska, dogodit će se samo kada su CIE L\*a\*b\* vrijednosti sivog balansa van tolerancije.



*Slika 4. Strip za tisak*

## 2.4. Metamerizam

Metamerizam se pojavljuje kada dvije različite boje pod određenim uvjetima daju dojam da se radi o dvije iste boje. Ako promatramo dva objekta od kojih jedan ima ujednačene vrijednosti spektralne energije reflektiranog svjetla s neke površine po svim valnim dužinama vidljivog dijela spektra, a ako drugi objekt dobijemo miješanjem



nekih boja spektra, teoretski se onda može boja drugog objekta izmiješati da dobijemo dojam da se radi o dvije iste boje pod određenim uvjetima promatranja[14]. Razlika je vidljiva ako promatramo krivulje refleksije prvog i drugog objekta. Krivulja refleksije prvog objekta je podjednaka na svim valnim duljinama i ne podudara se sa krivuljom refleksije drugog objekta koji ima svoje spektralne maksimume u području kratkih, srednjih i dugih valnih dužina vidljivog dijela spektra. Dakle, ako promijenimo spektralnu energiju koja dolazi na objekt, promijenit će se i spektralna energija refleksije objekta i dva objekta se više neće podudarati po svojim spektralnim razdiobama reflektiranog svjetla.

Metamerne boje su boje kod kojih su iste reflektirane brojčane tristimulusne vrijednosti, a različita spektralna energija zračenja, tj. boje različitih spektralnih energija zračenja koje se podudaraju kod promatrača.. Stimulusi reflektiranog svjetla pod ovim uvjetima čine metamerijski par, a pojava se naziva metamerizam.

Metamerizam se može definirati odnosom:

$$k \int \lambda \Phi_{\lambda 1} x \lambda d\lambda = k \int \lambda \Phi_{\lambda 2} x \lambda d\lambda$$

$$k \int \lambda \Phi_{\lambda 1} y \lambda d\lambda = k \int \lambda \Phi_{\lambda 2} y \lambda d\lambda$$

$$k \int \lambda \Phi_{\lambda 1} z \lambda d\lambda = k \int \lambda \Phi_{\lambda 2} z \lambda d\lambda$$

$$\Phi_{\lambda 1} \neq \Phi_{\lambda 2} \quad [3]$$

$\Phi_{\lambda}$  predstavlja raspodjelu spektralne energije navedenih stimulusa, a  $x\lambda$ ,  $y\lambda$ ,  $z\lambda$  funkciju spektralne vrijednosti CIE 1931 standardnog promatrača. Postoje četiri različite vrste metamerizma, odnosno, pojava metamerizma dešava se uslijed četiri različita uvjeta promatranja metamerijskog para:

- metamerizam uvjetovan promjenom osvjetljenja
- metamerizam uvjetovan promjenom promatrača
- metamerizam uvjetovan promjenom veličine polja promatranja

- metamerizam uvjetovan promjenom geometrije promatranja

Pri daljnjem ispitivanju dolazi do pojave prve dvije vrste metamerizma. Metamerizam uvjetovan promjenom osvjetljenja i metamerizam uvjetovan promjenom promatrača.

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

S obzirom da je proučavan metamerizam uvjetovan promjenom promatrača i promjenom izvora svjetla, provedeno je ispitivanje na 30 ispitanika različite dobne uzrasti, na kojima je izvršeno predispitivanje Ishiharinovim testom raspoznavanja boja da bi se provjerilo da li ispitanici raspoznaju boje.

#### **3.1. Materijali ispitivanja**

Za materijale ispitivanja korišten je originalni otisak (*Slika 5*), na kojemu je dominirala žuta boja. Za originalni otisak s dominantnom žutom bojom napravljeno je zasebno povećanje udjela plave, crvene, žute i zelene boje po 10 %, 20 % i 30 %. Otisci su otisnuti u dvije različite tehnike tiska, ink-jet tisak i elektrofotografija te je za original dobiveno 12 otisaka s različitim udjelom postotaka pojedinih boja.



*Slika 5. Originalna fotografija za reprodukciju otisaka s dominantnom žutom bojom*

### **3.2. Metoda ispitivanja**

Nakon predispitivanja Ishiharinovim testom, ispitanici su dobili originalni uzorak na kojem je žuta boja dominantna te 12 pripadajućih uzoraka s određenim postotkom povećanja plave, žute, crvene i zelene boje s 10 %, 20 % i 30 %.

Ispitivanje je provedeno na sljedeći način: svaki ispitanik je pod određenim izvorom osvjetljenja trebao poredati uzorke po sličnosti prema originalu, od najbližijeg do najrazličitijeg u odnosu na original. Svaki uzorak s dominantnom žutom bojom morao je po sličnosti u odnosu na original poredati četiri puta pod različitim izvorima osvjetljenja: D<sub>50</sub>, D<sub>75</sub>, LED i dnevnim svjetlom.

D<sub>50</sub> ( 5000K) je izvor svjetla sličan bijeloj svjetlosti, koji se koristi u evaluaciji grafičkih i slikovnih reprodukcija. Ima podjednake udjele valnih duljina crvene, zelene i plave svjetlosti elektromagnetskog spektra.

D<sub>75</sub> (7500K) je izvor svjetla plavkastog obojenja koji je izvorno korišten za evaluaciju boje u tekstilnoj i grafičkoj industriji. Zamijenjen je za D<sub>65</sub>, koji se koristi kao standardni izvor svjetla . Izvor svjetla D<sub>75</sub> naglašava plave i crvene tonove te zelene podtonove.

LED (Light Emmiting Diode) je svjetleća poluvodička dioda koja emitira usmjerenu svjetlost poznatu pod nazivom elektroluminiscencija. To je specijalan tip poluvodičke diode koja je sastavljena od sljedećih komponenti: LED čipa, katode, anode, reflektora, stakla.

Dnevna svjetlost je izvor svjetla koji se definira kao kombinacija direktnog i indirektnog Sunčevog svjetla tijekom dana. Osvjetljenost dnevnog svjetla može biti od 5 000 luxa tijekom oblačnog neba do 120,000 luxa tijekom izravnog sunčevog svjetla u podne.

### **3.3. Metoda ispitivanja MacAdamsovim elipsoidama**

Nakon što je provedeno istraživanje na 30 ispitanika različitih dobnih uzrasta gdje su pod D<sub>50</sub>, D<sub>75</sub>, LED izvorima svjetlosti i dnevnim svjetlom uspoređivali original s testnim uzorkom, odvojeni sivi kontrolni strip originala i testnih uzoraka izmjereni su pomoću spektrofotometra, koji mjeri promjene u refleksiji, transmisiji u intervalima duž valnih dužina vidljivog dijela spektra. Spektrofotometrom su dobivene L\*, a\* i b\*

vrijednosti sivog balansa testnih i originalnog uzoraka, koji služe za izračune MacAdamsovih elipsoida u programu MathCAD po matematičkim formulama:

$$g_{11} = \frac{1}{a^2} \cos^2 \theta + \frac{1}{b^2} \sin^2 \theta$$

$$g_{12} = \left( \frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \sin \theta \cos \theta$$

$$g_{22} = \frac{1}{a^2} \sin^2 \theta + \frac{1}{b^2} \cos^2 \theta$$

gdje je

$\theta < 90^\circ$  kada je  $g_{12} < 0$

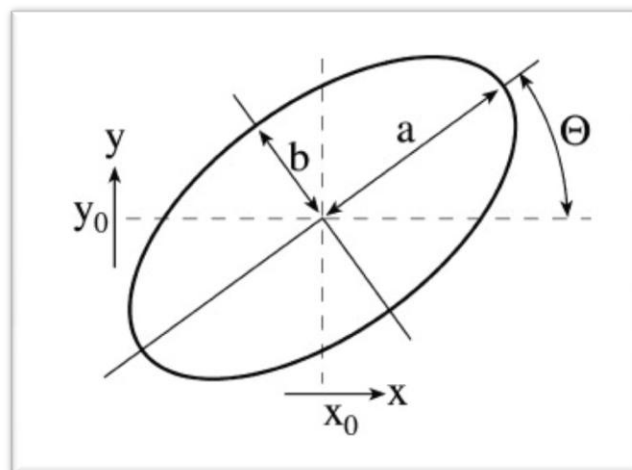
$\theta > 90^\circ$  kada je  $g_{12} > 0$

$$\frac{1}{a^2} = g_{22} + g_{12} \cot \theta$$

$$\frac{1}{b^2} = g_{11} + g_{12} \cot \theta \quad [4]$$

za  $a^*$ = najveća poluos,  $b^*$ = najmanja poluos i  $\theta$ = kut u stupnjevima. Vrijednosti  $g_{11}$ ,  $g_{12}$  i  $g_{22}$  su konstantne za svaku MacAdamsovu elipsoidu, te su računane pomoću dužine  $a$  i  $b$  na najvećoj i najmanjoj poluosi elipsoide i kuta nagiba  $\theta$  između najveće osi do osi  $x$  koordinatnog sustava (Slika 6).

Područje MacAdamsove trodimenzionalne elipsoide prikazuje dobivene rezultate CIE  $L^*a^*b^*$  vrijednosti sivog balansa.



Slika 6. Prikaz parametara elipsoide

*(G. Wyszecki, W.S. Stiles, Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, second ed., Wiley-Interscience Publication, New York, 1982.)*

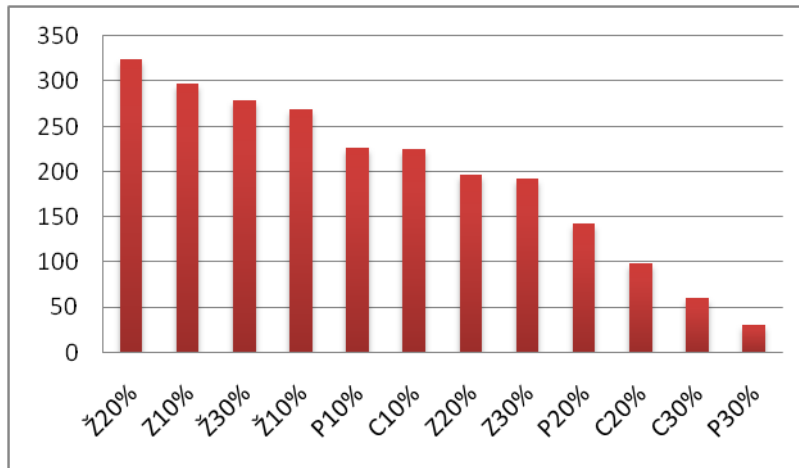
## **4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA**

### **4.1. Komparativna vizualna analiza usporedbe originalnih i testnih uzoraka**

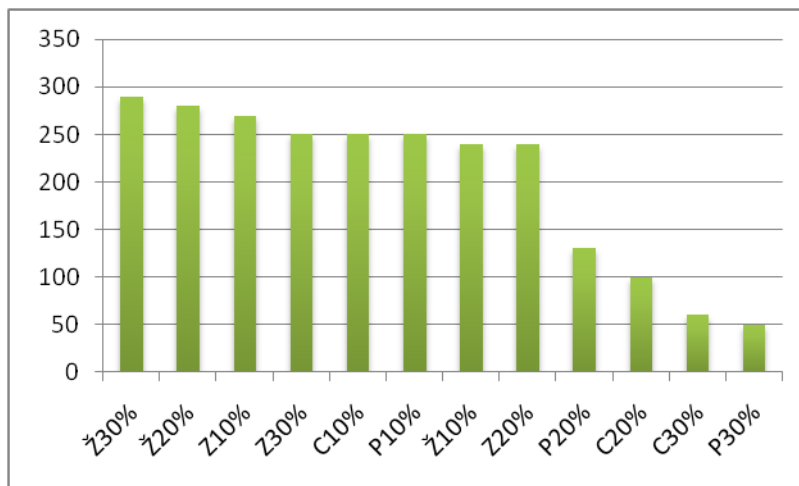
Prikazani rezultati su prethodili ispitivanju gdje su ispitanici uspoređivali pod različitim izvorima svjetlosti originalni uzorak s testnim uzorcima. Zbrojeni su bodovi od svih 30 ispitanika zajedno da bi dobili redosljed sličnosti testnih uzoraka prema originalu.

Za prikaze rezultata korišteni su grafovi. U grafovima su prikazane vrijednosti prema postotku. Dok je određenim obojenjem istaknuto o kojem se izvoru osvjetljenja radi, crvenom je prikazan izvor svjetla  $D_{50}$ , zelenom  $D_{75}$ , plavom LED i žutom dnevno svjetlo.

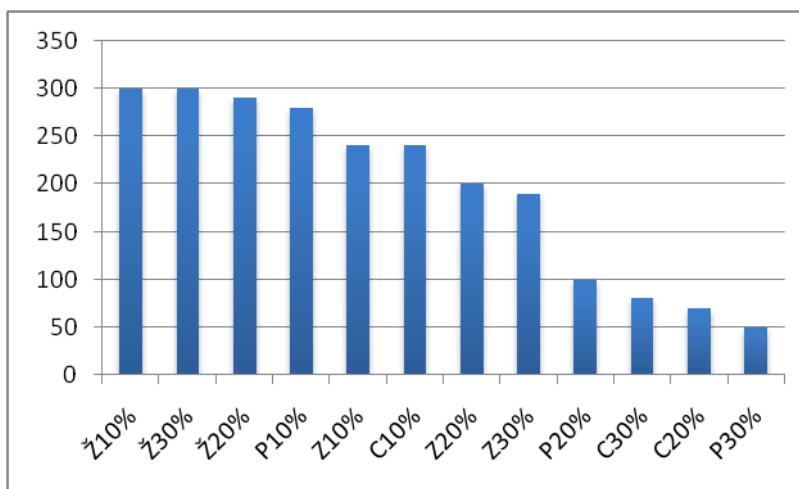
Temeljem provedenih istraživanja vizualne procjene kvalitete otisaka s kojom je moguće ustanoviti metamerizam na otiscima, dobiveni su rezultati prihvatljivosti kvalitete otisaka kako je prikazano histogramima u daljnjem tekstu. Na navedenim histogramima prikazani su različiti doživljaji kvalitete otisaka kod različitih izvora osvjetljenja te se može ustanoviti da se neki otisci doživljavaju kvalitetnije kod jedne vrste osvjetljenja, a drugi kod druge vrste osvjetljenja. Navedena pojava koja je ustvari metamerizam uvjetovan promjenom osvjetljenja događa se zbog različite refleksije boja te na taj način neke boje kod jednog izvora osvjetljenja emitiraju jednu raspodjelu elektromagnetnog vidljivog dijela spektra, dok druga boja emitira drugačiju raspodjelu elektromagnetnog vidljivog dijela spektra.



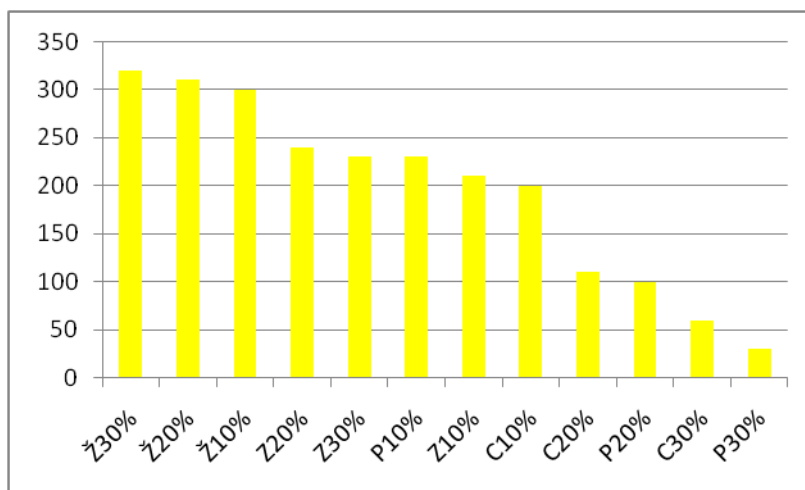
a) Izvor osvetljenja D50



b) Izvor osvetljenja D75

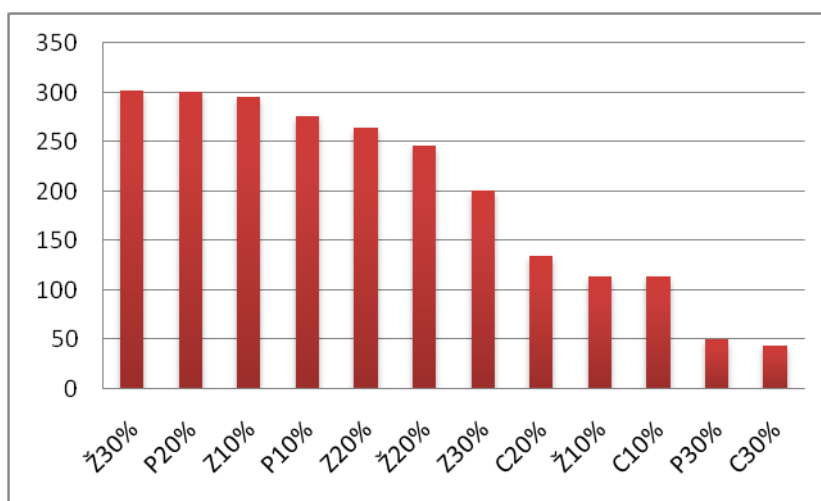


c) Izvor osvetljenja LED

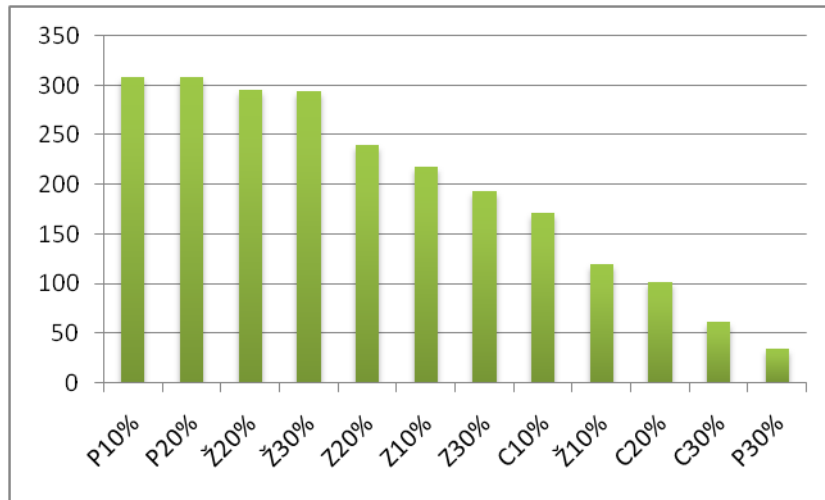


d) Izvor osvetljenja dnevno svjetlo

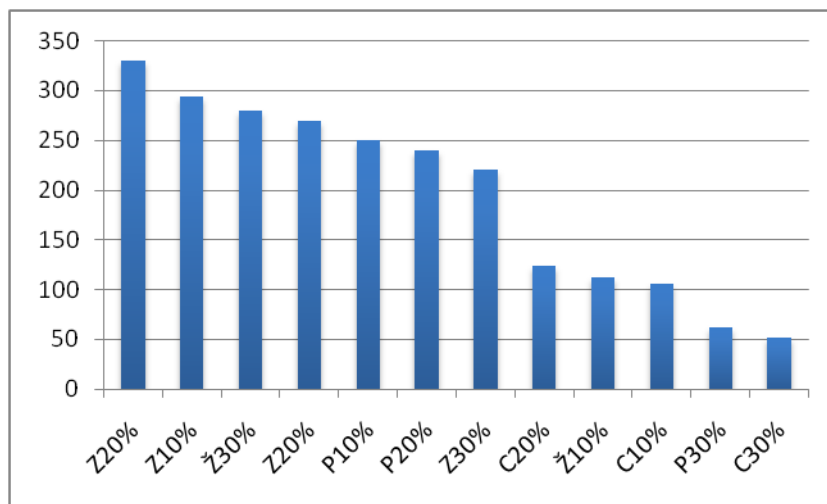
Slika 7. a), b), c), d) Vizualna ocjena kvalitete doživljaja otisaka tiskanih tehnikom ink-jeta za otiske s dominantnim žutim tonovima pri izvorima osvetljenja D50, D75, LED i dnevnim svjetlom.



a) Izvor osvetljenja D50

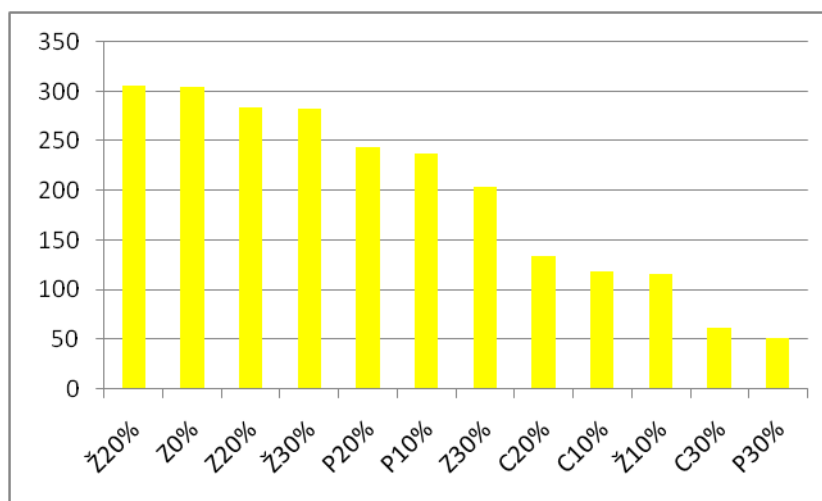


*b ) Izvor osvetljenja D75*



*c ) Izvor osvetljenja LED*



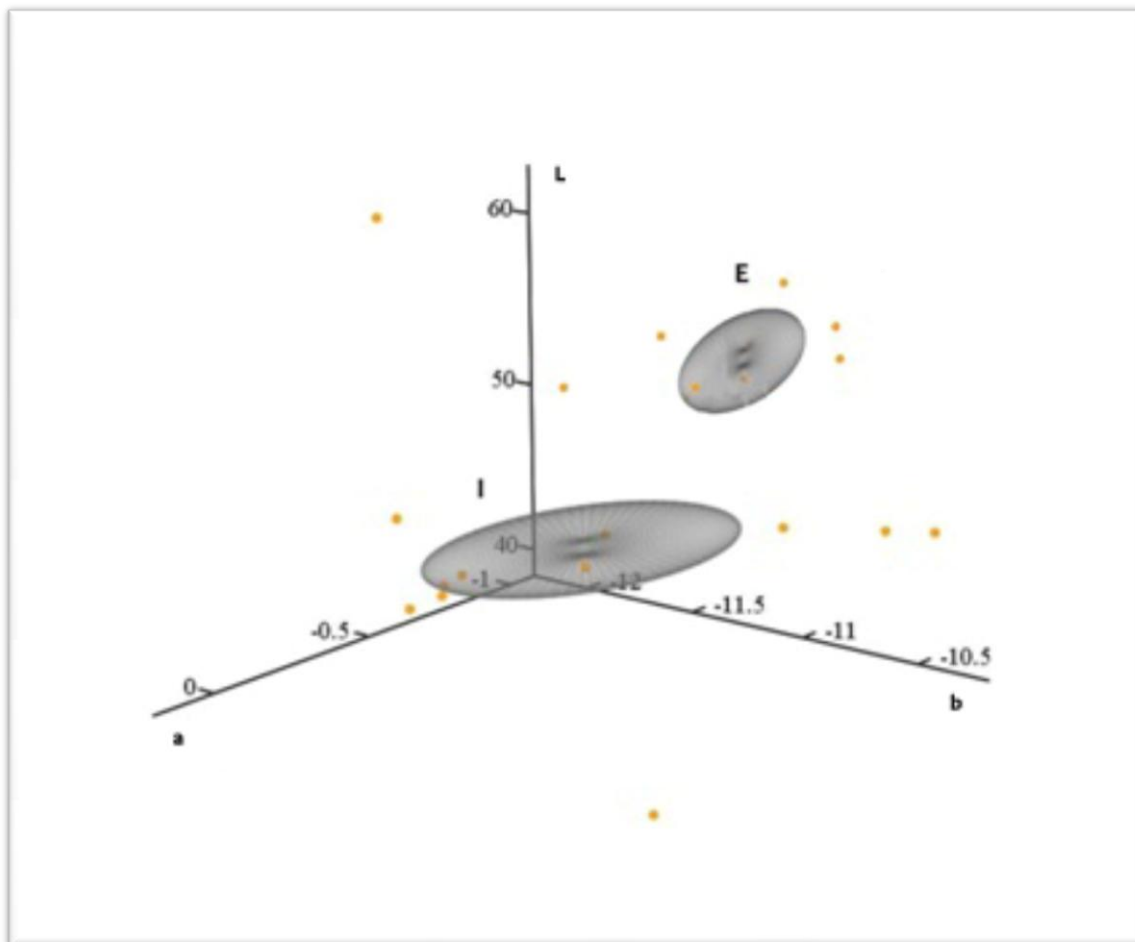


d) Izvor osvjjetljenja dnevno svjetlo

Slika 8. a), b), c), d) Vizualna ocjena kvalitete doživljaja otisaka tiskanih tehnikom elektrofotografije za otiske s dominantnim žutim tonovima pri izvorima osvjjetljenja D50, D75, LED i dnevnim svjetlom.

Osim vizualne procjene metamerizma na otiscima, napravljena su i kolorimetrijska mjerenja sivog balansa u kojima su vrijednosti stavljene u CIE  $L^*a^*b^*$  sustav te su izračunate MacAdamsovi trodimenzionalni elipsoidi koji su prikazani na slici 9.

Osim navedenih elipsoida, na slici su prikazane i referentne točke koje su poslužile za izračun elipsoida. Konstrukcijom elipsoida te smještajem elipsoida unutar trodimenzionalnog koordinatnog CIE  $L^*a^*b^*$  sustava vidljivo je da je područje prihvatljivosti kvalitete različito ovisno o tehnici tiska. Ako se promatra slika 9, vidljivo je da ne postoje područja preklapanja elipsoida što znači da na navedenom području ima pojave metamerizma. Isto tako iz izračunatih elipsoida, vidljivo je da je prihvatljivost kvalitete potpuno drugačija kod različitih tehnika tiska. Međutim da je došlo do preklapanja elipsoida u tom području ne bi došlo do pojave metamerizma.



*Slika 9. MacAdamsova elipsoida sivog balansa uzoraka s dominantnom žutom bojom za ink-jet i elektrofotografiju*

#### **4.2. Diskusija vizualne analize usporedbe originalnih i testnih uzoraka**

Na grafovima u prethodnom poglavlju može se vidjeti pri kojim su izvorima osvjetljenja testni uzorci odabrani kao najbližiji originalima.

Kod *slike 7* je vidljivo da su kao testni uzorci koji su najbližiji originalu odabrani oni koji imaju povećan postotak žute boje za 10 % pri LED izvoru osvjetljenja, 20 % za D<sub>50</sub> izvor osvjetljenja i 30 % za D<sub>75</sub> i dnevno svjetlo, dok su najrazličitiji uzorci s povećanim postotkom plave boje za 30 %, pri svim izvorima osvjetljenja.

Kod *slike 8* je vidljivo da su kao testni uzorci koji su najbliži originalu odabrani oni koji imaju povećan postotak žute boje za 20 % pri dnevnom svjetlu, 30 % pri D<sub>50</sub> izvoru osvjetljenja, zelene boje za 20 % pri LED izvoru osvjetljenja te plave boje za 10 % pri D<sub>75</sub> izvoru osvjetljenja, dok su najrazličitiji uzorci s povećanim postotkom plave boje za 30 % pri D<sub>75</sub> i dnevnom svjetlu te crvene boje za 30 % pri D<sub>50</sub> i LED izvorima osvjetljenja.

## 5. ZAKLJUČCI

Istraživanjima u ovome radu je ustanovljeno da je metamerizam pojava koja se osim na točno definiranim bojama pojavljuje i na višetonskim slikama. Pojavu metamerizma na višetonskim slikama moguće je ustanoviti metodom izračuna i konstrukcijom MacAdamsovih elipsoida. Navedeni metamerizam moguće je ustanoviti metodom binokularnog simultanog usuglašavanja na način da standardni promatrač uspoređuje otiske u različitim uvjetima promjene osvjetljenja.

Konstrukciju MacAdamsovih elipsoida moguće je dobiti kolorimetrijskim mjerenjem sivog balansa na način da se preko mjernih vrijednosti CIE L\*a\*b\* sustava konstruiraju elipsoidi koji predstavljaju područje u kojem se nalaze točke sivog balansa. Kako je za otiske različitih tehnika tiska, ali i otisaka s različitim dominantnim tonovima konstrukcija MacAdamsovih elipsoida različita, može se zaključiti da je došlo do pojave metamerizma. Iz konstrukcije elipsoida moguće je ustanoviti preklapanje elipsoida, odnosno različitost elipsoida u udaljenosti unutar CIE L\*a\*b\* sustava pa i oblik elipsoida.

Prema konstrukciji i matematičkom proračunu, područje koje se poklapa unutar dva ili više elipsoida predstavlja područje u kojem nema pojave metamerizma. U istraživanju je također zaključeno da je pojava metamerizma samo u području u kojem se navedeni elipsoidi ne preklapaju. Temeljem ovih istraživanja ustanovljeno je da je pojava metamerizma različita kod elektrofotografije i ink-jeta. Također je ustanovljeno da ljudi kvalitetu otisaka i doživljaj boja doživljavaju različito ovisno o tome kakvi su dominantni tonovi na slici.

Ovim istraživanjima dokazano je da je suvremenim znanstvenim metodama uz pomoć kolorimetrije i matematičkog proračuna i konstrukcije MacAdamsovih elipsoida moguće ustanoviti pojavu metamerizma ne samo na čistim definiranim bojama, već na višebojnim i višetonskim otiscima, što predstavlja preduvjet za istraživanja kojima će se u budućnosti moći i valorizirati metamerizam kod većeg broja dominantnih tonova, odnosno prilikom definiranja kvalitete tiska, moći će se postići veća kvaliteta finalnog proizvoda.

Ovim radom pokušalo se približiti dokazivanje pojave metamerizma svim grafičkim dizajnerima kako bi ubuduće obratili pažnju na mogućnost ove pojave te prilikom samog dizajniranja prilagodili dizajn uvjetima izlaganja i prezentiranja istog.

## 7. LITERATURA

- [1]. S. Solomon, P. Lennie, The Machinery of Colour Vision, Nature Reviews. Neuroscience. 8 (2007) 276-286.
- [2]. I. Zjakić, M. Milković, Psihologija boja, Veleučilište, Varaždin, 2010. 98-107.
- [3]. K. Gegenfurtner, Cortical Mechanism of Colour Vision, Nature Reviews. Neuroscience. 4 (2003) 563-572.
- [4]. R.W.G. Hunt, M.R. Luo, Using Magnitude Estimation Percepts to Evaluate a Model of Colour Vision, Color Res. Appl. 19 (1994) 27-33.
- [5]. J.C. Maxwell, Experiments on Colour, Transactions of the Royal Society Edinburgh. 21 (1855) 275-298.
- [6]. L. Yoder, Relative Absorption Model of Color Vision, Color Research and Application. 30 (2005) 252-264.
- [7]. Y. Nayatani, H. Sobagaki, K. Takahama, T. Yano, Field Trials of a Non-linear Colour-appearance Model, Color Res. Appl. 22 (1997) 240-258.
- [8]. K. Leon, D. Mery, F. Pedreschi, J. Leon, Color measurement in L\*a\*b\* units from RGB digital images, Food Research International. 39 (2006) 1084-1091.
- [9]. R.S. Berns, Principles of Color Technology, third ed., John Wiley & Sons, New York, 2000., 182-203.
- [10]. M.A. Crognale, Development, Maturation, and Aging of Chromatic Visual Pathways, Journal of Vision. 2 (2002) 438-450.
- [11]. S. Williams, Practical Colour Management, Optics & Laser Technology. 38 (2006) 399-404.
- [12]. H. Kipphan, Handbook of Print Media, Technologies and production Methods, first ed., Springer, Heidelberg, 2001. 78-83.
- [13]. K. Barnard, V. Cardei, B. Funt, A Comparison of Computational Color Constancy Algorithms. I: Methodology and Experiments With Synthesized Data, IEEE Transactions on Image Processing. 11(9) (2002) 972-984.
- [14]. G. Wyszecki, W.S. Stiles, Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, second ed., Wiley-Interscience Publication, New York, 1982., 252-312.