



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
GRAFIČKO INŽENJERSTVO I DIZAJN

Ivana Tomić

Karakterizacija kolorimetrijskih vrednosti otisaka štampanih goniohromatskim pigmentima

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2016



Univerzitet u Novom Sadu
Fakultet tehničkih nauka
Grafičko inženjerstvo i dizajn



Ivana Tomić

**Karakterizacija kolorimetrijskih vrednosti otisaka
štampanih goniohromatskim pigmentima**

-doktorska disertacija-

Novi Sad, 2016.

Istraživanja realizovana u okviru disertacije su potpomognuta sredstvima Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije u okviru Projekta tehnološkog razvoja (broj 35027) *“Razvoj softverskog modela za unapređenje znanja i proizvodnje u grafičkoj industriji”*.

Rezultati istraživanja usko su vezani za bilateralni projekat Republike Srbije i Republike Slovenije *„Development of a method for using commercial digital camera as color measurement device“*.

Deo istraživanja realizovan je u okviru Erasmus Mundus projekta (JoinEU SEE program razmene).

IZJAVA

Ja, Ivana Tomić, izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da ova doktorska disertacija predstavlja isključivo rezultate mog rada u saradnji sa mentorom, da se temelji na mojim naučno-stručnim saznanjima i istraživanjima i da se oslanja na popisanu i navedenu literaturu.

Izjavljujem da nijedan deo ove doktorske disertacije nije napisan na nedozvoljen i neetičan način, preuzimanjem ili prepisivanjem iz bilo kojeg ne citiranog rada, tuđih dela ili rezultata, koji bi bio u suprotnosti sa akademskom moralnošću.

Autorska prava svih rezultata i elemenata koji su dobijeni u doktorskoj disertaciji pripadaju Departmanu za grafičko inženjerstvo i dizajn odnosno Fakultetu tehničkih nauka kao pravnom licu.

Izjavljujem da su istovetne štampana i elektronska verzija doktorske disertacije.

Izjavljujem da sam saglasna da se doktorska disertacija može staviti na trajan uvid u elektronskom obliku.

Potpis kandidata



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

| | |
|--|---|
| Редни број, РБР: | |
| Идентификациони број, ИБР: | |
| Тип документације, ТД: | Монографска публикација |
| Тип записа, ТЗ: | Текстуални штампани материјал |
| Врста рада, ВР: | Докторска дисертација |
| Аутор, АУ: | МСц Ивана Томић |
| Ментор, МН: | Проф. др Драгољуб Новаковић, Проф. др Алеш Хладник |
| Наслов рада, НР: | Карактеризација колориметријских вредности отисака штампаних гониохроматским пигментима |
| Језик публикације, ЈП: | Српски |
| Језик извода, ЈИ: | Српски |
| Земља публиковања, ЗП: | Република Србија |
| Уже географско подручје, УГП: | А.П. Војводина |
| Година, ГО: | 2016 |
| Издавач, ИЗ: | Ауторски репринт |
| Место и адреса, МА: | Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6 |
| Физички опис рада, ФО: (поглавља/страница/цитата/табела/слика/графика/прилога) | 11/222/180/51/46/77/2 |
| Научна област, НО: | Графичко инжењерство и дизајн |
| Научна дисциплина, НД: | Графичко инжењерство и дизајн |
| Предметна одредница/Кључне речи, ПО: | гониохромизам, перласцентни пигменти, карактеризација камере, неуронске мреже |
| УДК | - |
| Чува се, ЧУ: | У библиотеци Факултета техничких наука у Новом Саду |
| Важна напомена, ВН: | - |
| Извод, ИЗ: | У оквиру дисертације предложено је решење за одређивање колориметријских вредности отисака штампаних гониохроматским пигментима на основу одзива дигиталне камере. Предмет рада представљао је развој модела карактеризације камере прилагођеног за фитовање више-угаоних података, као и испитивање утицаја параметара предложене методологије на тачност процене вредности боја камером. Развијени модел, базиран на вештачким неуронским мрежама, омогућио је постизање задовољавајуће прецизности мерења боја, процену вредности боја свих тестираних мерних геометрија на основу снимака у једном мерном углу, а показао је и висок степен адаптивности на промену осветљења које се приликом мерења користи. Модел је оптимизован применом генетског алгорита, чиме је његова ефикасност знатно унапређена. |
| Датум прихватања теме, ДП: | 24.09.2015. |
| Датум одбране, ДО: | |
| Чланови комисије, КО: | Председник: Др Ана Козмидис Петровић, редовни професор |
| | Члан: Др Сандра Дедијер, доцент |
| | Члан: Др Немања Кашиковић, доцент |
| | Члан, ментор 2: Др Алеш Хладник, ванредни професор |
| | Члан, ментор 1: Др Драгољуб Новаковић, редовни професор |



KEY WORDS DOCUMENTATION

| | |
|--|--|
| Accession number, ANO : | |
| Identification number, INO : | |
| Document type, DT : | Monographic Publication |
| Type of record, TR : | Textual material, printed |
| Contents code, CC : | Ph.D. thesis |
| Author, AU : | MSc Ivana Tomić |
| Mentor, MN : | Prof. Ph.D. Dragoljub Novaković, Prof. Ph.D. Aleš Hladnik |
| Title, TI : | Colorimetric Characterization of Prints Enhanced with Goniochromatic Pigments |
| Language of text, LT : | Serbian |
| Language of abstract, LA : | Serbian |
| Country of publication, CP : | Republic of Serbia |
| Locality of publication, LP : | A.P. Vojvodina |
| Publication year, PY : | 2016 |
| Publisher, PB : | Author's reprint |
| Publication place, PP : | Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6 |
| Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes) | 11/222/180/51/46/77/2 |
| Scientific field, SF : | Graphic engineering and design |
| Scientific discipline, SD : | Graphic engineering and design |
| Subject/Key words, S/KW : | goniochromism, pearlescent pigments, camera characterization, neural networks |
| UC | - |
| Holding data, HD : | The Library of the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad |
| Note, N : | - |
| Abstract, AB : | The thesis proposes a solution for colorimetric characterization of prints enhanced with goniochromatic pigments by means of a digital camera. The subject of the research was the development of a camera characterization model adapted to fit multi-angular data and the assessment of the proposed framework parameters impact on the accuracy of camera-based color measurement. The developed model, based on artificial neural networks, enabled accurate color measurement with a satisfactory level of accuracy, estimation of color values of all analyzed measurement geometries on the basis of images obtained in one detection angle, and was proved to be very adaptive to the change of the illuminant used during the measurement. The model was optimized by means of a genetic algorithm, which led to the significant improvement of its efficiency. |
| Accepted by the Scientific Board on, ASB : | 24.09.2015. |
| Defended on, DE : | |
| Defended Board, DB : | President: Ana Kozmidis Petrović, Ph.D., Full Professor |
| | Member: Sandra Dedijer, Ph.D., Assistant Professor |
| | Member: Nemanja Kašiković, Ph.D., Assistant Professor |
| | Member, Mentor 2: Aleš Hladnik, Ph.D., Associate Professor |
| | Member, Mentor 1: Dragoljub Novaković, Ph.D., Full Professor |
| | Mentor's sign |

*"At times, our own light goes out and is rekindled by a spark from another person.
Each of us has cause to think with deep gratitude of those who
have lighted the flame within us."*

A. Schweitzer

Neizmernu zahvalnost na pomoći ukazanoj tokom izrade ove disertacije, ali i na nesebičnoj podršci i veri u mene od početka mog akademskog rada do sada dugujem mom mentoru, profesoru Dragoljubu Novakoviću, bez koga ova doktorska disertacija sigurno ne bi "ugledala svetlost dana". Takođe, želim da se zahvalim i mom drugom mentoru, profesoru Alešu Hladniku, na konstruktivnim komentarima i smernicama koje su u mnogome uticale na konačnu formu ovog rada.

Veliko hvala profesorici Sandri Dedijer na svim diskusijama i sugestijama, kao i vremenu i energiji koje je uložila da sve inicijalne ideje budu sprovedene u delo.

Profesoru Dubravku Čulibrku hvala na tome što je stoički podneo sva moja pitanja i razjasnio sve nedoumice vezane za implementaciju metoda korišćenih u radu.

Zahvalnost dugujem i mojim dragim kolegama sa departmana za Grafičko inženjerstvo i dizajn, koji su imali razumevanja za moje obaveze i omogućili mi da ovo istraživanje privedem kraju.

Deo ovog istraživanja realizovan je pomoću uređaja i materijala sa Departmana za Optiku, Univerziteta u Granadi (Španija). Ovom prilikom se zahvaljujem profesoru Rafaelu Huertasu koji je to omogućio.

I na kraju, hvala onima koji su uvek bili uz mene i koji su mi dali snage i motivacije da istrajem. Mojoj porodici, prijateljima, kao i mom partneru. Bez vaše podrške ne bi bilo ni ovog rada.

Mojoj majci

Predgovor

“When sunlight, which contains red, yellow, green, and blue light, shines on a mud puddle with oil on it, the areas that strongly reflect each of those colors overlap and produce all kinds of combinations which our eyes see as different colors... This phenomenon of colors produced by the partial reflection of white light by two surfaces is called iridescence, and can be found in many places... the more you see how strangely Nature behaves, the harder it is to make a model that explains how even the simplest phenomena actually work.”

R. Feynman

Fenomen goniohromizma, odnosno promene opažene boje objekta sa promenom ugla posmatranja, oduvek je intrigirao naučnike koji su ovu pojavu pokušavali najpre da objasne, a potom i simuliraju veštačkim materijalima. U grafičkoj reprodukciji spomenuti efekat postiže se korišćenjem specijalnih efektnih pigmenata, pri čemu se vrednost reprodukovane boje kontroliše mernim uređajima koji omogućavaju višeuugaono merenja. Ovi uređaji su nefleksibilni, zahtevaju veliku površinu merenja i njima se ne mogu detektovati varijacije u obojenju na površini merenja, karakteristika koja je u procesu kontrole kvaliteta štampanih materijala od velikog značaja.

Sistemi zasnovani na analizi slike uveliko se koriste za procesnu kontrolu parametara štampe poput grešaka registra, reprodukcije teksta, linija i sl., a u dosadašnjim ispitivanjima pokazano je i da se kamere mogu koristiti za procenu vrednosti boja u jednoj mernoj geometriji. Kako njihova primena za više-uugaono merenje boja do sada nije podrobnije ispitivana, ova disertacija predstavlja jedan od prvih koraka u istraživanju navedene problematike.

Motivacija istraživanja zasnovana je na činjenici da se digitalnim kamerama može prevazići veliki broj problema koji se vezuju za merne uređaje. Pored toga, kamere predstavljaju veoma atraktivno rešenje za karakterizaciju vrednosti boja, ne samo zbog svoje fleksibilnosti, već i cene. Sa razvojem tehnologije i napretka u proizvodnji senzora, tačnost detekcije boje može se samo povećavati pa ne čudi činjenica da interesovanje za istraživanja u ovoj oblasti ne jenjava već dve decenije.

Razvoj metode u kojoj se za višeuugaono merenje boja koristi digitalna kamera predstavljalo je svojevrsan izazov s obzirom na to kamere nisu predviđene da scenu koja se snima kodiraju kolorimetrijski tačno, već vizuelno prihvatljivo. Pored metode snimanja, bilo je neophodno razviti i odgovarajući metod za transformisanje RGB vrednosti dobijenih snimanjem kamerom u kolorimetrijske vrednosti, od značaja za objektivno definisanje vrednosti svake boje. U rešavanju ovog problema rukovodilo se osnovama samog fenomena. Naime, kako je goniohromizam prirodni fenomen, za njegovo modeliranje primenjen je pristup koji inspiraciju nalazi upravo u prirodi. Model razvijen u okviru istraživanja zasnovan je na algoritmu veštačkih neuronskih mreža, koje predstavljaju jednu od formi implementacije veštačke inteligencije na način simuliranja funkcionisanja biološke mreže neurona. Na taj način zadati problem je rešavan na isti način kao i svi problemi sa kojima se svakodnevno susrećemo – kroz proces učenja, procene i korekcije grešaka.

Rezime

Osnovna osobina materijala koji se karakterišu kao goniohromatski je da se opažaj njihove boje menja sa promenom ugla posmatranja ili osvetljavanja. Samim tim kvantitativni opis boje goniohromatskih materijala predstavlja svojevrsnu problematiku zbog kompleksne interakcije svetlo-objekat-posmatrač. Kako bi se kolorimetrijske vrednosti ovakvih materijala odredile, neophodno je korišćenje mernih uređaja koji omogućavaju merenje u više mernih geometrija (gonio-spektrofotometara ili gonio-kolorimetara).

U okviru disertacije predstavljeno je i testirano alternativno rešenje za karakterizaciju vrednosti boja otisaka štampanih goniohromatskim pigmentima u kom se, umesto mernog uređaja, koristi digitalna kamera. Princip dobijanja kolorimetrijskih vrednosti na osnovu odziva kamere zasniva se na proceduri karakterizacije kamere, odnosno formiranju funkcije koja vrednosti boja transformiše iz uređajno zavisnih (RGB) u uređajno nezavisne (CIELAB). Stoga je predmet sprovedenog istraživanja obuhvatio razvoj adekvatnog modela karakterizacije kamere, kao i ispitivanje uticaja parametara predložene metodologije na tačnost merenja boja kamerom s ciljem definisanja pristupa u kom će digitalna kamera biti korišćena kao gonio-kolorimetar. Predloženi metodološki okvir razvijen je imajući na umu industrijsku primenu predloženog rešenja, pa su sprovedeni eksperimenti imali za cilj analizu održivosti predloženog pristupa u industrijskim uslovima.

U nizu sprovedenih eksperimenata procenjen je uticaj spektralne raspodele izvora svetla, ambijentalnih uslova, kao i broja uzoraka trening seta na tačnost procene kolorimetrijskih vrednosti goniohromatskih štampanih otisaka. Pored toga, procenjene su mogućnosti optimizacije predloženog pristupa kako bi se skratilo vreme trajanja pojedinih operacija i povećala njegova efikasnost.

Model razvijen u okviru istraživanja, baziran na empirijskom principu karakterizacije kamere i primeni veštačkih neuronskih mreža, pokazao se kao veoma precizan pri određivanju kolorimetrijskih vrednosti boja u svim procenjivanim geometrijama merenja. Na osnovu eksperimentalnih rezultata zaključeno je da se tačnost procene vrednosti boja primenom neuronskih mreža ne umanjuje ni ukoliko se prilikom snimanja uzoraka koriste izvori svetla čije spektralne raspodele do izvesne mere odstupaju od raspodele standardnih iluminanata, kao ni u slučajevima kada ambijentalno osvetljenje nije strogo kontrolisano. Navedeni zaključci govore u prilog adaptivnosti razvijenog modela i otvaraju niz mogućnosti za njegovu praktičnu primenu. Procenom uticaja veličine trening seta na tačnost određivanja kolorimetrijskih vrednosti došlo se do zaključka da se pri merenju goniohromatskih uzoraka kamerom može očekivati manja tačnost merenja u odnosu na merenje uzoraka koji ne poseduju goniohromatske osobine.

Pored toga, pokazano je da se vrednosti boja svih analiziranih mernih geometrija mogu uspešno odrediti na osnovu snimaka dobijenih u jednom mernom uglu, čime se fleksibilnost i efikasnost modela znatno povećava. Dodatno unapređenje modela ostvareno je pristupom baziranom na genetskom algoritmu kojim je omogućen izbor minimalnog broja uzoraka trening seta za postizanje definisanog stepena tačnosti merenja. Zaključci istraživanja predstavljaju dobru osnovu za dalji razvoj industrijski primenljivog rešenja merenja boja goniohromatskih uzoraka baziranog na primeni digitalnih kamera.

Ključne reči: goniohromizam, perlascentni pigmenti, karakterizacija kamere, neuronske mreže

Abstract

A fundamental property of materials characterized as goniochromatic is that the perception of their color alters with the change of the angle of observation or illumination. Thus a quantitative description of goniochromatic materials color is rather problematic due to the complexity of interaction between the illumination, object, and observer. In order to determine colorimetric values of such materials, it is necessary to use devices that enable measuring in multiple measurement geometries (gonio-spectrophotometers or gonio-colorimeters).

The thesis presents and tests an alternative solution for colorimetric characterization of prints enhanced with goniochromatic pigments in which, instead of a measuring device, a digital camera is used. The principle of obtaining colorimetric values from the camera response rests on the procedure of camera characterization, i.e. on the method of forming a function that transforms the device dependent- (RGB) into device independent color values (CIELAB). Therefore, the subject of the research was the development of an adequate camera characterization model and the assessment of the proposed method parameters impact on the accuracy of camera-based color measurement in order to define the approach in which a digital camera will be used as a gonio-colorimeter. The proposed methodological framework has been developed keeping in mind the industrial application of the proposed solution. Hence, the experiments conducted for this purpose aimed at analyzing the sustainability of the proposed approach in industrial conditions.

A series of experiments were conducted in order to assess the influence of the spectral power distribution of the light source, ambient light conditions, as well as the number of training set samples on the accuracy of colorimetric measurement of goniochromatic prints. Moreover, we assessed the optimization possibilities of the proposed approach in order to reduce the duration of individual operations and to increase its efficiency.

The model developed hereby, based on the empirical camera characterization and the use of artificial neural networks, proved to be very accurate in determining the colorimetric values of all evaluated measuring geometries. Based on the experimental results, it was concluded that the accuracy of colorimetric estimation by means of neural networks does not decrease if the spectral power distribution of the light source used during the image acquisition deviates to a certain extent from the standard illuminant distribution, neither does it in cases when ambient illumination is not strictly controlled. These conclusions indicate the adaptability of the model and open up a range of possibilities for its practical application. The assessment of the impact of training set size on the accuracy of camera-based color measurement led to the conclusion that in the case of goniochromatic samples lower accuracy of color measurement is to be expected in relation to the measurement of non-goniochromatic samples.

In addition, it was proved that the color values of all analyzed measurement geometries can be estimated on the basis of images obtained in one detection angle, thus the flexibility and efficiency of the model increased significantly. The additional model improvement was achieved by means of a genetic algorithm that enabled the selection of a minimal number of training set samples for achieving a defined degree of color measurement accuracy. The research provides a good foundation for the further development of sustainable solutions for color measurement of goniochromatic samples based on usage of digital cameras.

Keywords: goniochromism, pearlescent pigments, camera characterization, neural networks

Spisak slika

| | |
|--|----|
| Slika 2.1. Primeri goniohromizma u prirodi (a) kutikula ženke zlatnog jelenka, (b) unutrašnjost školjke <i>Haliotis iris</i> , (c) mehur sapunice | 5 |
| Slika 2.2. Šematski prikaz interferencije na tankom filmu (izvor: Kinoshita et al, 2008) | 6 |
| Slika 2.4. Šematski prikaz interferencije na više slojeva (izvor: Kinoshita et al, 2008) | 8 |
| Slika 2.5. SEM slika 3D fotoničnog kristala koji se sastoji od niza SiO ₂ sfera prečnika 300 nm (izvor: Sakoda, 2001) | 8 |
| Slika 2.6. Razlaganje svetlosti po principu difrakcije (izvor: Darling, 2015) | 9 |
| Slika 2.7. Podela pigmenata prema načinu na koji reaguju sa svetlošću | 10 |
| Slika 2.8. (a) Snimak poprečnog preseka ljuspice perlascentnog pigmenta dobijen transmissionim elektronskim mikroskopom. Na snimku se uočava osnovni mica sloj i sloj titanijum dioksida veoma precizno deponovanog na osnovnom sloju (izvor: Maile et al, 2005); (b) Poprečni presek ljuspice simetričnog višeslojnog pigmenta – substrat je mica, dok su slojevi simetrično raspoređeni posmatrano od centra preseka na način: TiO ₂ -SiO ₂ -TiO ₂ (izvor: Klein, 2010) | 12 |
| Slika 2.9. Mikroskopski snimak perlascentnog pigmenta (mica + rutil) (a) snimak u svetlom polju, (b) snimak u tamnom polju (izvor: Klein, 2010) | 12 |
| Slika 2.10. Šematski dijagram na kom je prikazana fazna razlika interferentnih zraka L1 i L2 (izvor: Pfaff, 2008) | 13 |
| Slika 2.11. Svetlost komplementarne boje interferentnoj se u slučaju (a) crne podloge - potpuno absorbuje, (b) bele podloge - potpuno reflektuje, (c) podloge u boji – reflektuje u određenoj meri u zavisnosti od pigmenta osnove (izvor: Klein, 2010) | 14 |
| Slika 2.12. Reflektanse mica substrata sa različitim debljinama TiO ₂ sloja (merenje vršeno na crnoj podlozi, $d_e/8^\circ$ geometrija) (izvor: Klein, 2010) | 14 |
| Slika 2.13. Izgled opažene interferentne boje različitih perlascentnih pigmenata (izvor: Pfaff, 2009) | 15 |
| Slika 2.14. Interakcija izvora svetla, objekta posmatranja i posmatrača pri opažanju boja | 19 |
| Slika 2.15. Grafički prikaz spektralnih kriva i njima pripadajućih boja | 20 |
| Slika 2.16. Spektralna raspodela snage (a) bele LED sijalice, (b) inkadescentne sijalice, (c) fluorescentne sijalice (izvor: Admesy, 2015) | 21 |
| Slika 2.17. Grafički prikaz boje svetlosnog izvora u zavisnosti od njegove temperature (izražene u K) | 21 |
| Slika 2.18. Spektralne raspodele izvora svetla istih odnosnih temperatura boje (izvor: WangMoreno) | 21 |
| Slika 2.19. SPD standardnih iluminanata (izvor: Fairchild, 2005) | 22 |

| | |
|---|----|
| Slika 2.20. Izgled reflektovane svetlosti sa objekta u zavisnosti od izvora svetla (a) standardno osvetljenje D65, (b) standardno osvetljenje A (izvor: Konica Minolta, 2015) | 22 |
| Slika 2.21. Prikaz funkcija usaglašenog stimula za CIE standardne posmatrače 2° i 10° (izvor: Ohno, 2015) | 25 |
| Slika 2.22. (a) Usmerena 45°x/0° geometrija, (b) kružna 45°c/0° geometrija | 28 |
| Slika 2.23. Merenje (a) u ravni, (b) van ravni upadnog zračenja. Sa α_i označen je ugao izvora svetla, sa α_d - ugao detektora, dok je sa α_a označen azimut | 29 |
| Slika 2.24. Definisane pozicije izvora zračenja i detektora u odnosu na normalu na uzorak (izvor: Chorro et al, 2015) | 30 |
| Slika 2.25. Definisane pozicije izvora zračenja i detektora (a) princip označavanja pozicije detektora, (b) cis i trans geometrije (izvor: Martínez-Verdú, 2011) | 30 |
| Slika 2.26. Merne geometrije za merenje interferentnih pigmenata definisane standardom ASTM E2539 – 12: izvori svetla pod uglom od (a) 45°, (b) 15°, kao i odgovarajuće pozicije detektora | 32 |
| Slika 2.27. Dominantne boje kod goniohromatskih materijala (izvor: Martínez-Verdú, 2011) | 32 |
| Slika 2.28. (a) Izgled gonio-spektrofotometra X-Rite MA98, kao i (b) njegovi osnovni delovi: 1- jedan od izvora svetla (15° u odnosu na normalu), 2 - jedan od detektora, 3 - motor za dinamičko rotiranje uzoraka koji omogućava promenu pozicije 31 filtera u boji za razdvajanje svetlosti na delove spektra (izvor: X-Rite, 2010) | 33 |
| Slika 2.29. Automatska kontrola reprodukcije boja u automobilskoj industriji korišćenjem uređaja BYK-mac ROBOTIC (izvor: Eid, 2013) | 34 |
| Slika 2.30. Princip određivanja vrednosti boja uzorka (a) spektrofotometrom, (b) digitalnom kamerom | 35 |
| Slika 2.31. Princip empirijske karakterizacije kamere (a) Određivanje veze između RGB i kolorimetrijskih vrednosti trening seta boja, (b) procena kolorimetrijskih vrednosti za boju iz test seta | 37 |
| Slika 2.32. Model neurona (izvor: Gurney, 2007) | 42 |
| Slika 2.33. Struktura neuronske mreže (izvor: Yu, 2007) | 43 |
| Slika 5.1. Algoritam toka istraživanja | 48 |
| Slika 5.2. Izgled DocuColor 252 digitalne mašine za štampu (izvor: Xerox Corporation, 2010) | 50 |
| Slika 5.3. Izgled sito štamparske mašine S-6S4T.B (izvor: Centropapir, 2015) | 51 |
| Slika 5.4. Izgled gonio-spektrofotometra Gretag Macbeth Auto-Eye 640 sa kalibracionom pločicom | 52 |
| Slika 5.5. Izgled spektrofotometra Eye-One Pro | 53 |

| | |
|---|----|
| Slika 5.6. Digitalna kamera Canon EOS 550D i kit objektiv EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS (izvor: Canon, 2015) | 53 |
| Slika 5.7. Svetlomer Sekonic L-758D DigitalMaster | 54 |
| Slika 5.8. (a) Šematski prikaz stalka i (b) njegov izgled | 55 |
| Slika 5.9. Izgled improvizovane mračne komore | 55 |
| Slika 5.10. Test karte korišćene u istraživanju (a) Digital Color Checker SG test karta, (b) Color Checker White Balance test karta (izvor: X-Rite, 2009) | 56 |
| Slika 5.11. Izgled radnog okruženja programa Babel Color CT&A, deo: Spectral Tools | 58 |
| Slika 5.12. Izgled test karte korišćene u radu (izvor: Tomić et al, 2016) | 61 |
| Slika 5.13. Izgled izabranog seta boja u formi projekcija na ose CIELAB prostora boja: (a) a^*-b^* projekcija, (b) a^*-L^* projekcija, (c) b^*-L^* projekcija (izvor: Tomić et al, 2016) | 61 |
| Slika 5.14. Merne geomerije korišćene u radu | 63 |
| Slika 5.15. Položaj izvora svetla prilikom snimanja uzoraka kamerom (a) pogled od napred, (b) pogled od gore. Sa 1 su označeni izvori svetla, 2 – kamera, 3 – uzorak koji se digitalizuje, 4 – pokrivka. | 64 |
| Slika 5.16. Položaj izvora svetla (fluorescentne lampe) prilikom snimanja uzoraka kamerom (a) pogled od napred, (b) pogled od gore. Sa 1 je označen izvor svetla, 2 – kamera, 3 – uzorak koji se digitalizuje, 4 – pokrivka. | 64 |
| Slika 5.17. Izgled nosača fluorescentnih lampi i njegov položaj pri snimanju u uglu od $45^\circ/asp75^\circ$ (a) pogled od napred, (b) pogled sa strane (izvor: Tomić et al, 2016) | 65 |
| Slika 5.18. Izgled mernog uređaja sa dodatkom difuzera i poklopca za kalibraciju | 65 |
| Slika 5.19. Pozicija spektrofotometra pri merenju upadnog zračenja (na slici je prikazan slučaj kada su prilikom merenja korišćene fluorescentne lampe) | 66 |
| Slika 5.20. Spektralna raspodela LED sijalica korelisane temperature boje koja odgovara standardnom iluminantu (a) D65 i (b) A, sa i bez korišćenja difuzora | 67 |
| Slika 5.21. Relativne spektralne snage izvora svetla simulatora standardnog osvetljenja (a) D65, (b) A, zajedno sa raspodelama snage pripadajućih iluminanata | 68 |
| Slika 5.22. Položaj svetlomera pri merenju upadnog svetla | 69 |
| Slika 5.23. Polja Gretag Macbeth Color Checker SG test karte korišćena za procenu šuma | 71 |
| Slika 5.24. Korišćenje jedne neuronske mreže za estimaciju vrednosti boja svih geometrija (a) postavka 1, (b) postavka 2 | 83 |
| Slika 6.1. CIELAB ($D65/10^\circ$) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a^*-b^* ose, (b) L^*-a^* ose, (c) L^*-b^* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji $45^\circ/asp15^\circ$ | 86 |

| | |
|---|----|
| Slika 6.2. CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a*-b* ose, (b) L*-a* ose, (c) L*-b* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji 45°/asp45° | 86 |
| Slika 6.3. CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a*-b* ose, (b) L*-a* ose, (c) L*-b* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji 45°/asp75° | 86 |
| Slika 6.4. CIELAB (A/10°) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a*-b* ose, (b) L*-a* ose, (c) L*-b* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji 45°/asp15° | 87 |
| Slika 6.5. CIELAB (A/10°) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a*-b* ose, (b) L*-a* ose, (c) L*-b* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji 45°/asp45° | 87 |
| Slika 6.6. CIELAB (A/10°) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a*-b* ose, (b) L*-a* ose, (c) L*-b* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji 45°/asp75° | 87 |
| Slika 6.7. CIELAB a*-b* dijagram vrednosti bolja polja test karte za (a) standardno osvetljenje D65, (b) standardno osvetljenje A. Merni ugao kodiran je bojama. | 88 |
| Slika 6.8. Aspekularni pomeraji koji pokazuju efekat promene boje sa uglom posmatranja za potpuno zasićenu crvenu (polje L17 test karte), zelenu (L18), plavu (L19) i sivu boju srednje svetline (GS13) u (a) CIE a*-b* dijagramu, (b) CIE L*-C* dijagramu. Geometrije merenja označene su različitim simbolima, dok CIELAB vrednosti odgovaraju D65/10°. | 88 |
| Slika 6.9. Aspekularni pomeraji koji pokazuju efekat promene boje sa uglom posmatranja za potpuno zasićenu crvenu (polje L17 test karte), zelenu (L18), plavu (L19) i sivu boju srednje svetline (GS13) u (a) CIE a*-b* dijagramu, (b) CIE L*-C* dijagramu. Geometrije merenja označene su različitim simbolima, dok CIELAB vrednosti odgovaraju A/10°. | 89 |
| Slika 6.10. Srednja vrednost ΔE^*_{ab} razlika izmerenih i estimiranih vrednosti boja za izvore svetla simulatore D65 i definisane merne uglove | 90 |
| Slika 6.11. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 15° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) fluorescentne lampe, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED | 91 |
| Slika 6.12. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 45° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) fluorescentne lampe, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED | 91 |
| Slika 6.13. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 75° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) fluorescentne lampe, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED | 91 |
| Slika 6.14. Procenat uzoraka estimiranih sa zadovoljavajućim stepenom tačnosti za izvore svetla D65 | 92 |
| Slika 6.15. Srednje apsolutne vrednosti razlika CIELAB kanala za izvore svetla D65 i merne uglove od (a) 15° asp, (b) 45° asp i (c) 75° asp | 93 |
| Slika 6.16. Srednja ΔE^*_{ab} vrednost u zavisnosti od izvora svetla (D65_1 označava fluorescentne lampe, D65_2 – fluorescentne sijalice, D65_3 - LED) i ugla snimanja | 95 |
| Slika 6.17. Srednja vrednost ΔE^*_{ab} razlika izmerenih i estimiranih vrednosti boja za izvore svetla A i definisane merne uglove | 98 |

| | |
|--|-----|
| Slika 6.18. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 15° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) inkadescentne sijalice, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED | 99 |
| Slika 6.19. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 45° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) inkadescentne sijalice, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED | 99 |
| Slika 6.20. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 75° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) inkadescentne sijalice, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED | 99 |
| Slika 6.21. Procenat uzoraka estimiranih sa zadovoljavajućim stepenom tačnosti za izvore svetla A | 100 |
| Slika 6.22. Srednje apsolutne vrednosti razlika CIELAB kanala za izvore svetla A i merne uglove od (a) 15° asp, (b) 45° asp i (c) 75° asp | 101 |
| Slika 6.23. Srednja ΔE^*_{ab} vrednost u zavisnosti od izvora svetla (A_1 označava inkadescentne sijalice, A_2 – fluorescentne sijalice, A_3 - LED) i ugla snimanja | 102 |
| Slika 6.24. Prikaz (a) iluminanse, (b) temperature boje osvetljenja u funkciji vremena u slučaju ambijentalnog svetla 1 | 104 |
| Slika 6.25. Prikaz (a) iluminanse, (b) temperature boje osvetljenja u funkciji vremena u slučaju ambijentalnog svetla 2 | 105 |
| Slika 6.26. Prikaz (a) iluminanse, (b) temperature boje osvetljenja u funkciji vremena u slučaju ambijentalnog svetla 3 | 105 |
| Slika 6.27. Srednja vrednost ΔE^*_{ab} razlika izmerenih i estimiranih vrednosti boja za testirana ambijentalna svetla | 106 |
| Slika 6.28. Procenat uzoraka estimiranih sa definisanim stepenom tačnosti za testirana ambijentalna svetla | 106 |
| Slika 6.29. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 15° asp za slučaj (a) ambijentalnog svetla 1, (b) ambijentalnog svetla 2, (c) ambijentalnog svetla 3 | 107 |
| Slika 6.30. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 45° asp za slučaj (a) ambijentalnog svetla 1, (b) ambijentalnog svetla 2, (c) ambijentalnog svetla 3 | 107 |
| Slika 6.31. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 75° asp za slučaj (a) ambijentalnog svetla 1, (b) ambijentalnog svetla 2, (c) ambijentalnog svetla 3 | 107 |
| Slika 6.32. Srednje apsolutne vrednosti razlika CIELAB kanala za korišćena ambijentalna svetla i merne uglove od (a) 15° asp, (b) 45° asp i (c) 75° asp | 108 |
| Slika 6.33. Srednja ΔE^*_{ab} vrednost u zavisnosti od ambijentalnog svetla (Amb_1 označava ambijentalno svetlo 1, Amb_2 – ambijentalno svetlo 2, Amb_3 – ambijentalno svetlo 3) i ugla snimanja | 110 |
| Slika 6.34. Prosek srednjih ΔE^*_{ab} vrednosti u zavisnosti od broja uzoraka trening seta | 112 |
| Slika 6.35. Prosek maksimalnih ΔE^*_{ab} vrednosti u zavisnosti od broja uzoraka trening seta | 112 |

| | |
|---|-----|
| Slika 6.36. Prosek minimalnih ΔE^*_{ab} vrednosti u zavisnosti od broja uzoraka trening seta | 112 |
| Slika 6.37. Prosečne apsolutne greške CIELAB kanala za merni ugao od (a) 15° asp, (b) 45° asp i (c) 75° asp | 114 |
| Slika 6.38. Pareto front na kome su prikazana optimalna rešenja za definisane fukcije cilja | 115 |
| Slika 6.39. Izgled (a) celog, (b) redukovanog seta boja u formi projekcija u CIELAB prostoru boja. Boja označava ugao u kom je pojedini uzorak meren. | 116 |
| Slika 7.1. Prikaz raspodele RGB vrednosti boja test karte dobijenih snimanjem pod izvorima svetla simulatorima osvetljenja D65 u uglu od (a) 15° asp, (b) 45° asp, (c) 75° asp | 121 |
| Slika 7.2. Prikaz RGB vrednosti boja test karte dobijenih snimanjem pod izvorima svetla simulatorima osvetljenja A u uglu od (a) 15° asp, (b) 45° asp, (c) 75° asp | 122 |
| Slika 7.3. (a) RGB vrednosti dva uzorka detektovanih kamerom u uglu od 15° asp (gore) i 45° asp (dole) i njima pripadajuće CIELAB vrednosti, (b) reflektanse datih uzoraka (izvor: Tomić et al, 2016) | 125 |

Spisak tabela

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1. Korelacija između veličine ljuspica perlascentnih pigmenata, podloge za štampu i odgovarajuće linijature raster valjka u flekso štampi (izvor: Weitzel, 2008) | 17 |
| Tabela 2.2. Preporuke za izbor linijature cilindra za štampu u dubokoj štampi na osnovu veličine ljuspice perlascentnog pigmenta (izvor: Merck KGaA, 2015) | 18 |
| Tabela 2.3. Preporuke za izbor linijature raster valjka u zavisnosti od veličine pigmenta (izvor: Merck KGaA, 2015) | 18 |
| Tabela 2.4. Klase indeksa metamerizma za simulatore dnevnog svetla | 24 |
| Tabela 2.5. Pregled mernih geometrija komercijalnih gonio-spektrofotometara (izvori: X-Rite, 2010; Konica Minolta, 2015; Weixel, 2010; Chorro et al, 2014; Cramer & Gabel, 2001) | 33 |
| Tabela 5.1. Tehničke karakteristike Xerox DocuColor 252 digitalne mašine (izvor: Xerox Corporation, 2010) | 50 |
| Tabela 5.2. Karakteristike sito štamparske mašine S-6S4T.B (izvor: Centropapir, 2015) | 50 |
| Tabela 5.3. Tehničke karakteristike Gretag Macbeth Auto-Eye 640 gonio-spektrofotometra (izvor: GretagMacbeth, 2001) | 51 |
| Tabela 5.4. Tehničke karakteristike spektrofotometra Eye-One Pro (izvor: X-Rite, 2006) | 52 |
| Tabela 5.5. Karakteristike digitalne kamere Canon EOS 550D (izvor: Canon, 2015) | 53 |
| Tabela 5.6. Karakteristike svetlomera Sekonic L-758D DigitalMaster (izvor: Sekonic Corp., 2014) | 54 |
| Tabela 5.7. Fizičko-hemijske osobine Iriodin® 221 Rutil Feinblau perlascentnih pigmenata (izvor: Merck KGaA, 2015b) | 57 |
| Tabela 5.8. Specifikacije svetlosnih izvora korišćenih u eksperimentu (nominalne vrednosti) | 60 |
| Tabela 5.9. Rezultati procene reprodukcije boja svetlosnih izvora korišćenih u eksperimentu | 66 |
| Tabela 5.10. Iluminansa zračenja merena na centru merne površine | 66 |
| Tabela 5.11. Rezultati procene reprodukcije boja LED izvora nakon smanjenja intenziteta njihovog zračenja | 67 |
| Tabela 5.12. Izmerene vrednosti iluminanse na centru merne površine za LED osvetljenja nakon smanjenja intenziteta njihovog zračenja | 67 |
| Tabela 5.13. Vrednosti brzine blende za definisane ISO vrednosti i otvore blende (za sve izvore svetla korišćene u testiranju) | 70 |
| Tabela 5.14. Izmerene CIE LAB vrednosti polja (D65/2°) | 72 |
| Tabela 5.15. RGB vrednosti polja test karte u sRGB prostoru boja skalirane u rang od 0-1 | 72 |
| Tabela 5.16. Procenjene vrednosti šuma za slike snimljene sa ISO vrednošću od 100 | 73 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 5.17. Procenjene vrednosti šuma za slike snimljene sa ISO vrednošću od 200 | 74 |
| Tabela 6.1. Rezultati procene kolorimetrijskih vrednosti pri korišćenju izvora svetla simulatora standardnog osvetljenja D65 u zavisnosti od ugla merenja | 90 |
| Tabela P6.2. Rezultati Levene testa procene jednakosti varijanse unutar grupa - podela prema boji uzorka, izvoru svetla (simulatori st. osvetljenja D65) i uglu merenja | 94 |
| Tabela 6.3. Rezultati statističke analize uticaja uzorka, izvora svetla (simulatora standardnog osvetljenja D65) i ugla merenja, kao i njihovih združenih uticaja na tačnost procene kolorimetrijskih vrednosti (3-faktorska ANOVA -procena efekta unutar subjekata) | 94 |
| Tabela 6.3. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja D65 (1 – fl. lampe, 2 –fl. sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 15° asp | 96 |
| Tabela 6.4. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja D65 (1 – fl. lampe, 2 –fl. sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 45° asp | 97 |
| Tabela 6.5. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja D65 (1 – fl. lampe, 2 –fl. sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 75° asp | 97 |
| Tabela 6.6. Rezultati procene kolorimetrijskih vrednosti pri korišćenju izvora svetla simulatora st. osvetljenja A u zavisnosti od ugla merenja | 98 |
| Tabela 6.7. Rezultati Levene testa procene jednakosti varijanse unutar grupa - podela prema boji uzorka, izvoru svetla (simulatori st. osvetljenja A) i uglu merenja | 101 |
| Tabela 6.8. Rezultati statističke analize uticaja uzorka, izvora svetla (simulatora standardnog osvetljenja A) i ugla merenja, kao i njihovih združenih uticaja na tačnost procene kolorimetrijskih vrednosti (3-faktorska ANOVA -procena efekta unutar subjekata) | 102 |
| Tabela 6.9. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja A (1 – inkadescentne sijalice, 2 –florescentne sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 15° asp | 103 |
| Tabela 6.10. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja A (1 – inkadescentne sijalice, 2 –florescentne sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 45° asp | 103 |
| Tabela 6.11. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja A (1 – inkadescentne sijalice, 2 –florescentne sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 75° asp | 104 |
| Tabela 6.12. Rezultati greške procene kolorimetrijskih vrednosti pri snimanju u različitim ambijentalnim uslovima i mernim uglovima | 106 |
| Tabela 6.13. Rezultati Levene testa procene jednakosti varijanse unutar grupa - podela prema boji uzorka, ambijentalnom svetlu korišćenom prilikom snimanja i uglu merenja | 109 |
| Tabela 6.14. Rezultati statističke analize uticaja uzorka, ambijentalnog svetla i ugla merenja, kao i njihovih združenih uticaja na tačnost procene kolorimetrijskih vrednosti (3-faktorska ANOVA -procena efekta unutar subjekata) | 109 |
| Tabela 6.15. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za testirana ambijentalna osvetljenja i merni ugao od 15° asp | 110 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 6.16. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za testirana ambijentalna osvetljenja i merni ugao od 45° asp | 111 |
| Tabela 6.17. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za testirana ambijentalna osvetljenja i merni ugao od 75° asp | 111 |
| Tabela 6.18. Greške procene kolorimetrijskih vrednosti sa promenom broja uzoraka trening seta za ugao merenja od 15° asp | 113 |
| Tabela 6.19. Greške procene kolorimetrijskih vrednosti sa promenom broja uzoraka trening seta za ugao merenja od 45° asp | 113 |
| Tabela 6.20. Greške procene kolorimetrijskih vrednosti sa promenom broja uzoraka trening seta za ugao merenja od 75° asp | 113 |
| Tabela 6.21. Greške procene kolorimetrijskih vrednosti pri korišćenju jedne neuronske mreže | 115 |
| Tabela 6.22. Greške procene pojedinačnih CIELAB kanala pri korišćenju jedne neuronske mreže | 115 |
| Tabela 6.23. Greške procene kolorimetrijskih vrednosti pri korišćenju jedne neuronske mreže i redukovanog trening seta | 117 |
| Tabela 6.24. Greške procene pojedinačnih CIELAB kanala pri korišćenju jedne neuronske mreže i redukovanog trening seta | 117 |
| Tabela 6.25. Greške estimacije pri korišćenju jedne neuronske mreže (4-18-3) i RGB vrednosti za jedan od mernih uglova | 117 |
| Tabela 6.26. Greške estimacije pojedinačnih CIELAB kanala pri korišćenju jedne neuronske mreže (4-18-3) i RGB vrednosti za jedan od mernih uglova | 118 |

Spisak priloga

Prilog 1

| | |
|---|-----|
| Tabela P1. 1. Vrednosti boja test karte definisane u CIELAB prostoru boja | 149 |
|---|-----|

Prilog 2

| | |
|---|-----|
| Slika P2.1. Reflektanse polja A1-L1 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 152 |
| Slika P2.2. Reflektanse polja A2-L2 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 153 |
| Slika P2.3. Reflektanse polja A3-L3 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 154 |
| Slika P2.4. Reflektanse polja A4-L4 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 155 |
| Slika P2.5. Reflektanse polja A5-L5 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 156 |
| Slika P2.6. Reflektanse polja A6-L6 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 157 |
| Slika P2.7. Reflektanse polja A7-L7 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 158 |
| Slika P2.8. Reflektanse polja A8-L8 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 159 |
| Slika P2.9. Reflektanse polja A9-L9 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 160 |
| Slika P2.10. Reflektanse polja A10-L10 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 161 |
| Slika P2.11. Reflektanse polja A11-L11 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 162 |
| Slika P2.12. Reflektanse polja A12-L12 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 163 |
| Slika P2.13. Reflektanse polja A13-L13 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 164 |

| | |
|---|-----|
| Slika P2.14. Reflektanse polja A14-L14 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 165 |
| Slika P2.15. Reflektanse polja A15-L15 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 166 |
| Slika P2.16. Reflektanse polja A16-L16 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 167 |
| Slika P2.17. Reflektanse polja A17-L17 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 168 |
| Slika P2.18. Reflektanse polja A18-L18 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 169 |
| Slika P2.19. Reflektanse polja A19-L19 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 170 |
| Slika P2.20. Reflektanse polja A20-L20 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 171 |
| Slika P2.21. Reflektanse polja A21-L21 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 172 |
| Slika P2.22. Reflektanse polja A22-L22 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 173 |
| Slika P2.23. Reflektanse polja GS1-GS15 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 174 |
| Slika P2.24. Reflektanse polja GS16-GS26 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja | 175 |
| | |
| Tabela P2. 1. Izmerene CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima | 176 |
| Tabela P2. 2. Izmerene CIELAB (A/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima | 182 |

Spisak skraćenica

- ANN – *Artificial Neural Networks* – Veštačke neuronske mreže
- AHD - *Adaptive Homogeneity-Directed* - Adaptivna homogenošću-upravljana (interpolacija)
- BRDF – *Bidirectional Reflectance Distribution Function* - Bidirekcionalna funkcija distribucije reflektanse
- CCT - *Correlated Color Temperature* – Odnosna temperatura boje
- CCD – *Charge-Coupled Device* – Uređaj (element) sa spregnutim naelektrisanjem
- CMOS - *Complementary Metal–Oxide–Semiconductor* – Komplementarni metal-oksidi poluprovodnik
- CIE - *Commission Internationale de l' Eclairage* - Međunarodna komisija za osvetljenje
- CRI - *Color Rendering Index* - Indeks prikaza boje
- GA – *Genetic Algorithm* – Genetiski algoritam
- HDR – *High Dynamic Range* – Veliki dinamički opseg
- LED – *Light Emitting Diode* – Diode koje emituju svetlo
- LCD – *Liquid Crystal Display* – Monitor sa tečnim kristalima
- LOO – *Leave One Out* – Pojedinačna unakrsna validacija
- LUT – *Look-Up Table* – Ogljedna tabela
- MI - *Metamerix Index* - Indeks metamerizma
- MLP – *Multi Layer Perceptron* – Višeslojni perceptron
- MSE – *Mean Squared Error* – Srednja kvadratna greška
- PPG – *Patterned Pixel Grouping* – Grupisanje piksela na osnovu šeme
- PSNR - *Peak Signal to Noise Ratio* - Vršni odnos signal-šum
- SNR - *Signal to Noise Ratio* - Odnos signal-šum
- SPD – *Spectral Power Distribution* – Spektralna distribucija snage
- VNG - *Variable Number of Gradients* – Promenljiv broj gradijenata

Sadržaj

| | |
|---|------|
| Predgovor | i |
| Rezime | ii |
| Abstract | iv |
| Spisak slika..... | vi |
| Spisak tabela..... | xii |
| Spisak priloga | xv |
| Spisak skraćenica..... | xvii |
| | |
| 1. Uvod | 1 |
| 1.1. Obrazloženje teme i okvira istraživanja | 3 |
| 1.2. Pregled sadržaja disertacije..... | 4 |
| | |
| 2. Aktuelno stanje u oblasti istraživanja | 5 |
| 2.1. Goniohromatski materijali u štampi..... | 5 |
| 2.1.1. Pojam i mehanizmi goniohromizma..... | 5 |
| 2.1.2. Pigmenti za postizanje goniohromatskog efekta | 9 |
| 2.1.3. Perlascentni pigmenti..... | 11 |
| 2.1.4. Optičke osobine perlascentnih pigmenata | 12 |
| 2.1.5. Primena perlascentnih pigmenata u grafičkoj reprodukciji | 15 |
| 2.1.6. Specifičnosti štampe perlascentnih pigmenata | 17 |
| 2.2. Određivanje vrednosti boja u grafičkoj reprodukciji..... | 19 |
| 2.2.1. Kvantitativni opis boje..... | 19 |
| 2.2.2. Standardno osvetljenje | 20 |
| 2.2.3. Sličnost izvora svetla sa standardnim osvetljenjem..... | 23 |
| 2.2.4. Standardni posmatrač..... | 24 |
| 2.2.5. Kolorimetrijske vrednosti boja | 25 |
| 2.2.6. Uređaji za merenje boja | 26 |
| 2.3. Karakterizacija vrednosti boja goniohromatskih materijala | 29 |
| 2.3.1. Princip merenja boja goniohromatskih materijala..... | 29 |
| 2.3.2. Merne geometrije za merenje goniohromatskih materijala..... | 30 |

| | |
|--|----|
| 2.3.3. Merni uređaji - industrijska i laboratorijska rešenja | 32 |
| 2.4. Digitalna kamera kao uređaj za merenje boja | 35 |
| 2.4.1. Princip određivanja boje na osnovu odziva kamere | 35 |
| 2.4.2. Metode kolorimetrijske karakterizacije digitalne kamere | 37 |
| 2.4.3. Ograničenja kamere kao uređaja za merenje boja | 38 |
| 2.4.4. Faktori koji utiču na tačnost karakterizacije kamere | 40 |
| 2.4.5. Tačnost merenja boja digitalnom kamerom | 41 |
| 2.4.6. Veštačke neuronske mreže kao metod karakterizacije digitalne kamere | 41 |
| 3. Problem, predmet i cilj istraživanja..... | 45 |
| 4. Hipoteze istraživanja | 46 |
| 5. Metodologija istraživanja | 47 |
| 5.1. Plan i etape istraživanja..... | 47 |
| 5.2. Definisane nepromenljivih i varijabilnih parametara istraživanja..... | 49 |
| 5.3. Priprema istraživanja..... | 50 |
| 5.3.1. Uređaji, materijali i programski alati korišćeni u istraživanju | 50 |
| 5.3.2. Izbor izvora svetla..... | 59 |
| 5.3.3. Izbor boja test karte | 60 |
| 5.3.4. Priprema štampanih uzoraka | 61 |
| 5.4. Metode određivanja vrednosti boja goniohromatskih uzoraka | 62 |
| 5.4.1. Definisane mernih geometrija..... | 62 |
| 5.4.2. Određivanje CIELAB vrednosti boja mernim uređajem | 63 |
| 5.4.3. Procedura snimanja uzoraka digitalnom kamerom | 63 |
| 5.4.4. Karakterizacija izvora svetla u uslovima snimanja | 65 |
| 5.4.5. Definisane podešavanja kamere | 68 |
| 5.4.6. Metode obrade slike za dobijanje vrednosti boje..... | 74 |
| 5.5. Metode procene uticaja varijabilnih parametara postavke na tačnost estimacije boje..... | 76 |
| 5.5.1. Metod karakterizacije kamere | 76 |
| 5.5.2. Metod procene uticaja spektralne raspodele izvora svetla | 77 |
| 5.5.3. Metod procene uticaja ambijentalnog osvetljenja | 78 |
| 5.5.4. Metod procene uticaja broja uzoraka trening seta..... | 79 |

| | |
|--|-----|
| 5.6. Metode optimizacije | 82 |
| 5.6.1. Optimizovanje karakterizacije – pristup jedne mreže..... | 82 |
| 5.6.2. Optimizovanje karakterizacije – selektivna redukcija boja trening seta | 83 |
| 5.6.3. Skraćenje trajanja procedure snimanja uzoraka | 84 |
| 6. Rezultati istraživanja | 84 |
| 6.1. Rezultati instrumentalne karakterizacije uzoraka..... | 85 |
| 6.2. Rezultati procene uticaja izvora svetla na tačnost estimacije boje | 89 |
| 6.2.1. Rezultati za izvore svetla D65..... | 89 |
| 6.2.2. Rezultati za izvore svetla A..... | 97 |
| 6.3. Rezultati procene uticaja ambijentalnog osvetljenja na tačnost estimacije boje..... | 104 |
| 6.4. Rezultati procene broja boja trening seta na tačnost estimacije boje..... | 112 |
| 6.5. Rezultati optimizacije metoda..... | 114 |
| 6.5.1. Rezultati optimizacije modela karakterizacije kamere | 114 |
| 6.5.2. Rezultati selektivne redukcije boja trening seta | 115 |
| 6.5.3. Rezultati optimizacije trajanja procedure snimanja uzoraka | 117 |
| 7. Diskusija rezultata | 119 |
| 7.1. Diskusija rezultata eksperimenta 1 | 119 |
| 7.2. Diskusija rezultata eksperimenta 2 | 123 |
| 7.3. Diskusija rezultata eksperimenta 3 | 124 |
| 7.4. Diskusija rezultata optimizacije metoda | 124 |
| 8. Zaključci istraživanja | 127 |
| 9. Naučni doprinos istraživanja i mogućnost primene u praksi | 132 |
| 10. Literatura | 134 |
| 11. Prilozi | 148 |
| Biografija sa bibliografijom | 188 |

1. Uvod

Štamparska industrija poslednjih godina suočava se sa velikim izazovima. Izdavačko tržište širi se ka poljima digitalnih medija i elektronskih publikacija, koji su u pojedinim segmentima potpuno potisnuli štampane materijale. Kako bi se pariralo elektronskim medijima, u grafičkoj reprodukciji javlja se tendencija ka kreiranju proizvoda koji su vizuelno upečatljiviji i dopadljiviji. Jedan od pristupa je oslojavanje štampanih otisaka različitim tipovima efektnih pigmenata, koji omogućavaju postizanje niza vizuelnih efekata. U praksi je veoma zastupljeno korišćenje pigmenata koji omogućavaju promenu odštampane boje sa uglom posmatranja – efekat poznat kao goniohromizam. Goniohromatski pigmenti nalaze veliku primenu u štampi luksuzne ambalaže i dekorativnih elemenata ambalaže, magazina i reklamnih materijala, kao i u štampi zaštitnih elemenata.

U istraživanju, akcenat je stavljen na perlascentne pigmente, jednu od grupa goniohromatskih pigmenata. Pored promene boje sa uglom posmatranja ovi pigmenti omogućavaju i postizanje bisernog sjaja, pa se stoga vrlo često koriste u dekorativne svrhe (Weitzel, 2008). U procesu proizvodnje mogu se mešati sa konvencionalnim bojama i lakovima, i nanositi kao klasična boja ili u formi oslojavanja već odštampanog otiska. Goniohromatski efekat postiže se perlascentnim pigmentima zahvaljujući činjenici da se sastoje od više slojeva tankih filmova prirodnog minerala muskovita i metal-oksida (Lewis, 1998; Klein, 2010). Optički efekat u ovom slučaju nastaje usled kreativne interferencije između svetlosnih zraka reflektovanih sa gornjeg i donjeg sloja metal-oksida (Pfaff, 2008; Kinoshita et al, 2008). Intenzitet efekta promene boje sa uglom posmatranja zavisi od koncentracije pigmenta u vezivu i debljini njihovog nanosa, pri čemu veći nanos osigurava naglašeniji efekat promene boje (Klein, 2010).

Karakterizacija vrednosti boja goniohromatskih materijala predstavlja svojevrsnu problematiku zbog komplikovane interakcije svetlo-materijal-posmatrač (odnosno senzor mernog uređaja). S obzirom na to da merna geometrija u velikoj meri utiče na vrednost izmerene boje (Hunt & Pointer, 2011), neophodno je precizno definisati kako položaj izvora svetla, tako i senzora mernog uređaja. Najzastupljenija postavka uređaja za merenje goniohromatskih materijala (gonio-spektrofotometara) podrazumeva da se izvor svetla nalazi na fiksnoj poziciji (obično 45° stepeni u odnosu na normalu), dok se niz senzora nalazi na različitim pozicijama u odnosu na spekularno reflektovano svetlo kako bi se razlike u promeni boje na adekvatan način opisale (Klein, 2010).

Gonio-spektrofotometri omogućavaju preciznu i pouzdanu analizu boja na površini koja je određena njihovim mernim otvorom, dok se vrednost boje dobija kao srednja vrednost merene površine. Na taj način nije moguće meriti prostorne varijacije reprodukovane boje, pa se primena ovih uređaja limitira na merenje boja punih tonova. Takođe, zbog svoje konstrukcije ovi uređaji su veoma nefleksibilni, a njihova osetljivost (kao i cena) utiču na to da se retko koriste u industriji i svoju primenu uglavnom nalaze u laboratorijskim testiranjima (Sole et al, 2014).

Poslednje dve decenije pored klasičnih mernih uređaja za određivanje kolorimetrijskih vrednosti boja koriste se i digitalne kamere. Njihova primena donedavno se odnosila na digitalizovanje otisaka pri proceni reprodukcije detalja poput linija, tačaka, teksta (ISO, 2001), grešaka uzrokovanih neuniformnim nanosom boje kao što su zrnčavost, šum, mikro i makro uniformnost (Briggs, 2002; Pedersen et al, 2009), procenu grešaka registra (Chandu, 2008), kao i pojedinih vrsta sjaja otisaka (Tse & Briggs, 2005; Monie et al, 2003). Sa razvojem metoda karakterizacije digitalnih kamera, polje njihove upotrebe se širi i na procenu vrednosti boja štampanih uzoraka (Martínez-Verdú et al, 2010).

Procedura karakterizacije podrazumeva pronalaženje funkcije kojom se vrednosti boja detektovanih od strane kamere, i shodno tome definisanih u uređajno zavisnom prostoru boja (RGB), prevode u uređajno nezavisan (CIEXYZ, CIELAB) (Hong et al, 2001; Johnson, 2002). Različite metode mogu biti iskorišćene za formiranje veze između odziva kamere i izmerenih vrednosti, pri čemu su najzastupljenije linearna i polinomna regresija, ogledne tabele (LUT od engl. *Lookup table*), veštačke neuronske mreže i sl. U ovom slučaju umesto termina merenje vrlo često se koristi pojam procena (tj. estimacija), jer se određivanje vrednosti boje ne vrši direktno.

U dosadašnjim istraživanjima procedura karakterizacije kamere korišćena je za procenu vrednosti boja standardizovanih test karata i uzoraka štampanih apsorpcionim pigmentima (Brydges et al, 1998; Hong et al, 2001; Cheung et al, 2004; Solli et al, 2005; Liu et al, 2008; Bianco et al, 2009; Abed et al, 2013). Ovakvi uzorci ne zahtevaju više-ugaono merenje pa se digitalizacija vrši tako što se kamera prilikom snimanja postavlja u jednu, fiksnu poziciju u odnosu na izvor svetla. Rezultati procene vrednosti boja u najvećoj meri su zavisili od algoritma karakterizacije i tipa korišćene kamere (Cheung et al, 2004b; Solli et al, 2005).

Pored toga, monohromatske digitalne kamere uspešno su primenjene kao detektori u više-ugaonim sistemima za procenu boje sa ciljem određivanja bidirekcionalne funkcije reflektanse spektralno kompleksnih uzoraka (Tsuchida et al, 2005; Kim et al, 2015). Ovakvi sistemi prate konstrukciju konvencionalnih mernih uređaja, pri čemu se svetlo reflektovano od uzorka korišćenjem monohromatora razlaže na spektar (ili njegove delove) pre nego što biva detektovano od strane senzora kamere. Navedeni pristup osigurava precizno merenje boja, ali podrazumeva i veoma robustnu konstrukciju, pri čemu se pojedini delovi sistema moraju veoma precizno pozicionirati i kalibrisati.

Pretpostavka od koje se u istraživanju krenulo je da se metod karakterizacije kamere, uspešno primenjen za procenu vrednosti boja uzoraka snimanih u jednoj geometriji merenja, može iskoristiti i za više-ugaona merenja. Stoga je predložen pristup u kom se kolorimetrijske vrednosti boja dobijaju isključivo na osnovu odziva kamere, pri čemu su pozicije izvora svetla i kamere definisane tako da simuliraju postavku mernog uređaja (gonio-spektrofotometra). Samim tim, sve razlike u postavi

snimanja u odnosu na građu mernog uređaja utiču na tačnost pristupa. Stoga se došlo do zaključka da je neophodno ispitati varijabilne parametre predložene metode određivanja kolorimetrijskih vrednosti goniohromatskih štampanih otisaka kako bi se procenio njihov uticaj na tačnost rezultata i definisala optimalna postavka.

U svim spektrofotometrima koristi se izvor svetla poznate spektralne raspodele, a zatim se nakon merenja refleksije uzorka vrednost boje preračunava u odnosu na raspodele definisane standardom (takozvane standardne iluminante) (Sharma, 2003). Ovaj proces naziva se „zanemarivanje izvora svetla“ i osigurava dobijanje ponovljivih rezultata bez obzira na tip izvora svetla koji je u uređaju primenjen. Pri snimanju uzoraka digitalnom kamerom procedura je veoma slična, jer se prilikom snimanja koristi izvor svetla određene spektralne raspodele, dok se procedurom karakterizacije kao izlazi mogu definisati kolorimetrijske vrednosti boja za standardne iluminante. Efikasnost algoritma karakterizacije da „zanemari izvor svetla“ osigurava veću tačnost procene vrednosti boja, pa je u radu korišćeni algoritam testiran na način snimanja uzoraka pod izvorima svetla različite spektralne raspodele od one definisane standardnim iluminantom.

Pored toga, spektrofotometar je zatvoren sistem, gde su pozicije izvora svetla i detektora veoma precizno definisane, a sami delovi izolovani od okoline. Na taj način sprečava se da ambijentalno svetlo dopre do senzora merenog uređaja i dovede do pogrešnog očitavanja vrednosti boja. Snimanje uzoraka kamerom podrazumeva da je postavka nešto robustnija, kao i da dolazi do izvesnog rasipanja zračenja reflektovanog sa uzorka. Ukoliko se postavka izoluje od okoline, njena primena u industrijskim uslovima je limitirana. Stoga je izvršeno testiranje predloženog pristupa u uslovima potpune izolacije, kao i u tipičnim radnim uslovima kako bi se procenilo koliko je dati sistem osetljiv na ambijentalno svetlo.

Kada je u pitanju broj boja neophodnih za formiranje funkcije karakterizacije, preporuke koje postoje vezane su za slučaj kada su pri proceni korišćene standardizovane test karte (Hong et al, 2001; Cheung et al, 2004b; De Lasarte et al, 2010), kao i različiti algoritmi karakterizacije (Hong et al, 2001; De Lasarte et al, 2010). S obzirom na nepostojanje preporuka za goniohromatske uzorke u istraživanju je ispitan i uticaj broja uzoraka trening seta na tačnost estimacije.

1.1. Obrazloženje teme i okvira istraživanja

Kako efekat promene boja sa uglom posmatranja kod goniohromatskih pigmenata (naročito perlascentnih) u velikoj meri zavisi od debljine nanosa sredstva za oslojavanje, postoji potreba za njegovim kontrolisanjem u procesu štampe. Sistemi zasnovani na korišćenju digitalne kamere u ovom segmentu mogu se smatrati dostojnom alternativom klasičnim mernim uređajima, jer su fleksibilniji, brži i ne zahtevaju veliku površinu prilikom merenja.

Za razliku od gonio-spektrofotometra, gde je površina koja se procenjuje limitirana mernim otvorom uređaja (obično veoma velikim), procena vrednosti boje kamerom omogućava kontrolu veće površine, ali i izolovanje veoma malih delova snimka (veličine piksela). Ovo može biti veoma korisno u slučajevima kada se goniohromatski premaz nanosi parcijalno. Pored toga, korišćenje kamere podrazumeva bez-kontaktno merenje, što u praksi znači da se vrednost boje može proceniti i dok otisak nije u potpunosti suv. U pojedinim tehnikama štampe ovaj podatak može biti koristan,

jer se nanos sredstva za oslojavanje može povećati kako bi se osigurao željeni efekat. Takođe, na taj način izbegava se oštećenje površine uzorka prilikom merenja. Na osnovu snimka kamere može se proceniti ne samo boja, već i uniformnost snimljene površine, te se samim tim mogu detektovati greške nanosa boje i karakterisati tekstura uzorka koji se snima (Gebeješ, Tomić et al, 2012).

S druge strane, najveći izazov spomenutog pristupa uglavnom je vezan za podešavanje algoritma karakterizacije. Pored toga, tačnost procene zavisi od podešavanja kamere, izvora svetla, kao i ostalih varijabilnih parametara same postavke. Kako bi se postigla što veća tačnost procene vrednosti boja kamerom postoji potreba za detaljnijim ispitivanjem navedenih uticaja.

1.2. Pregled sadržaja disertacije

Disertacija se tematski može podeliti u dva dela. Prvi deo obuhvata teorijske osnove neophodne za razumevanje problematike istraživanja, dok je drugi deo fokusiran na samo istraživanje kroz definisanje predmeta i cilja rada, prikaz metodologije i rezultata istraživanja.

U uvodnom delu dat je kratak osvrt na problematiku ispitivanja, sa naglaskom na predmet rada i okvir istraživanja.

Deo *Aktuelno stanje u oblasti istraživanja* (poglavlje 2) podeljen je u četiri oblasti, pri čemu se u svakoj od njih razmatraju teorijski prilazi ispitivanoj problematici, sa osvrtom na aktuelne publikacije i trenutna shvatanja u oblasti istraživanja. Prva oblast posvećena je goniohromatskim materijalima, pri čemu je akcenat stavljen na perlascentne pigmente, njihove karakteristike i primenu u štampi. U sklopu druge oblasti pokrivena su teorijske osnove vezane za karakterizaciju vrednosti boja u grafičkoj reprodukciji, sa opisom uticajnih faktora i načinom njihove standardizacije. Treća oblast daje uvid u način merenja goniohromatskih materijala, pri čemu se razmatraju sličnosti i razlike sa klasičnim metodama određivanja vrednosti boja. Poslednja oblast posvećena je određivanju vrednosti boja materijala posredstvom digitalne kamere. U ovom potpoglavlju posebna pažnja posvećena je algoritmima karakterizacije, kao i veštačkim neuronskim mrežama s obzirom na to da su iste korišćene u istraživanju.

Nakon teorijskih razmatranja definisani su predmet i cilj rada i postavljene su hipoteze istraživanja koje su u nastavku rada eksperimentalno testirane.

Istraživački deo konceptualno je podeljen u dva segmenta. Prvi segment predstavlja detaljan opis *Metodologije istraživanja* (poglavlje 5) u kom je specificiran plan rada i faze istraživanja, definisani varijabilni i nepromenljivi parametri svakog eksperimenta, opisani korišćeni uređaji i materijali, kao i metode relevantne za sprovođenje istraživanja. U drugom segmentu prikazani su rezultati ispitivanja (poglavlje 6), njihova analiza i diskusija (poglavlje 7), nakon čega su izvedeni relevantni zaključci (poglavlje 8).

Na samom kraju rada dat je prikaz naučnog doprinosa istraživanja, kao i mogućnost primene predloženog pristupa u praksi. Najznačajniji rezultati istraživanja i podaci od značaja za izvođenje eksperimenata koji, zbog svog obima, nisu mogli biti predstavljani u sklopu istraživačkog dela, prikazani su u sekciji *Prilozi*.

2. Aktuelno stanje u oblasti istraživanja

2.1. Goniohromatski materijali u štampi

2.1.1. Pojam i mehanizmi goniohromizma

Goniohromizam (engl. *goniochromism*, *iridescence*) predstavlja osobinu pojedinih materijala tj. površina da se opažaj njihove boje menja sa promenom ugla posmatranja ili osvetljavanja. Pri tome je najdominantnija promena tona boje (Klein, 2010), dok kod velikog broja materijala nije zanemariva ni promena u zasićenju i svetlini (Martínez-Verdú, 2011). Materijali koji poseduju ovu osobinu nazivaju se goniohromatski, pri čemu se efekat promene boje može ogledati u velikom broju tonских prelaza (efekat duginih boja) ili u razlici od svega par tonova.

U prirodi se ovaj efekat može primetiti na perima pauna, krilima leptira, muva, pčela i drugih insekata, na koži glavonožaca, kao i kod pojedinih vrsta školjki, biljaka i minerala (Meadows et al, 2009; Tilley, 2013) (slika 2.1). Arhetipski primeri su i boja mehura sapunice (slika 2.1c) ili sloja ulja na vodi. Upravo prirodni materijali i način na koji se kod njih postiže efekat promene boje sa uglom posmatranja predstavljali su osnovu za razumevanje efekta goniohromizma i proizvodnju veštačkih materijala kojima se ovaj efekat može simulirati.



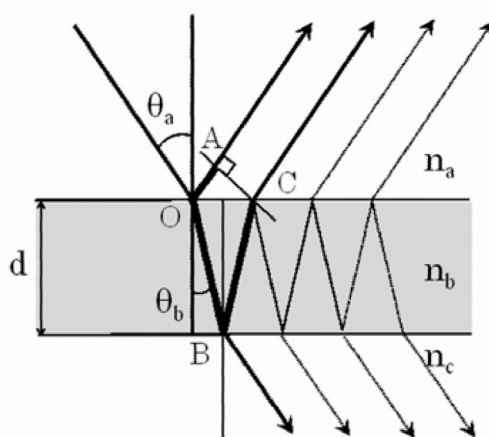
Slika 2.1. Primeri goniohromizma u prirodi (a) kutikula ženke zlatnog jelenka, (b) unutrašnjost školjke *Haliotis iris*, (c) mehur sapunice

Naime, većina prirodnih materijala poseduje jedan osnovni pigment koji daje boju objektu, dok se promena opaženog tona boje postiže dodatnim slojevima polutransparentnog ili transparentnog materijala koji uzrokuju različite optičke efekte. Uzrok ovih efekata leži u rasipanju svetlosti koja

pada na površinu materijala, pri čemu dolazi do absorpcije, refleksije, transmisije, ali i do interferencije svetlosti koja je zaslužna za promenu talasne dužine reflektovane svetlosti (Martínez-Verdú, 2011; Tilley, 2013). Ukoliko materijal ne poseduje pigment, interferencija i difrakcija upadne bele svetlosti uzrokuju refleksiju različitih talasnih dužina i, posledično, opažaj boje. U zavisnosti od strukture površine i broja (polu)transparentnih slojeva efekat se može opisati sledećim mehanizmima (Kinoshita et al, 2008; Martínez-Verdú, 2011):

- interferencija na tankom filmu,
- interferencija na više slojeva (višeslojni reflektori),
- ftonični kristali,
- difrakciona rešetka.

Kao slikovit primer interferencije na tankom filmu može se navesti opažaj duginih boja na mehuru sapunice (slika 2.1c). Pod pojmom tanki film podrazumeva se transparentan materijal veoma male debljine – od nanometra do mikrometra (Hetch, 2001). Sam materijal ne poseduje pigmente, ali se boja opaža zahvaljujući činjenici da reflektovani zraci sa graničnih površina stupaju u interakciju jedan sa drugim (slika 2.2). Naime, svetlosni zrak koji pada na površinu tankog filma se delimično odbija (pozicija A na slici 2.2), a delimično propušta kroz materijal pri čemu menja svoj ugao prostiranja u zavisnosti od indeksa prelamanja sredine (Sharma, 2006). Propušteni svetlosni zrak se na drugoj granici faza, tj. na donjoj površini tankog sloja (pozicija B na slici 2.2), ponovo delimično odbija pri čemu se odbijeni zrak vraća u prvobitni medij (pozicija C na slici 2.2). Svetlosni zraci koji se odbijaju od gornje i donje površine sloja stupaju u interakciju jedan sa drugim i za slučaj da je fazna razlika između njih jednaka umnošku talasne dužine svetlosti dolazi do konstruktivne interferencije (Mehta, 2008). Odnosno, reflektovana svetlost se pojačava. U svim drugim slučajevima dolazi do poništavanja prostiranja talasa, odnosno do destruktivne interferencije i slabljenja refleksije. Na određenoj poziciji tankog sloja selektivno se reflektuje svetlost i jedna talasna dužina se pojačava i opaža kao dominantna, dok sve druge slabe. Variranjem debljine sloja ili posmatranjem sloja iste debljine pod različitim uglovima moguće je videti različite boje.



Slika 2.2. Šematski prikaz interferencije na tankom filmu (izvor: Kinoshita et al, 2008)

Uslov za konstruktivnu interferenciju zavisi i od toga da li je tanak film u kontaktu sa materijalom većeg indeksa prelamanja ili ne (Tilley, 2013). Razlog leži u činjenici da reflektovani svetlosni zraci menjaju fazu za 180° ukoliko svetlosni zrak prelazi iz sredine sa manjim indeksom prelamanja u

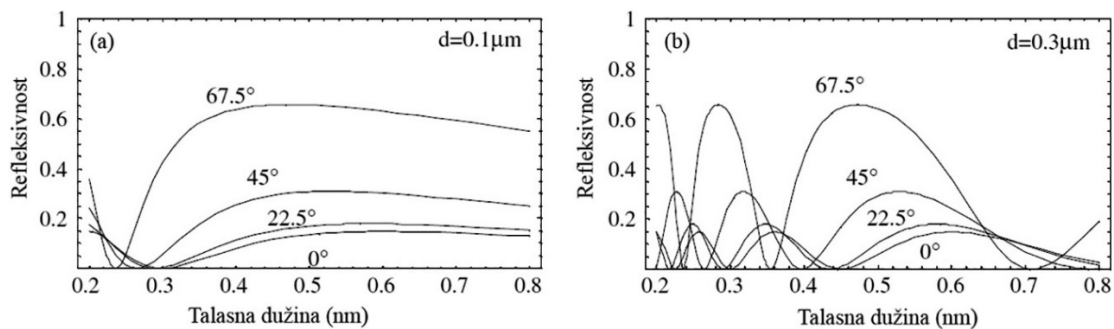
sredinu sa većim, dok u suprotnom slučaju ne dolazi do promene. Primer za prvi slučaj su anti-refleks slojevi na staklenim materijalima, dok je prethodno spomenuti mehur sapunice primer za slučaj kada je tanak film izolovan od drugih materijala. Ukoliko se posmatra tanak film debljine d , refrakcionog indeksa n_b , upadnog ugla θ_a i ugla prelamanja θ_b (kao što je prikazano na slici 2.2) uslov za konstruktivnu interferenciju za slučaj mehura sapunice dat je kao (Kinoshita et al, 2008):

$$2 n_b d \cos \theta_b = (m - 1/2) \lambda_{max} \quad (2.1)$$

Gde se sa λ_{max} označava talasna dužina na kojoj je refleksija najveća, a m je ceo broj. Talasna dužina na kojoj je refleksija najveća može se odrediti na način (Srinivasarao, 1999):

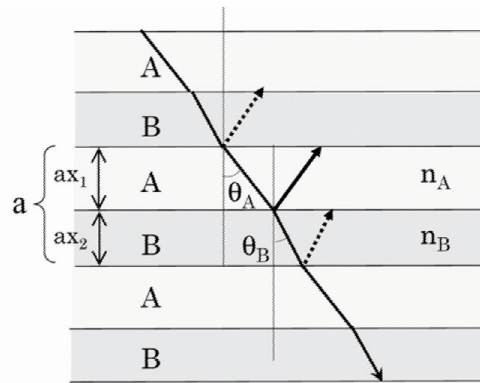
$$\lambda_{max} = \left(\frac{4 n_b d}{2 n_a + 1} \right) \left(1 - \frac{n_a^2}{n_b^2} \sin^2 \theta_a \right) \quad (2.2)$$

Na osnovu date jednačine može se zaključiti da se sa povećanjem upadnog ugla svetlosti, refleksija zračenja pomera ka kraćim talasnim dužinama, odnosno boja se opaža kao plavija. Takođe, očito je da sama refleksija zavisi od debljine samog sloja, kao i od indeksa prelamanja sredina u kojoj se svetlosni zrak prostire. Na slici 2.3 prikazano je kako se refleksivnost tankog filma menja sa upadnim uglom i debljinom samog sloja.



Slika 2.3. Refleksivnost tankog filma ($n=1.5$) u vazduhu za različite uglove upadnog zračenja pravca polarizacije normalog na ravan upadne svetlosti u slučaju da je debljina filma (a) $0.1 \mu\text{m}$, (b) $0.3 \mu\text{m}$ (izvor: Kinoshita et al, 2008)

Interferencija na više slojeva postiže se spajanjem više tankih filmova različitih indeksa prelamanja u jednu celinu (kao na slici 2.4), čime se obezbeđuje postizanje većeg broja graničnih faza i naglašeniji efekat interferencije svetlosti (Attwood, 1999). U prirodi se ovakva postavka sreće kod kutikula velikog broja tvrdokrilaca, kod krljušti riba, kraba i sl. Materijali koji oksidiraju kako bi proizveli transparentan film kojim se oslojava osnovni materijal koriste se za generisanje tzv. višeslojnih reflektora, odnosno materijala kojima se postiže interferencija na više slojeva. Najpoznatije kombinacije su silicijum karbid (SiC) i bornit (Cu_5FeS_4) (Tilley, 2013). Dihroičnim filterima, koji se dobijaju oslojavanjem stakla slojevima oksida, može se takođe postići veoma naglašen efekat.



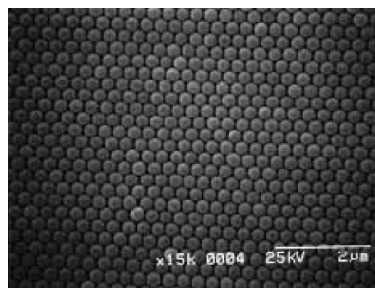
Slika 2.4. Šematski prikaz interferencije na više slojeva (izvor: Kinoshita et al, 2008)

Ako posmatramo dva sloja A i B sa debljinama d_A i d_B , indeksima prelamanja n_A i n_B i uglovima prelamanja θ_A i θ_B i pretpostavimo da je $n_A > n_B$, faza reflektovane svetlosti sa gornje i donje granice sloja A se menja za 180° . Konstruktivna interferencija postiže se ukoliko je zadovoljeno (Kinoshita et al, 2008):

$$2(n_A d_A \cos \theta_A + n_B d_B \cos \theta_B) = m\lambda \quad (2.3)$$

Na taj način omogućava se naglašavanje određenih talasnih dužina upadne bele svetlosti, što dovodi do promene u opažaju tona boje.

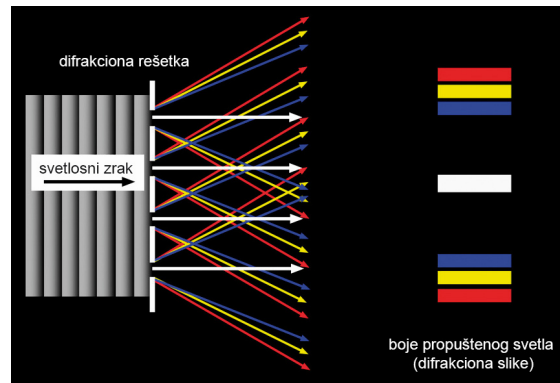
Složeniji slučaj interferencije svetlosti može se postići fotoničnim kristalima, odnosno sistemom identičnih čestica (optičkih elemenata) grupisanih u različite kristalne strukture (Sakoda, 2001). Reflektovani svetlosni zraci sa pojedinačnih elemenata kristala stupaju u interakciju jedan sa drugim, pojačavajući refleksiju određenih talasnih dužina. Ovakva struktura se u prirodi javlja kod velikog broja tvrdokrilaca, kao i u sloju kože kameleona. Primer veštački formiranih kristala dat je na slici 2.5.



Slika 2.5. SEM slika 3D fotoničnog kristala koji se sastoji od niza SiO_2 sfera prečnika 300 nm (izvor: Sakoda, 2001)

Pored interferencije svetlosti goniohromatski efekat može se postići i difrakcijom svetlosnih zraka. Kao difrakciona rešetka ponaša se bilo koji niz paralelnih useka i ispupčenja na nanometarskoj skali koji razlažu belu svetlost na svetlost različitih talasnih dužina (na slici 2.6 prikazan je princip funkcionisanja difrakcione rešetke). Goniohromatski efekat u ovom slučaju se opaža kao tonski prelaz u bojama duge, pri čemu su boje uvek raspoređene u nizu u kom se javljaju u vidljivom delu spektra – od crvene, preko narandžaste, žute, zelene i plave do ljubičaste. Veštačke difrakcione

rešetke razlažu svetlost na principu refleksije ili transmisije (tonski prelaz u bojama duge može se primetiti na kompaktnim diskovima, na primer), dok se u prirodi goniohromizam ovog tipa obično sreće u slojevima kutikule insekata pri čemu se razlaganje dešava isključivo na principu refleksije. Takođe, spektar boja koje se dobijaju difrakcijom je uređen i u smislu da se uvek prati spektralni niz: od nultog reda (čista spekularna refleksija), prvog reda (zasićene čiste boje) do spektra viših redova odnosno sekundarnih i tercijalnih boja. Na taj način goniohromizam uzrokovan difrakcijom lako se može razlikovati od ostalih tipova.



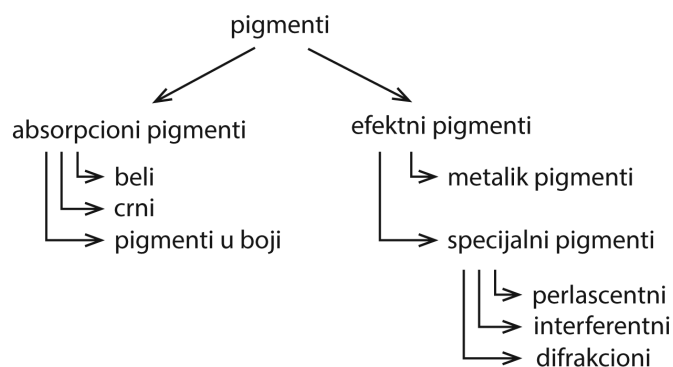
Slika 2.6. Razlaganje svetlosti po principu difrakcije (izvor: Darling, 2015)

2.1.2. Pigmenti za postizanje goniohromatskog efekta

Efekat promene boje sa uglom posmatranja je vizuelno veoma privlačan, pa ne čudi što je dosta napora uloženo da se proizvede na različitim materijalima koji su svakodnevno u upotrebi. Kako bi se to postiglo, razvijen je čitav niz takozvanih specijalnih efektnih pigmenata, koji se uglavnom koriste za oplemenjivanje već proizvedenog materijala. Pored štamparske industrije, gde se koriste za oplemenjivanje štampanih proizvoda, ovi pigmenti veliku primenu nalaze i u bojama za automobilsku industriju, u proizvodnji plastičnih materijala, kao i u kozmetičkoj industriji (Maile et al, 2005; Pfaff, 2008).

Svi pigmenti se u globalu mogu podeliti prema načinu na koji reaguju sa svetlošću na absorpcione pigmente i efektne pigmente (Klein, 2010; Pfaff, 2008) (slika 2.7). Prvi tip pigmenata absorbuje određene talasne dužine svetlosnog zračenja, dok ostale reflektuje izazivajući opažaj željenog tona boje. Ovi pigmenti zastupljeni su u svim bojama i farbama i bez njih ne bi bilo moguće postići efekat obojenja površine. Mogu se podeliti na bele, crne i pigmente u boji (slika 2.7) u zavisnosti od dela spektra koji absorbuju, odnosno reflektuju (Klein, 2010).

Efektne pigmente, s druge strane, omogućavaju postizanje specifičnih vizuelnih efekata (visok sjaj, metalik i efekat bisera i tome sl.) prostom i složenom refleksijom, difrakcijom, rasipanjem i interferencijom svetlosnog zračenja. U ovu klasu spadaju metalik pigmenti, kod kojih se efekat metala postiže ogledalskom refleksijom sa površine čestica, i specijalni efektni pigmenti (engl. *special effect pigments*) kojima se postižu goniohromatski efekti (Pfaff, 2008). U zavisnosti od strukture i mehanizma kojim se goniohromatski efekat postiže specijalni efektni pigmenti se dalje dele na perlascentne, interferentne i difrakcione pigmente (Klein, 2010) (slika 2.7).



Slika 2.7. Podela pigmentata prema načinu na koji reaguju sa svetlošću

Perlascentni pigmenti vrlo često se sreću i pod nazivom pigmenti bisernog sjaja (engl. *perl luster pigments*). S obzirom na to da goniohromatski efekat postižu interferencijom svetlosti mogu se svrstati u grupu interferentnih pigmentata (ASTM, 2012). Ipak, njihova primarna osobina, koja ih odvaja od ostalih tipova goniohromatskih pigmentata, je postizanje efekta sjaja prirodnih bisera. Stoga su u ovom radu definisani kao posebna grupa sledeći podelu datu u (Klein, 2010). Ovi pigmenti se sastoje uglavnom od dva ili više slojeva materijala različitih indeksa prelamanja, pri čemu se kao osnovni materijal koristi muskovit, kao i metali i oksidi metala. Efekat bisera postiže se prostim ili višestrukim refleksijama na granicama slojeva, kao i konstruktivnom interferencijom. Kako će ovaj tip pigmentata biti korišćen u radu, o njima će biti više reči u sledećim poglavljima.

Pod pojmom interferentni pigmenti podrazumevaju se svi pigmenti kojima se promena boje sa uglom posmatranja postiže po principu interferencije na više slojeva. Kod ovih pigmentata interferencija se postiže različitom debljinom slojeva i visokim odnosnom njihovih indeksa prelamanja (Maile et al, 2005). U ovu grupu spadaju (Klein, 2010):

- specijalni interferentni pigmenti,
- pigmenti tečnih kristala (engl. *Liquid Crystal Pigments - LCP*),
- optički varijabilni interferentni pigmenti (engl. *Optical Variable Interference Pigments - OVIP*),
- izduženi interferentni filmovi (engl. *Extended Interference Films*).

Difrakcioni pigmenti goniohromatski efekat postižu po principu razlaganja upadnog svetla na spektar. Vrlo često se nazivaju strukturirani pigmenti, jer se kao osnova za dobijanje čestica koje se ponašaju kao male difrakcione rešetke uglavnom koristi strukturirani film polimera. Ovaj film se može metalizirati i mleti u sitne čestice (do 10 μm), ili se na njega mogu naneti slojevi $\text{MgF}_2/\text{Al}/\text{MgF}_2$ ili $\text{SiO}_2/\text{Al}/\text{SiO}_2$ koji se kasnije odvajaju razlaganjem nosećeg sloja (Maile et al, 2005). MgF_2 i SiO_2 u navedenoj kombinaciji slojeva služe kao nosač za tanak sloj aluminijuma. Ovako dobijene čestice su veoma fine (periodičnost njihove strukture je oko 1 μm), a činjenica da je sama proizvodnja izuzetno skupa limitira njihovo korišćenje na visoko kvalitetne proizvode (štampa sigurnosnih kodova na novčanicama, i tome sl.) (Maile et al, 2005). Pored navedenih materijala, mogu se koristiti i feromagnetne čestice koje se pri nanošenju na osnovni sloj mogu precizno orjentisati pod dejstvom spoljašnjeg magnetnog polja (Klein, 2010).

2.1.3. Perlascentni pigmenti

Perlascentnim pigmentima simulira se izgled površine prirodnih bisera, pri čemu se pored karakterističnog sjaja postiže i suptilan goniohromatski efekat. U zavisnosti od njihove strukture mogu se podeliti na dve grupe i to (Maile & Reynders, 2003):

1. Pigmenti koje se sastoje od jednog optički homogenog materijala (pigmenti bez substrata)
2. Pigmenti slojevite strukture koji se sastoje od bar dva optički različita materijala (slojevita struktura na substratu)

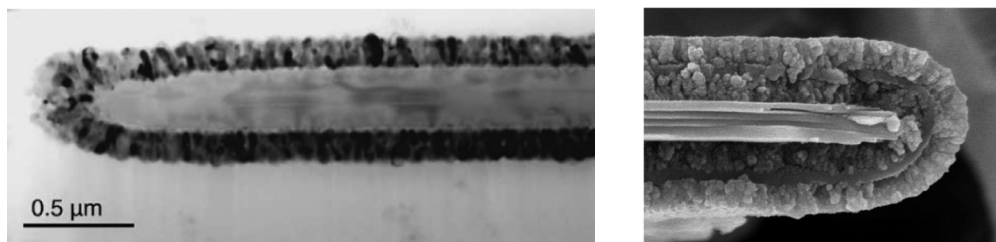
Pigmenti koji se sastoje od jednog materijala predstavljaju zapravo pojedinačne kristale ili ljuspice polikristalnih struktura metala i sličnih materijala. Kako bi se omogućio optički efekat ovi pigmenti se proizvode tako da njihova debljina bude reda veličine jedne četvrtine talasnih dužina vidljivog spektra (Maile & Reynders, 2003). U ovu grupu spadaju pigmenti koji se koriste uglavnom u kozmetičkoj industriji (prirodne esencije bisera, bizmut-oksidi hlorid), za zaštitu površina od korozije (liskunasti oksidi gvožđa), za proizvodnju nakita i tome sl. (Maile et al, 2005). Budući da se sastoje od jednog sloja, obično veoma krto materijala, pokazuju ograničenu mehaničku stabilnost pa se ne mogu koristiti u procesima koji koriste pritisak. Stoga se pigmenti ovog tipa ne koriste u štampi.

Struktura prirodnih bisera, koji se sastoje od naizmenično raspoređenih slojeva transparentnih materijala različitih indeksa prelamanja (slojevi kalcijum karbonata i proteina) (Pfaff, 2008), poslužila je kao inspiracija za formiranje pigmenata slojevite strukture. Njihov komercijalni uspeh započinje tokom 70ih godina, nastavlja se tokom 80ih razvojem pigmenata otpornih na vlagu namenjenih štampi proizvoda za izlaganje na otvorenom (engl. *outdoor*), i dostiže vrhunac krajem 90ih godina prošlog veka pronalaskom načina za sintetisanje većeg broja slojeva optičkih materijala na osnovnom substratu (Maile et al, 2005).

Ovi pigmenti sastoje se od substrata koji je uglavnom prirodni ili sintetički muskovit (silikatni mineral, poznatiji pod nazivom mica) i slojeva koji mogu biti od različitih materijala (titanijum-dioksid, gvožđe(III)oksid, hrom(III)oksid, silicijum-dioksid, molibden itd.) (Teany, 1999; Maile & Reynders, 2003). Mineral mica, koji se koristi kao osnova za formiranje ljuspica pigmenata, je transparentan, čime se postiže impresija optičke dubine i postepena promena u sjaju i hromatičnosti.

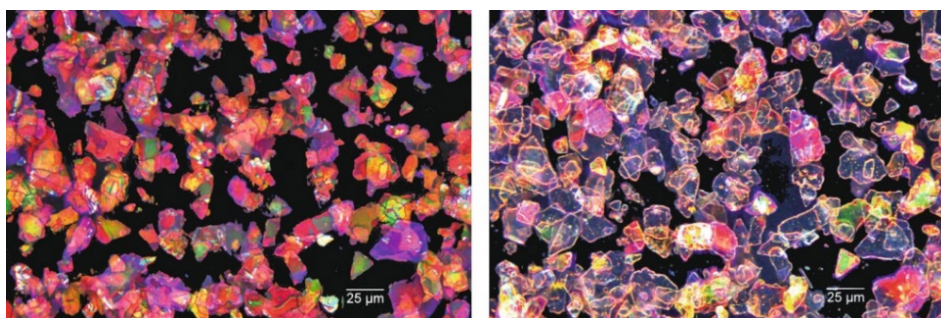
Na slici 2.8a prikazana je struktura najčešće korišćenog pigmenta ove grupe – substrat je mica, dok se kao interferentni sloj koristi titanijum-dioksid (TiO_2). Promena u boji kod ovog tipa pigmenta u velikoj meri zavisi od debljine TiO_2 sloja koji se kreće u granicama od 50-300 nm sa obe strane mica sloja (Maile et al, 2005). Ukoliko se titanijum-dioksid nalazi u kristalnoj formi poznatoj pod nazivom anatas, nanosi se direktno na mica sloj, dok je za druge forme uglavnom neophodno koristiti dodatni sloj metal oksida.

Rutil (najzastupljenija kristalna forma titanijum-dioksida) se na mica sloj nanosi posredno, tako što se mica najpre oslojava kalaj-dioksidom (SnO_2), a zatim se nanosi sloj rutila (Maile et al, 2005). Više slojeva različitih materijala pojačavaju interferenciju, pa se pri formiranju ljuspice pigmenata ovog tipa uglavnom i koriste bar dva sloja metal-oksida čiji se redosled permutuje. Na slici 2.8b prikazana je ljuspica višeslojnog pigmenta, koji se sastoji od mica substrata i više slojeva SiO_2 i TiO_2 . Ovakva kombinacija omogućava postizanje 15 interferentni boja.



Slika 2.8. (a) Snimak poprečnog preseka ljuspice perlascentnog pigmenta dobijen transmisivnim elektronskim mikroskopom. Na snimku se uočava osnovni mica sloj i sloj titanijum dioksida veoma precizno deponovanog na osnovnom sloju (izvor: Maile et al, 2005); (b) Poprečni presek ljuspice simetričnog višeslojnog pigmenta – substrat je mica, dok su slojevi simetrično raspoređeni posmatrano od centra preseka na način: $TiO_2-SiO_2-TiO_2$ (izvor: Klein, 2010)

Na mikroskopskom snimku perlascentnog pigmenta prikazanom na slici 2.9. mogu se opaziti različite boje ljuspica u zavisnosti od pozicije same ljuspice u odnosu na izvor svetlosti. Pigment prikazan na slici sastoji se od mica substrata oslojenog rutilom, pri čemu je slika 2.9a dobijena u svetlom polju, dok slika 2.9b predstavlja snimak u tamnom polju.



Slika 2.9. Mikroskopski snimak perlascentnog pigmenta (mica + rutil) (a) snimak u svetlom polju, (b) snimak u tamnom polju (izvor: Klein, 2010)

Pored optičkih osobina perlascentni pigmenti pokazuju i niz hemijskih i mehaničkih osobina koje ih čine vrlo pogodnim za upotrebu u različite svrhe. Kao najznačajnije osobine mogu se navesti (Kolorjet, 2015):

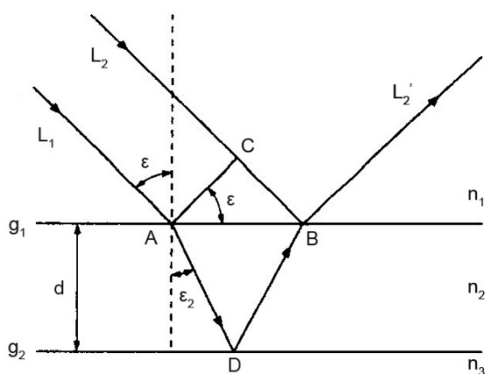
- loša električna provodljivost,
- visoka otpornost ka bazama i kiselinama,
- otpornost na temperature do $800^{\circ}C$,
- veoma dobra otpornost na svetlost (pri čemu su pojedini pigmenti otporni i na UV zračenje),
- nisu štetni za okolinu i mogu se koristiti za štampu ambalaže za pakovanje hrane.

2.1.4. Optičke osobine perlascentnih pigmenta

Različiti slojevi od kojih se perlascentni pigmenti sastoje utiču na to da se svetlost koja pada na pigment reflektuje u skladu sa zakonom refleksije, ali se istovremeno i rasipa stvarajući efekat postepenog smanjenja intenziteta reflektovanog svetla. Time se postiže karakterističan biserni sjaj, koji za posmatrača deluje kao da dolazi iz samog objekta (Pfaff, 2008). Ovi pigmenti mogu biti

transparentni ili neprozirni, pri čemu su transparentni znatno više u upotrebi jer omogućavaju veće varijacije u opaženim bojama.

Konstruktivna interferencija, do koje dolazi zbog različitih indeksa prelamanja slojeva, stvara i karakterističan goniohromatski efekat pa se pigmenti ovog tipa karakterišu putem njihove interferentne boje. Interferentna boja određena je talasnom dužinom svetlosti koja se opaža kao svetlo reflektovano u spekularnom uglu u odnosu na upadno zračenje, što zapravo odgovara interferentnom uglu prvog reda (zrak L_2' na slici 2.10).

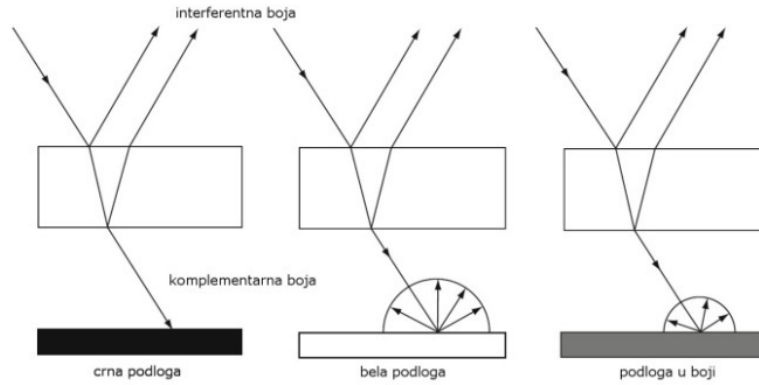


Slika 2.10. Šematski dijagram na kom je prikazana fazna razlika interferentnih zraka L_1 i L_2 (izvor: Pfaff, 2008)

Svetlost komplementarne boje reflektovanoj se ili propušta (u slučaju transparentnih čestica) ili apsorbira (ukoliko su čestice pigmentata neprozirne). Kod transparentnih pigmentata boja podloge na koju se nanose igra veliku ulogu u izgledu konačno opažene boje, upravo zbog propuštanja svetlosti komplementarne boje kroz sloj. Razlikuju se tri karakteristična slučaja koji su pojednostavljeno prikazani na slici 2.11 (Klein, 2010).

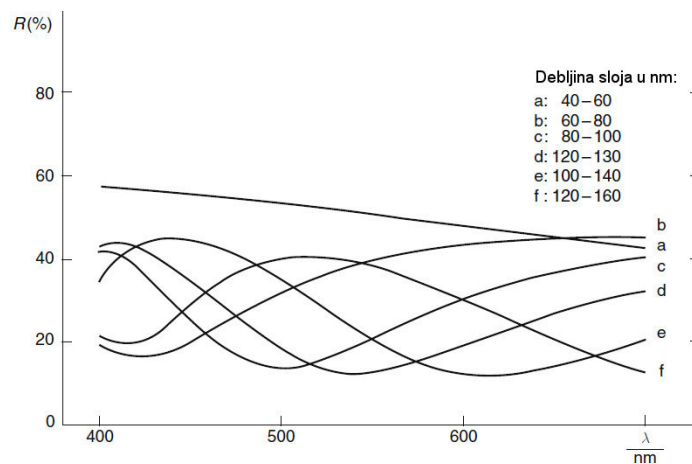
Ukoliko se pigmenti nanose na crnu podlogu (slika 2.11a), propušteno svetlo se u idealnom slučaju u potpunosti absorbira pa se kao rezultat u spekularnom uglu opaža samo interferentna boja, dok sama boja podloge deluje nešto svetlija zbog zraka rasutih sa ivica ljuspica pigmentata. Bela podloga (slika 2.11b), sa druge strane, reflektuje u potpunosti svetlost komplementarne boje pa se kao rezultat u spekularnom uglu opaža zapravo kombinacija interferentne i njoj komplementarne boje. U svakom drugom uglu opaža se uglavnom komplementarna boja difuzno reflektovana sa površine osnovnog sloja.

Kod podloga u boji (slika 2.11c), opažena boja predstavlja kombinaciju interferentne, boje svetlosti reflektovane sa podloge (određene absorpcijom nanesenog pigmenta) i boje komplementarne interferentnoj koja se difuzno reflektuje sa podloge. U ovom slučaju moguće je dobiti veliki broj tonskih prelaza.



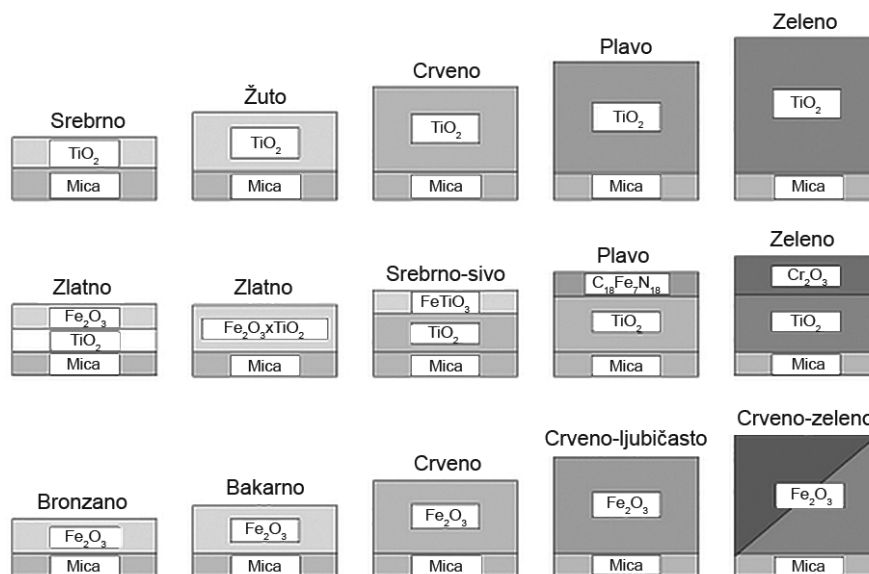
Slika 2.11. Svetlost komplementarne boje interferentnoj se u slučaju (a) crne podloge - potpuno absorbuje, (b) bele podloge - potpuno reflektuje, (c) podloge u boji – reflektuje u određenoj meri u zavisnosti od pigmenta osnove (izvor: Klein, 2010)

U zavisnosti od tipa pigmenta, broja slojeva i njihove debljine može se proizvesti izgled visoko sjajne (pojačavanjem spekularne komponente refleksije) ili čak mat površine (naglašavanjem difuzne komponente). Broj slojeva utiče na broj boja koje se mogu opaziti; kod pigmenata sa jednim slojem opaža se svega par različitih boja (Maile et al, 2005), dok se kod višeslojnih pigmenata omogućava opažaj više boja sa promenom ugla posmatranja. Debljina sloja u velikoj meri utiče na opaženu interferentnu boju (jednačina 2.2), pri čemu se sa porastom debljine reflektovano zračenje pomera uglavnom ka kraćim talasnim dužinama (Slika 2.12).



Slika 2.12. Reflektanse mica substrata sa različitim debljinama TiO_2 sloja (merenje vršeno na crnoj podlozi, $d_e/8^\circ$ geometrija) (izvor: Klein,2010)

Slojevi različitih materijala zbog drugačijih indeksa prelamanja omogućavaju postizanje različitih boja, a njihovom međusobnom kombinacijom i promenom njihove debljine mogu se postići značajne varijacije opažene boje (kao što je prikazano na slici 2.13).



Slika 2.13. Izgled opažene interferentne boje različitih perlascentnih pigmenata (izvor: Pfaff, 2009)

2.1.5. Primena perlascentnih pigmenata u grafičkoj reprodukciji

Primarna funkcija perlascentnih pigmenata u grafičkoj reprodukciji je dekorativna, jer se njihovim korišćenjem postiže iluzija optičke dubine i veoma specifičan sjaj koji se ne može postići nijednim drugim materijalom (Maile et al, 2005). Različiti načini nanošenja omogućavaju postizanje niza optičkih efekata – simuliranje izgleda prirodnih bisera i sličnih materijala, izgled satena, kao i simuliranje strukture prirodnih materijala (tekstura drveta za štampu tapeta i obloga, na primer, simulira se parcijalnim nanosom srebro-belog perlascentnog pigmenata) (Weitzel, 2008). Pored dekorativne funkcije, pigmenti ovog tipa se vrlo često koriste i za štampu sigurnosnih elemenata na dokumentima i novčanicama, jer efekat promene boje sa uglom posmatranja nije jednostavno kopirati.

S obzirom na to da su perlascentni pigmenti uglavnom transparentni, mogu se koristiti samostalno ili se mešati sa absorpcionim pigmentima koji se koriste u štamparskim bojama za postizanje goniohromatskog efekta. To ih čini veoma pogodnim za primenu u grafičkoj reprodukciji, jer se mogu koristiti u svim štamparskim procesima i na otisak nanositi kao klasična boja ili u formi sredstva za oslojavanje.

Boje za štampu sastoje se od 4 osnovne komponente: pigmenata, rastvarača, veziva i različitih aditiva koji se dodaju kako bi se osigurale specifične osobine karakteristične za štamparski proces u kom će boja biti korišćena (Robert, 2015; Eldred, 2001). Perlascentni pigmenti mogu se u štamparskoj boji koristiti uz već postojeći absorpcioni pigment, tako što se u samu boju dodaju u različitim odnosima (obično od 0.5 do čak 20%, u zavisnosti od pigmenata). Na ovaj način osigurava se postizanje osnovnog tona boje i veoma suptilan goniohromatski efekat, jer se perlascentni pigmenti ne zadržavaju u potpunosti na površini materijala (Weitzel, 2008). Takođe, mešanjem sa drugim pigmentima smanjuje se karakterističan biserni sjaj, budući da absorpcioni pigmenti u sloju boje upijaju veliku količinu upadnog zračenja (Klein, 2010).

Stoga se ovi pigmenti uglavnom koriste dispergovani u transparentnom nosaču – osnovi štamparske boje (rastvaračima i vezivima koji se koriste u specifičnom štamparskom procesu) ili različitim tipovima lakova. Koncentracija pigmenta u ovom slučaju određuje se u zavisnosti od viskoziteta neophodnog za tehniku štampe kojom će biti naneti na podlogu i efekta koji se želi postići. Prilikom dodavanja ovih pigmenta u vezivo boje treba izbegavati agresivno mešanje, jer mehanički uticaji mogu oštetiti strukturu pigmenta. Agresivnije mešanje uglavnom nije ni neophodno budući da gotovo svi perlascentni pigmenti veoma dobro disperguju i u slabo viskoznim osnovama. Kako bi se obezbedilo homogeno raspoređivanje pigmenta u vezivu i osigurao bolji nanos tokom štampe, preporučuje se da se pigmenti najpre disperguju u maloj količini veziva, a zatim nakon određenog vremena kondicioniranja povežu sa ostatkom (Weitzel, 2008; Ram Charan, 2013).

Ovako pripremljena mešavina može se koristiti na isti način kao štamparska boja – za štampu punih tonova i rasterske strukture, kao prva naneta boja ili za oslojavanje već odštampanih materijala, dok dobre fizičko-hemijske osobine pigmenta omogućavaju da se odštampani otisci mogu dodatno štampati, oslojavati različitim vrstama lakova, utiskivati i tome sl. Takođe, pigmenti ovog tipa mogu se koristiti za štampu gotovo svih podloga, počev od papira i kartona (oslojenog i neoslojenog), preko plastike i tekstila, pa do stakla, kože, metala i drveta (Weitzel, 2008; Ram Charan, 2013).

Sve prethodno spomenuto, kao i činjenica da su otporni na toplotu, vlagu, hemijske i fizičke uticaje (postojanost ka trenju, svetlosti itd.) omogućava njihovu upotrebu za štampu širokog ranga proizvoda. Kao najznačajniji mogu se navesti (Teany, 1999; Maile et al, 2005; Weitzel, 2008):

- luksuzna i dekorativna pakovanja,
- magazini i reklamni materijal,
- štampani tekstilni materijali,
- tapete i obloge za nameštaj,
- sigurnosna štampa i sl.

Perlascentni pigmenti veoma su zastupljeni u štampi ambalaže i luksuznih pakovanja, gde se obično nanose na prethodno odštampan papir ili karton i to u debljem sloju kako bi se osigurali intenzivniji vizuelni efekti. Za ove proizvode koriste se tehnike rotacione duboke, kao i flekso štampe. Duboka štampa koristi se i za štampu zaštitnih elemenata kod sigurnosne štampe, dok se flekso tehnikom vrši štampa tapeta i sličnih obloga. Kod magazina, perlascentni pigmenti se uglavnom nanose parcijalno, kako bi se naglasio određeni deo publikacije, pri čemu se štampa vrši ofset tehnikom. Otpornost na vlagu, pranje i toplotu čini perlascentne pigmente veoma dobrim izborom za štampu sportske odeće, kao i kućnog tekstila. U ovom slučaju nanos se vrši tehnikom sito štampe.

Kako su perlascentni pigmenti slojevite strukture i poseduju drugačiji hemijski sastav od klasičnih pigmenta za svaku od navedenih tehnika potrebno je ispoštovati određene zahteve kako bi se željeni goniohromatski efekat postigao. Specifičnosti i preporuke vezane za njihovo korišćenje u štampi date su u nastavku.

2.1.6. Specifičnosti štampe perlascentnih pigmenata

Pri štampi perlascentnih pigmenata tehnikom flekso štampe preporučuje se njihovo mešanje sa transparentnim flekso bojama na bazi rastvarača niskog viskoziteta ili sa bojama na vodenoj bazi. Da se goniohromatski efekat ne bi previše umanjio, koncentracija konvencijalnog tonera odnosno pigmenta ne bi trebala prelaziti 3% (Weitzel, 2008). Koncentracija perlascentnog pigmenta može dostići i do 30%, pri čemu se ovako visoke vrednosti obično koriste u slučaju pigmenata finijih čestica (do 25 μm) za postizanje efekta satena. Za grublje čestice koncentracije su znatno niže.

Kako bi se omogućio uniforman prenos pigmenata do štamparske forme i njihov ravnomeran nanos na podlogu za štampu neophodno je izabrati adekvatan tip štamparske forme, kao i pravilno graviran raster valjak. Kada su forme u pitanju dobri rezultati se postižu korišćenjem mekših fotopolimernih ploča sa nižim površinskim naponom. Time se sprečava zadržavanje i deponovanje pigmenata na ploči (Weitzel, 2008) i osigurava bolji prenos na podlogu. Što se prenosa boje na štamparsku formu tiče, preporučuje se korišćenje laserski graviranih keramičkih raster valjaka (heksagonalna struktura pod uglom od 60°) jer se njima postiže bolji prenos pigmenata (Merck KGaA, 2015).

Izbor linijature raster valjka zavisi od strukture podloge za štampu, kao i od veličine ljuspica pigmenata. Upotrebom perlascentnih pigmenata postižu se naglašeniji vizuelni efekti ukoliko se štampa vrši na ravnim, uniformnim površinama zbog boljeg rasporeda pigmenta na površini. Efekat se može postići i na grubljim, upojnim materijalima, pri čemu linijatura raster valjka mora biti manja. U tabeli 2.1 date su preporuke za izbeg linijature raster valjka u zavisnosti od veličine ljuspica pigmenta i podloge za štampu.

Tabela 2.1. Korelacija između veličine ljuspica perlascentnih pigmenata, podloge za štampu i odgovarajuće linijature raster valjka u flekso štampi (izvor: Weitzel, 2008)

| Veličina ljuspice pigmenta (μm) | Podloga za štampu | Slikovni elementi koji se štampaju | Linijatura aniloks valjka (linija/cm) |
|--|---|--|---------------------------------------|
| 5-15 10-60 5-125 20-200 | Grubi i upojni materijali | Površine punog tona | 32-72 |
| 5-25 10-60 | Glatki materijali (premazni papiri i filmovi) | Površine punog tona, rastrirane površine, štampa finih detalja | 60-80 |
| 5-15 5-25 | Glatki materijali | Rastrirane površine (linijatura > 60 lin/cm) | 80-120 |

Adekvatan izbor linijature graviranog cilindra bitan je i kod štampe perlascentnih pigmenata tehnikom duboke štampe. I u ovom slučaju preporučuje se korišćenje laserski graviranih cilindara, dok se kao značajan faktor navodi i viskozitet same boje koji je za duboku štampu znatno niži nego u slučaju flekso štampe. Takođe, viskozitet se mora prilagoditi materijalu koji se štampa i brzini štampe (Merck KGaA, 2015). U tabeli 2.2 date su preporuke za izbor linijature cilindra za štampu u zavisnosti od veličine čestice pigmenata. Za bolji prenos odnosno bolje pražnjenje štampajućih elemenata cilindra za štampu, u slučaju većih čestica preporučuje se korišćenje manjih linijatura (tabela 2.2).

Tabela 2.2. Preporuke za izbor linijature cilindra za štampu u dubokoj štampi na osnovu veličine ljuspice perlascentnog pigmenta (izvor: Merck KGaA, 2015)

| Veličina ljuspice pigmenta (μm) | Linijatura (linija/cm) |
|--|------------------------|
| < 15 | 70 |
| 5–25 | |
| 10–60 | 70–60 |
| 10–100 | 60–48 |
| 10–125 | |

Perlascentni pigmenti su veoma pogodni i za štampu ofset tehnikom štampe, pri čemu se mogu koristiti kao klasična boja ili kao sredstvo za oslojavanje. U prvom slučaju, zbog debljine nanosa ovom tehnikom štampe i finoće samih formi, koriste se pigmenti veličine do 25 μm (Merck KGaA, 2015). Krupniji pigmenti se ne mogu adekvatno preneti na podlogu i mogu dovesti do gubitka detalja na otisku. Prilikom štampe neophodno je pravilno izabrati cilindar nosilac gumenog omotača. Naime, potrebno je izabrati gumeni nosač koji će sprečiti nakupljanje pigmenata na nosaču i osigurati njihov maksimalan prenos na podlogu (Huber Group, 2014).

Takođe, preporučuje se korišćenje FM rastriranja jer struktura rastera omogućava naglašavanje vizuelnog efekta. Veličina tačke u ovom slučaju ne bi trebala biti manja od 30 μm , kako bi se osigurao dobar prenos detalja (Merck KGaA, 2015). Ukoliko se koristi AM rastriranje, linijatura ne bi trebala biti veća od 85 linija/inch (34 linije/cm) (Merck KGaA, 2015).

Perlascentni pigmenti mogu se štampati i mokro na suvo. Štampa mokro na mokro osigurava finiju reprodukciju, ali se goniohromatski efekat umanjuje jer se perlascentni pigmenti do neke mere mešaju sa prethodno nanetim. Ukoliko se perlascentni pigmenti štampaju prvi u nizu, sušenje je obavezno pre štampe sledeće boje (Merck KGaA, 2015), jer se u suprotnom slučaju mogućnost potpunog sušenja smanjuje i može doći do lepljenja tabaka u jedinici za izlaganje.

Ako se perlascentni pigmenti u ofset štampi koriste za oslojavanje, nanose se putem jedinice za lakiranje. U ovom slučaju mogu se koristiti i pigmenti čije čestice prelaze 25 μm . Pravilan izbor linijature raster valjka i ovde je bitan, pri čemu se preporuke mogu naći u tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Preporuke za izbor linijature raster valjka u zavisnosti od veličine pigmenta (izvor: Merck KGaA, 2015)

| Veličina čestice pigmenta (μm) | Teoretska zapremina nanosa (cm^3/m^2) | Linijatura (linija/cm) | Linijatura (linija/inch) |
|---|---|------------------------|--------------------------|
| < 15 5–25 | 6–13 | 80–120 | 200–300 |
| 10–60 | 9–20 | 60–100 | 150–250 |
| 10–100 10–125 | 20–25 | 40–60 | 100–150 |

Kada je u pitanju sito tehnika štampe, za postizanje optimalnih rezultata linijatura sita mora biti prilagođena veličini ljuspica pigmenta. Po pravilu linijatura mora biti bar 1.5-2.5 puta veća od najveće čestice pigmenta, kako bi se omogućio njihov lak prolaz kroz proreze sita (Weitzel, 2008; Merck KGaA, 2015). Ukoliko se koriste čestice veličine 10-60 μm na primer, linijatura sita bi trebala

iznositi 90-120 μm . Takođe, materijal od kog se sito sastoji treba birati tako da ne dođe do zapušavanja (odnosno do lepljenja čestica pigmenata za sito), a raket nož ne bi trebao biti velike tvrdoće da ne bi došlo do degradacije pigmenta usled mehaničkih uticaja.

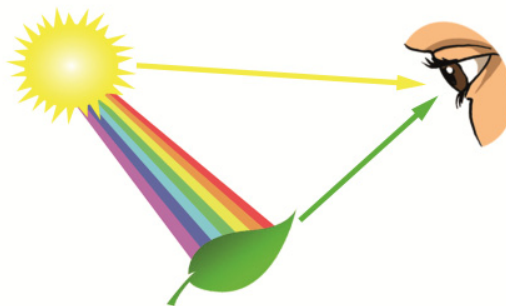
2.2. Određivanje vrednosti boja u grafičkoj reprodukciji

2.2.1. Kvantitativni opis boje

Fairchild (Fairchild, 2005) definiše boju kao atribut vizuelne senzacije, pri čemu njen izgled zavisi od tri komponente slikovito predstavljene na slici 2.14. Autor postavlja pitanje “zašto je boja?” umesto “šta je boja?” stavljajući akcenat na činjenicu da boje zapravo ne postoje u odsustvu jedne od tri komponente (Fairchild, 2005). Naime, za postojanje boje kao opažajne senzacije neophodan je najpre izvor svetlosti koji emituje zračenje u vidljivom delu spektra. U odsustvu svetlosti ne može se govoriti o opažanju objekata, pa samim tim ni njihovih boja¹.

Druga komponenta je objekat čije fizičke osobine utiču na promenu svetlosnog zračenja koje do njega dopire. U zavisnosti od pigmenata objekta pojedine talasne dužine se absorbiraju i, u slučaju (polu)providnih materijala, propuštaju, dok se ostale reflektuju do posmatrača.

Poslednja komponenta neophodna za postojanje boje je posmatrač. Reflektovana ili propuštena svetlost se procesira od strane vizuelnog sistema, pri čemu se pojedini delovi spektra detektuju različitim fotoreceptorima. Izvor svetlosti takođe utiče na posmatrača, čime se omogućava mehanizam hromatske adaptacije (Shevell, 2003; Fairchild, 2005).



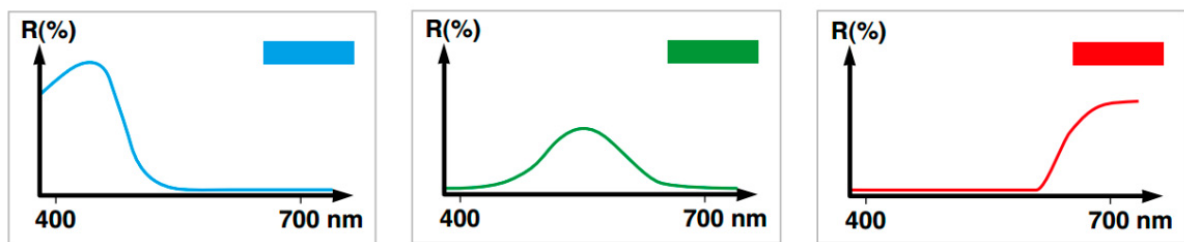
Slika 2.14. Interakcija izvora svetla, objekta posmatranja i posmatrača pri opažanju boja

Pored navedenih komponenti na opažaj boje od strane posmatrača utiču i dodatni faktori. Ovi faktori direktno su vezani za način funkcionisanja ljudskog vizuelnog sistema, odnosno princip po kom se informacija o sceni koja se posmatra procesira od strane vizuelnog sistema i viših moždanih struktura. Naime, pokazano je da na izgled boje objekta koji se posmatra utiču hromatičnost i luminansa okoline u kojoj se dati objekat nalazi (fenomeni simultanog kontrasta, *crispening* i *spreading* npr.), veličina i površinske karakteristike objekta, njegov položaj u odnosu na izvor svetla, ali i promena u luminansi okoline u kojoj se objekat posmatra (Stevens i Hunt efekat) ili samog objekta (Bezold-Brücke pomeraj tona) itd. (Fairchild, 2005).

¹ Izuzetak su objekti koji emituju zračenje (monitori, projektori) gde je sam objekat zapravo izvor svetlosti pa dodatni izvor nije neophodan kako bi se boje mogle opaziti.

U cilju precizne komunikacije u industriji i nauci izgled boje neophodno je opisati objektivno, na nedvosmislen i univerzalan način (Gupte, 2010). Kako bi se to omogućilo svi uticajni parametri moraju biti precizno kvantifikovani, jer njihove karakteristike u velikoj meri utiču na konačan izgled boje. Stoga se pri merenju boja svi dodatni faktori koji mogu uticati na vrednost koja se meri strogo kontrolišu dok se tri glavna faktora jasno preciziraju i ne menjaju tokom procesa merenja. Način definisanja ovih parametara preciziran je od strane CIE (fr. *The Commission Internationale de l'Eclairage*) komiteta, odgovornog za standardizaciju kvantifikovanja boja.

Objekat čija se boja procenjuje definiše se na osnovu geometrijske i spektralne distribucije zračenja koje je propušteno kroz ili reflektovano od njihove površine (Fairchild, 2005). Spektralna distribucija je u većini slučajeva dovoljna, jer se u praksi uglavnom posmatra jedna ravan objekta koji se procenjuje. Da bi se ova veličina mogla definisati neovisno od izvora svetla, za objekte koji reflektuju zračenje precizira se u vidu spektralne reflektanse (Ohta & Robertson, 2005), odnosno procenta reflektovanog zračenja na svakoj talasnoj dužini vidljivog dela spektra (slika 2.15). Ovakav prikaz predstavlja potpun opis boje uzorka, jer omogućava preciziranje njenog izgleda pod različitim izvorima svetla. U praksi ova veličina se određuje procenom stepena reflektovanog zračenja u poređenju sa refleksijom idealnog reflektora (bele kalibracione pločice koja se koristi za inicijaciju uređaja za merenje boja).

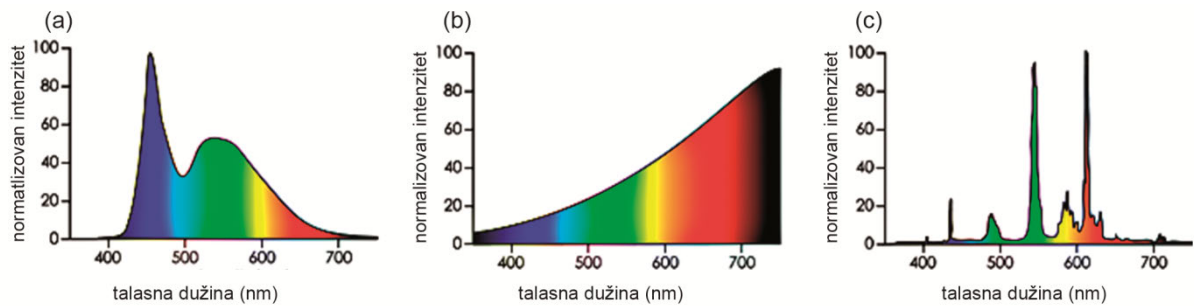


Slika 2.15. Grafički prikaz spektralnih kriva i njima pripadajućih boja

Objekat čija se boja određuje u procesu merenja predstavlja varijablu, pa je preciznije definisanje preostala dva faktora koji utiču na izgled boja (svetlosni izvor i posmatrač) od većeg značaja za samo merenje. Ovi parametri detaljnije su opisani u nastavku.

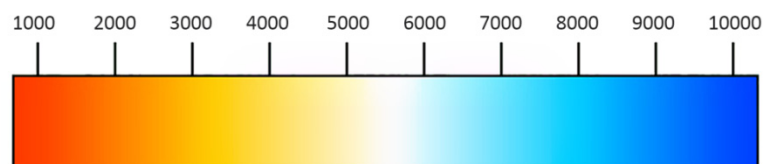
2.2.2. Standardno osvetljenje

Prema CIE, svetlosni izvori karakterišu se putem njihove spektralne raspodele snage, temperature boje i hromatskih koordinata (Gupte, 2010). Pod pojmom spektralne raspodele snage (skraćeno SPD od engl. *Spectral Power Distribution*) podrazumeva se radiometrijska veličina od značaja (energija odnosno snaga) u funkciji talasnih dužina (Sharma, 2003). Ova funkcija obično se normalizuje na način definisanja maksimalne vrednosti na talasnoj dužini od 560 nm kako bi se omogućilo adekvatno poređenje osobina izvora (Fairchild, 2005). Ovako prikazana raspodela naziva se *relativna spektralna snaga* i predstavlja bezdimenzionu veličinu. Na slici 2.16 prikazane su spektralne raspodele najzastupljenijih izvora svetla, kao intenzitet zračenja u funkciji talasne dužine.



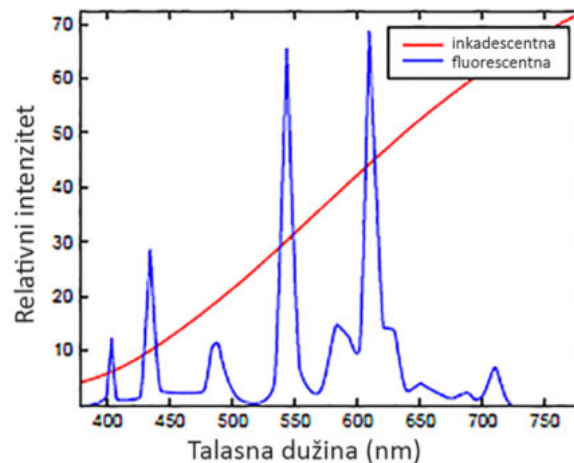
Slika 2.16. Spektralna raspodela snage (a) bele LED sijalice, (b) inkadescentne sijalice, (c) fluorescentne sijalice (izvor: Admesy, 2015)

Temperatura boje ili tačnije odnosna (korelisana) temperatura boje (CCT od engl. *Correlated Color Temperature*) je temperatura crnog tela na kojoj njegova boja u najvećoj meri odgovara izgledu boje svetla koje se procenjuje, pri čemu se procena vrši na istoj vrednosti svetline i pod odgovarajućim uslovima posmatranja (CIE/IEC, 1987). Na manjim temperaturama boja zračenja svetlosnog izvora je žuća, dok se sa porastom temperature boja svetla pomera ka plavim tonovima. Izgled boje svetla u zavisnosti od njegove temperature prikazan je na slici 2.17.



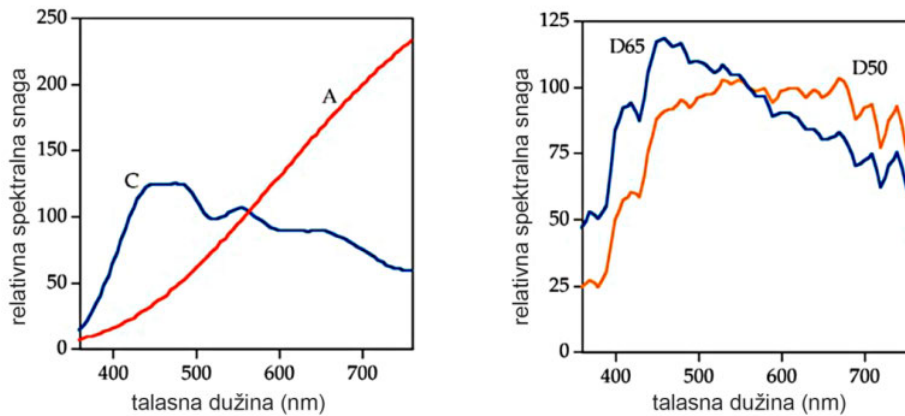
Slika 2.17. Grafički prikaz boje svetlosnog izvora u zavisnosti od njegove temperature (izražene u K)

Svetlosni izvori mogu posedovati istu odnosnu temperaturu boje, a potpuno različitu spektralnu raspodelu. Primer je dat na slici 2.18. gde se temperatura boje od 3000 K postiže sa dva izvora svetla (inkadescentnom i fluorescentnom sijalicom) čiji je stepen zračenja na talasnim dužinama vidljivog dela spektra različit. Ukoliko se prikazanim izvorima svetla osvetli jedan isti objekat, reflektovana svetlost će biti različita jer će predstavljati kombinaciju reflektanse objekta i spektralne krive izvora zračenja. Stoga je za precizan opis svetlosnog izvora neophodno definisati njegovu spektralnu raspodelu.



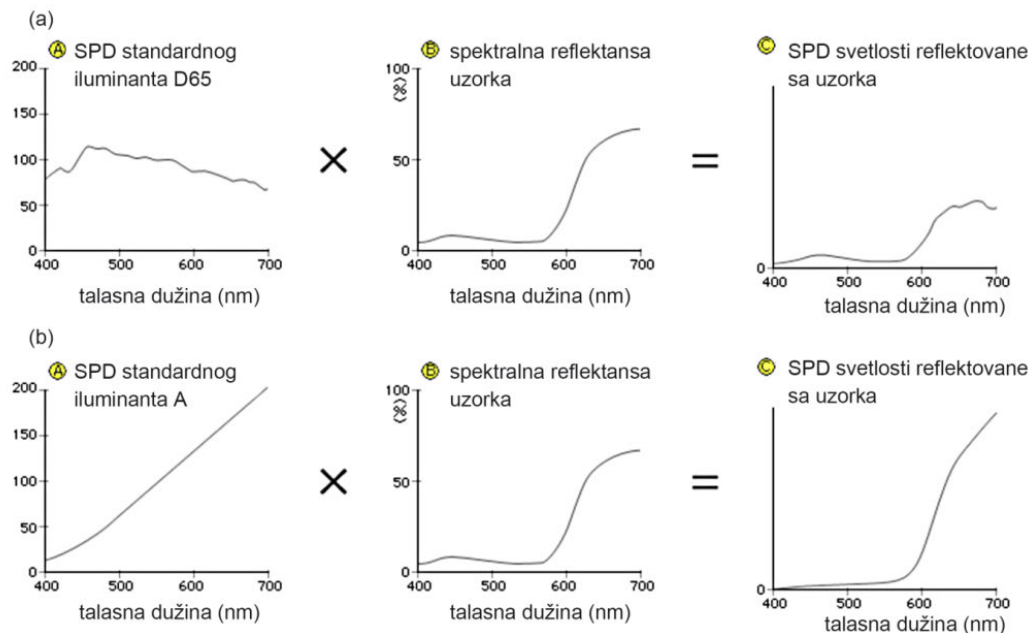
Slika 2.18. Spektralne raspodele izvora svetla istih odnosnih temperatura boje (izvor: WangMoreno)

Kako bi se omogućila ponovljivost prilikom merenja boja CIE precizira standardne iluminante koji su određeni upravo putem svoje spektralne raspodele. U grafičkoj industriji u primeni su standardni iluminant A čija raspodela odgovara sijalici sa užarenim vlaknom (CCT od 2856 K), kao i iluminanti D50 i D65 (temperatura 5000 i 6500 K) koji simuliraju dnevno svetlo (Wyszecki & Stiles, 2000). Spektralne raspodele navedenih iluminanata prikazane su na slici 2.19.



Slika 2.19. SPD standardnih iluminanata (izvor: Fairchild, 2005)

Na slici 2.20. prikazana je uticaj svetlosnog izvora na zračenje reflektovano od objekta. S obzirom na to da spektralna reflektansa objekta određuje stepen naglašavanja talasnih dužina upadnog zračenja, reflektovano zračenje će u slučaju prikazanom na slici 2.20b biti dominantnije u dugim talasima u odnosu na situaciju kada sam svetlosni izvor u spomenutom rangu talasnih dužina zrači manje (Slika 2.20a). Kako je upravo reflektovano zračenje ono što pri posmatranju objekata stiže do oka posmatrača, veoma je bitno definisati svetlosni izvor koji je prilikom posmatranja korišćen.



Slika 2.20. Izgled reflektovane svetlosti sa objekta u zavisnosti od izvora svetla (a) standardno osvetljenje D65, (b) standardno osvetljenje A (izvor: Konica Minolta, 2015)

2.2.3. Sličnost izvora svetla sa standardnim osvetljenjem

Standardna osvetljenja u praksi se realizuju pomoću standardnih izvora svetla, fizičkih izvora zračenja koja simuliraju raspodelu definisanu standardom (Wyszecki & Stiles, 2000). Kako bi se procenilo koliko zračenje standardnog izvora svetla, ali i bilo kog drugog izvora, odgovara standardnom iluminantu koriste se dva metoda:

1. metod zasnovan na razlici u izgledu serije test boja koje se karakterišu kao reprezentativne
2. metod zasnovan na razlici spektralne raspodele.

Prvi metod definisan je od strane CIE i zasniva se na određivanju indeksa prikaza boje (skraćenica CRI od engl. *Color Rendering Index*). Ovim indeksom numerički se iskazuje stepen poklapanja izgleda boja pod konkretnim izvorom svetla sa izgledom boja pod referentnim izvorom. Ukoliko je temperatura boje konkretnog izvora svetla manja od 5000 K kao referentni izvor koristi crno telo iste temperature boje. U suprotnom slučaju, referentni izvor je neki od CIE izvora koji simuliraju dnevno svetlo (serija D) (CIE, 1995). Vrednosti indeksa prikaza boje kreću se od 0-100 i što je vrednost veća, veća je sposobnost posmatranog izvora da simulira zračenje referentnog.

Međutim, ova metrika nije idealna - njom se ne može predvideti metamerizam, nije adekvatna za izvore svetla CCT manje od 5000 K (Guo & Houser, 2004) i ne može se sa istom efikasnošću primeniti za sve tipove izvora svetla. Naime, CIE tehnički izveštaj iz 2007. godine (CIE, 2007) naglašava da CRI nije adekvatan za procenu LED osvetljenja. Izveštaj je zasnovan na rezultatima niza akademskih studija u kojima je primećena veoma slaba korelacija ovog indeksa sa rezultatima vizuelnih procena ispitanika. S obzirom na to da nova metrika još uvek nije razvijena, naglašava se da indeks prikaza boje može biti korišćen i u ove svrhe, ukoliko se uz njega mere i drugi parametri koji bi mogli dati bolji uvid u to kako dati izvor prikazuje svetlo. Takođe, navodi se da u ovom slučaju razlike CRI manje od 5 nisu značajne tj. izvori deklarirani sa CRI od 80 i 84 mogu se smatrati identičnim (U.S. Department of Energy, 2008).

Stepen poklapanja spektralne raspodele određuje se koristeći CIE metod zasnovan na indeksu metamerizma (skraćenica MI od engl. *Metamerism Index*) prvi put definisanog u (CIE, 1986). MI se može definisati za konkretan izvor svetla i, mnogo češće, za simulator standardnog iluminanta. Indeks metamerizma konkretnog izvora svetla određuje se korišćenjem CIE kolorimetrijskog sistema. Procena se vrši za par boja koje su metameričke ($\Delta E^*_{ab}=0^2$) pod standardnim (referentnim) iluminantom. MI se dobija na osnovu razlike boja metameričkog para posmatranog pod test svetlom (CIE, 2004). Indeks metamerizma pri određivanju procene spektralne raspodele simulatora dnevnog svetla definiše se u vidljivom (MI_v) i UV delu spektra (MI_u). Indeks u vidljivom delu spektra predstavlja srednju vrednost razlike boja 5 metameričkih parova posmatranih pod standardnim osvetljenjem (D50, D55, D65 i D75) i simulatorom dnevnog svetla (Shanda, 1999). Procena razlike u UV delu spektra zasnovana je na istom principu.

² ΔE^*_{ab} odnosno *razlika boja* je metrika kojom se kvantitativno opisuje opažena razlika između dve boje. Vrednost 0 određuje da su boje identične, dok više vrednosti ukazuju na veća odstupanja u izgledu boja.

Za određivanje razlike boja koristi se CIELAB prostor boja, koji daje perceptualno uniformne rezultate (pri definisanju indeksa prikaza boje koristi se CIE UVW prostor boja, koji nije perceptualno uniforman). Pri tom, razlika boja predstavlja Euklidovu udaljenost između pozicija boja u definisanom prostoru. U odnosu na stepen metamerizma u vidljivom delu spektra simulatori dnevnog svetla se mogu klasifikovati prema tabeli 2.4. U tabeli su prikazane vrednosti indeksa metamerizma definisanog preko razlike boja u CIELAB i CIELUV prostoru boja i odgovarajuće klase (A-E).

Tabela 2.4. Klase indeksa metamerizma za simulatore dnevnog svetla

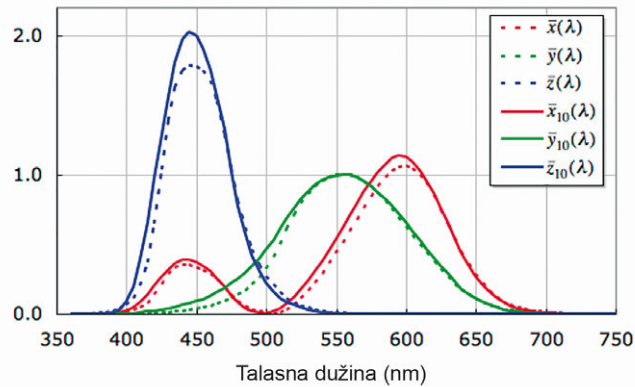
| CIELAB | CIELUV | Klasa |
|------------|-------------|-------|
| < 0.25 | < 0.32 | A |
| 0.25 - 0.5 | 0.32 - 0.65 | B |
| 0.5 - 1.0 | 0.65 - 1.3 | C |
| 1.0 - 2.0 | 1.3 - 2.6 | D |
| > 2 | > 2.6 | E |

2.2.4. Standardni posmatrač

Da bi merenje boja bilo objektivno način na koji ih posmatrač opaža takođe mora biti jasno definisan. Stoga, 1931. godine CIE uvodi pojam standardnog posmatrača, koji predstavlja prosečnu osetljivost ljudskog vizuelnog sistema na svetlost (Wyszecki & Stiles, 2000). Standardni posmatrač 1931 definisan je za posmatrača sa normalnim vizuelnim sistemom u rangu fotopskog vida³ za takozvani fovealni vid odnosno polje viđenja koje se prostire u vidnom uglu od 1° - 4° (CIE, 2004; ISO, 2007). U ovom vidnom uglu svetlost koja dopire do oka pada direktno na foveu, centralni deo mrežnjače oka koji sadrži najveći broj fotoreceptora (čepića) koji reaguju na određene delove spektra (Oleari, 2016). Stoga se standardni posmatrač 1931 aproksimira funkcijama usaglašenog stimulusa koje predstavljaju osetljivosti tri tipa čepića ljudskog oka na određene talasne dužine svetlosti (Slika 2.21). Funkcije $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ i $z(\lambda)$ predstavljaju odziv L, M i S čepića koji reaguju na duge, srednje i kratke talase. Standardni posmatrač 1931 označava se i kao standardni posmatrač 2° da bi se precizirala ekscentričnost mrežnjače unutar koje su čepići dominantni.

S obzirom na činjenicu da broj čepića opada od centra mrežnjače ka periferiji, osetljivost ljudskog vizuelnog sistema na opažanje različitih talasnih dužina varira u zavisnosti od veličine objekta koji se posmatra. Iz tog razloga CIE 1964. godine uvodi pojam (dodatnog) standardnog posmatrača koji opisuje ekstra-fovealno viđenje, odnosno prosečnu reakciju na stimulus koji se prostire u vidnom uglu od 10° (Oleari, 2016). U praktičnoj primeni, standardni posmatrač 1964 (ili 10°) koristi se kada objekat koji se meri obuhvata više od 4° vidnog ugla detektora. Funkcije usaglašenog stimulusa za standardnog posmatrača 10° prikazane su na slici 2.21.

³ Posmatranje u uslovima dobre osvetljenosti (luminansa od 10-10⁸ cd/m²). U ovom slučaju aktivni su čepići, fotoreceptori oka koji omogućavaju viđenje boja.



Slika 2.21. Prikaz funkcija usaglašenog stimulusa za CIE standardne posmatrače 2° i 10° (izvor: Ohno, 2015)

2.2.5. Kolorimetrijske vrednosti boja

Nauka koja se bavi definisanjem vrednosti boja naziva se kolorimetrija, pa se stoga vrednosti dobijene merenjem boja neretko nazivaju kolorimetrijske vrednosti. Numeričke vrednosti boje određuju se kao međuzavisnost svih prethodno navedenih parametara na način (Ohta & Robertson, 2000):

$$X = k \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d(\lambda) \tag{2.4}$$

$$Y = k \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda) \tag{2.5}$$

$$Z = k \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d(\lambda) \tag{2.6}$$

Gde su: X, Y, Z - tristimulusne vrednosti

k – konstanta skaliranja

$\phi(\lambda)$ – spektralna raspodela stimulusa

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ - funkcije usaglašenog stimulusa (2° ili 10°).

Za slučaj reflektivnih objekata, spektralna raspodela objekta predstavlja umnožak njegove reflektanse i spektralne raspodele izvora svetla:

$$X = k \int_{\lambda} \rho(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d(\lambda) \tag{2.7}$$

$$Y = k \int_{\lambda} \rho(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda) \tag{2.8}$$

$$Z = k \int_{\lambda} \rho(\lambda) S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d(\lambda) \tag{2.9}$$

gde su: $\rho(\lambda)$ – reflektansa objekta

$S(\lambda)$ – spektralna raspodela izvora svetla.

Za izračunavanje tristimulusnih vrednosti u praktičnoj primeni koristi se diskretni oblik jednačine pri čemu se umesto integrala koristi suma, dok je interval $\Delta\lambda$ u ovom slučaju određen spektralnom rezolucijom mernog uređaja (obično 5-10 nm).

Konstanta k određuje se na dva načina u zavisnosti od moda definisanja veličine. U apsolutnoj kolorimetriji ova vrednost iznosi 683 lumen/W, čime se sistema kolorimetrije približava fotometriji

(Fairchild, 2005). U relativnom smislu, koji se primenjuje pri praktičnom merenju boja, konstanta k definiše se kao (Ohta & Robertson, 2000):

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)} \quad (2.10)$$

Konstanta je definisana na ovaj način kako bi tristimulusna vrednost Y (koja grubo opisuje svetlinu boje) imala vrednost 100 za objekat koji u potpunosti reflektuje upadni spektar zračenja ($\rho(\lambda)=1$ za svako λ).

Tristimulusne vrednosti precizno opisuju vrednost boje u trodimenzionalnom CIEXYZ koordinatnom sistemu pri čemu vrednost X grubo odgovara crvenoj boji, vrednost Y zelenoj, dok vrednost Z opisuje udeo plave boje u posmatranoj boji. Kako bi se omogućila lakša komunikacija i boje predstavile tako da njihove numeričke vrednosti odgovaraju opaženom stimulusu, vrednosti boja u grafičkoj i mnogim drugim industrijama iskazuju se u trodimenzionalnom CIELAB prostoru boja, čije se ose označavaju sa L^* , a^* i b^* . Ovaj prostor definisan je kao perceptualno uniforman, odnosno, formiran je tako da udaljenosti jedne boje od druge u definisanom koordinatnom sistemu odgovaraju njihovoj opaženoj razlici. Vrednost L^* odgovara svetlini, dok su a^* i b^* hromatske ose od kojih a^* opisuje boju na skali crveno-zelena, a b^* na skali plavo-žuto. Svetlina se skalira u rangju od 0-100, gde 0 predstavlja crnu boju, a 100 potpuno belu. Kada su hromatske ose u pitanju, negativne a^* vrednosti označavaju da je boja više zelena, dok pozitivne određuju dominantan crveni ton, dok u slučaju b^* koordinate negativne vrednosti označavaju plavi ton, a pozitivne žutu boju. Svaka opažena boja jednoznačno se može opisati pomoću tri navedene koordinate.

Konverzija iz tristimulusnih vrednosti u CIELAB definisana je na način (Ohta & Robertson, 2000):

$$L^* = 116 f(Y/Y_n) - 16 \quad (2.11)$$

$$a^* = 500 f(X/X_n) - f(Y/Y_n) \quad (2.12)$$

$$b^* = 200 f(Z/Z_n) - f(Y/Y_n) \quad (2.13)$$

gde su X, Y i Z tristimulsne vrednosti objekta čija se boja određuje, a X_n, Y_n i Z_n tristimulusne vrednosti idealnog reflektora (bele boje) pod istim osvetljenjem. Pri tom je:

$$f(X/X_n) = \begin{cases} (X/X_n)^{\frac{1}{3}}, & X/X_n > 0.008856 \\ 7.787 (X/X_n) + 0.1379, & X/X_n \leq 0.008856 \end{cases} \quad (2.14)$$

Funkcije $f(Y/Y_n)$ i $f(Z/Z_n)$ dobijaju se analogno (2.14).

2.2.6. Uređaji za merenje boja

CIELAB vrednosti jednoznačno se određuju mernim uređajima – kolorimetrima i spektrofotometrima. Kolorimetri su uređaji jednostavnije konstrukcije, jer se svetlo reflektovano sa objekta propušta kroz tri filtera - crveni, zeleni i plavi. Intenzitet zračenja nakon filtriranja odgovara CIEXYZ vrednostima, pa se kolorimetrijske vrednosti dobijaju direktnim merenjem. Spektrofotometri predstavljaju kompleksnije instrumente, jer se svetlo nakon reflektovanja pomoću

monohromatora razdvaja na delove spektra. Time se omogućava određivanje reflektanse boje i samim tim njen najprecizniji opis. Kako je u ovom radu za karakterizaciju vrednosti boja uzoraka korišćen spektrofotometrijski pristup akcentat će biti stavljen upravo na ove uređaje. Princip funkcionisanja ovih uređaja iscrpno je opisan u nizu publikacija (Wyszecki & Stiles, 2000; Klein, 2010; Hunt & Pointer, 2011). Za potrebe ovog istraživanja od značaja je osvrnuti se na segment njihove konstrukcije opisan u nastavku.

Spektrofotometar se sastoji od tri osnovna dela: izvora svetla, sistema za razdvajanje svetla na delove spektra i detektora. Kao izvori svetla obično se koriste inkadescentne ili ksenonske lampe sa odgovarajućim filterima (Sharma, 2003; Lam, 2000; Berns, 2000). Izvor svetla u idealnom slučaju nema uticaja na vrednosti merenja, jer se merenje vrši u relativnom smislu. Naime, prilikom merenja vrednost boje određuje se u odnosu na boju referentnog uzorka. Kod spektrofotometara referentni uzorak je bela kalibraciona pločica (idealni difuzer).

Ako se sa $\rho_s(\lambda)$ i $\rho_t(\lambda)$ označe reflektanse standardnog uzorka (kalibracione pločice) i test uzorka (uzorka čija se boja procenjuje), respektivno, sa $S(\lambda)$ spektralna raspodela izvora svetla, pri čemu uređaj vrši K merenja u razmaku od $\Delta\lambda$ u intervalu od $[\lambda_0, \lambda_0 + (K-1)\Delta\lambda]$ rezultat merenja standardnog uzorka može se predstaviti kao (Sharma, 2003):

$$M_s(k) = d_k S(\lambda_0 + k \Delta\lambda) \rho_s(\lambda_0 + k \Delta\lambda), \quad 0 \leq k \leq (K-1) \quad (2.15)$$

gde d_k označava osetljivost senzora uređaja na talasnoj dužini $\lambda_0 + k \Delta\lambda$. Analogno, rezultat merenja test uzorka je prikazan kao:

$$M_t(k) = d_k S(\lambda_0 + k \Delta\lambda) \rho_t(\lambda_0 + k \Delta\lambda), \quad 0 \leq k \leq (K-1) \quad (2.16)$$

Reflektansa test uzorka određuje se na način (Sharma, 2003):

$$\rho_t(\lambda_0 + k \Delta\lambda) = \frac{M_t(k)}{M_s(k)} \rho_s(\lambda_0 + k \Delta\lambda), \quad 0 \leq k \leq (K-1) \quad (2.17)$$

Na osnovu (2.9) i (2.10) jasno je da se osetljivosti senzora i spektralna raspodela izvora svetla poništavaju, te samim tim nemaju uticaja na reflektansu test uzorka. Njegova reflektansa procenjuje se na osnovu njegove spektralne raspodele ($M_t(k)$), kao i spektralne raspodele svetla reflektovanog sa kalibracione pločice ($M_s(k)$) i reflektanse same pločice. U praktičnoj primeni zbog prisustva šuma u sistemu i dinamičkog opsega detektora, poželjno je da proizvod $d_k S(\lambda_0 + k \Delta\lambda)$ bude konstantan u funkciji talasnih dužina (Sharma, 2003). Isto tako, referentni uzorak izrađuje se tako da poseduje što je moguće sličniju refleksiju na svim talasnim dužinama, kako bi se odnos $M_t(k)/M_s(k)$ jednostavnije odredio.

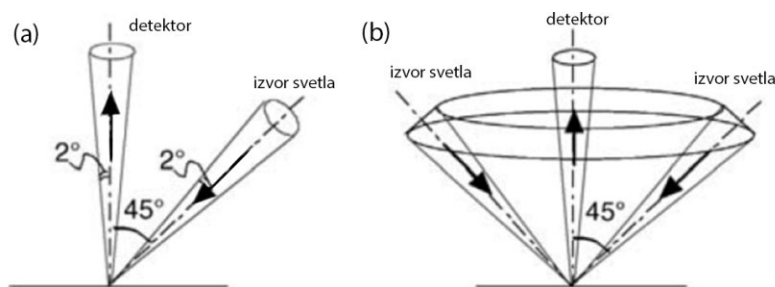
Na osnovu izmerene reflektanse uzorka određuju se kolorimetrijske vrednosti njegove boje, pri čemu se u praktičnoj primeni u obzir uzimaju standardna osvetljenja i osetljivosti standardnih posmatrača (na način koji je opisan u prethodnim sekcijama). Činjenica da izvor svetla unutar spektrofotometra

ne utiče na kolorimetrijske vrednosti boja koje se mere predstavlja važnu karakteristiku samog uređaja i naziva se „zanemarivanje izvora svetla“ (engl. *discounting the illuminant*).

Kod konvencionalnih spektrofotometara (uređaja za merenje apsorpcionih pigmenata) od položaja izvora svetla i detektora⁴ zavisi vrednost izmerene boje, jer se detektuju različiti delovi reflektovanog zračenja. Stoga je preciziranje geometrije merenja, odnosno položaja izvora svetla u odnosu na položaj detektora, od suštinskog značaja za razumevanje uslova pod kojim je merenje vršeno.

Konvencionalni uređaji uglavnom poseduju jedan izvor svetla, kao i jedan detektor čije se pozicije definišu u odnosu na normalu na tačku merenja (CIE, 2004). Merna geometrija se opisuje preciziranjem položaja izvora svetla i detektora na način: ugao upadnog zračenja/ugao detekcije reflektovanog zračenja. Za kontrolu reprodukcije boje u grafičkoj industriji uglavnom se koriste uređaji merne geometrije $45^\circ/0^\circ$ ili $0^\circ/45^\circ$ (Ohno, 2000; Hunt & Pointer, 2011). Na taj način osigurava se izbegavanje spekularne refleksije tj. refleksije svetlosti pod uglom identičnom uglu upadnog zračenja. Izbegavanje spekularne refleksije ključno je iz razloga što svetlo reflektovano u spekularnom uglu određuje sjaj uzorka, i onemogućava precizno određivanje njegove boje. Ovo je naročito značajno za materijale koji poseduju visok sjaj poput štampanih otisaka oslojenih sjajnim lakovima, na primer.

Za geometriju $45^\circ/0^\circ$ razlikuju se i dva slučaja - usmerena i kružna geometrija. Kod usmerene geometrije koristi se samo jedan izvor svetla postavljen pod uglom od 45° u odnosu na normalu, dok se kod kružne više izvora svetla postavlja pod istim uglom oko normale na uzorak kako bi se osiguralo uniformnije osvetljenje (slika 2.22). Kako bi se ova dva slučaja razlikovala dodaju se oznake pri definisanju merne geometrije - "x" za usmerenu i "c" za kružnu geometriju.



Slika 2.22. (a) Usmerena $45^\circ x/0^\circ$ geometrija, (b) kružna $45^\circ c/0^\circ$ geometrija

Ukoliko bi se konvencionalni uređaji koristili za merenje goniohromatskih uzoraka, dobijena vrednost boje ne bi bila od značaja jer bi opisivala samo jednu od boja koje se kod ovih uzoraka mogu opaziti. Stoga se za definisanje boja ovih uzoraka koriste uređaji sa više mernih geometrija, opisanih u narednim poglavljima.

⁴ Sistem za razdvajanje svetlosti na delove spektra (prizme, difrakcione rešetke ili filteri u boji) postavlja se nakon izvor svetla ili pre detektora, pa preciziranje njegove tačne pozicije nije neophodno.

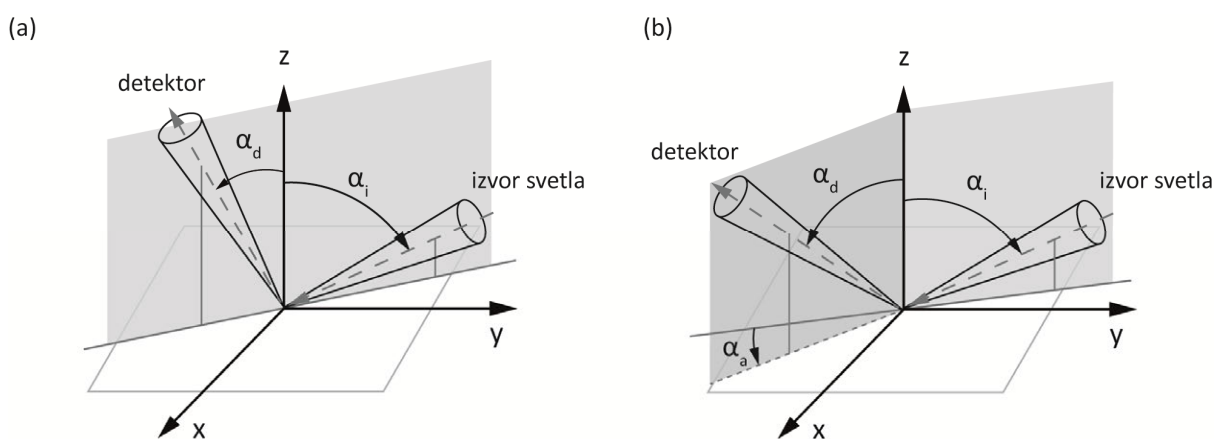
2.3. Karakterizacija vrednosti boja goniohromatskih materijala

2.3.1. Princip merenja boja goniohromatskih materijala

S obzirom na kompleksnost promene u izgledu boje goniohromatskih materijala sa variranjem pozicije izvora svetla i/ili posmatrača potpuna karakterizacija boja ovakvih uzoraka zahteva određivanje spektralne bidirekionalne funkcije distribucije reflektanse (engl. *Bidirectional Reflectance Distribution Function* - BRDF) (Ferrero et al, 2013). Pod pojmom BRDF podrazumeva se funkcija koja za svaku poziciju izvora svetla i ugao reflektovane svetlosti (u odnosu na normalu na posmatranu tačku uzorka) definiše odnos intenziteta reflektovanog i upadnog zračenja. Iako je ova funkcija primarno radiometrijski koncept, ukoliko se odnos procenat reflektovanog zračenja posmatra na svakoj talasnoj dužini vidljivog spektra omogućava se dobijanje spektralnih podataka i shodno tome pun opis boje uzorka.

Kako bi se ova funkcija generisala neophodna je veoma složena aparatura, kao i komplikovana procedura merenja koja je izvodljiva isključivo u laboratorijskim uslovima (Ferrero et al, 2014b). Pored toga, potrebno je sprovesti i izuzetno veliki broj merenja, što onemogućava laku industrijsku integraciju. Stoga se u praktičnoj primeni promena boje uzorka definiše kroz limitirani broj uglova osvetljavanja i posmatranja uzoraka, pa tako svaki uređaj za merenje boja goniohromatskih materijala poseduje veći broj geometrija merenja. Instrumenti ovog tipa nazivaju se više-ugaoni spektrofotometri ili gonio-spektrofotometri.

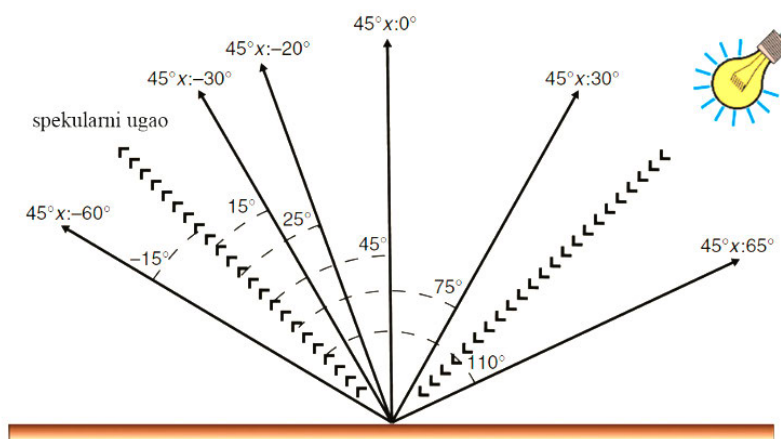
Pri merenju ovim uređajima razlikuju se merenja u ravni i van ravni upadnog zračenja (engl. *in plane* i *out of incidence plane*). Pod pojmom merenja u ravni podrazumeva se da se izvor svetla, normala na uzorak i detektor nalaze u jednoj ravni, dok se u suprotnom slučaju detektor može nalaziti van ravni upadnog snopa zračenja (slika 2.23) (Martínez-Verdú, 2011; Kehren, 2013). Ako izvor svetla i detektor ne leže u jednoj ravni, pored direkcionih uglova neophodno je definisati i azimut, odnosno odstupanje detektora od inicijalne ravni (slika 2.23b). U industrijskoj primeni, zbog jednostavnosti konstrukcije mernih uređaja, uglavnom se koristi prvi slučaj.



Slika 2.23. Merenje (a) u ravni, (b) van ravni upadnog zračenja. Sa α_i označen je ugao izvora svetla, sa α_d - ugao detektora, dok je sa α_a označen azimut

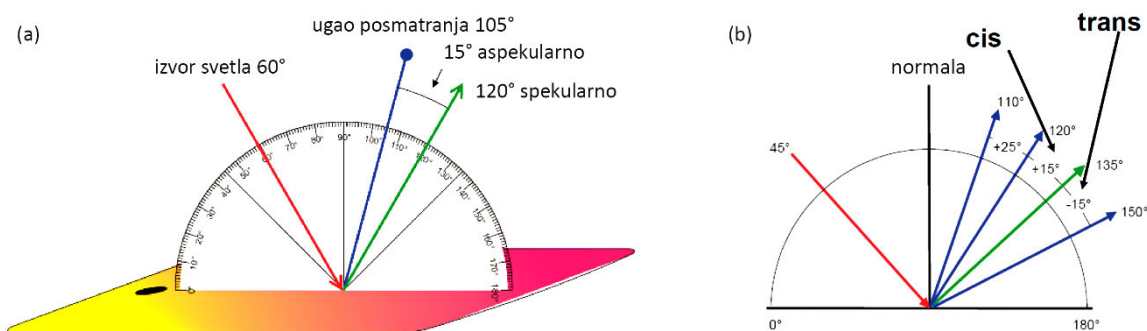
2.3.2. Merne geometrije za merenje goniohromatskih materijala

Za preciziranje mernih geometrija uređaja za merenje goniohromatskih materijala koriste se dve notacije. Prva je definisana od strane CIE (CIE, 2004) i odgovara notaciji konvencionalnih mernih uređaja. Pozicija svetlosnog izvora definiše se kao ugao između upadnog zračenja i normale na uzorak, pri čemu se ovaj ugao uvek pozitivan. Ugao detektovanog zračenja meri se takođe od normale na uzorak, s tim da je ugao negativan ako je detektor sa suprotne strane normale u odnosu na izvor svetlosti, a pozitivan u suprotnom slučaju (slika 2.24). Ovakva notacija primenjena je u (Rösler, 1990; Cramer & Gabel, 2001; Hupp & Dörsam, 2007; Chorro et al, 2015).



Slika 2.24. Definisane pozicije izvora zračenja i detektora u odnosu na normalu na uzorak (izvor: Chorro et al, 2015)

Po drugoj notaciji, koja je znatno zastupljenija u praktičnoj primeni (ASTM, 2012), pozicija izvora svetla definiše se kao i u prethodnom slučaju, dok se pozicija detektora određuje u odnosu na spekularni ugao (slika 2.25a). Stoga se ugao refleksije u ovom slučaju karakteriše kao aspekularni, pri čemu se u označavanju koristi skraćenica "asp" ili "as". Kod definisanja pozicije detektora razlikuju se takozvane "cis" i "trans" geometrije. Pod pojmom "cis" geometrije merenja podrazumevaju se geometrije kod kojih su pozicija izvora svetla i detektora na istoj strani u odnosu na spekularni ugao, dok je kod "trans" geometrije detektor na suprotnoj strani spekularnog ugla od osvetljenja (slika 2.25b). Aspekularni uglovi cis geometrija označavaju se sa pozitivnim predznakom, dok se kod trans geometrija definišu kao negativni (slika 2.25b).



Slika 2.25. Definisane pozicije izvora zračenja i detektora (a) princip označavanja pozicije detektora, (b) cis i trans geometrije (izvor: Martínez-Verdú, 2011)

Zbog veće zastupljenosti u praktičnoj primeni biće korišćena druga notacija - izvor svetla biće definisan u odnosu na normalu, dok će se detektor precizirati u odnosu na spekularni ugao.

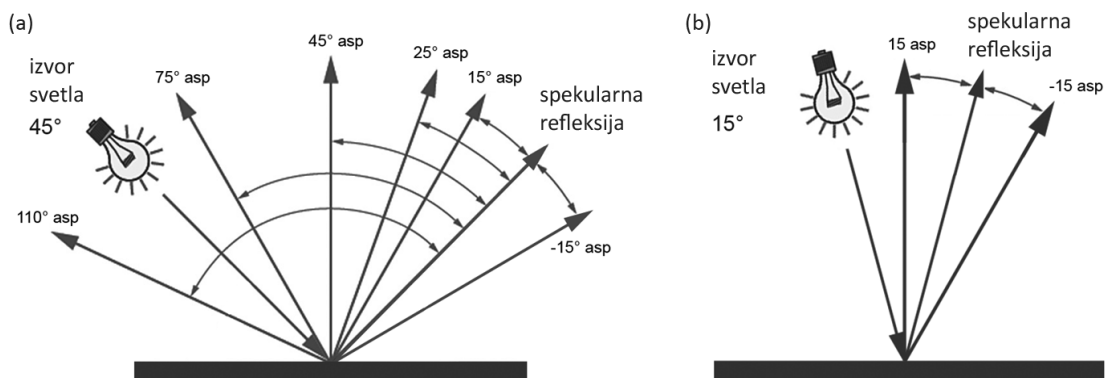
Merne geometrije za merenje goniohromatskih uzoraka određene su na osnovu dve osnovne promene u izgledu boje, koje su posebno izražene kod uzoraka oslojenih interferentnim i perlascentnim pigmentima (Cramer & Gabel, 2001):

- Promena uzrokovana variranjem položaja izvora svetla dok je položaj posmatrača/detektora konstantan. Ovo je tipična promena nastala interferencijom, pa se stoga ovako posmatrana promena u boji naziva *interferentni pomeraj*.
- Promena uzrokovana variranjem ugla posmatranja/detektovanja dok je položaj izvora svetla konstantan. U ovom slučaju (u zavisnosti od položaja izvora svetla) mogu se iscrtati tipične krive boja, koje imaju tendenciju da konvergiraju ka jednoj tački sa porastom vidnog ugla. Ovaj fenomen je poznat kao *aspekularni pomeraj*.

Tokom godina načinjeno je niz pokušaja da se proceni optimalna postavka za potpunu karakterizaciju boja goniohromatskih uzoraka. Takagi i saradnici (Takagi et al, 2007) definišu 1485 pozicija merenja za potpun opis promena u obojenju sa uglom posmatranja goniohromatskih materijala u automobilskoj industriji, dok se u kasnijim radovima pokazuje da je tako veliki broj merenja u praktičnoj primeni nepotreban. Ferrero i saradnici (Ferrero et al, 2013) predlažu 9 geometrija merenja zasnovanih na 2 ugla osvetljavanja i kombinaciji aspekularnih pozicija detektora. Preporuke su bazirane na određivanju bidirekionalne funkcije distribucije reflektanse i dokazane kao adekvatne korišćenjem komercijalno dostupnih uređaja (Ferrero et al, 2015). Autori preporučuju da izvori svetla budu pozicionirani pod uglovima od 20° i 50°, dok bi detektori trebali biti postavljeni pod uglovima -10, 10, 20, 30 i 50° asp ukoliko je izvor svetla pod uglom od 20°, kao i -20, 20, 80 i 120 za izvor svetla od 50° (Ferrero et al, 2014a).

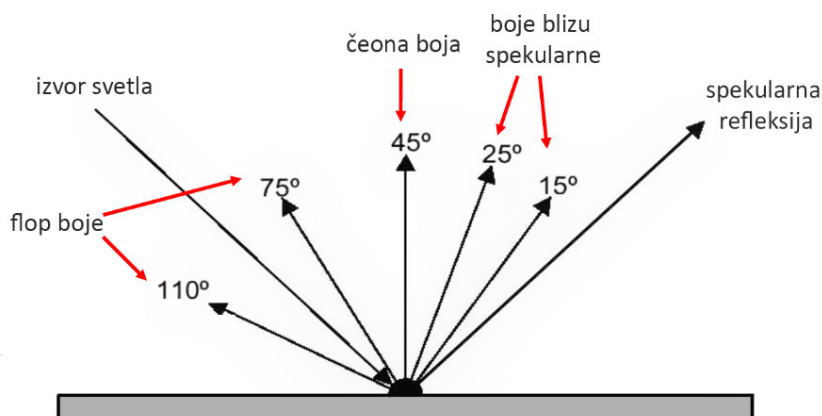
Specifično za perlascentne pigmente, preporuke za merenje mogu se pronaći u radovima (Nadal & Early, 2004; Kirchner & Cramer, 2012; Cramer, 2013). Nadal i Early predlažu da se kolorimetrijska procena vrši na osnovu 3 ugla osvetljavanja uzoraka (15°, 45°, 65°) i 5 aspekularnih uglova procene (15°, 35°, 45°, 70° i 85°) za svaki od uglova osvetljenja (Nadal & Early, 2004), dok Kirchner i Cramer uvode specifične uglove zasnovane na aproksimaciji položaja pigmenta unutar sloja premaza (Kirchner & Cramer, 2012).

U industrijskoj primeni, za opis aspekularnog i interferentnog pomeraja koriste se preporuke ASTM E2539 – 12 standarda. Ovaj standard propisuje merenje sa dva izvora svetla (pod uglovima od 45° i 15° u odnosu na normalu) i različitim pozicijama detektora. Za ugao od 45° merenje reflektovanog zračenja se vrši u uglovima od -15°, 15°, 25°, 45°, 75° i 110° asp, dok se detektori za izvor svetla od 15° nalaze na uglovima od -15° i 15° asp (slika 2.26).



Slika 2.26. Merne geometrije za merenje interferentnih pigmentata definisane standardom ASTM E2539 – 12: izvori svetla pod uglom od (a) 45°, (b) 15°, kao i odgovarajuće pozicije detektora

Od spomenutih mernih geometrija, 3 su neizostavne kako bi se mogle definisati tri dominantne boje goniohromatskih materijala. Ove boje karakterišu aspekularni pomeraj i nazivaju se boje blizu spekularne, čeona boja i flop boje (Martínez-Verdú, 2011). Boje blizu spekularne definišu ton koji se opaža kada se uzorak posmatra pod uglom bliskom spekularnom uglu (15° ili 25° asp), dok je čeona boja ona koja se opaža kada se uzorak posmatra pod 45° asp (slika 2.5). Flop boja je boja koja se opaža u niskim uglovima posmatranja (obično 110° ili 75° asp) (slika 2.27). Iako vrednosti boja merenih u spomenute 3 geometrije ne pokrivaju sve promene u obojenju koji se goniohromatskim pigmentima mogu postići, za kontrolu reprodukcije boja definišu se kao dovoljne (Berns, 2000). Spomenute geometrije integrisane su u komercijalne uređaje za merenje boja kao što je opisano u nastavku.

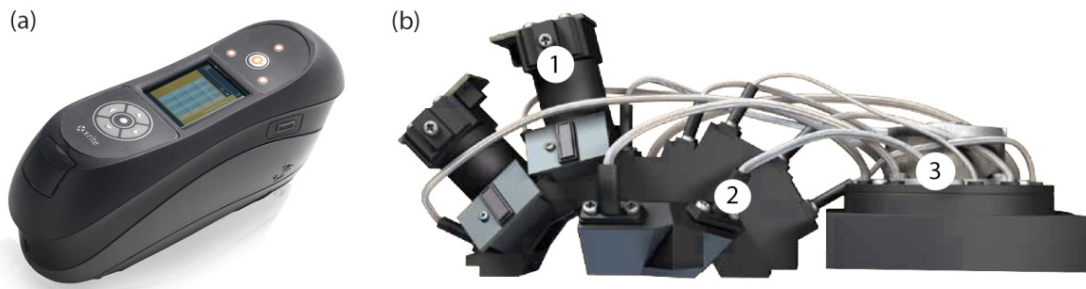


Slika 2.27. Dominantne boje kod goniohromatskih materijala (izvor: Martínez-Verdú, 2011)

2.3.3. Merni uređaji - industrijska i laboratorijska rešenja

Za merenje boja koje poseduju goniohromatske osobine uglavnom se koriste gonio-spektrofotometri, odnosno spektrofotometri koji omogućavaju višeugaono merenje. Ovi uređaji poseduju više izvora svetla, kao i više detektora postavljenih pod različitim uglovima (slika 2.28). Izbor mernih geometrija uglavnom prati zahteve ASTM E2539 – 12 standarda, pri čemu pojedini uređaji poseduju

i nestandardne geometrije. Pregled komercijalnih uređaja sa osvrtom na geometrije merenja dat je u tabeli 2.5.

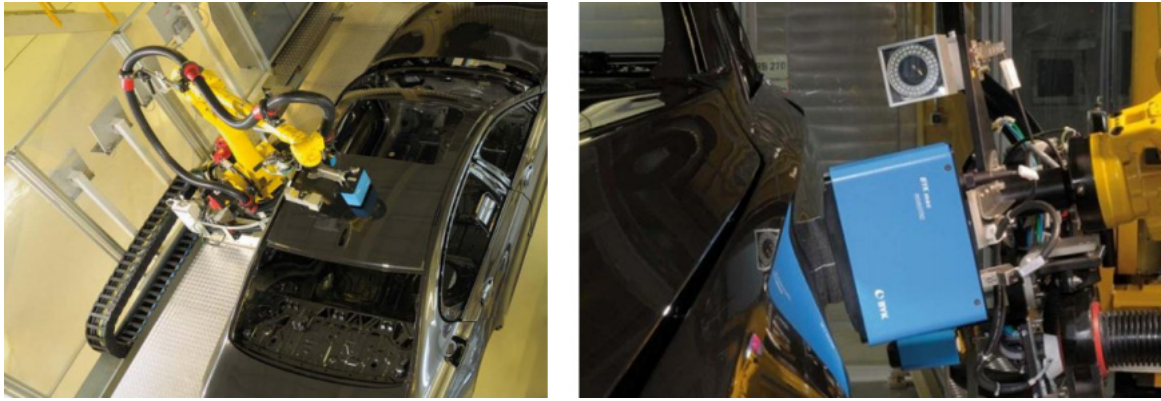


Slika 2.28. (a) Izgled gonio-spektrofotometra X-Rite MA98, kao i (b) njegovi osnovni delovi: 1- jedan od izvora svetla (15° u odnosu na normalu), 2 - jedan od detektora, 3 - motor za dinamičko rotiranje uzoraka koji omogućava promenu pozicije 31 filtera u boji za razdvajanje svetlosti na delove spektra (izvor: X-Rite, 2010)

Tabela 2.5. Pregled mernih geometrija komercijalnih gonio-spektrofotometara (izvori: X-Rite, 2010; Konica Minolta, 2015; Weixel, 2010; Chorro et al, 2014; Cramer & Gabel, 2001)

| Merni uređaj | Pozicija izvora svetla (u odnosu na normalu) | Pozicija detektora (asp) |
|--------------------------|--|--|
| X-Rite MA98 | 45° | $-15^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 110^\circ$ |
| | 15° | $-15^\circ, 15^\circ$ |
| GretagMacbeth AutoEye | 45° | $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 110^\circ$ |
| BYK-mac | 45° | $-15^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 110^\circ$ |
| Konica Minolta CM-512m3A | 25° | -25° |
| | 45° | -45° |
| | 75° | -75° |
| Phyma WICO 10 | 45° | $-22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ, 0^\circ, 112,5^\circ$ |
| | $22,5^\circ$ | $-45^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ, 90^\circ$ |
| Datacolor Multi FX10 | 45° | $-15^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 110^\circ$ |
| | 15° | $-15^\circ, 15^\circ$ |
| | 65° | $-15^\circ, 15^\circ$ |

X-Rite MA98 omogućava i merenje van ravni upadnog zračenja, dok uređaj BYK-mac meri i zrnastost, kao i odsjaj korišćenjem dodatnih CCD senzora i naknadnom analizom snimljene slike. Za merenje odsjaja koriste se uglovi osvetljavanja od 15° , 45° i 75° , pri čemu se CCD senzor nalazi na normali, dok se procena zrnastosti vrši osvetljavanjem uzorka difuznim svetlom (Weixel, 2010). Ovaj uređaj dostupan je i u varijanti BYK-mac ROBOTIC, koji se može instaritati na robotske sisteme (slika 2.29) kako bi se kontrola boje vršila automatski tokom proizvodnje (Eid, 2013).



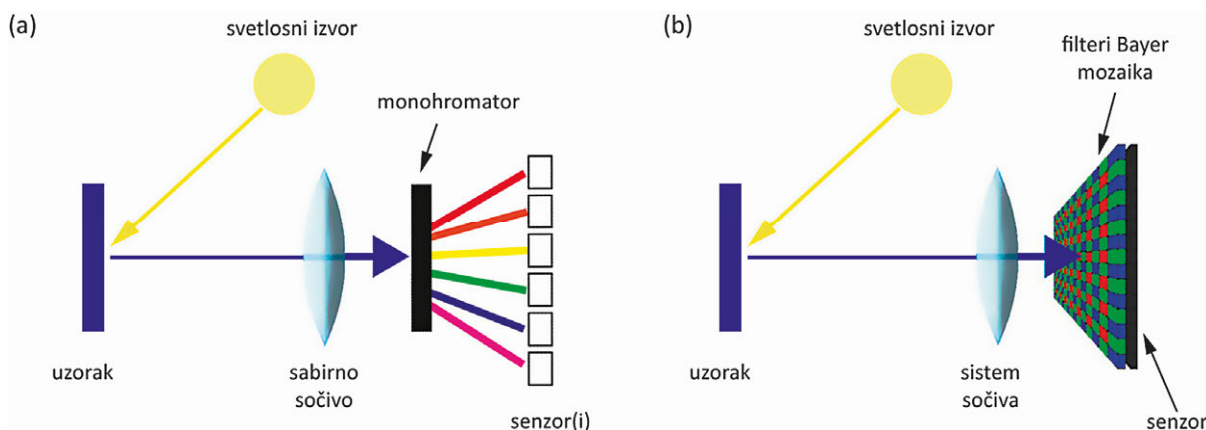
Slika 2.29. Automatska kontrola reprodukcije boja u automobilske industriji korišćenjem uređaja BYK-mac ROBOTIC (izvor: Eid, 2013)

Pored industrijskih uređaja, razvijeno je i niz laboratorijskih rešenja koja omogućavaju određivanje vrednosti boja goniohromatskih uzoraka (Tsuchida et al, 2005; Hünerhoff et al, 2006; Atamas et al, 2012; Rabal et al, 2012; Matsapey et al, 2013; Sole et al, 2015; Kim et al, 2015). Ova rešenja su uglavnom koncipirana s ciljem određivanja BRDF, pri čemu se za promenu pozicije uzoraka koriste robotske ruke (Hünerhoff et al, 2006; Atamas et al, 2012; Rabal et al, 2012) ili klizači (Kim et al, 2015), dok se izvor svetla ili detektor rotiraju u jednoj ravni ili su u potpunosti fiksirani (Matsapey et al, 2013). U pojedinim pristupima umesto klasičnih fotodetektora koriste se CCD kamere (Tsuchida et al, 2005; Atamas et al, 2012; Kim et al, 2015). CCD kamera iskorišćena je i za određivanje reflektovanog zračenja u radu Sole i saradnika (Sole et al, 2015).

2.4. Digitalna kamera kao uređaj za merenje boja

2.4.1. Princip određivanja boje na osnovu odziva kamere

Ideja određivanja kolorimetrijskih vrednosti boja na osnovu odziva digitalne kamere nastala je usled sličnosti njene konstrukcije sa konstrukcijom uređaja za merenja boja (slika 2.30). Tipičan merni uređaj sastoji se od izvora svetla, sabirnog sočiva koje svetlo reflektovano od objekta usmerava ka monohromatoru (kod spektrofotometra) ili filterima (u slučaju kolorimetra) i senzoru ili više njih koji detektuju stepen reflektovanog zračenja na određenom opsegu talasnih dužina.



Slika 2.30. Princip određivanja vrednosti boja uzorka (a) spektrofotometrom, (b) digitalnom kamerom

Digitalne kamere s druge strane ne poseduju svetlosni izvor, već je on definisan unutar scene koja se snima. Nakon interakcije sa objektom snimanja reflektovano zračenje dopire do objektiva kamere koji se sastoji od sistema sočiva, postavljenih tako da omoguće fokusiranje svetlosnih zraka ka senzoru uz što manje rasipanje unutar sistema. Kod konvencionalnih digitalnih kamera razdvajanje svetlosti se vrši pozicioniranjem filtera u boji ispred senzora, pri čemu su kod većine kamera filteri raspoređeni u formi tzv. Bayer mozaika (slika 2.30b). Nakon prolaska svetlosti kroz filtere, senzor kamere detektuje intenzitet crvene, zelene i plave boje u zavisnosti od pozicije filtera. Konačna vrednost boje svakog piksela digitalne slike dobija se interpolacijom.

Uzimajući u obzir spektralnu raspodelu izvora svetla pod kojim je snimanje vršeno, reflektansu uzorka i spektralne osetljivosti RGB kanala digitalne kamere R , G i B vrednosti uzorka koji se snima mogu se iskazati na način (Harderberg, 2001):

$$R = \int_{\lambda} \rho(\lambda)S(\lambda)s_R(\lambda) d\lambda \quad (2.18)$$

$$G = \int_{\lambda} \rho(\lambda)S(\lambda)s_G(\lambda) d\lambda \quad (2.19)$$

$$B = \int_{\lambda} \rho(\lambda)S(\lambda)s_B(\lambda)d\lambda \quad (2.20)$$

Gde je: $\rho(\lambda)$ – reflektansa uzorka na talasnoj dužini λ ,

$S(\lambda)$ – spektralna raspodela izvora svetla pod kojim je snimanje vršeno,

s_R , s_G i s_B – spektralne osetljivosti R , G i B kanala, respektivno.

Zbog jednostavnosti zapisa, u prethodnim jednačinama pretpostavljeno je da je šum unutar sistema na nivou koji se može zanemariti.

Spektralne osetljivosti zavise od propusnosti filtera i osetljivosti samog senzora (Martínez-Verdu et al, 2010):

$$s_R(\lambda) = t_{UV}(\lambda)t_{IR}(\lambda)t_R(\lambda)s(\lambda) \quad (2.21)$$

$$s_G(\lambda) = t_{UV}(\lambda)t_{IR}(\lambda)t_G(\lambda)s(\lambda) \quad (2.22)$$

$$s_B(\lambda) = t_{UV}(\lambda)t_{IR}(\lambda)t_B(\lambda)s(\lambda) \quad (2.23)$$

Gde su: $t_{UV}(\lambda)$ – transmitansa UV filtera na talasnoj dužini λ ,
 $t_{IR}(\lambda)$ – transmitansa IR filtera na talasnoj dužini λ ,
 $t_R(\lambda), t_G(\lambda), t_B(\lambda)$ – transmitanse crvenog, zelenog i plavog filtera, respektivno,
 $s(\lambda)$ - osetljivost senzora na talasnoj dužini λ .

Poredeći jednačine 2.18-2.20 sa načinom određivanja CIEXYZ vrednosti boja mernim uređajem (jednačine 2.7-2.9, strana 26) mogu se uočiti razlike navedenih pristupa određivanja vrednosti boja. Ukoliko se snimanje kamerom vrši pod izvorom svetla koje ima spektralnu raspodelu identičnu standardnom iluminantu, jedina razlika u merenju uređajem i kamerom bila bi zapravo osetljivost detektora. U praksi međutim, veoma mali broj svetlosnih izvora omogućava zadovoljavajuću simulaciju standardnih osvetljenja. Problem može predstavljati i uniformnost osvetljavanja uzorka koji se snima, kao i varijacije u intenzitetu zračenja svetlosnog izvora ukoliko se snimanje vrši u nekontrolisanim uslovima. Pored toga, većina komercijalno dostupnih kamera na ispunjava Luther-Ives uslov (Sharma, 2003; De Lasarte et al, 2010; Martínez-Verdú et al, 2010), odnosno odziv filtera ne predstavlja linearnu kombinaciju funkcija usaglašenog stimulusa. Stoga nužno postoje razlike u vrednostima izmerenih boja sa korišćenjem uređaja i digitalne kamere, pri čemu su vrednosti dobijene kamerom u velikoj meri zavisne od njene konstrukcije.

Ukoliko se digitalna kamera koristi za procenu vrednosti boja ove razlike moraju biti prevaziđene. Upravo to predstavlja zadatak karakterizacije kamere, procedure u kojoj se definiše veza između RGB vrednosti kamere i CIE vrednosti boja (CIEXYZ ili CIELAB). U teoriji, proces karakterizacije sastoji se od 3 koraka (Martínez-Verdú et al, 2010):

- *Prostorna karakterizacija*, koja podrazumeva ispravljanje prostorne neuniformnosti senzora kamere pri ravnomernoj osvetljenosti uzorka⁵
- *Spektralna karakterizacija*, koja podrazumeva određivanje pseudo-funkcija usaglašenog stimulusa kamere, odnosno, odziva njenih kanala za svaku talasnu dužinu zračenja
- *Kolorimetrijska karakterizacija*, odnosno proces definisanja veze između RGB vrednosti kamere i kolorimetrijskih vrednosti boja

⁵ Ova neuniformnost obično nastaje usled zakrivljenja sočiva u objektivu kamere.

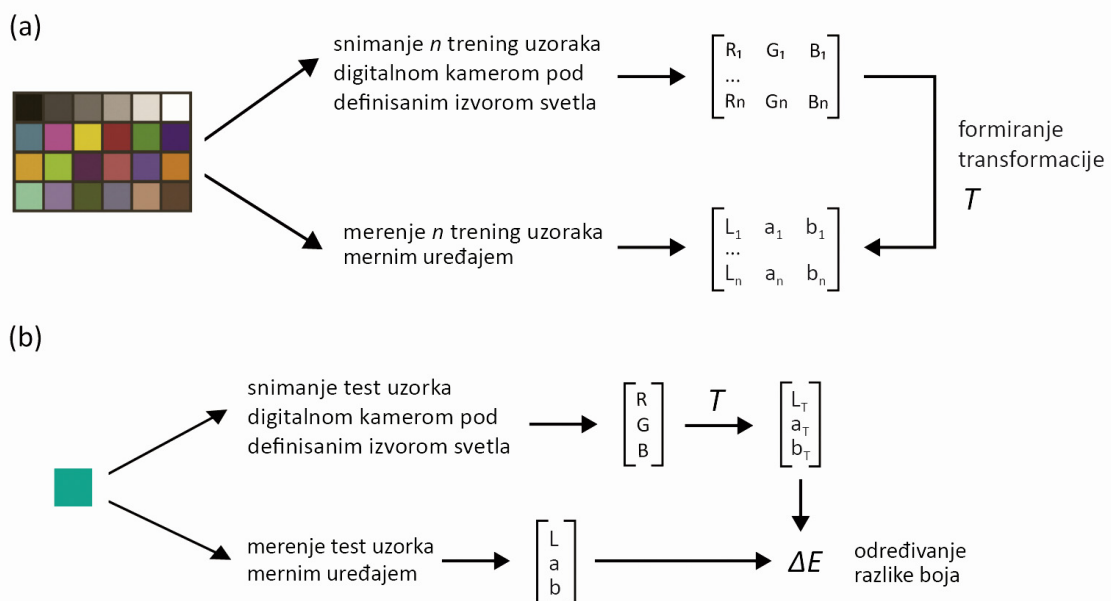
Ukoliko je cilj određivanje kolorimetrijskih vrednosti kamerom, a ne reflektanse merenih boja, spektralna karakterizacija može se zanemariti. U tom slučaju pristupa se direktnoj metodi (Hong et al, 2001), odnosno proceduri kolorimetrijske karakterizacije.

2.4.2. Metode kolorimetrijske karakterizacije digitalne kamere

Za određivanje veze između RGB i CIE vrednosti boja koriste se dva pristupa – pristup zasnovan na modelu i empirijski pristup (Balasubramanian, 2003).

Prvi pristup zasnovan je na matematičkom opisu fizičkog procesa detektovanja i procesiranja boja od strane digitalne kamere (Barnard & Funt, 2002). Prednost ovog pristupa je u tome što je za modeliranje funkcije mapiranja neophodan manji broj uzoraka različitih boja, kao i to što se do neke mere može generalizovati za različite uslove snimanja. S druge strane, ukoliko se karakterizacija vrši na ovaj način spektralne osetljivosti senzora kamere moraju biti poznate, što u praksi komplikuje sprovođenje same procedure. Za određivanje spektralnih osetljivosti neophodna je veoma komplikovana aparatura (monohromator, integraciona sfera i spektrometar), a sam proces je veoma vremenski zahtevan (Balasubramanian, 2003; Martínez-Verdú et al, 2010). Pored toga, tačnost ovakvog pristupa u velikoj meri zavisi od fluktuacije signala uređaja tokom vremena. Stoga se u praksi vrlo često koristi drugi metod, koji je i primenjen u ovom radu.

Empirijska karakterizacija je pristup u kom se ignorišu karakteristike senzora kamere (kamera se tretira kao „crna kutija“) i posmatraju se jedino odzivi na poznate stimulse. U ovom pristupu niz uzoraka različitih boja (takozvani *training set*) snima se digitalnom kamerom i, poželjno u istim uslovima, mernim uređajem – spektrofotometrom ili kolorimetrom. Procedura karakterizacije zasniva se na formiranju funkcije transformacije RGB vrednosti u izmerene kolorimetrijske vrednosti (slika 2.31a) (Hong et al, 2001; Cheung et al, 2004b).



Slika 2.31. Princip empirijske karakterizacije kamere (a) Određivanje veze između RGB i kolorimetrijskih vrednosti trening seta boja, (b) Procena kolorimetrijskih vrednosti za boju iz test seta

Tačnost definisane transformacije određuje se na način snimanja novog seta uzoraka (takozvani *test set*), različitih boja od onih u trening setu, u istim uslovima snimanja, i korišćenjem prethodno definisane transformacije za određivanje kolorimetrijskih vrednosti (slika 2.31b) (De Lasarte et al, 2010). Dobijene vrednosti se zatim porede sa izmerenim na način određivanja razlike boja (slika 2.31b).

Najveća mana navedenog pristupa je to što je transformacija zavisna od ulaznog medijuma (Sharma, 2003), odnosno validna je samo za uzorke koji poseduju iste spektralne karakteristike kao uzorci trening seta (Balasubramanian, 2003). Testiranje modela sa uzorcima koji su proizvedeni na različit način od uzoraka trening seta (štampa na različitoj podlozi ili sa drugim tipom boje, na primer) uglavnom dovodi do loše estimacije (Ben Chouikha et al, 2006; Urban et al, 2007). Ovo u velikoj meri limitira generalnu primenu modela.

Za definisanje kolorimetrijske transformacije uglavnom se koriste metode linearne i polinomne regresije (Wu et al, 2000; Hong et al, 2001; Cheung et al, 2004b; Tomić et al, 2015), veštačke neuronske mreže (Cheung & Westland, 2002; Cheung et al, 2004b; Li et al, 2007), trodimenzionalne ogledne tabele sa interpolacijom i ekstrapolacijom (Kang, 2006), kao i metoda kernela (Heikkinen et al, 2007). Algoritam korišćen za definisanje transformacije igra veliku ulogu u tačnosti metode, pa je stoga ovaj uticaj dalje diskutovan u poglavlju 2.4.4.

Pored samog algoritma neretko se primenjuju i metode optimizacije koje se zasnivaju na selektivnom odabiru uzoraka trening seta (Cheung et al, 2006; Eckhard et al, 2014) ili na primeni algoritama koji omogućavaju pronalazak adekvatnih parametara transformacije (Bianco et al, 2009). U (Bianco et al, 2009) predstavljeno je zanimljivo rešenje bazirano na genetskom algoritmu (GA od engl. *Genetic Algorithm*), koje omogućava pronalazak adekvatnih parametara polinomne transformacije.

2.4.3. Ograničenja kamere kao uređaja za merenje boja

Digitalne kamere nisu dizajnirane da reprodukuju boje kolorimetrijski tačno, već perceptualno dopadljivo. Stoga, najveći izazov merenja boja kamerom predstavlja sama kamera. Kako bi se osiguralo dobijanje što tačnije vrednosti boja na osnovu odziva kamere, razlike između kamere i mernog uređaja moraju biti uzete u obzir. Ove razlike se moraju nadoknaditi u sistemu za detektovanje slike ili naknadno korigovati ukoliko je to moguće (Seymour, 2009).

Kao što je već rečeno, najveća razlika kamere i mernog uređaja predstavlja detektor. Spektralne osetljivosti kamere ne predstavljaju linearne kombinacije CIEXYZ tristimulusnih vrednosti pa su odstupanja u vrednostima detektovanih boja nužna pojava. Ipak, uprkos ovim razlikama pokazano je da je za većinu uslova snimanja moguće postići prihvatljivu reprodukciju boja čak i sa komercijalnim kamerama (Martínez-Verdú et al, 2003).

Ovo je moguće ukoliko se izbegnu ili koriguju svi ostali uzroci grešaka u detekciji boja od kojih su najznačajniji (Seymour, 2009):

- dinamički opseg kamere
- nelinearnost odziva
- rasuto svetlo unutar sistema sočiva
- neuniformnost polja snimanja
- amplitudska rezolucija
- kalibracija fotometrijske nule
- šum signala

Dinamički opseg snimanja određuje mogućnost kamere da istovremeno, sa istim podešavanjima, precizno reprodukuje veoma svetle i veoma tamne tonove scene. Ukoliko kamera ne poseduje odgovarajući dinamički opseg moguća je njegoa korekcija (De Lasarte et al, 2011), kao i korišćenje HDR (engl. *High Dynamic Range*) pristupa (Kim & Kautz, 2008).

Na nelinearnost odziva utiču strujna kola pre A/D konvertera, kao i sam konverter (Seymour, 2009). Kako se ovaj uticaj ne može izbeći i zavisi od konkretne kamere, razvijen je pristup za njegovu korekciju (Westland et al, 2012).

Rasuto svetlo u sistemu sočiva utiče na stvaranje odsjaja na snimcima koji mogu uticati na smanjenje svetline i zasićenja detektovanih boja (Tomić et al, 2014). Ovaj efekat zavisao je od okoline snimanja i može se minimizirati ukoliko se smanji refleksija objekata oko uzorka koji se meri (Seymour, 2009).

Objektivi u većini digitalnih kamera ne propuštaju svetlost uniformno po celoj površini, pa za konstantnu vrednost ulazne radjanse pikseli na centru snimka obično poseduju višu vrednost signala od onih na obodima (Sharma, 2003). Ovaj efekat može se redukovati adekvatnim izborom udaljenosti kamere od uzorka koji se digitalizuje, tako da on ne pokriva celu površinu snimka. Pored toga, uniformnost se može i kompenzovati veoma jednostavnim pristupom u kom se snima polje uniformne boje, a zatim se vrši korekcija svetline na osnovu dobijenog snimka (Sharma, 2003).

Amplitudska rezolucija odnosno kodiranje snimka sa određenim brojem bita po kanalu boje takođe može uticati na tačnost karakterizacije. Hong i saradnici (Hong et al, 2001) u svom radu dokazuju da nema razlike u tačnosti estimacije ukoliko se snimci kodiraju sa 8 i sa 12 bita po kanalu boje. Takođe, Seymour (2009) tvrdi da kodiranje sa više od 10 bita po kanalu nije opravdano jer se povećava šum signala.

Pod kalibracijom fotometrijske nule podrazumeva se podešavanje kamere da u odsustvu svetla očitava vrednost piksela od 0 (Seymour, 2009). Fotometrijska nula se određuje na osnovu pomeraja koji se dodaje analognom signalu pre digitalizovanja, i mora se oduzeti pri obradi snimaka kako bi se osigurala adekvatna reprodukcija tamnih tonova.

Konačno, u svakom sistemu, pa i u slučaju digitalnih kamera javlja se šum signala. Pravilnim izborom ekspozicije može se sprečiti većina vrsta šuma, dok se šum tamne struje, koji je prisutan nezavisno od izvora svetla i podešavanja kamere može ukloniti oduzimanjem snimka generisanog u odsustvu svetlosti od snimaka uzorka (Martínez-Verdú et al, 2002).

Takođe, većina navedenih uticaja može biti u potpunosti uklonjena ili bar umanjena usrednjavanjem vrednosti piksela slike, kako se i predlaže 17321-1:2012 (ISO, 2012). Na taj način poboljšava se ukupna tačnost merenja boja kamerom.

2.4.4. Faktori koji utiču na tačnost karakterizacije kamere

Spektralna raspodela izvora svetla koji se prilikom snimanja digitalnom kamerom koristi vrlo često odstupa od raspodele standardnih iluminanata, pa samim tim i refleksija svetlosti od uzorka pokazuje izvesna odstupanja od one koja bi bila određena mernim uređajem. Da bi se ove razlike minimizirale, poželjno je da korišćeni izvor svetla što bolje simulira standardne iluminante. ISO 17321-1:2012 (ISO, 2012) precizira da se kao izvori svetla koriste simulatori iluminanta D55, dok se u većini do sada publikovanih radova koriste simulatori standardnog osvetljenja D65 (Nadal & Early, 2003; Liu et al, 2008; Atamas, 2012).

U spomenutom standardu (ISO, 2012) naglašava se i značaj uniformnog osvetljenja površine snimanja, gde se precizira da maksimalna varijacija iluminanse na površini koja se snima može biti 1%. Da bi se postigla što veća uniformnost zahteva se i da se bar dva izvora svetla rasporede oko ose uzorka koji se snima, tako da njihovo zračenje pada na uzorak pod uglom od 45° (ISO, 2012). Odstupanja u spektralnoj raspodeli izvora svetla mogu se do neke mere kompenzovati algoritmom karakterizacije (Martínez-Verdú et al, 2003; Jang et al, 2005; Tomić et al, 2015), dok se greške uniformnosti mogu minimizirati usrednjavanjem vrednosti piksela snimka.

Pored primenjenog algoritma, karakteristika kamere i svetlosnog izvora, na tačnost empirijske karakterizacije utiču i uzorci koji se koriste za treniranje i testiranje modela. Opseg boja trening seta definiše se na osnovu primene i zavisi od algoritma karakterizacije. U globalnoj primeni opseg boja trening seta trebao bi da pokriva gamut uređaja kojima se boje reprodukuju (Sharma, 2003; Nyström, 2006) uz minimum različitih uzoraka (Harderberg et al, 1998; Cheung & Westland, 2004a; Cheung & Westland, 2006). Pored toga u trening set poželjno je uključiti i boje kritične za reprodukciju poput memorisanih boja i tonova kože (Sharma, 2003). S obzirom na to da standardizovane test karte ispunjavaju ove uslove, većina autora preferira njihovu primenu, umesto kreiranja sopstvenog seta boja (Hong et al, 2001; Cheung et al, 2004b; Soli, 2005; Bianco, 2009).

Tačnost procene određena je i brojem uzoraka trening seta. Ukoliko se algoritam trenira sa većim brojem uzoraka logično je zaključiti da će aproksimacija boje test uzorka biti preciznija. U prethodnim studijama (De Lasarte et al, 2010; Hong et al, 2001; Cheung et al, 2004b) pokazano je da se za pojedine tehnike može definisati prag tačnosti, odnosno granica nakon koje povećanje broja uzoraka trening seta ne poboljšava tačnost karakterizacije. Navedeni zaključci su zasnovani na primeni linearnog pseudo-inverzno metoda (De Lasarte et al, 2010), polinomne regresije (Hong et al, 2001) i neuronskih mreža (Cheung et al, 2004b) pri čemu su uzorci trening i test seta bile boje standardizovanih test karti (IT8 7/2, GretagMacbeth ColorChecker DC, ColorChecker ColorRendition Chart, NCS boje itd.).

Dodatni faktor koji se pri snimanju mora uzeti u obzir predstavlja i geometrija merenja. Preporuke definisane ISO standardom (ISO, 2012) za pozicioniranje izvora svetla su validne za standardne test karte, odnosno uzorke dobijene štampom absopcioni pigmentima. Gotovo sve do sada publikovane studije koristile su ovakve uzorke, kao i fiksne pozicije kamere i izvora svetla. Kada je u pitanju procena boja štampanih goniohromatskih uzoraka digitalnom kamerom, pilot studije koje su prethodile ovom istraživanju (Gebejes et al, 2013; Tomić et al, 2015) pokazale su da rezultati procene u velikoj meri zavise od ugla pozicioniranja kamere prilikom snimanja, te da je neophodno dalje istraživanje parametara koji u ovom slučaju utiču na tačnost procene.

2.4.5. Tačnost merenja boja digitalnom kamerom

Seymour (2009) u svom radu diskutuje stepen tačnosti kolorimetrijskog merenja boja pri proceni štampanih otisaka u kontekstu merenja boja kamerom. Navodi da prihvatljiva greška merenja mora biti manja od $3 \Delta E^*_{ab}$ i poželjno je da bude manja od $1 \Delta E^*_{ab}$ (Seymour, 2009). Svoje zaključke bazira na ISO 12647-2:2004, standardu koji precizira detalje procesne kontrole u ofset štampi. Iako je navedeni standard zamenjen novom verzijom, tolerancije na kojima su navedeni zaključci zasnovani nisu menjane (ISO 12647-2:2013) i veoma su slične tolerancijama za ostale tehnike štampe (ISO 12647 delovi 2-7) (ISO, 2013). Navedene tolerancije Seymour (2009) koristi da definiše mogućnost korišćenja kamere za procenu vrednosti boja štampanih otisaka, nezavisno od tehnike štampe kojom su generisani.

Ako se navedeni uslovi definišu kao polazna osnova za procenu tačnosti merenja boja digitalnom kamerom, može se zaključiti da većina empirijskih metoda ne omogućavaju postizanje zadovoljavajućeg stepena tačnosti za primenu u grafičkoj reprodukciji (Jang et al, 2005; Ben Chouikha et al, 2006; Urban et al, 2007; Bianco, 2009; Andersen & Harderberd, 2005). Srednje greške estimacije kreću se u rangu od ΔE^*_{ab} 0.5 (Liu et al, 2008) do čak 11.6 (Ben Chouikha et al, 2006), pri čemu je u većini radova prijavljena greška u opsegu od 2-4 ΔE^*_{ab} .

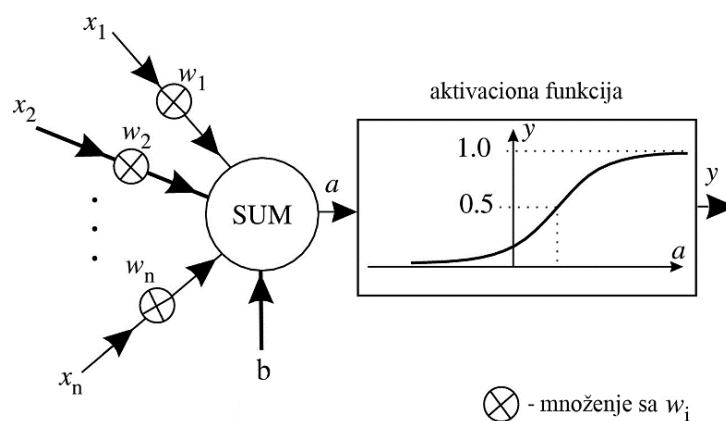
Pristupi kojima se postiže srednja greška estimacije manja od $3 \Delta E^*_{ab}$ baziraju se na polinomnoj i sličnim metodama regresije (Solli et al, 2005; Brydges et al, 1998; Hong et al, 2001; Fang et al, 2016), kao i na neuronskim mrežama (Cheung et al, 2004b; Liu et al, 2008). Bitno je napomenuti da su u navedenim studijama korišćene različite kamere, kao i različit tip uzoraka, tako da nastale greške nisu samo posledica korišćenog algoritma. Pri poređenju različitih algoritama na istom setu uzoraka i pri merenju istom kamerom, metode polinomne regresije i neuronskih mreža dale su gotovo iste rezultate (Cheung et al, 2004b). Takođe, poređenje 5 različitih metoda estimacije CIELAB vrednosti na osnovu odziva kamere pri proceni boja hrane (León et al, 2005) pokazalo je da se najbolji rezultati postižu korišćenjem neuronskih mreža. Stoga je u nastavku ova metoda detaljnije objašnjena.

2.4.6. Veštačke neuronske mreže kao metod karakterizacije digitalne kamere

Veštačka neuronska (neuralna) mreža (skraćeno ANN od engl. *Artificial Neural Network*) je matematički model kojim se simulira struktura, povezanost i funkcionalnost mreže neurona ljudskog nervnog sistema (Krenker, 2011). Predstavlja jednu od formi implementacije veštačke inteligencije, i kao takva omogućava modelovanje kompleksnih nelinearnih sistema koji se ne mogu jednostavno opisati korišćenjem klasičnih metoda (Lazar, 2013).

Svaka mreža sastoji se od jednostavnijih procesnih jedinica, nazvanih neuroni. Neuroni su funkcije koje do neke mere oponašaju funkcionalnost biološkog neurona (Krenker, 2011), međusobno su povezani vezama, pri čemu procesiona moć cele mreže zavisi od jačine pojedinačnih veza (Balasubramanian, 2003). Ove veze se formiraju adaptiranjem mreže na određeni set podataka, odnosno "učnjem" odnosno treniranjem na osnovu zadatih parametara. Težinski koeficijenti (engl. *weights*) veza između neurona ažuriraju se tokom učenja kako bi se dobio izlaz što sličniji zadatoj vrednosti. Po završetku procesa učenja, koeficijenti se ne menjaju i mreža služi za procesiranje novih podataka.

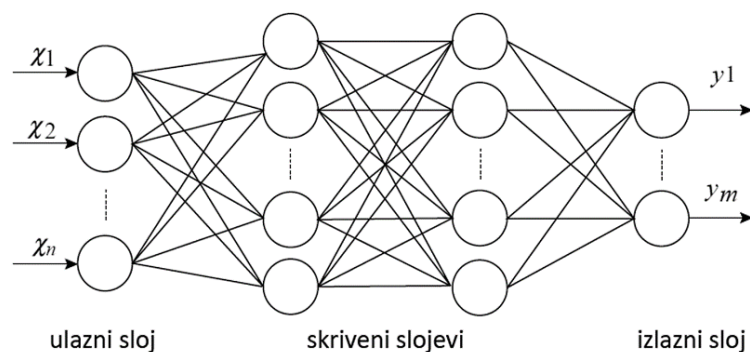
Na ulazu neurona ulazni podaci (označeni sa x na slici 2.32) bivaju ponderisani, odnosno svaka ulazna vrednost množi se pojedinačnim težinskim koeficijentom (Krenker, 2011) (označenim sa w na slici 2.32). Dobijeni umnošci se potom prenose do sumatora gde se vrši njihovo sabiranje i dodavanje vrednosti ofseta (engl. *bias*). Ukupan zbir prosleđuje se na aktivacionu funkciju (funkcija prenosa ili transfera) (Pot, 2011), čiji izlaz predstavlja izlaz neurona (y na slici 2.32).



Slika 2.32. Model neurona (izvor: Gurney, 2007)

Izlaz neurona u velikoj meri zavisi od aktivacione funkcije koja može biti linearna i nelinearna (Hagan et al, 2015). Najčešće korišćene aktivacione funkcije su prag prenosna, linearna i log-sigmoidalna funkcija (Pot, 2011). Izlaz pojedinačnog neurona predstavlja ulaz sledećeg neurona u nizu koji je sa njim povezan.

Neuroni su u mreži raspoređeni u slojeve, pri čemu se razlikuju ulazni, izlazni i skriveni sloj(evi). Ulazni sloj sadrži podatke koji predstavljaju ulaze modela, odnosno podatke koje je neophodno procesirati. Putem neurona skrivenog sloja (odnosno slojeva, budući da ih može biti više) vrši se razmena informacija između ulaza i izlaza (obično u pravcu prikazanom na slici 2.33), dok neuroni izlaznog sloja predstavljaju rezultate procesiranja tj. izlaze modela (slika 2.33.). U najzastupljenijoj konfiguraciji neuroni su raspoređeni u 3 sloja (mreža sa jednim skrivenim slojem), pri čemu ulazni signal u sledeći sloj neurona zavisi isključivo od izlaza prethodnog sloja.



Slika 2.33. Struktura neuronske mreže (izvor: Yu, 2007)

Neuronske mreže se prema smeru prostiranja informacija mogu podeliti na nerekurzivne odnosno nepovratne (engl. *feedforward*) i rekurzivne tj. povratne (engl. *feedback*) (Krenker, 2011). U prvom slučaju informacije se prostiru samo u jednom smeru (od ulaznog ka izlaznom sloju), dok se u suprotnom slučaju izlazi neurona šalju u niže slojeve (od izlaznog ka ulaznom) ili u isti sloj.

Značajna karakteristika neuronskih mreža jeste i proces učenja. Ovaj proces može biti realizovan putem niza algoritama koji omogućavaju nadgledano (engl. *supervised*) i nenadgledano (engl. *unsupervised*) učenje (Rojas, 1996). U prvom slučaju vrednosti izlaza za zadate ulaze su poznati, pa se učenje svodi na fitovanje zadatih podataka. U nenadgledanom učenju vrednosti izlaza nisu poznate, pa se proces treniranja bazira na ulaznim podacima i cost funkciji koja se minimizira (Rojas, 1996; Krenker, 2011).

U praktičnoj primeni skoro 70% problema rešava se troslojnim mrežama korišćenjem pristupa prostiranja greške unazad (engl. *backpropagation*) (Yu, 2007). Ovaj pristup koristi princip nadgledanog učenja pri treniranju nerekurzivnih mreža i predstavlja efektanu tehniku koja je u stanju da prepozna pravila i izuzetke pri generisanju veze između ulaznih i izlaznih podataka (Yu, 2007; Pot, 2011). Vrlo često se ovakve mreže nazivaju višeslojni perceptroni (skraćenica MLP od engl. *Multi Layer Perceptron*) (Pot, 2011). Opšte je prihvaćeno pravilo da se sa troslojnom mrežom sa prostiranjem greške unazad sa odgovarajućim funkcijama prenosa u izlaznom i skrivenom sloju i dovoljnih brojem neurona skrivenog sloja može aproksimirati bilo koja kontinualna funkcija (White, 1990; Lazar, 2013).

Prilikom procesa nadgledanog učenja mreža se obučava korišćenjem grupe podataka koja se naziva *training set*. Pored toga, u proces treniranja obično se uključuje i *validacioni set* koji sadrži podatke koji se ne nalaze u trening setu. Validacioni set služi za procenu generalizacije – sposobnosti mreže da klasifikuje podatke koji nisu bili dostupni tokom učenja. Greška validacionog seta obično se smanjuje u početnim fazama učenja, kao i greška trening seta. Međutim, u momentu kada dođe do prezasićenja mreže (engl. *overfitting*), odnosno kada se mreža previše prilagodi specifičnostima trening seta, greška validacije počinje da raste (Du & Swamy, 2013).

Pri primeni algoritma sa prostiranjem greške unazad, svaka iteracija treninga sastoji se od sledećih koraka (Leverington, 2009):

1. informacije o podacima trening seta propuštaju se kroz mrežu generišući rezultate u izlaznom sloju
2. na osnovu poznatih ciljnih vrednosti određuje se greška procene (obično u formi MSE), kao i potrebne promene u težinskim koeficijentima neurona izlaznog sloja
3. promene u težinskim koeficijentima se računaju za sve neurone, počev od poslednjeg sloja unazad dok svi koeficijenti nisu promenjeni

Nakon promene svih koeficijenata procedura treninga počinje ponovo. Trening se može zaustaviti nakon određenog broja epoha (definisanih od strane korisnika, obično prateći konvergenciju greške) ili kada greška validacije počinje da raste. Nakon završetka procesa učenja (treninga) procesiona moć mreže testira se na novoj grupi podataka koji se nazivaju *test set*. Ovi podaci nezavisni su od trening i validacionog seta i greška njihovog procesiranja predstavlja grešku koja se može očekivati u generalnoj primeni mreže.

Efikasnost mreže povećava se povećavanjem slojeva neurona, ali se time povećava i kompleksnost samog sistema, kao i vreme učenja. Stoga je kod primene neuronskih mreža bitno definisati optimalnu kompleksnost, odnosno, podešavanje koje će omogućiti postizanje zadovoljavajuće tačnosti bez uvođenja šuma u sistem.

Ukoliko se analizira princip empirijske karakterizacije kamere i način funkcionisanja neuronskih mreža mogu se pronaći izvesne analogije. Oba pristupa se zasnivaju na principu „crne kutije“ pri čemu se za dati set ulaznih parametara posmatraju izlazne vrednosti. Takođe, u oba slučaja koriste se trening i test set podataka, pa zato ne čudi što su upravo neuronske mreže jedna od najzastupljenijih tehnika kolorimetrijske karakterizacije (Bianco, 2009).

Ulazni sloj neuronske mreže u ovom slučaju sastoji se od 3 neurona (R, G i B vrednosti), dok se u izlaznom nalaze takođe 3 neurona (CIE L*, a* i b* vrednosti). U do sada publikovanim studijama (Cheung & Westland, 2002; Cheung et al, 2004b; León et al, 2005; Liu et al, 2008) za određivanje njihove veze korišćen je višeslojni perceptron sa jednim (Cheung & Westland, 2002; Cheung et al, 2004b; León et al, 2005) ili više skrivenih slojeva (Liu et al, 2008). Takođe, neuronske mreže korišćene su i za navedenu transformaciju (RGB) u radovima (Chu & Feng, 1996; Chuan & Shi-Sheng, 2008; Fdhal et al, 2009).

Prednost ovog pristupa u odnosu na ostale (metode regresije, LUT i sl.) je u činjenici da se i visoko nelinearne veze mogu modelirati sa zadovoljavajućim stepenom preciznosti, dok se kao najveća mana pristupa navodi vreme neophodno za izbor parametara i treniranje mreže (Cheung et al, 2004b). Zahvaljujući napretku u razvoju računarskih sistema treniranje mreže za rešavanje veoma kompleksnih problema može se izvršiti u kratkom vremenskom periodu, dok niz studija na temu karakterizacije kamere neuronskim mrežama (Cheung et al, 2004b; León et al, 2005; Liu et al, 2008) obezbeđuju solidnu osnovu za definisanje adekvatnih parametara.

3. Problem, predmet i cilj istraživanja

Ideja o korišćenju digitalne kamere kao uređaja za merenje boja nije nova i iscrpno je ispitivana u velikom broju istraživanja tokom prethodne dve decenije. Međutim, u do sada publikovanim studijama digitalne kamere korišćene su za procenu vrednosti boja uzoraka koji, zbog svojih karakteristika, ne zahtevaju više-ugaona merenja. Stoga je snimanje bilo vršeno tako da je položaj izvora svetla i kamere simulirao mernu geometriju $45^\circ/0^\circ$ ili $0^\circ/45^\circ$. Ovakav položaj predstavlja idealnu poziciju snimanja, jer se detektor (odnosno senzor kamere) pozicionira tako da spekularna refleksija uzorka ne ometa proces snimanja. Karakterizacija kamere u ovom slučaju svodi se na definisanje jedne transformacije tj. mapiranje RGB vrednosti kamere u CIE kolorimetrijske vrednosti definiše se jednom funkcijom. Pored toga, većina studija zasniva se na snimanju u kontrolisanim uslovima (u smislu kontrolisanja izvora svetla), pri čemu se ne ispituje mogućnost primene pristupa u industrijskim merenjima.

Problematika karakterizacije goniohromatskih materijala digitalnom kamerom ogleda se u činjenici da se pozicija kamere tokom merenja mora menjati kako bi se boja uzorka detektovala u svim definisanim mernim geometrijama. Takođe, proces karakterizacije se u ovom slučaju komplikuje jer se za svaki merni ugao, zbog različite interakcije svetlosti sa uzorkom, moraju definisati posebne transformacije. Iako digitalne kamere pokazuju veliki broj prednosti u poređenju sa mernim uređajima (fleksibilnost, veće polje merenja, brzina, mogućnost detekcije dodatnih parametara poput uniformnosti ili teksture itd.) do sada nije predloženo rešenje za njihovo korišćenje za merenje goniohromatskih materijala.

Na osnovu ovih saznanja **predmet istraživanja** predstavlja *razvoj metodološkog okvira korišćenja digitalne kamere za višeugaona merenja boja*. Pod tim se podrazumeva ispitivanje uticajnih parametara predložene metodologije na tačnost procene kolorimetrijskih vrednosti štampanih materijala koji se smatraju goniohromatskim, kao i razvoj modela karakterizacije kamere koji će omogućiti što preciznije određivanje njihove boje.

Cilj istraživanja je *definisane pristupa koji će omogućiti da se digitalna kamera koristi kao gonio-kolorimetar*. Pored toga, kao primenjeni cilj može se definisati i preciziranje odgovarajuće postavke snimanja štampanih uzoraka, s akcentom na industrijsku primenu razvijenog pristupa.

4. Hipoteze istraživanja

Na osnovi istraživanja realizovanih u pripremi teze može se postaviti osnovna hipoteza disertacije: *„Karakterizacija kolorimetrijskih vrednosti otisaka štampanih goniohromatskim (perlascentnim) pigmentima je moguća upotrebom komercijalne digitalne kamere uz odgovarajući metod snimanja otisaka i model karakterizacije kamere.“*

Kako bi se osnovna hipoteza dokazala, postavljene su pojedinačne hipoteze i to:

H1: *Moguće je razviti model karakterizacije digitalne kamere za više-ugaono merenje boja primenom metode veštačkih neuronskih mreža.*

H2: *Pri snimanju uzoraka moguće je koristiti izvore svetla čija spektralna raspodela odstupa od raspodele standardnih izvora, ukoliko navedena odstupanja nisu značajna.*

H3: *Ugao merenja imaće uticaja na određivanje kolorimetrijskih vrednosti boja, pri čemu se ovaj uticaj može minimizirati izborom odgovarajuće metode karakterizacije kamere.*

H4: *Najmanje greške procene kolorimetrijskih vrednosti boja očekuju se u slučaju merne geometrije $45^\circ/asp45^\circ$, jer u ovoj mernoj geometriji kamera ne detektuje odsjaje ili spekularnu refleksiju sa uzorka.*

H5: *Određivanje kolorimetrijskih vrednosti goniohromatskih uzoraka na osnovu odziva kamere zavisice u manjoj meri od temporalnih varijacija zračenja izvora svetla pod kojim se snimanje vrši.*

H6: *Optimizacija bazirana na genetskom algoritmu omogućice optimalnu selekciju uzoraka trening seta i, posledično, efikasniju karakterizaciju.*

H7: *Primenom veštačkih neuronskih mreža moguće je odrediti kolorimetrijske vrednosti za više mernih uglova na osnovu snimaka dobijenih u jednom uglu merenja.*

Da bi se hipoteze potvrdile razvijena je metodologija istraživanja i sprovedeni su odgovarajući eksperimenti.

5. Metodologija istraživanja

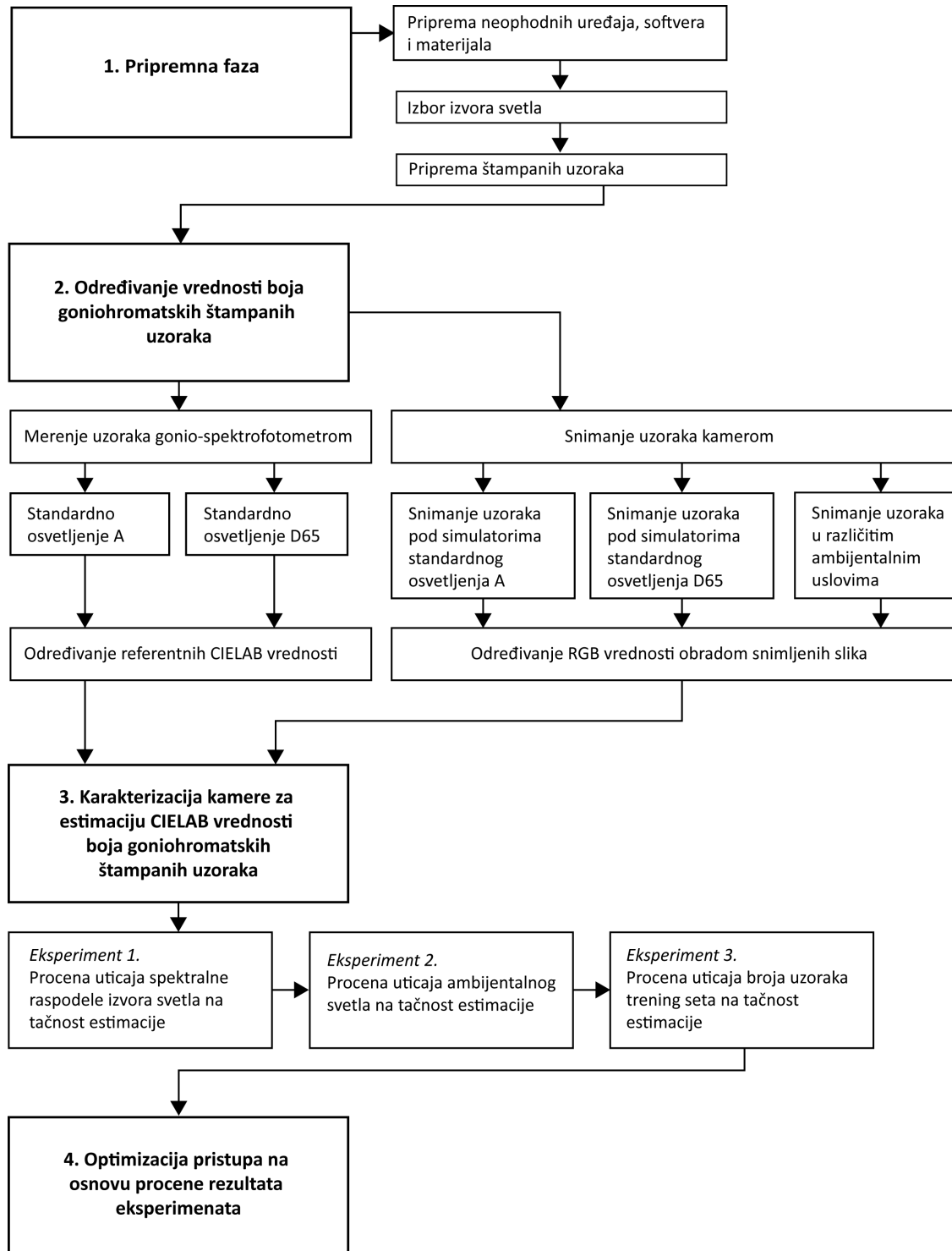
5.1. Plan i etape istraživanja

Kako bi se istraživanje uspešno sprovedo, definisani su koraci njegovog izvođenja šematski prikazani na slici 5.1. Glavne faze istraživanja označene su brojevima, dok su pojedini koraci navedeni unutar faze kojoj pripadaju.

Pripremna faza podrazumeva definisanje i pripremu svih elemenata neophodnih za sprovođenje istraživanja – počev od uzoraka, preko uređaja, programskih alata, materijala i načina njihove karakterizacije. U ovom delu neophodno je precizirati uređaje i programe koji će se koristiti u eksperimentalnoj postavci, kao i materijale koji će osigurati postizanje željenih efekata. Kada su uređaji u pitanju definišu se: štamparske mašine potrebne za štampu i oslojavanje uzoraka, merni uređaji za karakterizaciju vrednosti boja štampanih uzoraka i karakterizaciju svetlosnih izvora, digitalna kamera i njoj pripadajući objektiv. Opis programskih alata podrazumeva definisanje programa za obradu snimljenih slika, podataka dobijenih merenjima, sprovođenje procedure karakterizacije, analizu rezultata i tome sl. Drugi korak u pripremi istraživanja predstavlja preciziranje izvora svetla koji će se u eksperimentu koristiti prilikom snimanja uzoraka kamerom, dok je treći korak definisanje uzoraka. Kako su uzorci ovog istraživanja zapravo štampani materijali, njihova priprema podrazumeva najpre definisanje odgovarajućih materijala za štampu, zatim sadržaja koji će se štampati (definisanje koordinata boja test karte prema predefinisanim kriterijumima), a nakon toga i sam postupak štampe i oslojavanja. Kao izlaz *pripremne faze* definišu se štampani uzorci, izvori svetla i pripremljeni uređaji i alati neophodni za izvođenje eksperimenata.

Određivanje vrednosti boja goniohromatskih štampanih uzoraka podrazumeva preciziranje njihovih CIELAB i RGB vrednosti. Kako bi se ovi podaci mogli odrediti najpre je neophodno definisati merne geometrije koje će se u istraživanju koristiti. CIELAB vrednosti dobijaju se korišćenjem mernog uređaja koji omogućava višeugaono merenje uzoraka u definisanim geometrijama (gonio-spektrofotometra). Vrednosti se dobijaju u odnosu na standardno osvetljenje A i D65. RGB podaci dobijaju se na osnovu odziva kamere pri čemu ovaj korak podrazumeva: definisanje podešavanja kamere prilikom snimanja uzoraka, snimanje štampanih uzoraka prema definisanoj metodologiji i pod određenim izvorom svetla (izvori kojima se simuliraju iluminanti D65

i A), kao i obradu snimljenih slika. Kao izlaz druge faze definišu se CIELAB vrednosti štampanih uzoraka, kao i njihove RGB vrednosti za svaki od izvora svetla i načina snimanja.



Slika 5.1. Algoritam toka istraživanja

Treća faza predstavlja srž istraživanja, odnosno ***karakterizaciju kamere za procenu kolorimetrijskih vrednosti boja štampanih uzoraka***. U ovom segmentu najpre se definiše algoritam karakterizacije, pri čemu CIELAB vrednosti dobijene u prethodnom koraku predstavljaju referentne vrednosti koje se koriste za treniranje i procenu algoritma. RGB vrednosti dobijene na osnovu odziva kamere

koriste se kao ulazi navedenog algoritma. U okviru treće faze sprovode se tri eksperimenta koji imaju za cilj određivanje uticaja pojedinih parametara na tačnost estimacije (slika 5.1) za definisani algoritam karakterizacije.

Eksperiment 1 obuhvata procenu uticaja spektralne raspodele izvora svetla korišćenog prilikom snimanja uzoraka kamerom na tačnost estimacije. Kao izlaz ovog eksperimenta izvode se zaključci o tome koliko je korišćeni algoritam karakterizacije digitalne kamere efikasan u proceduri zanemarivanja izvora svetla. Navedeni zaključci daju odgovor na pitanje da li se pri snimanju uzoraka moraju koristiti standardni izvori svetla ili se snimanje može izvesti i pod svetlima drugih raspodela, što je od velikog značaja za praktičnu primenu metode.

Eksperiment 2 sprovodi se s ciljem procene uticaja ambijentalnog svetla na RGB vrednosti boja uzoraka dobijenih snimanjem kamerom, i posledično na tačnost estimacije vrednosti boja. Zaključci eksperimenta 2 daju odgovor na pitanje da li su pri snimanju uzoraka kamerom neophodni kontrolisani uslovi (u smislu potpune izolacije postavke od okoline) ili ne.

Eksperiment 3 obuhvata procenu uticaja broja uzoraka trening seta na tačnost estimacije vrednosti boja. Ovaj eksperiment sprovodi se sa ciljem definisanja optimalnog broja uzoraka trening seta i samim tim povećanja efikasnosti same procedure.

Poslednja faza istraživanja predstavlja **optimizaciju pristupa** korišćenja digitalne kamere za dobijanje CIELAB vrednosti boja goniohromatskih štampanih otisaka. Na osnovu zaključaka eksperimenata 1-3 definišu se moguća poboljšanja i procenjuje se njihova efikasnost. Izlaz ove faze predstavlja optimizovan metod.

5.2. Definisane nepromenljivih i varijabilnih parametara istraživanja

Kako bi se omogućila objektivnost dobijenih rezultata istraživanja u zavisnosti od cilja koji se želeo postići, definisani su nepromenljivi i varijabilni parametri istraživanja.

Nepromenljivi parametri istraživanja obuhvatali su štampane uzorke različitih boja oslojene goniohromatskim pigmentima, geometrije merenja uzoraka, DSLR kameru, podešavanja kamere prilikom snimanja uzoraka, kao i algoritam karakterizacije kamere.

U *eksperimentu 1* kao varijabilni parametri definišu se izvori svetla korišćeni za osvetljavanje uzoraka prilikom snimanja kamerom. Princip selekcije izvora svetla, odnosno kriterijum varijabilnosti definisan je u poglavlju 5.3.2. Svi ostali parametri u ovom eksperimentu definisani su kao nepromenljivi.

Kao varijabilni parametar u *eksperimentu 2* precizirano je ambijentalno osvetljenje, na način opisan u poglavlju 5.5.3. Snimanje je vršeno pod jednim izvorom svetla, kako bi se izbegle dodatne varijacije.

U *eksperimentu 3* varijabilni parametar predstavljao je broj uzoraka unutar seta za treniranje algoritma, dok je broj uzoraka test seta definisan kao konstanta. Svi ostali parametri definisani su kao nepromenljivi.

5.3. Priprema istraživanja

5.3.1. Uređaji, materijali i programski alati korišćeni u istraživanju

Mašine za štampu

S obzirom na broj uzoraka za istraživanje i zahtevani kvalitet, za potrebe štampe test polja korišćena je digitalna mašina **Xerox DocuColor 252**. Ova mašina funkcioniše na principu elektrofotografije, pri čemu se koristi suvi toner. Štampanje je vršeno u 4 boje, na maksimalnoj rezoluciji štampe koju ova mašina omogućava (2400 dpi). U tabeli 5.1. nalaze se karakteristike date mašine ključne za istraživanje, dok je na slici 5.2. prikazan njen izgled.



Slika 5.2. Izgled DocuColor 252 digitalne mašine za štampu (izvor: Xerox Corporation, 2010)

Tabela 5.1. Tehničke karakteristike Xerox DocuColor 252 digitalne mašine (izvor: Xerox Corporation, 2010)

| | |
|------------------------------|---------------------------|
| Toner | Suvi toner, 4 boje (CMYK) |
| Maksimalan format štampe | 330 x 480 mm |
| Maksimalna rezolucija štampe | 2400 x 2400 dpi |
| Podloge za štampu | do 300 g/m ² |

Kako bi se postigla veća debljina nanosa sloja perlascentnih pigmenata za oslojavanje odštampanih otisaka iskorišćena je sito tehnika štampe i to sito karusel mašina oznake **S-6S4T.B**. Ova mašina omogućava kontinualnu štampu 6 boja, pri čemu se sušenje obavlja u toku rada mašine korišćenjem automatskog grejača sa tajmerom. Podešavanje registra je manuelno i obavlja se nakon pozicioniranja i montaže sito ramova. Izgled mašine prikazan je na slici 5.3., dok su njene karakteristike od značaja date u tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Karakteristike sito štamparske mašine S-6S4T.B (izvor: Centropapir, 2015)

| | |
|------------------------------|-------------------|
| Maksimalan broj boja | 6 |
| Maksimalna veličina rama | 620 x 550 x 45 mm |
| Veličina automatskog grejača | 310 x 330 mm |
| Tačnost podešavanja registra | 10 µm |



Slika 5.3. Izgled sito štamparske mašine S-6S4T.B (izvor: Centropapir, 2015)

Merni uređaji

Za dobijanje referentnih vrednosti otisaka korišćen je gonio-spektrofotometar **Gretag Macbeth Auto-Eye 640**. Ovaj uređaj je zapravo portabl spektrofotometar usmerene geometrije (izvor svetla pod uglom od 45°), koji omogućava detektovanje reflektovanog zračenja pod više izabranih uglova. Uglovi pod kojima se merenje može vršiti su 15°, 45°, 75° i 110° aspekularno, dok se samo uzorkovanje vrši u opsegu od 360-750 nm sa korakom od 10 nm. Izgled uređaja prikazan je na slici 5.4., dok su u tabeli 5.3. sumirane njegove tehničke karakteristike. Kao rezultat merenja dobijaju se reflektanse merenih boja, kao i njihove CIELAB vrednosti za standardna osvetljenja D65, A i F2.

Tabela 5.3. Tehničke karakteristike Gretag Macbeth Auto-Eye 640 gonio-spektrofotometra (izvor: GretagMacbeth, 2001)

| | |
|--------------------------------|--------------------------|
| Tip izvora svetla | Pulsna ksenonska lampa |
| Temperatura boje izvora svetla | D65 |
| Opseg merenja | 360-780 nm |
| Interval uzorkovanja | 10 nm |
| Vreme merenja | 0.15 s |
| Otvor: | |
| Merni | 10 mm |
| Osvetljeni | 14 mm |
| Fizički | 16 mm |
| Optička konfiguracija: | |
| Izvor svetla | 45° |
| Detektori | 15°, 45°, 75° i 110° asp |
| Ponovljivost merenja | 0.1 RMS ΔE |



Slika 5.4. Izgled gonio-spektrofotometra Gretag Macbeth Auto-Eye 640 sa kalibracionom pločicom

Za karakterizaciju izvora svetla korišćen je spektrofotometar **Eye-One Pro**. U pitanju je spektrofotometar usmerene geometrije firme Gretag Macbeth (sada X-Rite) koji omogućava merenje refleksije, emisije zračenja i ambijentalnog osvetljenja (merenje luminanse i iluminanse). Refleksija se može odrediti na način merenja pojedinačnog uzorka ili u skenirajućem modu (automatsko detektovanje polja test karte), dok se merenje iluminanse svetla omogućava korišćenjem difuzera. Merenje se vrši u rangu 380-730 nm, sa korakom od 10 nm. Izgled uređaja prikazan je na slici 5.5., dok se njegove tehničke karakteristike nalaze u tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Tehničke karakteristike spektrofotometra Eye-One Pro (izvor: X-Rite, 2006)

| | |
|--------------------------------|--|
| Merna geometrija | 45°/0° |
| Izvor svetla | Sijalica punjena gasom, iluminant A |
| Pozicija osvetljenja | Obodno osvetljenje, DIN 5033 |
| Razdvajanje svetla | Hologrfska difrakciona rešetka |
| Prečnik mernog otvora | 4.5 mm |
| Opseg merenja | 380-730 nm |
| Fizički interval uzorkovanja | 3.5 nm |
| Optička rezolucija | 10 nm |
| Rang merenja luminanse | 0.2-300 cd/m ² |
| Filteri | Bez filtera ili UV |
| Ponovljivost u kratkom vremenu | $\Delta E^*_{94} \leq 0.1$ (D50, 2°) - srednja CIELAB vrednost 10 merenja bele boje u intervalima od 3 sekunde x,y: +/- 0.002 tipično (CRT 5000°K, 80 cd/m ²) |
| Reproduktivnost | Prosečno ΔE^*_{94} - 0.4 Maksimalno ΔE^*_{94} - 1.0 |
| Izlazni podaci | Luminansa (cd/m ²), hromatske koordinate x,y (CIE 1931), spektralna kriva |



Slika 5.5. Izgled spektrofotometra Eye-One Pro

Iako digitalna kamera (tj. digitalni fotoaparati) po svojoj osnovnoj funkciji nije merni uređaj, svrstana je u ovu kategoriju korišćenih uređaja jer je u radu bila upotrebljena za dobijanje vrednosti boja uzoraka. **Canon EOS 550D** spada u kategoriju DSLR kamera sa izmenljivim objektivima, pri čemu je opseg žižnih daljina kit objektiv koji je u radu korišćen 18-55 mm (sa otvorima blende f/3.5-5.6). Sama kamera omogućava snimanje rezolucije od 18 Mpi, dok CMOS senzor osigurava brz i stabilan rad. Karakteristike kamere date su u tabeli 5.5., dok slika 5.6. prikazuje kameru sa kit objektivom EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS koji je korišćen u ovom radu.



Slika 5.6. Digitalna kamera Canon EOS 550D i kit objektiv EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS (izvor: Canon, 2015)

Tabela 5.5. Karakteristike digitalne kamere Canon EOS 550D (izvor: Canon, 2015)

| | |
|-------------------------|---|
| Senzor | Tip: CMOS, Veličina: 22.3 x 14.9mm Odnos strana: 3:2 |
| Efektivan broj piksela | Oko 18 Mpi |
| Ukupan broj piksela | Oko 18.7 Mpi |
| Format snimaka | JPEG, RAW, JPEG+RAW |
| Veličina snimaka | JPEG: 5184 x 3456, 3456 x 2304, 2592 x 1728. RAW: 5184 x 3456 |
| Tip procesora | DIGIC 4 |
| Rang automatskog fokusa | EV 0.5 – 18 (na 23°C i ISO 100) |
| ISO osetljivost | AUTO: 100-6400 100-6400 proširivo do cca. 12800 sa 1-stop koracima |
| Brzina zatvarača | 30 – 1/4000 sec |
| Prostori boja | sRGB i Adobe RGB |
| Filteri u boji | RGB |

Za određivanje adekvatnih vrednosti ekspozicije prilikom snimanja korišćen je svetlomer firme **Sekonic, model L-758D**. Ovaj uređaj omogućava detektovanje reflektovanog, upadnog svetla i blic svetla, pri čemu se kao detektor upadnog svetla koristi sfera (engl. *Lumisphere*). Kao receptori za sve tipove svetala koriste se silikonske foto ćelije (Sekonic Corp., 2014). Izgled uređaja prikazan je na slici 5.7., a njegove osnovne karakteristike date su u tabeli 5.6.



Slika 5.7. Svetlomer Sekonic L-758D DigitalMaster

Tabela 5.6. Karakteristike svetlomera Sekonic L-758D DigitalMaster (izvor: Sekonic Corp., 2014)

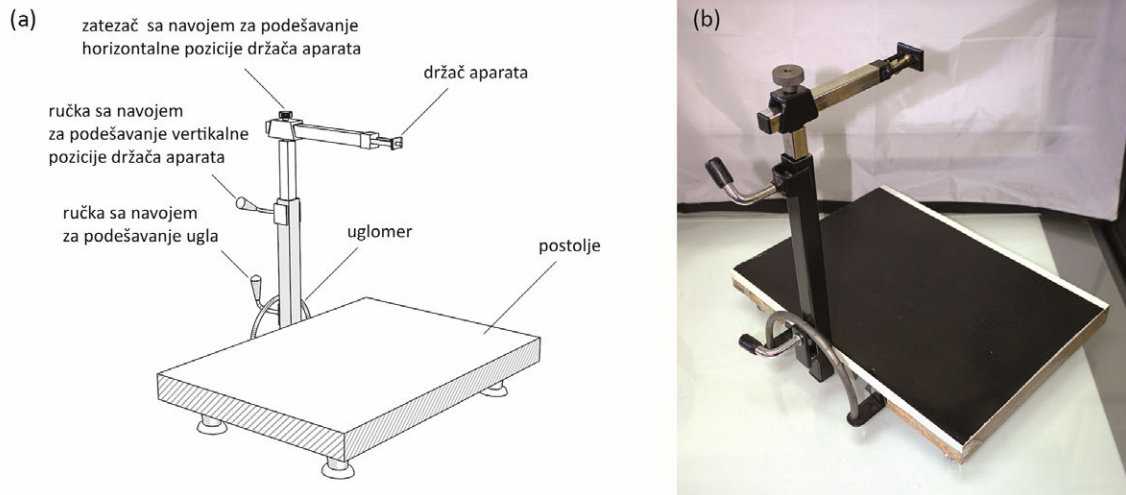
| | |
|---|---|
| Modovi merenja | <i>Ambijentalno svetlo:</i> Merenje prioriteta blende, zatvarača, EV <i>Blic svetlo:</i> sa opcionim radio-okidačem, bez sinhro-jezgra, sa sinhro-jezgrom |
| Raspon merenja (ISO 100) za ambijentalno svetlo | Direktno svetlo: EV -2 do EV 22.9; Reflektovano svetlo EV 1 do EV 24.4 |
| Ponovljivost | +/- 0.1 EV ili manje |
| Opseg ISO vrednosti | 3 -8000 |
| Opseg brzine zatvarača | <i>Ambijentalno svetlo:</i> 30 min do 1/8000 sec. (u 1, 1/2, 1/3 koracima), kao i 1/200, 1/400 <i>Blic:</i> 30 min do 1/1000 sec. (u 1, 1/2, 1/3 koracima), kao i 1/75, 1/80, 1/90, 1/100, 1/200, 1/400 |
| Opseg otvora blende | f/0.5 do f/161 (u 1, 1/2, 1/3 koracima) |
| Opseg vrednosti ekspozicije | EV -9.9 do EV 46.6 (u 1/10 koracima) |

Dodatni pribori

Kako bi se digitalna kamera mogla pozicionirati pod određenim uglovima u odnosu na normalu konstruisan je stalak koji se sastojao od postolja na koje su postavljani uzorci, uglomera i nosača sa držačem fotoaparata (slika 5.8). Stalac je konstruisan po ugledu na merni uređaj (goniospektrofotometar) uzimajući u obzir uglove na kojima se nalaze senzori koji detektuju reflektovano zračenje. Na taj način omogućeno je fiksiranje kamere, kao i precizno podešavanje ugla snimanja i udaljenosti kamere od objekta snimanja.

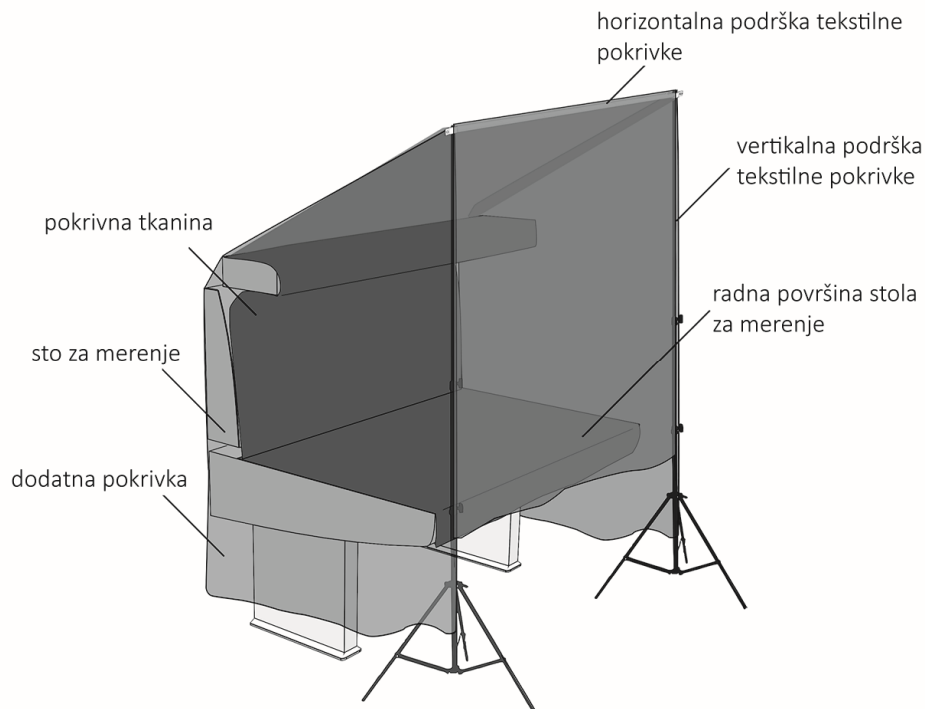
Postolje za uzorak dimenzija 32x44 cm fiksirano je za nosač, dok je uglomer koji služi za podešavanje ugla snimanja baždaren sa koracima od 15°. Nosač se sastojao od dva dela – vertikalnog i horizontalnog, pri čemu je vertikalni određivao visinu i mogao se zaokretati za željeni ugao (slika

5.8a), dok je horizontalni deo omogućavao pomeraj kamere po y-osi. Vertikalni deo nosača konstruisan je sa kliznim delom, kako bi se omogućilo precizno određivanje udaljenosti kamere od uzorka koji se snima. Minimalna udaljenost od postolja za uzorak iznosila je 34 cm, a maksimalna 60 cm. Horizontalni deo nosača takođe je izrađen sa kliznim delom, pri čemu je minimalna udaljenost od ivice postolja iznosila 5 cm, a maksimalna 20 cm. Šematski prikaz nosača dat je na slici 5.8a, dok je njegov izgled prikazan na slici 5.8b.



Slika 5.8. (a) Šematski prikaz stalka i (b) njegov izgled

Kako bi se izbegao uticaj ambijentalnog svetla prilikom snimanja uzoraka kamerom snimanje je vršeno unutar improvizovane mračne komore. Komora je formirana od stola za procenu probnih otisaka Mega Normlicht 98, čije su sve radne površine bile prekrivene crnim plišem (slika 5.9).



Slika 5.9. Izgled improvizovane mračne komore

Sa strane stola postavljena su dva stativa za rasvetu LS 8008K, maksimalne visine 2.4 m. Stativi su služili kao nosači metalne šipke, preko koje je takođe postavljena tekstilna pokrivka od crnog pliša koja je pokrivala radnu površinu stola od napred i od gore. Radna površina izolovana je i sa strana na način fiksiranja dodatnih tkanina crne boje za vertikalnu površinu stola i za vrhove stativa.

Od dodatnih pribora u istraživanju su korišćene test karte firme GretagMacbeth (sada X-Rite). Za dobijanje fotografija pri određivanju nivoa šuma korišćena je Digital Color Checker SG (Slika 5.10a), dok je za manuelno podešavanje balansa bele boje pre svakog snimanja korišćena Color Checker White Balance test karta (Slika 5.10b). Ove test karte izrađene su od posebne, polu-sjajne plastike koja osigurava da sva polja budu detektovana adekvatno, bez neželjenih odsjaja koji bi uticali na reprodukciju boja, pa se stoga koriste kako za podešavanje digitalne kamere prilikom snimanja, tako i za njenu karakterizaciju (Fraser et al, 2005; X-Rite, 2009).

Digital Color Checker SG test karta poseduje 140 polja koja su selektovana tako da pokrivaju opseg boja tipične digitalne kamere. Polja sive, bele i crne boje se ponavljaju kako na sredini test karte, tako i po obodu, čime se omogućava merenje uniformnosti osvetljenja prilikom snimanja. Color Checker White Balance test karta koristi se isključivo za podešavanje balansa bele boje prilikom snimanja. Ova karta obezbeđuje dovoljno veliku, uniformnu površinu bele boje, koja je strogo kontrolisana tako da bude spektralno neutralna pod svim osvetljenjima (X-Rite, 2009). Time se osigurava snimanje neutralne bele i sprečava se pojava dominantnih tonova neželjenih boja na fotografijama.



Slika 5.10. Test karte korišćene u istraživanju (a) Digital Color Checker SG test karta, (b) Color Checker White Balance test karta (X-Rite, 2009)

Korišćeni materijali

Kao podloga za štampu uzoraka korišćen je 300 g/m^2 mat kundruk papir koji se, zbog svojih karakteristika, može svrstati u tip 2 prema ISO 12647-2:2013 (ISO, 2013). Postizanje goniohromatskog efekta omogućeno je perlascentnim pigmentima firme Merck i to Iriodin® 221 Rutil Feinblau. Pigmenti koji spadaju u klasu Iriodin® omogućavaju postizanje goniohromatskog efekta, kao i efekta sjaja prirodnih bisera. Ovo se postiže deponovanjem slojeva metal oksida na osnovni mica sloj, čime se osigurava konstruktivna interferencija (Merck KGaA, 2015b). Pigmenti su polu-transparentni i mogu se koristiti samostalno ili mešati sa drugim pigmentima radi postizanja željenih efekata. U slučaju pigmenta korišćenog u istraživanju (221 Rutil Feinblau) na mica sloj deponovan je titanijum-dioksid kako bi se osigurala promena tona u žuto-plavom pravcu; u uglovima

blizu spekularnog podloga na koju su nanoseni opaža se kao plava, dok se u većim uglovima opaža kao žuta (Gebejes et al, 2013). Najznačajnije osobine ovog tipa pigmenta date su u tabeli 5.7.

Tabela 5.7. Fizičko-hemijske osobine Iriodin® 221 Rutil Feinblau perlascentnih pigmenata (izvor: Merck KGaA, 2015b)

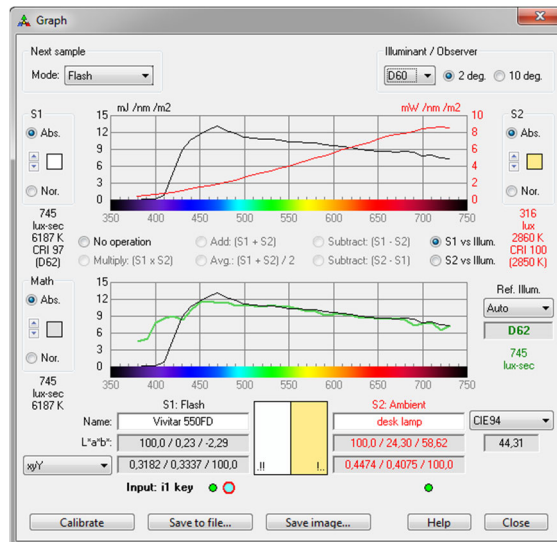
| | |
|----------------|---|
| Gustina | 3.1 - 3.3 g/cm ³ (20 °C) |
| pH vrednost | 8.0 - 11.0 (100 g/l, H ₂ O, 20 °C) |
| Rastvorljivost | Praktično nerastvorljiv (20 °C) |

Kako bi se omogućio ravnomeran nanos pigmenata na površini štampanog otiska perlascentni pigmenti su dispergovani u transparentnoj vodenoj bazi štamparske boje (proizvođača Minerva opal ink industry) koji se može koristiti kako za ofset, tako i za druge tehnike štampe.

Programski paketi

Za izvođenje kalkulacija i analiza neophodnih za istraživanje, kao i za obradu snimljenih slika i procedure karakterizacije korišćen je **MATLAB®** (verzija R2011a). MATLAB je programski paket koji omogućava analizu podataka, vizuelizaciju, programiranje i razvoj algoritama, kao i razvoj aplikacija pomoću interaktivnog okruženja koje nudi (MathWorks, 2015). Zahvaljujući velikom broju ugrađenih funkcija omogućava brzo rešavanje problema iz različitih oblasti, dok niz biblioteka algoritama osigurava da se i komplikovaniji zadaci mogu obaviti prilično efikasno. Set dodatnih algoritama, funkcija i aplikacija pod nazivom Image Processing Toolbox™ predstavlja nezamenljiv alat u obradi slike, jer omogućava analizu, segmentaciju i niz transformacija slike (González et al, 2009). Pored navedenog, u ovom istraživanju korišćen je i Neural Networks Toolbox™ (Demuth et al, 2010).

S obzirom na to da ne poseduje displej, spektrofotometar Eye-One Pro, korišćen za određivanje vrednosti ambijentalnog osvetljenja i karakterizaciju izvora svetla, mora biti korišćen zajedno sa odgovarajućim programom u kom se navedene veličine mogu očitati. U te svrhe u ovom istraživanju korišćen je program **Babel Color CT&A**. Product kompanije BabelColor, ovaj program podržava rad sa skoro svim uređajima firme X-Rite (ranije Gretag Macbeth) i omogućava pouzdano očitavanje i izračunavanje čitavog niza veličina – prikaz spektralnih kriva refleksije, emisije i ambijentalnog svetla, određivanje temperature boje, iluminanse, indeksa metamerizma i indeksa prikaza boje, definisanje koordinata boje i njihovo odstupanje od zadatih vrednosti, određivanje indeksa beline i žutoće za podloge, preračunavanje vrednosti boja u prostorima boja, merenje optičke gustine, analizu uniformnosti i odstupanja merenih vrednosti od ISO standarda itd. (BabelColor, 2015). Radno okruženje izuzetno je pregledno i jednostavno za korišćenje i podeljeno je u tri funkcionalne celine i to: deo za preračunavanje vrednosti boja, deo za merenje i deo za analizu. Ovaj program izabran je kao adekvatan za istraživanje zahvaljujući velikom broju opcija koje sadrži, načina prikaza merenih vrednosti i činjenice da poseduje ugrađene reference za određivanje sličnosti izvora svetla sa standardnim osvetljenjima D60 i D65 (pri određivanju CRI i MI). Izgled radnog okruženja za merenje emisije zračenja i ambijentalnog svetla prikazan je na slici 5.11.



Slika 5.11. Izgled radnog okruženja programa Babel Color CT&A, deo: Spectral Tools

Za obradu RAW snimaka štampanih uzoraka korišćen je program otvorenog koda (engl. *open-source*) **dcraw** (Coffin, 2013). Ovaj program izabran je jer osigurava vrlo precizno definisanje svih koraka obrade RAW fotografije počev od demozaikovanja, balansa bele, korekcije game, kontrasta, tonova, uklanjanje šuma tamne struje i tome sl. Kada je demozaikovanje u pitanju omogućeno je biranje više algoritama, pri čemu se pored bilinearne interpolacije koja je i najzastupljeniji metod obrade slika mogu koristiti i interpolacija promenljivog broja gradijenata (VNG od engl. *Variable Number of Gradients*), interpolacija grupisanjem piksela na osnovu šeme (PPG od engl. *Patterned Pixel Grouping*) i adaptivna homogenošću-upravljana interpolacija (ADH od engl. *Adaptive Homogeneity-Directed*). S obzirom na to da nema radno okruženje, ovaj program poziva se putem *command prompt*-a ili pomoću dostupnih okruženja otvorenog koda. Za potrebe ovog istraživanja, program je aktiviran iz MATLAB-a, čime je omogućena i automatizacija procesa obrade velikog broja fotografija.

Pored spomenutih programa za procenu šuma na fotografijama korišćen je program **CVIPtools**. Ovaj program takođe spada u domen programa otvorenog koda i omogućava analizu i poboljšanje slike u prostornom i frekventnom domenu (Umbaugh, 2010). Za razliku od drugih slične namene, CVIPtools omogućava procenu svih bitnijih parametara šuma na pojedinačnim kanalima boje digitalne slike (umesto na celoj slici). Na taj način indirektno se dobija informacija o osetljivosti senzora digitalne kamere na svetlost primarnih boja aditivne sinteze.

Pri proceni šuma RAW slike su transformisane u tiff fajlove u okviru programa **Adobe Photoshop CC**. Photoshop je program za obradu slika, koji od poslednjih verzija omogućava i rad sa RAW formatima. U okviru ovog programa omogućeno je interpoliranje izvornih vrednosti boja, sprovođenje balansa bele, kao i niza dodatnih korekcija koje omogućavaju postizanje vizuelno prihvatljivijih rezultata (korekcija kontrasta, tonova, zasićenja i sl.).

Statistička procena rezultata vršena je u programu **IBM SPSS Statistics 22**. Ovaj program jedan je od najčešće korišćenih programski alata za sprovođenje statističkih analiza, te je kao takav uvršten u rad.

5.3.2. Izbor izvora svetla

Kao cilj eksperimenta 1 definisana je procena uticaja spektralne raspodele izvora svetla na tačnost estimacije boje, te je shodno tome bilo neophodno definisati izvore svetla koji će biti testirani. Najzastupljenija standardna osvetljenja u praktičnoj primeni u grafičkoj reprodukciji su D50, D65 i A. Od navedenih u okviru ovog istraživanja akcenat je stavljen na osvetljenja D65 i A s obzirom na tip uzoraka koji su digitalizovani.

Naime, za razliku od otisaka štampanih apsorpcionim pigmentima, za one štampane goniohromatskim ne postoji preporuka za tip iluminanta koji treba koristiti prilikom merenja. U većini do sada publikovanih radova vezanih za određivanje vrednosti boja goniohromatskih uzoraka korišćen je standardni iluminant D65 (Nadal & Early, 2003; Liu et al, 2008; Atamas, 2012), jer predstavlja najneutralnije dnevno svetlo (u poređenju sa ostalim iluminantima serije D). Stoga je za testiranje uticaja izvora svetla na tačnost estimacije boje jedna grupa izvora svetla birana tako da simulira standardno osvetljenje D65.

Osvetljenje D65 u poređenju sa D50 i A predstavlja svetlosni izvor sa najdominantnijom komponentom plave boje. Kako pigmenti korišćeni u istraživanju osiguravaju promenu tona od žute ka plavoj, za drugu grupu izvora svetla birani su simulatori standardnog osvetljenja A. Od tri prethodno spomenuta iluminant A predstavlja izvor svetla najdominantnije žute boje (odnosna temperatura boje je 2856 K), pa samim tim svojom spektralnom raspodelom u najvećoj meri odstupa od D65. Ovakav izbor izvora svetla omogućio je poređenje različitih postavki, odnosno estimaciju kolorimetrijskih vrednosti koje se značajno razlikuju.

U eksperimentu 1 korišćeno je ukupno šest svetlosnih izvora koji su se razlikovali prema svojoj spektralnoj raspodeli - u obzir su uzeta tri svetlosna izvora odnosno temperature boje 6500 K (koja odgovara standardnom osvetljenju D65) i tri izvora odnosno temperature 2700 K (koja najpribližnije simuliraju standardno osvetljenje A). Na taj način osigurano je dovoljno varijacija za procenu željenog uticaja.

Generalno gledano, temperaturu boje od 6500 K moguće je postići sa tri tipa svetlosnih izvora zastupljenih u grafičkoj industriji - fluorescentnim lampama, metal-halogenim lampama i LED sijalicama. Metal-halogene lampe se pokreću sistemima za paljenje visokog napona, poseduju varijacije u svetlosnoj energiji tokom rada i neophodno ih je snabdeti sistemom za hlađenje jer se u toku rada značajno zagrevaju (Pešterac, 2007). Zbog svega navedenog ove lampe nisu korišćene u eksperimentu, već su u obzir uzeta preostala dva tipa. Korišćena su dva izvora koji spadaju u fluorescentne - fluorescentne lampe deklarirane kao standardni izvor svetla D65 i fluorescentne sijalice iste odnosne temperature boje. Lampe su preuzete iz kabine za posmatranje Agile Radiant Controlled Light 5 (Ihara Inc., 2005) i opremljene su sopstvenim napajanjem kako bi mogle biti iskorišćene u eksperimentu. Pored spomenutih fluorescentnih izvora iskorišćena je i LED rasveta (LED sijalice) budući da ovaj tip osvetljenja poprima sve više značaja u praktičnoj primeni. Karakteristike LED, kao i specifikacije fluorescentnih i LED sijalica marki Philips date su u tabeli 5.1. Navedeni podaci su definisani od strane proizvođača i mogu se pronaći u specifikacijama opreme (Ihara Inc., 2005), kao i na deklaracijama ambalaže (u slučaju sijalica).

Temperatura boje od 2700 K može se postići na više načina, pa su za potrebe ovog istraživanja definisana tri - fluorescentne i LED sijalice (kao u prethodnom slučaju) i sijalice sa užarenim vlaknom (inkadescentne). Inkadescentne sijalice su deklarirane kao standardni izvor svetla A i preuzete su iz kabine za posmatranje Agile Radiant Controlled Light 5. Karakteristike ovih izvora date su u tabeli 5.8 (informacije preuzete sa deklaracija). Sve sijalice su tokom rada postavljene u nosače lampi kako bi se osiguralo stabilno napajanje.

Tabela 5.8. Specifikacije svetlosnih izvora korišćenih u eksperimentu (nominalne vrednosti)

| Tip osvetljenja | Temperatura boje (K) | Fluks zračenja (lm) | Snaga (W) |
|------------------------|----------------------|---------------------|-----------|
| Fluorescentna lampa | 6500 | - | 18 |
| Fluorescentna sijalica | 6500 | 1200 | 88 |
| LED | 6500 | 806 | 60 |
| Inkadescentna sijalica | 2700 | - | 60 |
| Fluorescentna sijalica | 2700 | 1260 | 88 |
| LED | 2700 | 1521 | 100 |

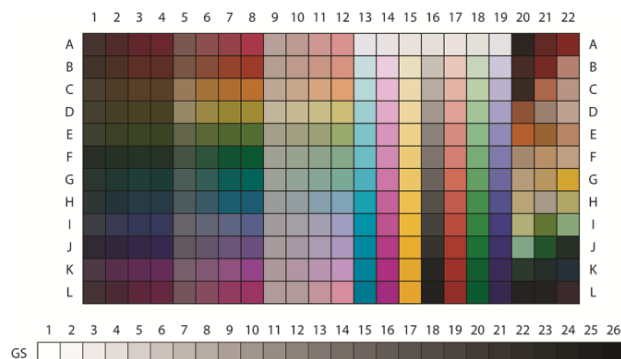
5.3.3. Izbor boja test karte

Izbor boja koje će se koristiti za treniranje i testiranje algoritma karakterizacije kamere su ključne za postizanje željene tačnosti estimacije boje (Cheung & Westland, 2004a). Naime, ukoliko se kamera koristi za procenu određenog ranga boja (na primer boje kože ili boje specifičnog proizvoda) trening algoritma mora biti izvršen na setu boja sličnog tonaliteta. Za opštu primenu opseg boja trening seta trebalo bi da pokriva opseg boja ulaznog ili izlaznog uređaja za koji se karakterizacija vrši (Nyström, 2006) uz korišćenje minimalnog broja različitih boja (Harderberg et al, 1998; Cheung & Westland, 2006). Stoga se u ove svrhe obično koriste standardizovane test karte, dizajnirane tako da zadovolje navedene uslove.

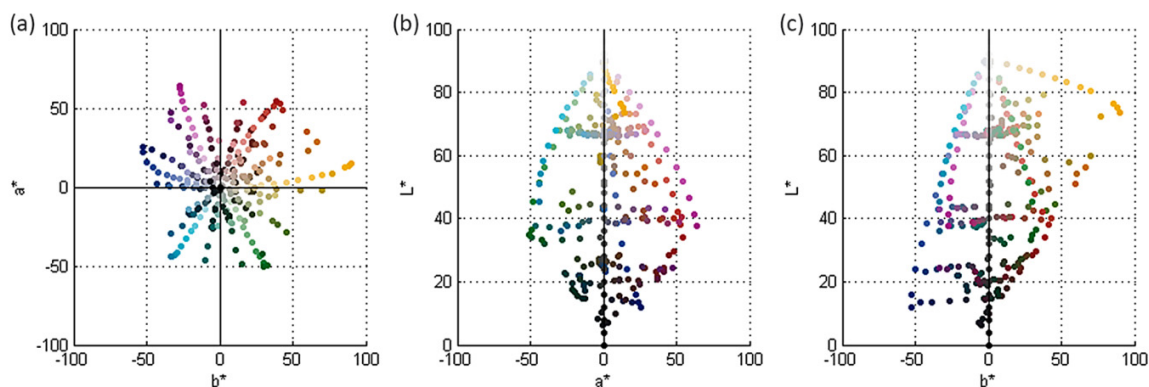
Test karta iskorišćena za potrebe ovog istraživanja formirana je tako da obuhvata sve boje AGFA IT8 7/2 (Q60) test karte, s obzirom na to da se ova test karta koristi za karakterizaciju ulaznih uređaja (Stone, 2003; Fraser et al, 2005) i poseduje dovoljan broj boja za korišćenje algoritma estimacije. Karta je kreirana u skladu sa ANSI IT8.7 i ISO 12641:1997 standardom (ANSI, 1993; ISO, 1997) i sastoji se od 288 polja koja su birana tako da obuhvataju prostor boja tipičnog ulaznog uređaja po pitanju tona, svetline i zasićenja (poseduje prelaze od potpuno zasićenih do neutralnih boja, kao i od najsvetlijih do najtamnijih tonova). Obuhvaćene su primarne i sekundarne boje aditivne sinteze (kolone 13-19), njihove kombinacije i varijacije u pogledu svetline i zasićenja, tonovi kože dobijene kolorimetrijskim merenjem i memorisane boje (kolone 20-22) koje su od velike važnosti za procenu boja (Fairchild, 2005). Karta se sastoji od ukupno 288 boja, od čega su 24 boje sive skale koje predstavljaju prelaze od bele do crne boje.

CIELAB vrednosti polja ove karte preuzete su iz referentnog fajla dostupnog od strane proizvođača (validnom za refleksne medijume). Kako bi se zadovoljili zahtevi ISO 17321-1:2006 standarda (ISO, 2006) umesto postojeće usvojena je nova siva skala, formirana tako da predstavlja linearnu promenu svetline. Umesto 24 boje, usvojena siva skala sastojala se od 26 boja, formiranih tako da su vrednosti a^* i b^* za svaku boju iznosile 0, dok je vrednost L^* varirana od 0-100 sa koracima od 4. Na taj način

broj boja test karte povećan je na 290. Izgled test karte korišćene u istraživanju zajedno sa oznakama pojedinih polja prikazan je na slici 5.12. CIELAB vrednosti boja korišćenih za štampu test karte dostupne su u Prilogu 1 (Tabela P1), dok je na slici 5.13. predstavljena njihova raspodela u CIELAB prostoru boja.



Slika 5.12. Izgled test karte korišćene u radu (izvor: Tomić et al, 2016)



Slika 5.13. Izgled izabranog seta boja u formi projekcija na ose CIELAB prostora boja: (a) a^*-b^* projekcija, (b) a^*-L^* projekcija, (c) b^*-L^* projekcija (izvor: Tomić et al, 2016)

5.3.4. Priprema štampanih uzoraka

Za postizanje željenog goniohromatskog efekta i omogućavanja dovoljnog broja različitih uzoraka, iskorišćena je osobina perlascentnih pigmentata opisana u poglavlju 2.1.4. Naime, perlascentni pigmenti su uglavnom transparentni, pa se mogu nanositi preko već odštampanih boja omogućavajući značajnu promenu postojećeg tona. Ova promena je izraženija ako se pigmenti ne mešaju sa štamparskom bojom, već se nanose kao odvojen sloj. Stoga su uzorci korišćeni u ovom istraživanju formirani na način štampanja ranga različitih boja i njihovim oslojavanjem perlascentnim pigmentima.

Koordinate test karte definisane u prethodnom poglavlju štampane su u vidu polja punog tona, pri čemu je veličina svakog polja iznosila 4x4 cm. Navedena veličina bila je neophodna zbog mernog otvora gonio-spektrofotometra korišćenog za određivanje CIELAB vrednosti štampanih uzoraka (Tabela 6.3). Kao podloga za štampu korišćen je 300 g/m² mat kunstdruck papir, a sama štampa vršena je na digitalnoj mašini Xerox DocuColor 252.

Nakon štampe i sušenja, otisci su oslojeni mešavinom perlascentnih pigmenata i transparentne vodene baze (opisanih u poglavlju 5.3.1). Transparentan nosač izabran je kako se ne bi umanjio efekat perlascentnih pigmenata i da bi se osiguralo da promena tona odštampanih polja nastaje isključivo kao posledica njihovog korišćenja (a ne pigmenata štamparske boje). Odnos pigmenata i nosača iznosio je 1:10. Ovaj odnos je definisan na osnovu preporuka za upotrebu perlascentnih pigmenata u štampi (Weitzel, 2008). Prilikom mešanja, na osnovu navedenih preporuka, pigmenti su najpre dispergovani u manjoj količini nosača (tzv. "kvašenje"), a zatim su pomešani sa ostatkom baze. Mešanje je vršeno ručno, bez prevelikog pritiska kako ne bi došlo do degradacije pigmenata.

Kako bi se postigao veći nanos sloja pigmenata na štampanim otiscima oslojavanje je vršeno sito tehnikom štampe (Kipphan, 2001), pri čemu su sekvencijalno nanosila tri sloja mešavine vodene baze i perlascentnog pigmenta („mokro na mokro“). Linijatura korišćenog sita iznosila je 43 l/cm. Oslojeni otisci sušeni su na temperaturi od 140° C tokom jednog minuta, nakon čega su dodatno sušeni na sobnoj temperaturi tokom 24 h. Debljina nanetog sloja perlascentnih pigmenata merena nakon sušenja iznosila je 20 µm i bila je konstantna za sva polja test karte (najveće izmereno odstupanje iznosilo je 5% od date debljine).

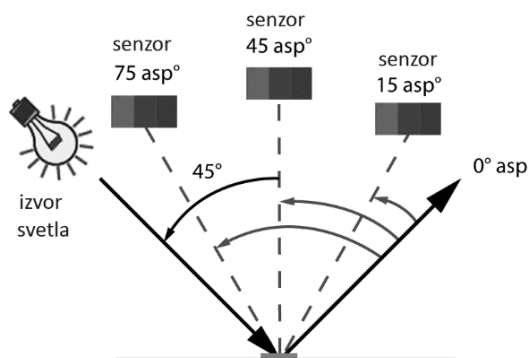
5.4. Metode određivanja vrednosti boja goniohromatskih uzoraka

5.4.1. Definisane mernih geometrija

Kao što je prikazano u poglavlju 2.3.2. pri merenju goniohromatskih materijala neizostavne su 3 geometrije merenja koje opisuju dominantne boje kod ovakvih uzoraka. Kako cilj istraživanja nije potpun opis promene u izgledu boje sa uglom osvetljavanja odnosno posmatranja, već procena uticajnih parametara na mogućnost estimacija navedenih boja kamerom, upravo su osnovne geometrije uzete u razmatranje. Izabrane geometrije definisane su kao obavezne pri merenju goniohromatskih uzoraka (ASTM, 2012) i inkorporirane su u sve komercijalno dostupne merne uređaje.

Ove geometrije podrazumevaju da je izvor svetla postavljen pod uglom od 45° u odnosu na normalu, dok su položaji detektora definisani u uglovima od 15° ili 25° asp (za opis tona boje koji se opaža najbliže spekularnoj refleksiji), 45° asp (za opis čeone boje, odnosno boje koja se opaža pri direktnom posmatranju uzorka) i 75° ili 110° asp (za opis takozvanih "flop" boja, odnosno boja koje se opažaju u niskim uglovima posmatranja. Navedenim geometrijama se opisuje interferentni pomeraj, koji je kod perlascentnih pigmenata i najznačajniji.

Za potrebe istraživanja izabrani su merni uglovi (uglovi pod kojima je postavljen detektor) od 15°, 45° i 75° asp. Na taj način osiguran je ravnomeran korak pri promeni mernog ugla, kao i precizno karakterisanje kolorimetrijskih vrednosti boje koja je najbliža spekularnoj. Izgled mernih geometrija korišćenih u istraživanju prikazan je na slici 5.14.



Slika 5.14. Merne geometrije korišćene u istraživanju

Navedene merne geometrije ($45^\circ/\text{asp}15^\circ$, $45^\circ/\text{asp}45^\circ$ i $45^\circ/\text{asp}75^\circ$) korišćene su kako prilikom merenja uzoraka (boja test karte) mernim uređajem, tako i prilikom snimanja navedenih uzoraka kamerom.

5.4.2. Određivanje CIELAB vrednosti boja mernim uređajem

Za dobijanje referentnih CIELAB vrednosti uzoraka korišćen je Gretag Macbeth Auto-Eye 640 gonio-spektrofotometar. Kako navedeni uređaj merenja vrši u tzv. relativnom modu, pre početka merenja izvršea je kalibracija uređaja. Kalibracija je podrazumevala podešavanje maksimalne i minimalne vrednosti merenja, pri čemu se maksimalna zadaje merenjem bele keramičke kalibracione pločice (slika 5.4). Minimalna vrednost određuje se na način merenja sa zatvorenim poklopcem (u odsustvu refleksije). Kako bi se osigurala što veća preciznost prilikom merenja uređaj je na isti način rekaliبران nakon merenja svakog dvadesetog uzorka.

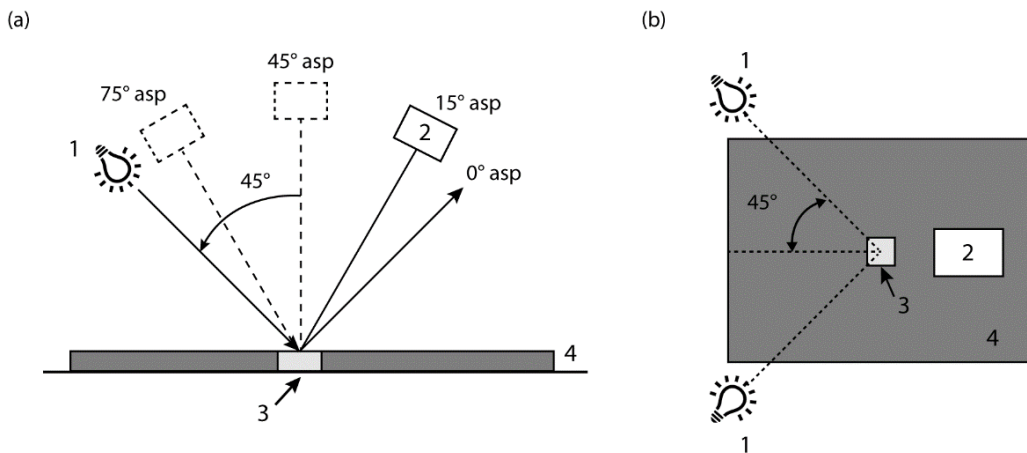
Svako polje test karte mereno je 3 puta i u obzir su uzete srednje CIELAB vrednosti navedenih merenja za standardne iluminante D65 i A. S obzirom na tip uzorka i veličinu mernog polja prilikom preračunavanja korišćen je standardni posmatrač od 10° (Nadal & Early, 2003; Atamas, 2012). Pored CIELAB vrednosti zabeležene su i reflektanse svakog od uzorka, pri čemu je i ovom slučaju u obzir uzimana srednja od tri izmerene vrednosti refleksije na svakoj talasnoj dužini.

5.4.3. Procedura snimanja uzoraka digitalnom kamerom

Kako bi se osigurala uspešnost rekonstrukcije vrednosti boje na osnovu odziva kamere, pri definisanju postavke snimanja rukovodilo se konstrukcijom gonio-spektrofotometra. Tipičan gonio-spektrofotometar je zatvoren sistem, pa su snimanja u svim eksperimentima sprovedena unutar konstruisane mračne komore (slika 5.9) i u potpuno zamračenoj prostoriji bez dodatnih izvora svetla. Na taj način izbegnut je uticaj neželjenih refleksija na površinu uzorka koji je digitalizovan. Dodatna snimanja van komore izvedena su u eksperimentu 3 na način opisan u poglavlju 5.5.3.

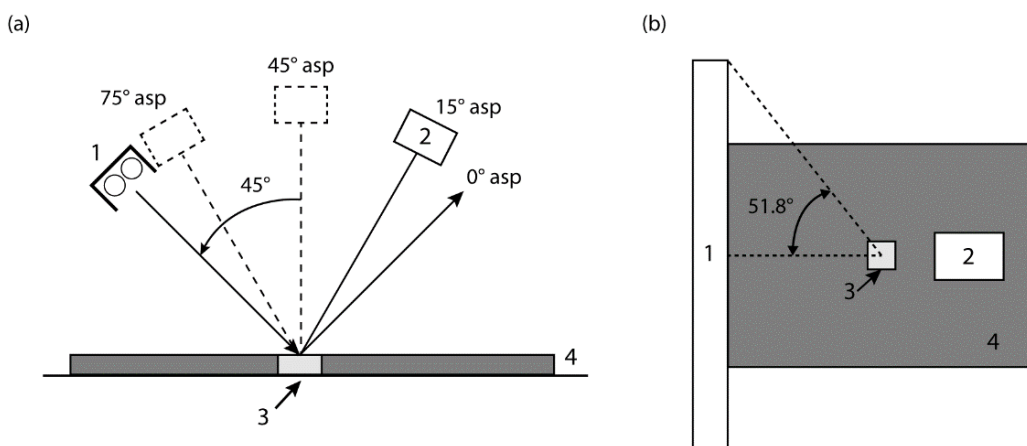
Kao baza za postavljanje uzoraka i fiksiranje kamere prilikom snimanja korišćen je stalak prikazan na slici 5.8. Prilikom merenja test karta je postavljana na postolje stalka, dok je kamera bila fiksirana za njegov držač.

Kako bi se osigurala uniformnost osvetljenja uzorka koji se snimao i pojačala iluminansa na njegovoj površini, dva izvora svetla postavljana su sa svake strane uzorka pod uglom od 45° u odnosu na njegovu normalu (slika 5.15). Udaljenost izvora svetla od centra uzorka u svim slučajevima (pri promeni izvora svetla) iznosila je 30 cm. Ovakva postavka korišćena je za sve izvore svetla, sem fluorescentnih lampi koje su, zbog svoje konstrukcije, morale biti pozicionirane na drugi način.



Slika 5.15. Položaj izvora svetla prilikom snimanja uzorka kamerom (a) pogled od napred, (b) pogled od gore. Sa 1 su označeni izvori svetla, 2 – kamera, 3 – uzorak koji se digitalizuje, 4 – pokrivka.

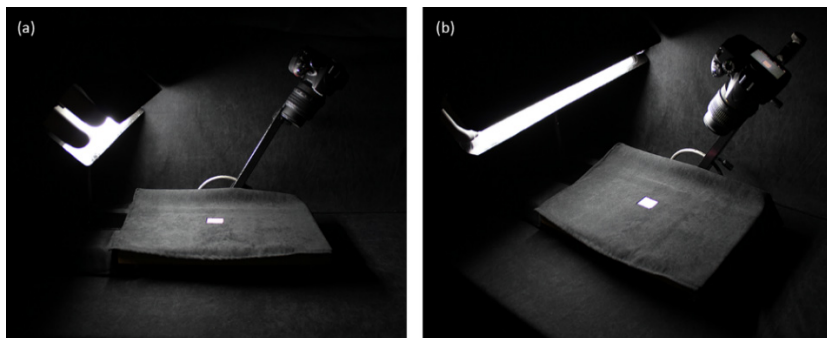
Pri snimanju u kom su korišćene fluorescentne lampe, korišćen je nosač u koji su dve lampe pozicionirane paralelno jedna iznad druge. Glava nosača pozicionirana je prilikom merenja pod uglom od 45° u odnosu na normalu na uzorak, pri čemu je udaljenost lampi od uzorka i u ovom slučaju iznosila 30 cm. Udaljenost je merena od centra ravni zračenja do centra uzorka koji se meri. Slika 5.16. predstavlja šematski prikaz ovakve postavke, dok je na slici 5.17. prikazan izgled nosača i pozicija kamere prilikom merenja u vidnom uglu od 75° asp.



Slika 5.16. Položaj izvora svetla (fluorescentne lampe) prilikom snimanja uzorka kamerom (a) pogled od napred, (b) pogled od gore. Sa 1 je označen izvor svetla, 2 – kamera, 3 – uzorak koji se digitalizuje, 4 – pokrivka.

Kako je kamera u ovoj postavci simulirala detektor mernog uređaja njena pozicija je varirana na način rotacije u ravni normale na površinu uzorka, pri čemu je rastojanje od objektiva kamere do

uzorka pri navedenoj rotaciji bilo konstantno i identično rastojanju izvora svetla od uzorka (30 cm). Pozicije kamere odgovarale izabranim uglovima merenja (15° , 45° i 75° asp). Da bi se izbegla neuniformnost detekcije površine koja nastaje kao posledica zakrivljenja objektiva kamere, polja test karte su snimana pojedinačno tako da je svako polje prilikom snimanja pozicionirano u centar vidnog polja kamere. Prilikom snimanja pojedinačnog polja, ostatak test karte pokrivan je crnom plišanom pokrivkom kako bi se sprečilo da refleksija sa okolnih polja bude detektovana kamerom (ISO, 2006).



Slika 5.17. Izgled nosača fluorescentnih lampi i njegov položaj pri snimanju u uglu od 45° /asp 75° (a) pogled od napred, (b) pogled sa strane (izvor: Tomić et al, 2016)

Žižna daljina objektiva kamere fiksirana je na 55 mm tako da je polje koje se snimalo obuhvatalo veću površinu snimljene slike. Sva podešavanja kamere prilikom snimanja bila su fiksirana, pri čemu je njihovo preciziranje objašnjeno u poglavlju 5.4.5.

5.4.4. Karakterizacija izvora svetla u uslovima snimanja

Svetlosni izvori mogu se karakterisati putem raznih veličina od značaja za konkretnu primenu. Za potrebe istraživanja, pored indeksa prikaza boje i indeksa metamerizma, koji opisuju sličnost izvora svetla sa standardnim osvetljenjem, bilo je neophodno odrediti iluminansu tj. fluks zračenja na površini snimanja. Ove veličine, kao i temperatura boje i spektar zračenja određene su merenjem, pri čemu je korišćen Eye-One Pro spektrofotometar. Očitavanja su dobijena pomoću programa Babel Color CT&A, gde je za mod merenja definisano ambijentalno svetlo, dok je za svaki izvor svetla definisana njegova korelisana temperatura boje kao referenca.

Spektrofotometar je korišćen sa dodatkom difuzera (slika 5.18), jer se jedino na taj način osigurava detektovanje upadnog fluksa. Kalibracija uređaja vršena je prilikom svake promene tipa osvetljenja i sastojala se u detektovanju tzv. "nule zračenja" (merenje je vršeno nakon što je difuzer preklopljen crnim poklopcem koji je osiguravao da nema upadnog zračenja na površini merenja).



Slika 5.18. Izgled mernog uređaja sa dodatkom difuzera i poklopca za kalibraciju

Izvori svetla su bili pozicionirani na način opisan u prethodnom poglavlju. Prilikom merenja, spektrofotometar je fiksiran tako da je merna glava bila pozicionirana na centru merne površine držača (slika 5.19). Na taj način detektovan je fluks zračenja koji pada tačno na poziciju na kojoj su se prilikom snimanja nalazila polja test karte.



Slika 5.19. Pozicija spektrofotometra pri merenju upadnog zračenja (na slici je prikazan slučaj kada su prilikom merenja korišćene fluorescentne lampe)

Rezultati merenja prikazani su u tabelama 5.9 i 5.10. U tabeli 5.9, pored vrednosti indeksa prikaza boje (CRI) standardni iluminant korišćen kao referenca za procenu. Indeks prikaza boje nije bilo moguće odrediti za svetlosne izvore sa CCT 2856 K (osvetljenje A), budući da nije postojala adekvatna referenca unutar programa za procenu.

Tabela 5.9. Rezultati procene reprodukcije boja svetlosnih izvora korišćenih u eksperimentu

| Simulator osvetljenja | Tip osvetljenja | Temperatura boje (K) | CRI | MI |
|-----------------------|------------------------|----------------------|----------|----|
| D65 | Fluorescentna lampa | 6044 | 97 (D65) | B |
| D65 | Fluorescentna sijalica | 5936 | 84 (D65) | E |
| D65 | LED | 6217 | 84 (D65) | E |
| A | Inkadescentna sijalica | 2582 | 91 (A) | - |
| A | Fluorescentna sijalica | 2518 | 82 (A) | - |
| A | LED | 2614 | 85 (A) | - |

Tabela 5.10. Iluminansa zračenja merena na centru merne površine

| Simulator osvetljenja | Tip osvetljenja | Iluminansa (lux) |
|-----------------------|------------------------|------------------|
| D65 | Fluorescentna lampa | 1090 |
| D65 | Fluorescentna sijalica | 884 |
| D65 | LED | 2347 |
| A | Inkadescentna sijalica | 903 |
| A | Fluorescentna sijalica | 917 |
| A | LED | 4358 |

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5.9 zaključeno je da postoje značajna odstupanja svakog od izvora svetla od standardnog osvetljenja čiju CCT simuliraju. Fluorescentna lampa i inkadescentna sijalica preuzete iz kabine za posmatranja pokazali su najbolje rezultate posmatrajući indeks prikaza boje, kao i indeks metamerizma u slučaju fluorescentne lampe.

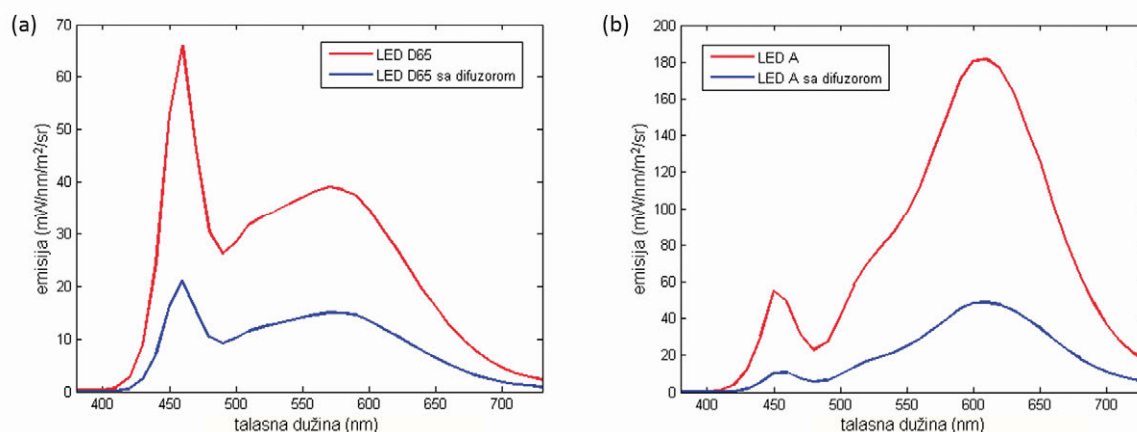
Kada je iluminansa u pitanju, fluks na površini merenja bio je najjači u slučaju LED sijalica, posebno sijalice sa CCT A (tabela 5.10). U ovom slučaju fluks je i do 4 puta veći u poređenju sa najslabijim izvorom svetla, pa je zaključeno da se intenzitet ovih izvora mora smanjiti kako bi se osigurala identična ekspozicija prilikom snimanja fotografija. Kako bi se to postiglo, iskorišćen je difuzni materijal sa *soft box*-a, koji se koristi primarno u studijskoj fotografiji. Ovaj materijal smanjuje intenzitet izvora svetla i povećava njegovu difuznost. Materijal je prilikom snimanja postavljen preko lampi, čime je zadržana njihova usmerenost u željenom pravcu i smanjen izuzetno jak intenzitet. Kako je svaka od LED sijalica izvor zračenja koji je po svojoj konstrukciji difuzan, dodatno “umekšavanje” snopa nije previše uticalo na osnovne parametre svetlosnog izvora. Neznatna promena primećena je u temperaturi boje svetla (tabela 5.11), pri čemu indeksi prikaza boje (a ni indeks metamerizma za slučaj LED sijalice) nisu promenjeni. Izmerene vrednosti fluksa date su u tabeli 5.12, dok je spektar zračenja obe sijalice sa i bez difuzora prikazan na slici 5.20.

Tabela 5.11. Rezultati procene reprodukcije boja LED izvora nakon smanjenja intenziteta njihovog zračenja

| Simulator osvetljenja | Tip osvetljenja | Temperatura boje (K) | CRI | MI |
|-----------------------|-----------------|----------------------|----------|----|
| D65 | LED | 5464 | 84 (D65) | E |
| A | LED | 2458 | 85 (A) | - |

Tabela 5.12. Izmerene vrednosti iluminanse na centru merne površine za LED osvetljenja nakon smanjenja intenziteta njihovog zračenja

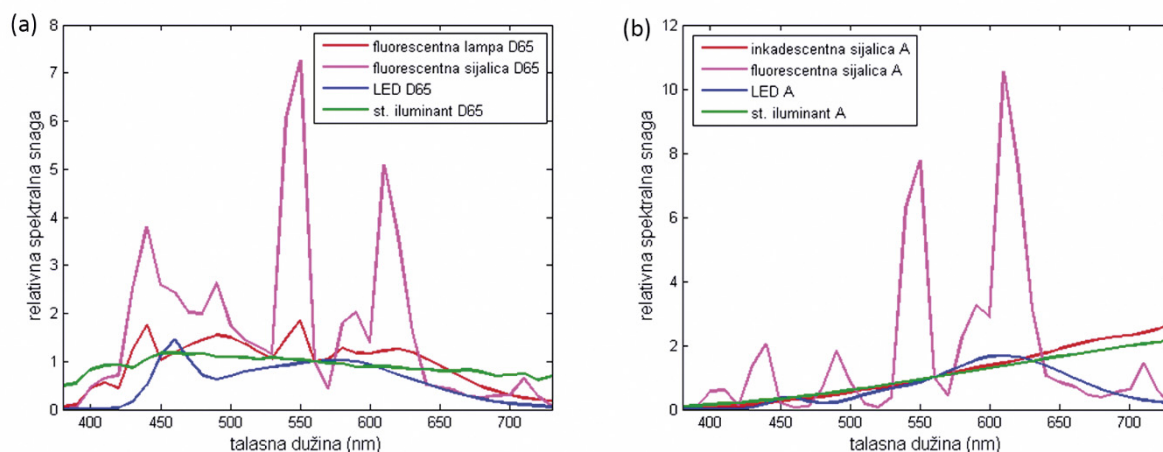
| Simulator osvetljenja | Tip osvetljenja | Iluminansa (lux) |
|-----------------------|-----------------|------------------|
| D65 | LED | 852 |
| A | LED | 861 |



Slika 5.20. Spektralna raspodela LED sijalica korelisane temperature boje koja odgovara standardnom iluminantu (a) D65 i (b) A, sa i bez korišćenja difuzora

Što se ostalih izvora svetla tiče, iako postoje neznatna odstupanja u iluminansi, njihov intenzitet nije bilo potrebno smanjivati jer je korišćenjem svetlomera potvrđeno da je u svakom slučaju neophodna ista ekspozicija.

Relativne spektralne raspodele izabranih izvora svetla, merene spektrofotometrom, prikazane su na slici 5.21. Radi poređenja, prikazana je i raspodela standardnih iluminanata odgovarajuće temperature.



Slika 5.21. Relativne spektralne snage izvora svetla simulatora standardnog osvetljenja (a) D65, (b) A, zajedno sa raspodelama snage pripadajućih iluminanata

Sa slike se može videti da u slučaju izvora CCT od 6500 K najveću sličnost sa standardnim iluminantom ima fluorescentna lampa, dok je najveće odstupanje primetno u slučaju fluorescentnih sijalica koje pokazuju izuzetno jak intenzitet u pojedinim delovima spektra. Kada su u pitanju simulatori standardnog iluminanta A, najbližnju spektralnu raspodelu snage ima inkadescetna sijalica (slika 5.21b). Najveće odstupanje ponovo je primetno u slučaju fluorescentnih sijalica. LED sijalice u oba slučaja pokazuju približan intenzitet zračenja standardnim iluminantima.

5.4.5. Definisavanje podešavanja kamere

Kada su u pitanju podešavanja kamere ISO 17321-1:2006 standard precizira da se prilikom snimanja u laboratorijskim uslovima moraju isključiti blic, digitalni balans bele, kao i sve automatske kontrole kamere, dok analogni balans bele tokom snimanja mora biti podešen na konstantnu vrednost (ISO, 2006). Takođe, preporučuje se izbegavanje kompresije snimaka. Što se tiče preostalih podešavanja (otvor i brzina blende, ISO faktor), nisu precizirani parametri izbora. Jednom definisana, podešavanja moraju biti konstantna prilikom snimanja svih uzoraka kako njihove varijacije ne bi uticale na promenu vrednosti detektovanih boja.

Kako bi se ispunili zahtevi standarda, digitalna kamera korišćena u istraživanju podešena je da snima RAW fajlove bez kompresije, pri čemu su isključene sve automatske opcije. Analogni balans bele, koji se tokom snimanja mora podesiti, definisan je manuelno, snimanjem GretagMacbeth White Balance test karte. Snimanje je takođe vršeno u manuelnom modu, bez uključenog blica.

Kako bi se što objektivnije definisala preostala podešavanja kamere uzeta su u obzir dva parametra: ekspozicija i šum slike. Ova dva parametra u najvećoj meri utiču na izgled tonova snimljene slike: pravilnom ekspozicijom osigurava se da tonovi slike budu adekvatno reprodukovani (ni previše svetli, ni previše tamni), dok se kontrolom nivoa šuma osigurava da ne dođe do degradacije snimljenih tonova.

Ekspozicija zavisi od 3 vrednosti: ISO osetljivosti, otvora blende i brzine zatvarača; stoga pri njenom definisanju sve tri moraju biti uzeta u obzir. U digitalnoj fotografiji odgovarajuća ekspozicija može se definisati korišćenjem automatskih podešavanja kamere ili upotrebom uređaja za merenje svetla (svetlomera). Procena kamerom (tzv. auto-ekspozicija) standardizovanja je na način da se kao referenca uzima refleksija neutralno sivog objekta (objekta koji reflektuje oko 18% upadne svetlosti). Osvetljenje scene u ovom slučaju procenjuje se na više predefinisanih pozicija grupisanih uglavnom na centru snimanja i ekspozicija se definiše tako da srednja vrednost svetline, izmerena na datim pozicijama, odgovara svetlini sivog objekta. Pri tom, kamera može podešavati samo otvor blende (sa fiksiranom brzinom blende), samo brzinu zatvarača (sa fiksiranim otvorom blende) ili oba parametra.

Navedeni pristup daje dobre rezultate samo u slučaju ujednačene raspodele svetline na slici, dok u suprotnom slučaju dovodi do previše tamnih ili previše svetlih fotografija. Kako je u ovom istraživanju scena koja se snima predstavlja zapravo polja punih tonova okruženo crnom bojom, ukoliko bi se podešavanje vršilo automatski ekspozicija bi drastično varirala u slučaju merenja polja različite svetline. Stoga je odlučeno da se za definisanje ekspozicije iskoristi precizniji pristup, odnosno da se za određivanje ekspozicije koriste vrednosti dobijene svetlomerom. Na osnovu izmerenog intenziteta ambijentalnog ili reflektovanog svetla, za zadatu ISO vrednost i otvor blende ovaj uređaj definiše odgovarajuću brzinu zatvarača. Na taj način, ekspozicija ne zavisi od scene koja se snima, već isključivo od jačine upadnog zračenja.

Da bi se definisala podešavanja ekspozicije svetlomer marke Seconik L-758DR DigitalMaster postavljen je da meri upadno zračenje na poziciji na kojoj su se prilikom snimanja kamerom nalazila odštampana polja. Procena je vršena za svih šest tipova izvora svetla korišćenih u istraživanju, pri čemu su prilikom svake procene izvori svetla postavljani na način opisan u prethodnom poglavlju. Na slici 5.22. prikazan je položaj svetlomera u slučaju kada su prilikom snimanja korišćene fluorescentne lampe.



Slika 5.22. Položaj svetlomera pri merenju upadnog svetla

S obzirom na to da su prilikom snimanja izvori svetla dovoljno blizu polju snimanja i da poseduju značajan intenzitet, za osetljivost senzora birane su ISO vrednosti od 100 i 200. Veće vrednosti vodile bi nužno ka većem šumu na fotografijama (Rand et al, 2005), pa stoga nisu razmatrane. Za dve definisane ISO vrednosti birani su otvori blende od 4.5, 5.6, 8 i 11 i za sve kombinacije ovih parametara svelomerom je određivana brzina zatvarača. Procedura određivanja ekspozicije izvršena je za sve izvore svetla definisane u eksperimentu.

Iako izabrani izvori svetla pokazuju razlike u količini fluksa zračenja, pokazalo se da optimalna ekspozicija u svim slučajevima predstavlja kombinaciju istih vrednosti (prikazanih u tabeli 5.13). Brzina blende izražena je u delovima sekunde, pa tako broj 8, na primer, označava 1/8 s.

Tabela 5.13. Vrednosti brzine blende za definisane ISO vrednosti i otvore blende (za sve izvore svetla korišćene u testiranju)

| | f 4.5 | f 5.6 | f 8 | f 11 |
|---------|-------|-------|-----|------|
| ISO 100 | 15 | 8 | 4 | 2 |
| ISO 200 | 30 | 15 | 8 | 4 |

Na osnovu vrednosti prikazanih u tabeli 5.13. može se primetiti da je za odgovarajuću ekspoziciju na većim otvorima blende neophodno kraće vreme snimanja, dok se sa povećavanjem ISO osetljivosti vreme snimanja duplo smanjuje, što je i očekivano. Kako bi se definisalo koja od navedenih kombinacija je optimalna za digitalizaciju otisaka u eksperimentu, procenjen je nivo šuma na fotografijama snimljenim kamerom sa svakim od podešavanja prikazanim u tabeli 5.13. Kao optimalna postavka definisana je ona koja je omogućila dobijanje snimaka sa minimalnim šumom.

Kako je za sve izvore svetla precizirana ista ekspozicija, procena je izvršena za fotografije snimljene pod svetlom fluorescentnih lampi, simulatora standardnog osvetljenja D65. Primat kod procene stavljen je na ovaj izvor svetla obzirom da se koristi u sva tri eksperimenta. Pored toga, nisu pronađeni literaturni izvori koji bi potvrdili da se šum slike menja sa temperaturom boje izvora svetla (slične iluminanse), dok je u eksperimentu 1 od suštinskog značaja bilo da se podešavanja kamere prilikom snimanja ne menjaju. Stoga je procena nivoa šuma izvršena samo za fotografije snimljene pod svetlom fluorescentnih lampi, pri čemu su izabrana podešavanja kamere korišćena u svim kasnijim snimanjima.

Lampe i kamera su pozicionirane tako da se simulira standardna geometrija 45°/0°. Kamera je postavljena upravno na polje snimanja, dok je nosač lampi postavljen pod uglom od 45° u odnosu na normalu na uzorak. Snimanje je izvršeno u potpunom mraku, tako da su jedini izvor svetlosti bile fluorescentne lampe. Udaljenost lampe od centra postolja snimanja, kao i udaljenost kamere od uzorka iznosili su 30 cm. Pre snimanja podešen je manuelni balans bele korišćenjem GretagMacbeth White Balance test karte.

Kao test slika korišćena je test karta Gretag Macbeth Color Checker SG, odnosno polja crvene, zelene, plave i sive boje sa sredine date karte (slika 5.23). Ove boje predstavljaju primarne boje aditivne sinteze i njihovu kombinaciju srednje svetline, pa su uvrštene kako bi se procenila njihova

reprodukcija. Pored toga, sivo polje je uvršteno i zbog usklađenosti sa zahtevima ISO 15739:2013 (ISO, 2013b) u kom se precizira testiranje šuma na test karti koja sadrži sivo polje refleksije 18%.

Karta je postavljena tako da data polja budu na sredini stalka (snimljene su 4 fotografije kako bi se osiguralo da su polja uvek na sredini snimka). Prilikom snimanja menjana su samo podešavanja kamere (varijacije date u tabeli 5.13) dok su pozicije svetala i kamere bila nepromenjene.



Slika 5.23. Polja Gretag Macbeth Color Checker SG test karte korišćena za procenu šuma

Slike su snimljene u RAW formatu i procesirane za dobijanje 8-bitnih TIFF fajlova u programu Adobe Photoshop CS6. Prilikom obrade slike definisano je da balans bele bude određen balansom definisanim u trenutku snimanja. Sve ostale opcije (korekcija boja, svetline, kontrasta i sl.) su isključene. Kao izlazni prostor boja definisan je sRGB. Sa dobijenih TIFF slika izdvojeni su središnji delovi svakog polja veličine 2x2 cm (na rezoluciji od 240 px/inch). Dobijene slike punih tonova crvene, zelene, plave i sive boje korišćene su za određivanje nivoa šuma.

Idealna slika, kada je u pitanju vrednost šuma, bila bi ona koja ne poseduje šum. Kako ovo nije moguće postići snimanjem, referentne slike za procenu šuma generisane su u programu MATLAB na osnovu vrednosti boja izabranih polja test karte (tabela 5.14). Vrednosti boja dobijene su merenjem spektrofotometrom Eye-One Pro (45°/0°). Kao izvor svetla definisan je standardni iluminant D65, a preračunavanje u CIELAB vrednosti je izvršeno uzimajući u obzir funkcije usaglašenog stimulusa za standardnog posmatrača od 2°. Ova vrednost izabrana je na osnovu udaljenosti kamere od polja snimanja i veličine polja (1.4 cm), jer je vidni ugao kamere pri snimanju date veličine polja iznosio 2.64°. Vidni ugao određen je prema (Kingslake, 1992):

$$\alpha = 2 \arctan \frac{d}{2f} \quad (5.1)$$

gde je: d – veličina objekta koji se snima (u pravcu merenja: horizontalno, vertikalno ili po dijagonali)

f – efektivna žižna daljina.

Pri definisanju standardnog posmatrača u obzir su uzete preporuke ISO i CIE (ISO/CIE, 2007) po kojima se standardni posmatrač od 2° koristi za slučajeve kada se uzorak zauzima vidni ugao od 1°-4°, dok se standardni posmatrač od 10° koristi u ostalim slučajevima (uzorak zauzima vidni ugao veći od 4°).

Tabela 5.14. Izmerene CIE LAB vrednosti polja (D65/2°)

| | L* | a* | b* |
|--------|-------|-------|--------|
| crvena | 36.23 | 59.31 | 34.6 |
| zelena | 53.56 | -45.3 | 39.38 |
| plava | 22.9 | 26.56 | -53.89 |
| siva | 96.01 | -0.8 | 2.98 |

Kako bi se slike generisale, izmerene CIELAB vrednosti preračunate su u sRGB vrednosti. Ova transformacija zahteva najpre određivanje tristimulusnih vrednosti (CIELAB→CIEXYZ) za dati iluminant, a zatim preračunavanje RGB vrednosti na osnovu tristimulusnih (CIEXYZ→RGB). Navedene transformacije izvršene su u programu MATLAB koristeći funkcije *lab2xyz* i *xyz2srgb* dostupne unutar ColorToolbox-a, pratećeg materijala publikacije (Westland et al, 2012). Pri preračunavanjima definisan je standardni izvor svetla D65 i standardni posmatrač od 2°. Dobijene RGB vrednosti prikazane su u tabeli 5.15.

Tabela 5.15. RGB vrednosti polja test karte u sRGB prostoru boja skalirane u rang od 0-1

| | R | G | B |
|--------|--------|--------|--------|
| crvena | 0.6764 | 0.0342 | 0.1316 |
| zelena | 0.2191 | 0.5712 | 0.2156 |
| plava | 0.0322 | 0.1783 | 0.5371 |
| siva | 0.9588 | 0.9559 | 0.9322 |

S obzirom na to da se procena šuma vrši upoređivanjem vrednosti piksela na identičnim pozicijama referentne i test slike, referentne slike su generisane tako da budu istih dimenzija kao selektovani delovi snimljenih polja (2x2 cm). Za određivanje vrednosti šuma korišćen je vršni odnos signal-šum (skraćenica PSNR od engl. *Peak Signal to Noise Ratio*). Ova metrika je u praktičnoj primeni veoma zastupljena pri proceni šuma i određuje se na način (Boncellet, 2000; Wang & Bovik, 2009):

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{f_{\max}^2}{MSE} \quad (5.2)$$

gde se sa f_{\max} označava maksimalna vrednost signala na slici (maksimalan intenzitet piksela), a MSE predstavlja srednju kvadratnu grešku između dve slike definisanu na način (Kaushik, 2012):

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [g(n, m) - f(n, m)]^2 \quad (5.3)$$

gde su: $f(n, m)$ - intenzitet piksela referentne slike definisan pozicijom n i m ,

$g(n, m)$ - intenzitet piksela slike koja se procenjuje definisan pozicijom n i m ,

M - ukupan broj piksela po širini slike,

N - ukupan broj piksela po dužini slike.

Vršni odnos signal šum procenjuje se za svaki od kanala boje slike i izražava se u dB. Što je dobijena vrednost veća šum na slici je manje primetan. Za idealan slučaj, odnosno kada su slike identične,

PSNR je beskonačna vrednost. Preračunavanje ove metrike vršeno je u programu CVIPtools, jer omogućava bolji uvid u raspodelu šuma po kanalima. Za razliku od drugih programa u kojima se PSNR određuje kao srednja vrednost šuma svih kanala, PSNR kao izlaz daje vrednost na svakom od kanala boje pa je stoga korišćen u ovom istraživanju.

Rezultate procene šuma na slikama snimljenim variranjem podešavanja ekspozicije prikazani su u tabelama 5.16 i 5.17, za ISO vrednost od 100 i 200 respektivno. Rezultati su prikazani za pojedinačne kanale boje i u formi srednjih vrednosti za sve kanale. Za slučaj kada su dati kanali procenjeni kao identični (PSNR vrednost ∞), srednja vrednost je računata uzimajući u obzir vrednost za preostala dva kanala boje.

S obzirom na to da je plavi kanal slike najpodložniji stvaranju šuma (Rand et al, 2005; Long, 2012; Davidson, 2015) veća pažnja pri analizi rezultata posvećena je PSNR vrednostima plavog kanala. Najveća srednja vrednost za svaku pojedinačnu analiziranu sliku označena je podebljano, dok je iskošeno označena najveća vrednost plavog kanala.

Tabela 5.16. Procenjene vrednosti šuma za slike snimljene sa ISO vrednošću od 100

| boje | | f 4.5 | f 5.6 | f 8 | f 11 |
|--------|------------------|---------------|---------------|---------------|----------|
| crvena | crveni kanal | 30.247 | 19.266 | 18.493 | 18.474 |
| | zeleni kanal | 20.897 | 20.898 | 20.898 | 20.897 |
| | plavi kanal | 17.792 | 17.810 | 17.784 | 17.772 |
| | srednja vrednost | 22.979 | 19.325 | 19.058 | 19.048 |
| zelena | crveni kanal | 16.926 | 27.309 | 30.354 | 30.780 |
| | zeleni kanal | 31.002 | 18.107 | 17.194 | 17.340 |
| | plavi kanal | 28.666 | 36.926 | 31.196 | 31.208 |
| | srednja vrednost | 25.531 | 27.447 | 26.248 | 26.443 |
| plava | crveni kanal | 45.357 | ∞ | ∞ | ∞ |
| | zeleni kanal | 16.218 | 17.144 | 17.902 | 17.784 |
| | plavi kanal | 25.743 | 25.751 | 23.306 | 23.468 |
| | srednja vrednost | 20.981 | 21.448 | 20.604 | 20.626 |
| siva | crveni kanal | 16.088 | 22.199 | 22.849 | 22.986 |
| | zeleni kanal | 16.356 | 22.016 | 23.232 | 23.051 |
| | plavi kanal | 15.986 | 20.469 | 21.836 | 21.726 |
| | srednja vrednost | 16.143 | 21.561 | 22.639 | 22.588 |

Tabela 5.17. Procenjene vrednosti šuma za slike snimljene sa ISO vrednošću od 200

| boje | | f 4.5 | f 5.6 | f 8 | f 11 |
|--------|------------------|---------------|---------------|--------|---------------|
| crvena | crveni kanal | 30.011 | 19.537 | 18.756 | 18.715 |
| | zeleni kanal | 20.897 | 20.898 | 20.898 | 20.898 |
| | plavi kanal | 17.810 | 17.782 | 17.783 | 17.777 |
| | srednja vrednost | 22.906 | 19.406 | 19.146 | 19.130 |
| zelena | crveni kanal | 17.276 | 26.733 | 29.501 | 30.628 |
| | zeleni kanal | 30.840 | 18.138 | 17.547 | 17.603 |
| | plavi kanal | 29.177 | 32.443 | 30.865 | 31.217 |
| | srednja vrednost | 25.764 | 25.771 | 25.971 | 26.483 |
| plava | crveni kanal | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| | zeleni kanal | 16.274 | 17.567 | 17.816 | 17.802 |
| | plavi kanal | 25.871 | 25.071 | 23.708 | 23.893 |
| | srednja vrednost | 21.073 | 21.319 | 20.762 | 20.848 |
| siva | crveni kanal | 16.167 | 21.712 | 22.493 | 22.79 |
| | zeleni kanal | 16.342 | 21.814 | 22.479 | 22.649 |
| | plavi kanal | 16.032 | 20.742 | 21.307 | 21.493 |
| | srednja vrednost | 16.180 | 21.423 | 22.093 | 22.311 |

Na osnovu rezultata procene šuma zaključeno je da ne postoje velike razlike PSNR vrednosti slika snimljenih sa različitim podešavanjima ekspozicije. Najveće razlike uočene su kod snimaka sivog polja, gde je šum naglašen u slučaju najvećeg otvora blende (f 4.5). Poredeći vrednosti dobijene za ISO 100 i 200 nešto više PSNR vrednosti dobijaju se u prvom slučaju, što je i očekivano.

Procenom srednje PSNR vrednosti svih kanala dobijenih za ISO 100 (tabela 5.16) uočeno je da u 2 od 4 slučaja (zelena i plava boja) otvor blende od f 5.6 osigurava postizanje manjeg šuma, dok isto podešavanje omogućava postizanje najmanje vrednosti šuma na plavom kanalu u skoro svim slučajevima. Jedini izuzetak u poslednjem slučaju primećen je za snimak sive slike, pri čemu razlika između vrednosti dobijene sa navedenim otvorom blende i najmanje uočene vrednosti nije previše značajna (razlika predstavlja svega 1.08% od najmanje vrednosti).

Stoga je odlučeno da bi optimalno podešavanje za postizanje minimalne vrednosti šuma predstavljalo ISO 100 i otvor blende od f 5.6. Za datu osetljivost senzora i otvor blende optimalna brzina blende definisana svetlomerom iznosi 1/8 s, te su spomenuta podešavanja korišćena prilikom digitalizacije uzoraka.

5.4.6. Metode obrade slike za dobijanje vrednosti boje

Kada je u pitanju način obrade snimljenih slika za procenu RGB vrednosti određenog polja, 17321-1:2012 (ISO, 2012) preporučuje da se u obzir uzme srednja RGB vrednost centralnog dela slike (minimalne površine 64x64 px). Poželjno je takođe da procena u obzir uzme bar 3 snimljene slike, kako bi se izbegle temporalne varijacije, ukoliko su navedene prisutne.

Što se same obrade slike tiče standard ne daje dodatne preporuke. U prethodnim studijama naglašava se važnost zadržavanja izvornih očitavanja senzora, te se pored postupka demozaikovanja (ako je

slika snimljena u RAW formatu), uklanjanja odsjaja i elektronskog balansa bele ne vrši nikakva dodatna obrada (Martínez-Verdú et al, 2003; ISO, 2012). Ovo se posebno odnosi na digitalnu korekciju balansa bele, jer se karakterizacija može uspešno izvršiti jedino ukoliko je balans bele bio isključen ili fiksiran prilikom snimanja (Westland et al, 2012) i ukoliko nakon snimanja slike nije dodatno korigovan. Eventualne korekcije vrednosti boja podrazumevaju proceduru linearizacije kojom se osigurava da R, G i B vrednosti budu jednake u slučaju snimaka monohromatskih uzoraka (Balasubramanian, 2003).

Da bi se ispunili navedeni zahtevi digitalne slike se uglavnom snimaju u RAW formatima. Kod tipičnih senzora koji poseduju Bayer-ove filtere za dobijanje vrednosti boja na svakom pikselu slike neophodno izvršiti demozajkovanje (određivanje nedostajućih vrednosti interpolacijom), pri čemu se vrši kodiranje slike u određenom tonskom opsegu. U prethodnim studijama (Hong et al, 2001; Seymour, 2004) pokazano je da kodiranje slike sa više od 10 bita po kanalu nije opravdano. Autori kao razlog navode naglašavanje šuma signala i dokazuju (Hong et al, 2001) da su razlike u određivanju vrednosti boje veće površine slike minimalne pri kodiranju slike sa 8 i 12 bita po kanalu boje.

U ovom istraživanju snimljene RAW slike procesirane su u *dcrw* programu otvorenog koda, koji je zbog velikog broja slika koje je trebalo obraditi pokretan iz MATLAB-a. Demozajkovanje je izvedeno bilinearnom interpolacijom, jer je vizuelnom procenom primećeno da ovaj tip interpolacije ne stvara artefakte na interpoliranim slikama, a pored toga omogućava bržu obradu od ostalih algoritama dostupnih u okviru korišćenog programa. Nijedno od dodatnih procesiranja nije vršeno (balans bele, gama i korekcije kontrasta i sl.).

Kao dodatni korak izvršeno je uklanjanje šuma tamne struje, koji postoji u sistemu nezavisno od izvora svetla (Widenhorn et al, 2002; Freeman, 2011). Ovaj šum uklonjen je tako što je najpre snimljena referentna slika u odstustu bilo kog izvora svetla (sa poklopcem na objektivu kamere), a zatim je data slika oduzimana od procesiranih (Widenhorn et al, 2010). Rezultujuće RGB slike snimane su kao 8-bitni TIFF fajlovi. Ovakva reprezentacija usvojena je na osnovu rezultata prethodno spomenutih studija (Hong et al, 2001; Seymour, 2004).

Budući da su polja snimana sekvencijalno zaključeno je da je za procenu RGB vrednosti nije opravdano koristiti 3 snimka kako se ISO 17321-1:2012 standardom preporučuje (ISO, 2012), već je vrednost definisana na osnovu jednog snimka. U obzir prilikom preračunavanja uzeta je nešto veća površina od zahtevane – površina od 400x400 px sa centra svake slike (originalne dimenzije slika iznosile su 5184x3456 px na rezoluciji od 240 px/inch). Srednja vrednost date površine računata je po kanalima slike i rezultujuće R, G i B vrednosti predstavljale su ulaze algoritma karakterizacije. Navedeni koraci procesiranja takođe su vršeni u MATLAB-u.

5.5. Metode procene uticaja varijabilnih parametara postavke na tačnost estimacije boje

5.5.1. Metod karakterizacije kamere

Nakon određivanja RGB i CIELAB vrednosti boja polja test karte procedurom karakterizacije definiše se njihova veza, odnosno način preračunavanja vrednosti iz jednog prostora boja u drugi. U većini prethodnih studija (Wu et al, 2000; Hong et al, 2001; Martínez-Verdú, 2003; Cheung et al, 2004b; Jang et al, 2005) na osnovu odziva kamere najpre su određivane CIEXYZ vrednosti, dok je konverzija u CIELAB sprovedena u sledećem koraku. Ovaj pristup nalazi opravdanje u manje-više linearnoj vezi između RGB i CIEXYZ vrednosti, pri čemu je samu transformaciju veoma jednostavno izvesti. Međutim, manja greška u prvom koraku ne znači nužno da će karakterizacija biti uspešno sprovedena jer je transformacija koja se sprovodi naknadno (CIEXYZ → CIELAB) nelinearna (Tomić et al, 2016). Stoga je moguće pristupiti direktnoj transformaciji (RGB → CIELAB) kao što je pokazano u (Solli et al, 2005; Chu & Feng, 1996; Chuan & Shi-Sheng, 2008; Fdhal et al, 2009).

Tačnost estimacije u velikoj meri zavisi i od algoritma karakterizacije. Ako se uporede rezultati karakterizacije kamere postignute različitih algoritmima prikazani u poglavlju 2.4.5. može se zaključiti da se najbolji rezultati postižu polinomnim i ostalim metodama regresije (Brydges et al, 1998; Hong et al, 2001; Soli et al, 2005), kao i veštačkim neuronskim mrežama (Cheung et al, 2002; Liu et al, 2008). Takođe pokazano je da metoda polinoma i neuronske mreže primenjene na isti set podataka daju gotovo identične rezultate (Cheung et al, 2004b). Svi navedeni radovi bazirani su na uzorcima sa aposorpcionim pigmentima, i samim tim na jednoj geometriji merenja. U prethodno sprovedenim studijama (Gebejes et al, 2013; Tomić et al, 2015) na izabranom setu goniohromatskih štampanih uzoraka za estimaciju kolorimetrijskih vrednosti ispitana je upotreba linearne pseudoinverzne metode (engl. *Pseudoinverse* – PSE) (Wandell & Farell, 1993; Hong et al, 2001) i nelinearne metode kernela (Heikkinen et al, 2007). Rezultati su u velikoj meri zavisili od mernog ugla, pri čemu su postignute visoke srednje vrednosti razlika između estimiranih i izmerenih vrednosti boja.

Na osnovu izloženog zaključeno je da bi u istraživanju kao algoritam karakterizacije trebalo uvrstiti metode polinomne regresije ili veštačke neuronske mreže. U odlučivanju između navedenih pristupa veliku ulogu igrao je sam način estimacije, odnosno potreba za višeuagaonim procenama. Naime, kod višeuagaonog merenja polinomna regresija zahtevala bi empirijsko pronalaženje adekvatnog polinoma za svaki od mernih uglova. S druge strane, adaptivnost ANN omogućava da se primene na različit set podataka (merenja u različitim uglovima), uz minimalnu promenu parametara. Na taj način povećava se efikasnost procedure karakterizacije. Stoga su u ovom istraživanju kao algoritam karakterizacije primenjene veštačke neuronske mreže. Takođe, kako bi se proces dobijanja kolorimetrijskih vrednosti dodatno ubrzao primenjena je direktna transformacija vrednosti boja kamere u kolorimetrijske vrednosti (RGB → CIELAB), koja se kod navedenog algoritma pokazala kao veoma uspešna (Chu & Feng, 1996; León et al, 2006; Chuan & Shi-Sheng, 2008; Fdhal et al, 2009).

U prethodnim studijama (Cheung et al, 2004b; Fghal et al, 2009) za određivanje navedene veze korišćen je višeslojni perceptron sa 3 neurona u ulaznom sloju (R, G i B vrednosti), različitim brojevima skrivenih slojeva i 3 neurona u izlazom sloju (L^* , a^* i b^* vrednosti). Pokazano je da ne dolazi do unapređenja u rezultatima određivanja kolorimetrijskih vrednosti boja ukoliko broj neurona skrivenog sloja prelazi 18 (Cheung et al, 2004b). U svim slučajevima mreža je trenirana Levenberg–Marquardt algoritmom sa prostiranjem greške unazad. Navedeni pristup sa svim preciziranim parametrima primenjen je i u ovom istraživanju. Pri tom je korišćeno predefinisano podešavanje u kom se za aktivaciju neurona skrivenog sloja koristi sigmoidna funkcija, dok se za aktiviranje neurona izlaznog sloja koristi linearna. Za određivanje grešaka karakterizacije u svim eksperimentima korišćen je princip unakrsne procene (engl. *cross-validation*) (White, 1990) pri čemu je inicijalni set uzoraka (svih 290 vrednosti boja) deljen prema definisanom kriterijumu na test i trening set. Trening set korišćen je za učenje algoritma i podešavanje težinskih koeficijenata, dok je test set korišćen za procenu uspešnosti učenja.

U zavisnosti od cilja eksperimenta definisani su kriterijumi podele kao i ostala podešavanja mreže. Ove opcije detaljno su objašnjene u narednim poglavljima. ANN su implementirane u okviru Matlab R2013a programa korišćenjem funkcija Neural Network Toolbox-a (Demuth et al, 2010).

Uzorci ovog istraživanja predstavljali su štampane materijale, dobijene kombinacijom tehnika štampe, pa se pri proceni tačnosti merenja boja rukovalo tolerancijama diskutovanim u delu 2.4.5. (Seymour, 2009). Usvojeno je dakle da je gornja granica za prihvatljivu estimaciju vrednosti boja ΔE^*_{ab} od 3.

5.5.2. Metod procene uticaja spektralne raspodele izvora svetla

Kako bi se procenilo koliko spektralna raspodela izvora svetla utiče na tačnost estimacije, odnosno, koliko je korišćeni algoritam efikasan u zanemarivanju izvora svetla, polja test karte snimljena su pod svim definisanim izvorima svetla na način opisan u delu 5.4.3. Snimanje je vršeno u potpuno zamračenoj prostoriji unutar improvizovane mračne komore (slika 5.9).

Nakon snimanja fotografije su obrađene na način opisan u poglavlju 5.4.6. Dobijene RGB vrednosti za svaki od izvora svetla i svaki od tri definisana merna ugla služile su kao ulazi algoritma karakterizacije. Kao ciljne vrednosti definisane su CIELAB koordinate koje su odgovarale standardnom osvetljenju koje je izvorom svetla simulirano – u slučaju kada su uzorci prilikom snimanja kamerom osvetljavani simulatorima standardnog osvetljenja D65, ciljne CIELAB koordinate odgovarale su standardnom osvetljenju D65, dok su u slučaju snimanja kamerom pod svetlima koja su simulirala standardno osvetljenje A, korišćene CIELAB vrednosti za navedeno standardno osvetljenje.

Kao algoritam estimacije korišćene su neuronske mreže, definisane kao što je opisano u prethodnom poglavlju. Treniranje i testiranje algoritma izvršeno je na principu unakrsne validacije pri čemu je korišćen LOO (engl. *Leave One Out*) metod. U ovom pristupu jedan od uzoraka se definiše kao testni, pri čemu se svi ostali uzorci seta koriste za treniranje algoritma. Zatim se ista procedura ponavlja za sve uzorke seta, pa se za set koji sadrži n uzoraka postupak treniranja/testiranja ponavlja n puta (u konkretnom slučaju 290).

Iako je treniranje vršeno na ovaj način sporije i manje efikasno u odnosu na ostale metode, navedenom podelom seta omogućeno je da se algoritam uvek trenira na isti način, te da se dobijene razlike u tačnosti estimacije kolorimetrijskih vrednosti boja mogu pripisati razlikama u ulaznim podacima (odnosno korišćenim izvorima svetla). Takođe, na ovaj način procena razlike boja (razlike između ciljnih CIELAB vrednosti dobijenih merenjem gonio-spektrofotometrom i estimiranih vrednosti dobijenih kao izlaz rezultata karakterizacije) vrši se za svaki uzorak seta, čime je omogućen uvid u efikasnost algoritma pri estimaciji pojedinih tonova.

U konkretnoj primeni podela na trening i test set vršena je korišćenjem funkcije *divideind* (mod podele: *sample*), pri čemu je su za svaki testni uzorak ostali uzorci predstavljali trening set. Treniranje algoritma za svaki uzorak vršeno je 100 epoha, dok su greške estimacije određivane za svaki uzorak u formi ΔE^*_{ab} razlike boja (Wyszecki & Stiles, 2000). Pri svakoj inicijaciji algoritma vrednosti praga i težinski koeficijenti postavljaju se na različite vrednosti, pa su stoga moguće neznatne varijacije u izlazima algoritma. Kako bi se ove varijacije minimizirale, procedura treniranja/testiranja ponovljena je 5 puta za svaku kombinaciju RGB i CIELAB vrednosti (Cheung et al, 2004b). Kao rezultat procene vrednosti boja pojedinačnog uzorka smatrana je srednja vrednost 5 ponavljanja.

Pri proceni uticaja izvora svetla posmatrana je raspodela greški (ΔE^*_{ab} vrednosti) za svaku kombinaciju RGB i CIELAB vrednosti, kao i ostale statističke vrednosti od značaja (srednja, minimalna i maksimalna vrednost). Pored ΔE^*_{ab} vrednosti praćene su i srednje vrednosti grešaka estimacije na pojedinačnim kanalima boja (ΔL^* , Δa^* i Δb^*). U ovom slučaju korišćene su apsolutne vrednosti grešaka, budući da ove vrednosti mogu biti i negativni brojevi što bi u proračunu uticalo na srednju vrednost.

5.5.3. Metod procene uticaja ambijentalnog osvetljenja

Kao cilj *eksperimenta 2* definisana je procena uticaja ambijentalnog osvetljenja na tačnost estimacije kolorimetrijskih vrednosti uzoraka. Kako bi se navedeni uticaj procenio uzorci su snimani pod jednim izvorom svetla, pri čemu je dodatno variran intenzitet ambijentalnog osvetljenja (osvetljenja u prostoriji u kojoj je merenje vršeno).

Standardni iluminant D65 i standardni posmatrač od 10° se uglavnom koriste pri merenju boja goniohromatskih uzoraka (kao što je diskutovano u poglavlju 5.3.2.), dok se od svih izvora svetla korišćenim u istraživanju fluorescentnim lampama dati iluminant najpreciznije simulira (tabela 5.9 i slika 5.21). Stoga su u ovom eksperimentu kao osnovni izvor svetla definisane fluorescentne lampe simulatori standardnog osvetljenja D65. Prilikom snimanja u različitim uslovima osvetljenosti nisu menjana podešavanja kamere definisana u poglavlju 5.4.5. kako bi se osiguralo adekvatno poređenje.

Pored navedenog izvora svetla, korišćeni su dodatni izvori tako da je ambijentalno osvetljenje varirano kroz tri intenziteta. U prvom slučaju uzorci su snimani u potpuno zamračenoj prostoriji i unutar mračne komore pri čemu je ambijentalno svetlo predstavljalo samo svetlost korišćenih lampi simulatora standardnog osvetljenja D65.

U drugom slučaju, snimanje je vršeno u zamračenoj prostoriji bez korišćenja komore, pri čemu su korišćene dodatne fluorescentne lampe postavljene levo i desno od polja snimanja na udaljenosti od

1.5 m. Na ovaj način omogućeno je postizanje nešto veće iluminanse na površinu uzorka koji se snimao kamerom, jer je pored dodatnih izvora zračenje pojačano i refleksijom od okolnih površina.

Konačno, poslednja postavka podrazumevala je snimanje na dnevnom svetlu. U ovom slučaju snimanje je vršeno bez zamračivanja prostorije.

Spektralna raspodela dodatno korišćenih izvora svetla nije posebno određivana, već je njihov uticaj definisan merenjem upadnog zračenja na površinu merenja. S obzirom na to da se prilikom snimanja kamerom zapravo meri reflektovano zračenje sa uzorka (određenog polja test karte), a sam uzorak se ne menja, jedini varijabilni faktor koji u ovom slučaju utiče na promenu vrednosti boja detektovanih kamerom je izvor svetla. Stoga se, direktnim merenjem upadnog zračenja, ovaj parametar može karakterisati.

Karakteristike iluminanse, odnosno ambijentalnog svetla za svaku od definisanih postavku, merene su Eye-One Pro spektrofotometrom sa dodatkom difuzera. Uređaj je prilikom merenja postavljan u poziciju u kojoj su se tokom snimanja kamerom nalazili štampani uzorci (slika 5.19). Za svaki od uslova snimanja detektovana je vrednost iluminanse i temperature boje. Navedeni parametri praćeni su tokom vremena, kako bi se procenile njihove varijacije u periodu snimanja. Budući da je snimanje svih uzoraka (290 polja test karte) u jednom mernom uglu trajalo oko 30 minuta (90 minuta za sva tri ugla merenja u jednoj postavci) za svaki od uslova snimanja navedeni parametri mereni su u intervalima od 10 minuta.

Snimljene fotografije za svaku postavku i svaki od mernih uglova obrađene su na način opisan u poglavlju 5.4.6. kako bi se definisale RGB vrednosti polja. Ove vrednosti predstavljale su ulaze algoritma karakterizacije. Kao ciljne vrednosti u svim slučajevima korišćene su CIELAB vrednosti dobijene merenjem gonio-spektrofotometrom (D65/10°). Neuronske mreže su generisane za svaku od postavki i za svaki od mernih uglova na način opisan u prethodnom poglavlju.

5.5.4. Metod procene uticaja broja uzoraka trening seta

Za procenu uticaja broja uzoraka trening seta na tačnost estimacije (*eksperiment 3*) korišćene su RGB vrednosti polja test karte snimljenih pod svetlom fluorescentnih lampi simulatora osvetljenja D65, i odgovarajuće CIELAB vrednosti dobijene merenjem (D65/10°).

Ukupan set uzoraka (svih 290 boja) nasumično je deljen na 3 dela – trening, validacioni i test set (korišćenjem funkcije *dividerand*, mod podele: *sample*). Podela je vršena u odnosima: 8:1:1, 7:2:1, 6:3:1, 5:4:1, 4:5:1 i 3:6:1. Ovakva podela omogućavala je variranje broj uzoraka trening seta, pri čemu je broj uzoraka test seta bio nepromenjen. Svaka grupa sastojala se dakle od različitih boja. Validacioni set uključen je ne samo zbog postizanja željenog odnosa broja uzoraka trening i test seta, već i s ciljem sprečavanja prezasićenja (engl. *overfitting*) u procesu učenja i poboljšavanja generalizacione moći mreže.

U tom smislu trening nije vršen određen broj epoha, kao u prethodnim eksperimentima, već je zaustavljan u momentu kada greška validacije počinje da se povećava. Greška procene u ovom slučaju praćena je pomoću MSE vrednosti. Ukupna performansa modela procenjena je na način estimacije test seta, primenom definisanih težinskih koeficijenata i vrednosti ofseta.

Kako bi se uticaj nasumične podele sveo na minimum procedura treniranja i testiranja ponovljena je 100 puta. Za svako ponavljanje algoritma određivana je ΔE_{ab}^* razlika boja između estimiranih i izmerenih CIELAB vrednosti pojedinačnih polja, kao i srednja, maksimalna i minimalna ΔE_{ab}^* vrednost svih izmerenih polja. Kao reprezent tačnosti estimacije izvršeno je uprosečavanje srednjih vrednosti za svih 100 ponavljanja algoritma (jednačina 5.5), dok su ekstremi (minimalna i maksimalna vrednost) takođe određeni za sva ponavljanja (jednačine 5.11 i 5.12). Pored toga izračunate su i prosečne vrednosti maksimuma i minimuma za sva ponavljanja (jednačina 5.9 i 5.10), i standardna devijacija srednjih vrednosti svih ponavljanja. Procedura dobijanja ovih vrednosti data je u nastavku (Tomić et al, 2016).

Ako je:

$\Delta E_{ab}^*(i)$ - greška estimacije uzorka i (odnosno razlika između njegove CIELAB vrednosti dobijene merenjem gonio-spektrofotometrom i CIELAB vrednosti dobijene kao rezultat algoritma karakterizacije),

k - ukupan broj uzoraka test seta,

n - broj ponavljanja algoritma (100 u konkretnom slučaju),

srednja vrednost razlike boja j -tog ponavljanja određuje se na način:

$$\text{srednje } \Delta E_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta E_{ab}^*(i) \quad (5.4)$$

Prosek srednjih ΔE_{ab}^* vrednosti za sva ponavljanja definisan je kao:

$$\text{Prosek srednjih } \Delta E \text{ vrednosti} = \mu = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{srednje } \Delta E_j \quad (5.5)$$

Standardna devijacija određena je za srednje vrednosti svih ponavljanja na način:

$$\text{Standardna devijacija} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n |\text{srednje } \Delta E_j - \mu|^2} \quad (5.6)$$

Ako se sa A_j označi vector dužine k koji sadrži $\Delta E_{ab}^*(i)$ razlike svih uzoraka test seta za j -to ponavljanje algoritma, maksimalna i minimalna greška za navedeno ponavljanje određene su na način:

$$\max_j = \max(A_j) \quad (5.7)$$

$$\min_j = \min(A_j) \quad (5.8)$$

Shodno tome, prosek maksimuma i minimum za sva ponavljanja određen je kao:

$$\text{Prosek max } \Delta E \text{ vrednosti} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \max_j \quad (5.9)$$

$$\text{Prosek min } \Delta E \text{ vrednosti} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \min_j \quad (5.10)$$

Konačno, ako se sa B označi vektor koji sadrži maksimalne greške (razlike boja) za svako od ponavljanja (prema jednačini 6.7. za $j=1$ do $j=n$), a C je vektor koji sadrži minimalne greške za svako ponavljanje (prema jednačini 6.8. za $j=1$ do $j=n$), najveća i najmanja greška za sva ponavljanja definišu se na način:

$$\mathbf{Max\ greška} = \max(B) \quad (5.11)$$

$$\mathbf{Min\ greška} = \min(C) \quad (5.12)$$

Pored navedenih vrednosti praćen je i prosek srednjih vrednosti grešaka estimacije na pojedinačnim kanalima boja (ΔL^* , Δa^* i Δb^*), na način dat kako sledi.

Ako je:

$\Delta L^*(i)$ – apsolutna vrednost greške estimacije svetline uzorka i (odnosno apsolutna vrednost razlike njegove CIE L^* vrednosti dobijene merenjem gonio-spektrofotometrom i CIE L^* vrednosti dobijene kao rezultat algoritma karakterizacije),

$\Delta a^*(i)$ – apsolutna vrednost greška estimacije kanala a^* vrednosti uzorka i ,

$\Delta b^*(i)$ – apsolutna vrednost greška estimacije kanala b^* vrednosti uzorka i ,

k - ukupan broj uzoraka test seta,

n - broj ponavljanja algoritma (100 u konkretnom slučaju),

srednja apsolutna vrednost svetline j -tog ponavljanja određuje se na način:

$$\text{srednje } \Delta L_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta L^*(i) \quad (5.13)$$

Analogno, srednje a^* i b^* apsolutne vrednosti dobijaju se kao:

$$\text{srednje } \Delta a^*_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta a^*(i) \quad (5.14)$$

$$\text{srednje } \Delta b^*_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta b^*(i) \quad (5.15)$$

Proseci srednjih L^* , a^* i b^* vrednosti za sva ponavljanja definisani su kao:

$$\mathbf{Prosek\ srednjih\ } \Delta L^* \mathbf{vrednosti} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{srednje } \Delta L_j \quad (5.16)$$

$$\mathbf{Prosek\ srednjih\ } \Delta a^* \mathbf{vrednosti} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{srednje } \Delta a_j \quad (5.17)$$

$$\mathbf{Prosek\ srednjih\ } \Delta b^* \mathbf{vrednosti} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{srednje } \Delta b_j \quad (5.18)$$

5.6. Metode optimizacije

Predloženi pristup korišćenja digitalne kamere za procenu vrednosti boja goniohromatskih štampanih uzoraka je izuzetno vremenski zahtevan, što bi u praksi limitiralo njegovu industrijsku primenu. Stoga su nakon sprovedenih eksperimenata razmotrene metode optimizacije.

Analiziranjem dužine trajanja pojedinih koraka procesa, zaključeno je da je vremenski najzahtevnija operacija snimanje fotografija odštampanih uzoraka. Empirijska karakterizacija kamere, naročito pri primeni neuronskih mreža, zahteva veliki broj ulaznih podataka za postizanje zadovoljavajućeg stepena tačnosti. Pri višegaonom merenju definisani broj ulaznih podataka umnožava se brojem uglova, jer je svaki uzorak neophodno snimiti u svakom uglu. U konkretnom slučaju to je značilo 870 snimaka (290 polja test karte u tri merna ugla), pa je procedura snimanja efektivno trajala oko 1.5 sati.

Pored toga, značajno je i vreme potrebno za štampu uzoraka. Ono je određeno brzinom rada konkretne mašine, pa se na njega ne može previše uticati.

Od koraka procesiranja snimljenih podataka značajno vreme utroši se i na obradu snimljenih fotografija i treniranje neuronskih mreža za svaki od uglova merenja (proceduru karakterizacije). Obrada RAW fotografija, sprovedena u ovom istraživanju, podrazumevala je samo jednu operaciju – demozajkovanje. Kako ni jedna od mogućih dodatnih operacija (balans bele, gama korekcija, linearizacija, korekcija kontrasta i tonova itd.) nije vršena, zaključeno je da skraćanje vremena neophodnog za izvršenje ovog koraka nije moguće.

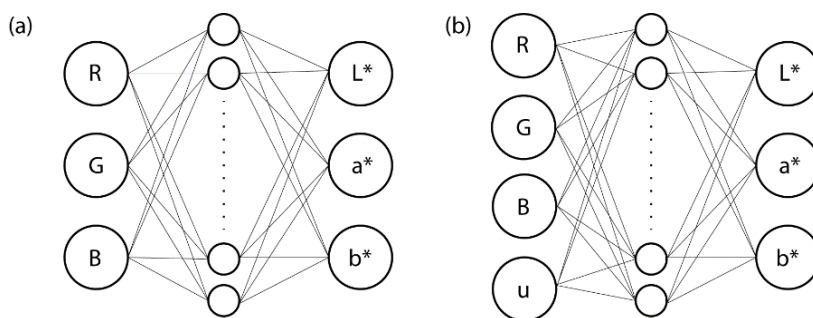
Akcent optimizacije pristupa stavljen je stoga na dve operacije – proceduru karakterizacije i snimanje uzoraka.

5.6.1. Optimizovanje karakterizacije – pristup jedne mreže

Kako bi se skratilo vreme obrade više-ugaonih podataka i samim tim povećala efikasnost predloženog pristupa ispitana je mogućnost korišćenja jedne neuronske mreže za procenu vrednosti boja za sve merne uglove. Umesto tri neuronske mreže (za svaki ugao merenja) korišćena je samo jedna, pri čemu su ispitane dve postavke grafički predstavljene na slici 5.24.

Prva postavka podrazumevala je da su ulazi algoritma RGB vrednosti uzoraka za sva tri ugla merenja dok su izlazi njima pripadajuće CIELAB vrednosti. Druga postavka razlikovala se od prve po dodatnom ulazu; naime, za svaki uzorak kao ulaz definisane su njegove R, G i B vrednosti, kao i aspekularni ugao pod kojim je snimljen (vrednost 15, 45 ili 75). Izlazi su kao i u prethodnom slučaju bile odgovarajuće CIELAB vrednosti.

U ovom segmentu kao ulazi mreže korišćeni su RGB podaci dobijeni snimanjem pod fluorescentnim lampama simulatorima D65 u uslovima odstupstva svakog drugog izvora svetla, dok su CIELAB vrednosti odgovarale D65/10°. Mreža je trenirana na način koji se eksperimentom 3 pokazao kao optimalan (uz 100 ponavljanja), dok je procena uspešnosti vršena preko parametara opisanih u poglavlju 5.5.4.



Slika 5.24. Korišćenje jedne neuronske mreže za estimaciju vrednosti boja svih geometrija (a) postavka 1, (b) postavka 2

5.6.2. Optimizovanje karakterizacije – selektivna redukcija boja trening seta

U prethodnim istraživanjima naglašen je značaj adekvatnog izbora boja trening seta, pri čemu se set smatra optimalnim ukoliko adekvatno pokriva gamut boja od značaja za konkretnu primenu, uz korišćenje minimalnog broja različitih boja (Harderberg et al, 1998; Cheung & Westland, 2006). Kako je u ovom ispitivanju korišćena nasumična podela inicijalnog seta boja na trening i test set, trening set se sastojao od boja koje nisu birane tako da se spomenuti zahtev definisan u prethodnim studijama (Harderberg et al, 1998; Cheung & Westland, 2006) ispuni.

Stoga je, pored pristupa jedne mreže, ispitana je i mogućnost selektivne redukcije broja uzoraka trening seta kako bi se procedura treniranja dodatno ubrzala. U ovom segmentu iskorišćen je pristup baziran na primeni genetskog algoritma (GA) (Tomić et al, 2016). GA je biološki inspirisana heuristika koja oponašajući proces prirodne selekcije omogućava rešavanje problema pretrage i optimizacije (Gen & Cheng, 1997; Mitchell, 1998). U genetskom algoritmu rešenja postavljenog problema (jedinke) evoluiraju ka boljim rešenjima u skladu sa postavljenim funkcijama cilja. Evolucija obično započinje od populacije nasumično generisanih ili izabranih jedinki i nastavlja se kroz procese selekcije, ukrštanja i mutacije (Haupt & Haupt, 2004). U svakoj iteraciji algoritma (odnosno u svakoj generaciji evolucije) zadržava se skup zadovoljavajućih rešenja, koja se dalje kombinuju kako bi se poboljšao kvalitet populacije i omogućilo postizanje rešenja koja u što većoj meri odgovaraju postavljenim zahtevima. Algoritam se prekida kada je proizveden maksimalan broj definisanih generacija ili kada je postignut zadovoljavajući nivo performansi populacije (Haupt & Haupt, 2004).

Za razliku od drugih metoda optimizacije, za GA nije neophodno da matematički model ili procena funkcije cilja budu unapred poznati. Samim tim ovaj pristup zahteva veoma malo znanja o problemu koji se rešava i obezbeđuje veću verovatnoću pronalaženja globalnog minimuma/maksimuma. GA je u dosadašnjim istraživanjima uspešno iskorišćen za određivanje koeficijenata polinomne transformacije pri kolorimetrijskoj karakterizaciji kamere (Bianco et al, 2009), pa je pretpostavljeno da će primena biti uspešna i za definisanje optimalnog trening seta.

Pri primeni GA definisana su dva cilja – smanjenje greške procene kolorimetrijskih vrednosti unutar test seta i smanjenje broja uzoraka trening seta.

U skladu s tim precizirane su i dve funkcije cilja čiji je minimum neophodno pronaći (Tomić et al, 2016):

$$f_1(x) = \Delta E_{ab}^* (test) \quad (5.19)$$

$$f_2(x) = \sum_i x_i \quad (5.20)$$

gde je sa x označen pojedinac populacije (binarni niz čija je dužina određena brojem uzoraka celog seta). Ukoliko je uzorak x_i uključen u optimalni trening set dodeljuje mu se vrednost 1, dok u suprotnom slučaju uzorak dobija vrednost 0. Na taj način ANN model je treniran na osnovu optimalnog subseta podataka, dok su preostali podaci podeljeni na validacioni i test set u odnosu 2:1. Kako se veličina trening seta u svakoj iteraciji menja navedeni odnos definisan je arbitrarno, kako bi se u test setu zadržao dovoljno veliki broj uzoraka. Pri proceni vrednosti boja korišćen je pristup jedne mreže (4-18-3), opisan u prethodnom poglavlju. Funkcije cilja određivane su za sve pojedince u svakoj iteraciji GA i služile su za procenu nivoa fitovanja cele populacije.

GA algoritam je implementiran u Matlab R2013a programskom okruženju uz pomoć kolega sa Univerziteta u Granadi. Iskorišćen je princip turnirske selekcije, koji pokazuje niz prednosti u odnosu na alternativne metode (Blickle & Thiele, 1996), kao i rekombinacija u dve tačke i operator uniformne mutacije. Za definisanje lokalnog pareto fronta za definisane funkcije cilja iskorišćena je Matlab funkcija gamultiobj, koja predstavlja varijaciju NSGA-II algoritma (Deb, 2001).

Nakon selekcije optimalnog trening seta, efikasnost pristupa procenjena je na način treniranja ANN modela korišćenjem datog seta. Ostali uzorci nasumično su deljeni su na validacioni i test set, pri čemu je broj uzoraka test seta predstavljao 10% broja uzoraka celog seta kao u poglavlju 5.5.4. Procedura treniranja i testiranja ponovljena je 100 puta, kao i u prethodnim slučajevima, pri čemu su i greške unutar test seta procenjivane na isti način (jednačine 5.4-5.18).

5.6.3. Skraćenje trajanja procedure snimanja uzoraka

U ovom segmentu došlo se na ideju da se za procenu vrednosti boja svih mernih geometrija, koriste fotografije snimljene samo u jednom uglu. S obzirom na adaptivnost korišćenog algoritma, pretpostavljeno je da će treniranje mreže biti uspešno izvršeno te da će sam algoritam biti u stanju da kompenzuje odstupanja u RGB vrednostima i dovoljno dobro simulira željenu vrednost. U konkretnom slučaju to bi smanjilo vreme snimanja 3 puta, dok bi u slučaju procene za n uglova isto vreme bilo smanjeno n puta.

Za karakterizaciju je primenjen pristup jedne mreže, gde su kao ulazi korišćene RGB vrednosti dobijene obradom slika snimljenih u jednom od uglova merenja, kao i vrednost ugla za koji se žele dobiti CIELAB koordinate (4 neurona u ulaznom sloju). Kao izlazi su korišćene CIELAB koordinate koje odgovaraju datom uzorku i definisanom uglu merenja. Jedna ista RGB vrednost dakle ponavljala se kao unos 3 puta, s tim da je dodatni unos (vrednost ugla) bio drugačiji (vrednosti su iznosile 15, 45 ili 75). Ispitane su mogućnosti da se kao ulazi koriste vrednosti slika snimljenih u mernom uglu od 15° asp, 45° asp i 75° asp, pri čemu je neuronska mreža trenirana na isti način kao što je opisano u poglavlju 5.6.1. Algoritam je ponavljan 100 puta, dok su greške procene vrednosti boja test seta određivane su u skladu sa jednačinama 5.4-5.18.

6. Rezultati istraživanja

6.1. Rezultati instrumentalne karakterizacije uzoraka

Karakterizacija štampanih uzoraka (polja test karte) gonio-spektrofotometrom podrazumevala je određivanje njihovih reflektansi za izabrane merne geometrije. Na osnovu reflektansi preračunate su i kolorimetrijske vrednosti od značaja za ovo istraživanje - CIELAB vrednosti uzimajući u obzir standardne iluminante D65 i A i standardnog posmatrača od 10° (Prilog 2, tabele P2.1 i P2.2).

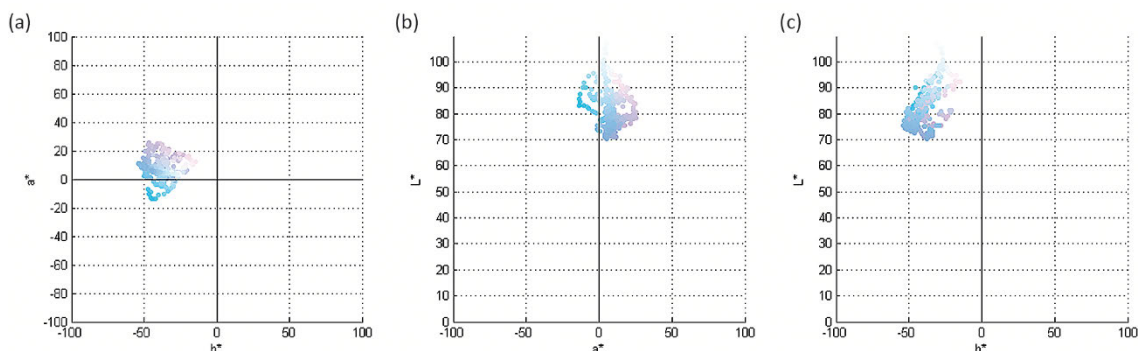
Reflektanse svih polja prikazane su u Prilogu 2 na slikama P2.1-P2.24. Za svako polje test karte na datim slikama predstavljene su odgovarajuće reflektanse u zavisnosti od ugla merenja (15° asp, 45° asp i 75° asp). Na taj način omogućena je procena uticaja oslojavanja perlascentnim pigmentima na izgled odštampanih boja.

Posmatrajući prikazane reflektanse može se zaključiti da se sa promenom ugla posmatranja opažaj boje svih uzoraka menja na isti način. U mernom uglu od 15° asp, svi uzorci pokazuju izuzetno visoku svetlinu i dominantan plavi ton (kriva svakog od polja test karte pokazuje veliki skok u rangu kraćih talasnih dužina, nisko zračenje u srednjim talasima i ponovni rast zračenja u dugim talasima). Ova promena najbolje se može uočiti na neutralnim poljima (slike P2.23 i P2.24). Reflektanse polja koje odgovaraju mernim uglovima od 45° asp i 75° asp prate isti trend, pri čemu je refleksija uzoraka nešto niža kada se mere u uglu od 75° asp u poređenju sa uglom od 45° asp. To zapravo znači da u navedena dva ugla ne dolazi do značajne promene tona opažene boje, ali se njena svetlina menja (uzorci se detektuju kao tamniji ukoliko se mere u uglu od 75° asp).

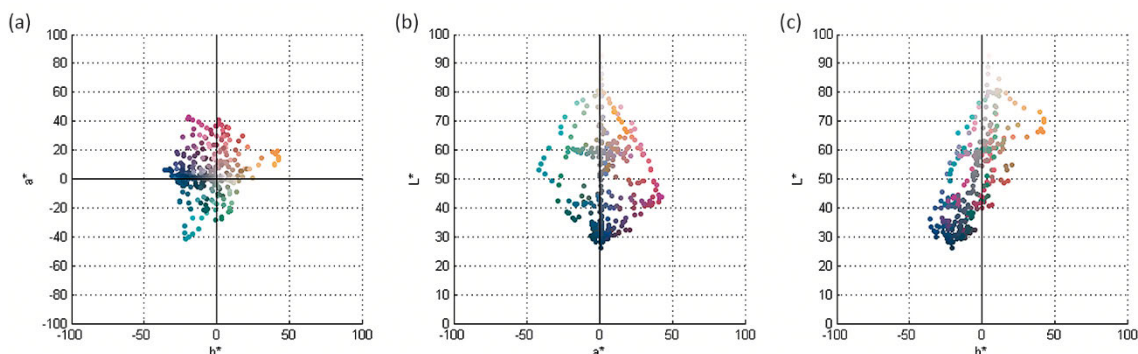
Navedeni zaključci mogu se potvrditi i posmatranjem raspodele CIELAB vrednosti polja test karte. Na slikama 6.1-6.3 prikazane su date vrednosti za standardno osvetljenje D65. Slika 6.1 predstavlja CIELAB koordinate polja test karte merene u uglu od 15° asp, dok slike 6.2 i 6.3 prikazuju raspodelu vrednosti dobijenih merenjem u uglu od 45° asp i 75° asp, respektivno.

Poređenjem slika 6.1-6.3 i inicijalnih vrednosti boja test karte prikazanih na slici 5.13 može se primetiti da oslojavanje uzoraka perlascentnim pigmentima najviše utiče na promenu tona pri proceni u mernom uglu od 15° asp. Uticaj osnovnog tona je u ovom slučaju veoma mali, pa se tako nakon oslojavanja boje uzoraka grupišu ka veoma svetlim, plavim tonovima. S druge strane, opsezi boja test karte nakon oslojavanja određeni za merne uglove od 45° asp i 75° asp su nešto manji od

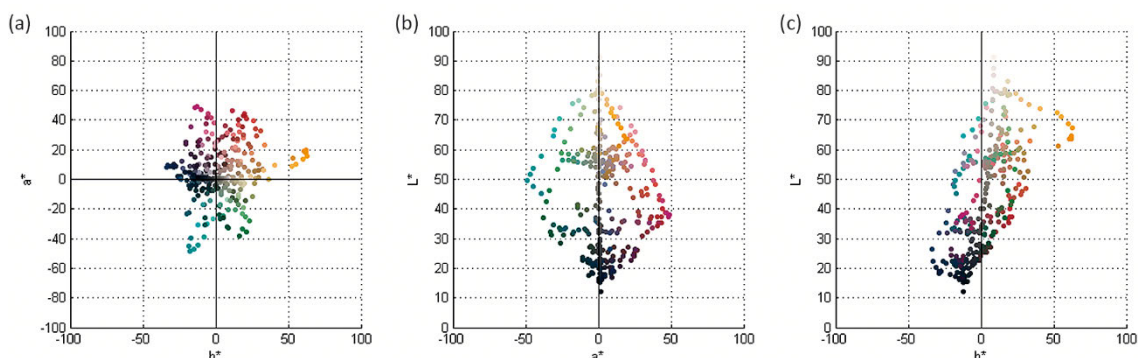
osnovnog (slika 5.13) pri čemu je prisutna tendencija pomeranja tonova ka centru dijagrama, odnosno smanjivanje njihovog zasićenja. Osnovni opseg boja najviše je zadržan u mernom uglu od 75° asp, gde je najveća promena primetna u smanjenju hromatičnosti osnovnih boja (slika 6.3a).



Slika 6.1. CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a^*-b^* ose, (b) L^*-a^* ose, (c) L^*-b^* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji $45^\circ/\text{asp}15^\circ$



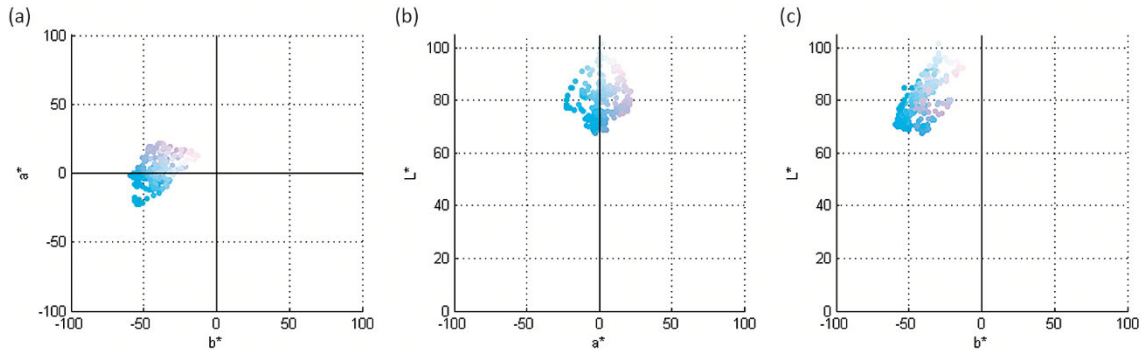
Slika 6.2. CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a^*-b^* ose, (b) L^*-a^* ose, (c) L^*-b^* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji $45^\circ/\text{asp}45^\circ$



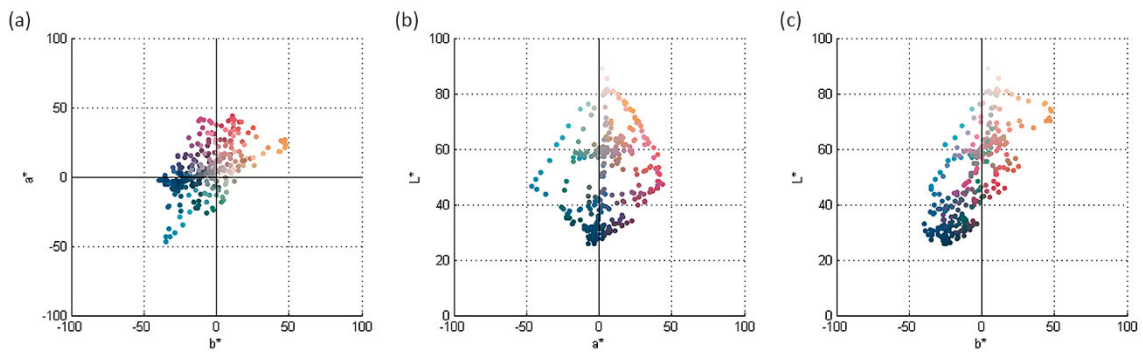
Slika 6.3. CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a^*-b^* ose, (b) L^*-a^* ose, (c) L^*-b^* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji $45^\circ/\text{asp}75^\circ$

CIELAB koordinate polja test karte za standardno osvetljenje A prikazane su na slikama 6.4-6.6. Slika 6.4 predstavlja CIELAB koordinate polja test karte merene u uglu od 15° asp, dok slike 6.5 i 6.6 prikazuju raspodelu vrednosti dobijenih merenjem u uglu od 45° asp i 75° asp, respektivno.

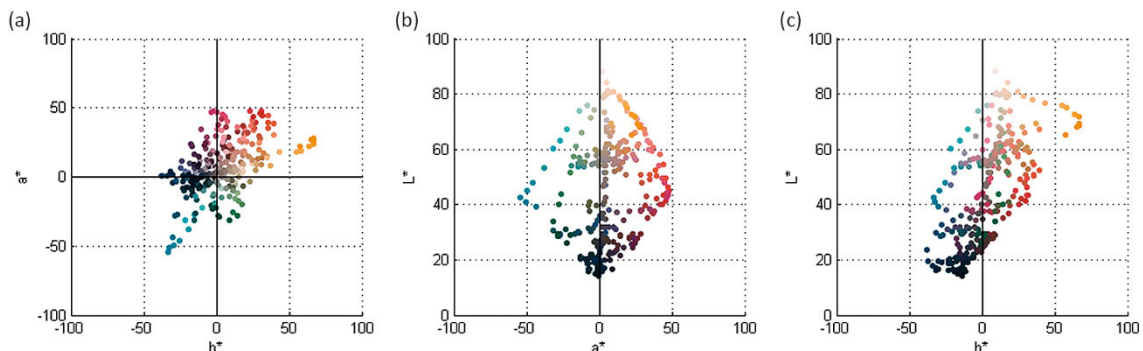
Na datim slikama može se primetiti isti trend kao u slučaju osvetljenja D65. Uzorci mereni u uglu od 15° asp i u ovom slučaju pokazuju dominantne plave tonove i visoku svetlinu, dok su za preostala dva ugla opsezi boja prilično slični. U mernom uglu od 75° asp, kao i u prethodnom slučaju, uzorci poseduju najveće zasićenje, kao i najveći opseg svetline.



Slika 6.4. CIELAB ($A/10^\circ$) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a^* - b^* ose, (b) L^* - a^* ose, (c) L^* - b^* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji $45^\circ/\text{asp}15^\circ$



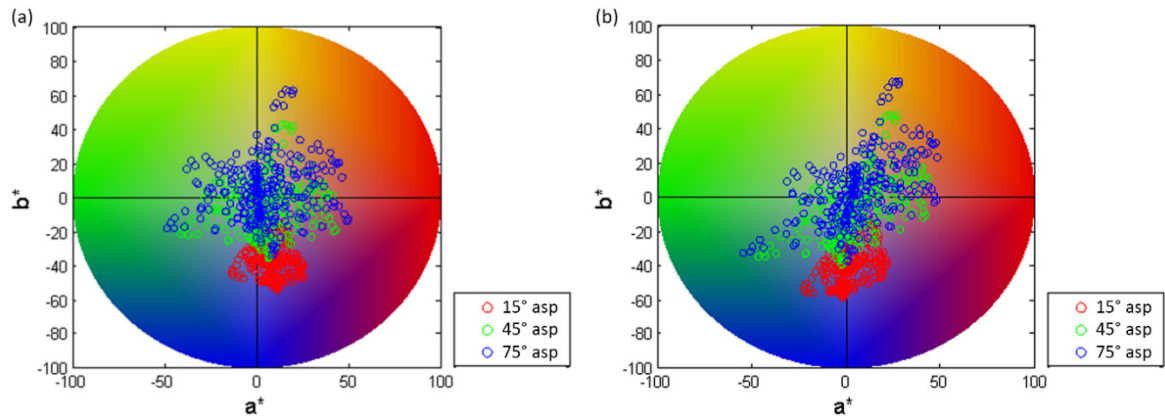
Slika 6.5. CIELAB ($A/10^\circ$) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a^* - b^* ose, (b) L^* - a^* ose, (c) L^* - b^* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji $45^\circ/\text{asp}45^\circ$



Slika 6.6. CIELAB ($A/10^\circ$) vrednosti polja test karte kao projekcija na (a) a^* - b^* ose, (b) L^* - a^* ose, (c) L^* - b^* ose CIELAB prostora boja. Vrednosti odgovaraju mernoj geometriji $45^\circ/\text{asp}75^\circ$

Za razliku od vrednosti određenih za standardno osvetljenje D65, CIELAB vrednosti za osvetljenje A pokazuju veće rasipanje na a^* osi, tačnije na pravcu cijan-crveno (slika 6.7). Boje test karte u

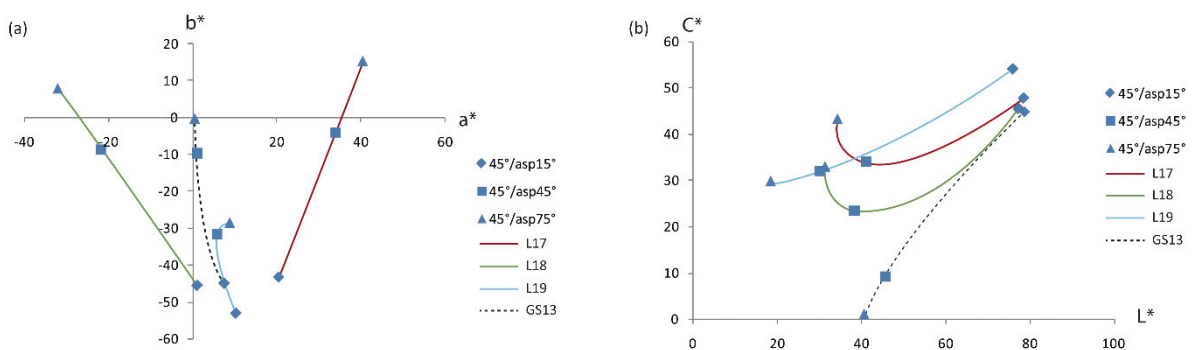
ovom slučaju pokazuju nešto veći pomeraj ka crveno narandžastim tonovima, naročito u uglu od 75° asp. Sa dijagrama na slici 6.7 može se uočiti i pravac promene tona boje sa uglom posmatranja.



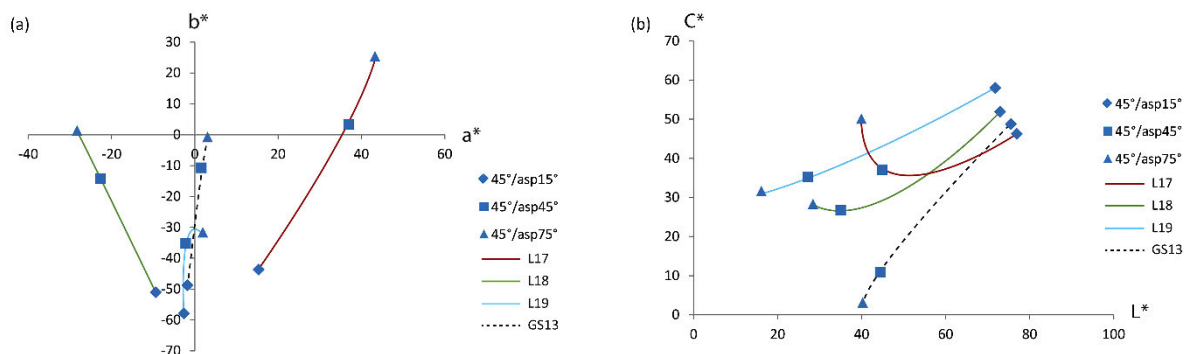
Slika 6.7. CIELAB a*-b* dijagram vrednosti boja polja test karte za (a) standardno osvetljenje D65, (b) standardno osvetljenje A. Merni ugao kodiran je bojom.

Na osnovu prikazanih grafika može se zaključiti da perlascentni pigmenti korišćeni u ovom istraživanju za oslojavanje štampanih otisaka menjaju sve komponente odštampanih boja – ton, zasićenje i svetlinu. Sa porastom aspekularnog ugla merenja ton se menja od plavog ka žutom (slika 6.7), a svetlina se smanjuje (slike 6.1-6.3 i 6.4-6.6). Zasićenje je najveće u uglu od 15° asp, smanjuje se u uglu od 45° asp, a zatim ponovo raste u uglu od 75° asp, pri čemu ova promena nije ista kod svih uzoraka.

Da bi se definisalo na koji način perlascentni pigmenti menjaju osnovne boje, posmatrane su promene boje sa uglom merenja za osnovne hromatske (RGB) i jednu od ahromatskih boja. Slika 6.8. prikazuje aspekularne pomeraje za potpuno zasićenu crvenu, zelenu i plavu boju (polja test karte L17, L18 i L19), kao i sivu boju srednje svetline (polje GS13). Merne geometrije označene su različitim simbolima, dok CIELAB vrednosti odgovaraju D65/10°. Aspekularni pomeraji spomenutih boja za vrednosti definisane za osvetljenje A prikazani su na slici 6.9.



Slika 6.8. Aspekularni pomeraji koji pokazuju efekat promene boje sa uglom posmatranja za potpuno zasićenu crvenu (polje L17 test karte), zelenu (L18), plavu (L19) i sivu boju srednje svetline (GS13) u (a) CIE a*-b* dijagramu, (b) CIE L*-C* dijagramu. Geometrije merenja označene su različitim simbolima, dok CIELAB vrednosti odgovaraju D65/10°.



Slika 6.9. Aspekularni pomeraji koji pokazuju efekat promene boje sa uglom posmatranja za potpuno zasićenu crvenu (polje L17 test karte), zelenu (L18), plavu (L19) i sivu boju srednje svetline (GS13) u (a) CIE a^* - b^* dijagramu, (b) CIE L^* - C^* dijagramu. Geometrije merenja označene su različitim simbolima, dok CIELAB vrednosti odgovaraju $A/10^\circ$.

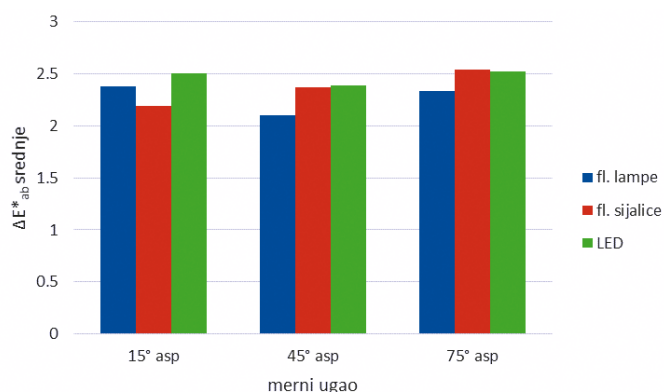
Iako promena u boji svakog uzorka prati prethodno opisan trend, može se primetiti da stepen te promene zavisi od osnovne boje. Naime, u slučaju neutralnih uzoraka promena u tonu na a^* skali je mnogo manja u poređenju sa hromatičnim uzorcima (posebno za crvenu i zelenu boju) (slika 6.8a). Tip korišćenog pigmenta utiče na to da i uzorci plavih boja pokazuju najmanju promenu u hromatičnosti (kako na a^* , tako i na b^* koordinati). Promena u zasićenju zavisi takođe od osnovne boje, pa će kod nezasićenih tonova i tonova plave boje sa porastom aspekularnog ugla zasićenje opadati. Veoma zasićene boje (sem plave) prate gorespomenuti trend - zasićenje je najveće u uglu najbližem spekularnom, sa porastom ugla opada, a zatim ponovo raste (slika 6.8b). S druge strane, evidentno je da osnovni ton ne utiče previše na promenu opažene svetline (slika 6.8b i 6.9a).

Ako se poredе koordinate boja za osvetljenje D65 i A (slike 6.8 i 6.9), može se primetiti da se u slučaju osvetljenja A tonovi svih boja pomeraju ka zelenim nijansama. Promena je najmanje uočljiva na crvenoj boji, koja i ima najmanji udeo zelene komponente. Promena u zasićenju s druge strane, najuočljivija je kod crvenih tonova koji istovremeno pokazuju i najmanju promenu u svetlini sa porastom ugla merenja.

6.2. Rezultati procene uticaja izvora svetla na tačnost estimacije boje

6.2.1. Rezultati za izvore svetla D65

Na slici 6.10 prikazani su rezultati srednjih vrednosti razlika boja između procenjenih i izmerenih CIELAB vrednosti, dok su maksimalne, minimalne, kao i vrednosti relevantnih percentila prikazane u tabeli 6.1. Pri određivanju navedenih vrednosti u obzir je uzeta srednja vrednost 5 ponavljanja algoritma za svaki uzorak, merni ugao i izvor svetla.



Slika 6.10. Srednja vrednost ΔE^*_{ab} razlika izmerenih i estimiranih vrednosti boja za izvore svetla simulatore D65 i definisane merne uglove

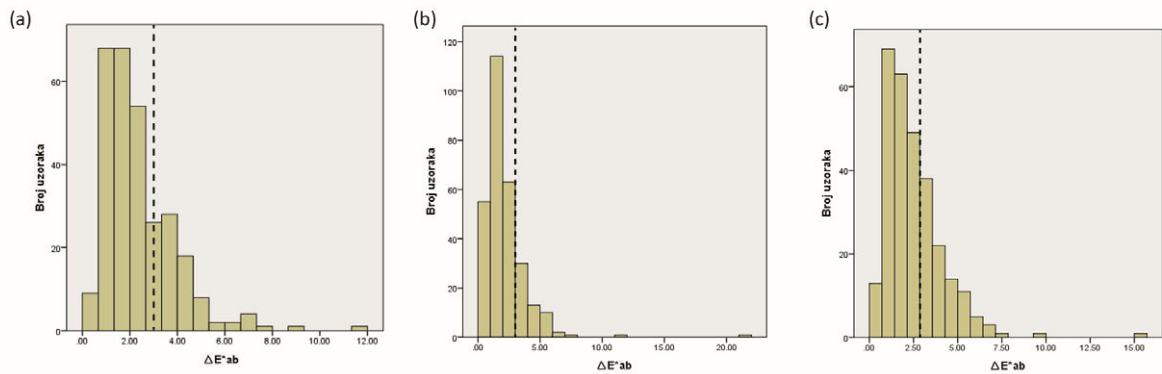
Tabela 6.1. Rezultati procene kolorimetrijskih vrednosti pri korišćenju izvora svetla simulatora standardnog osvetljenja D65 u zavisnosti od ugla merenja

| Izvor svetla | D65 fluorescentne lampe | | | D65 fluorescentne sijalice | | | D65 LED | | |
|----------------------------|-------------------------|---------|---------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp |
| Ugao merenja | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp |
| Min ΔE^*_{ab} | 0.45 | 0.3 | 0.43 | 0.33 | 0.25 | 0.39 | 0.39 | 0.25 | 0.41 |
| Max ΔE^*_{ab} | 11.9 | 17.68 | 25.75 | 21.15 | 55.56 | 62.16 | 15.28 | 96.92 | 49.16 |
| 75 perc. ΔE^*_{ab} | 3.12 | 2.49 | 2.7 | 2.74 | 2.61 | 2.83 | 3.26 | 2.51 | 2.83 |
| 95 perc. ΔE^*_{ab} | 4.98 | 4.49 | 4.99 | 5.22 | 4.99 | 5.61 | 5.48 | 4.58 | 5.66 |

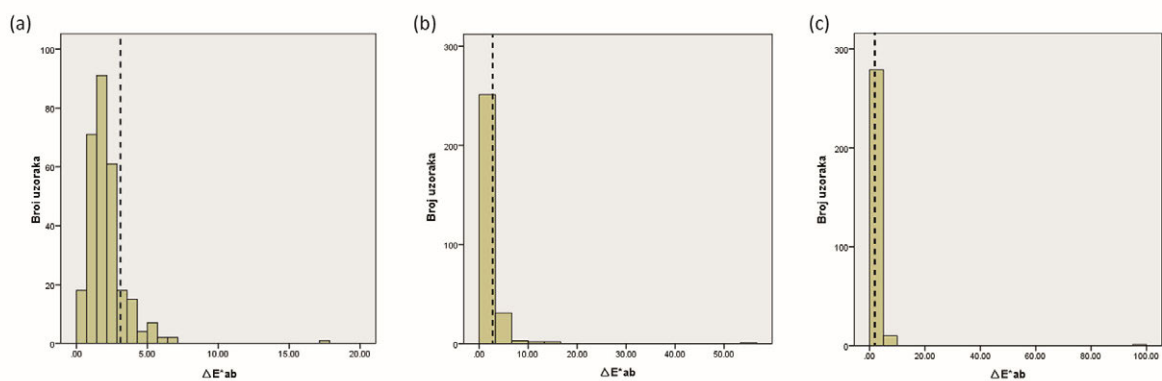
Na osnovu rezultata prikazanih na slici 6.10 može se primetiti da su za svaki od izvora svetla i sve uglove merenja srednje greške manje od definisane granice (ΔE^*_{ab} od 3). Takođe, primetno je da srednje ΔE^*_{ab} vrednosti variraju sa izvorima svetla i uglom merenja, pri čemu ne postoji univerzalan trend. Najmanja vrednost srednje ΔE^*_{ab} primetna je u slučaju uzoraka snimanih fluorescentnim lampama i to u uglu merenja od 45° asp (ΔE^*_{ab} od 2.10), dok je najveća srednja vrednost primetna u slučaju fluorescentnih sijalica u uglu od 75° asp (ΔE^*_{ab} od 2.53). Razlika između najveće i najmanje vrednosti iznosi svega 0.44 ΔE^*_{ab} , pa se može smatrati da odstupanja u srednjim vrednostima nisu značajne.

Najveća maksimalna vrednost za sve izvore svetla primećena je kod LED sijalica (ugao od 45° asp), dok je najmanja primetna za fluorescentne sijalice i LED (ugao od 45° asp).

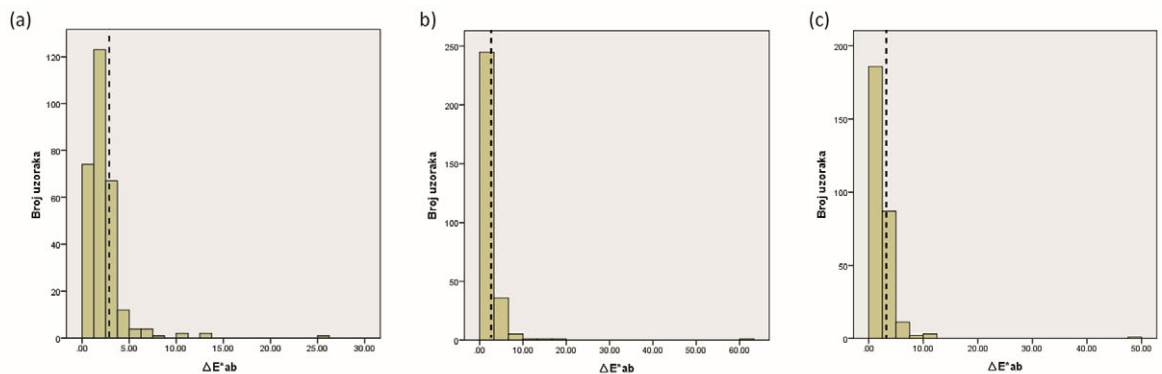
Navedene statističke vrednosti daju samo grubi uvid o uspešnosti estimiranih veličina, odnosno o razlikama sa promenom izvora svetla. U cilju preciznije procene raspodela ΔE^*_{ab} vrednosti (razlika između vrednosti boja estimiranih na osnovu odziva kamere i izmerenih mernim uređajem) prikazana je u formi histograma za svaki izvor svetla i svaki ugao merenja. Na slici 6.11 prikazani su rezultati za ugao merenja od 15° asp, dok slike 6.12 i 6.13 predstavljaju iste rezultate za uglove 45° asp i 75° asp, respektivno. Na datim graficima isprekidanom linijom označena je vrednost definisana kao granična za procenu tačnosti estimacije (ΔE^*_{ab} od 3).



Slika 6.11. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 15° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) fluorescentne lampe, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED



Slika 6.12. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 45° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) fluorescentne lampe, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED



Slika 6.13. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 75° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) fluorescentne lampe, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED

Sa histogramskog prikaza primetno je da za sva tri izvora svetla u svim uglovima merenja postoji jedan ekstrem. U pitanju je ΔE^*_{ab} vrednost polja GS1 odnosno polja čiste bele boje. Ovo polje svojom svetlinom prevazilazi sva ostala polja, pa se može zaključiti da za njegovu procenu nije postojala odgovarajuća referenca unutar trening seta. Takođe, tokom digitalizacije navedenog polja test karte primećen je problem pri fokusiranju kamere. Ovaj problem bio je posebno naglašen u mernom uglu od 15° asp, u kom svi uzorci pokazuju izuzetno visoku vrednost svetline (slika 6.1). Stoga se može

zaključiti da je greška estimacije polja GS1 u velikoj meri uslovljena i nemogućnošću kamere da adekvatno detektuje vrednost date boje.

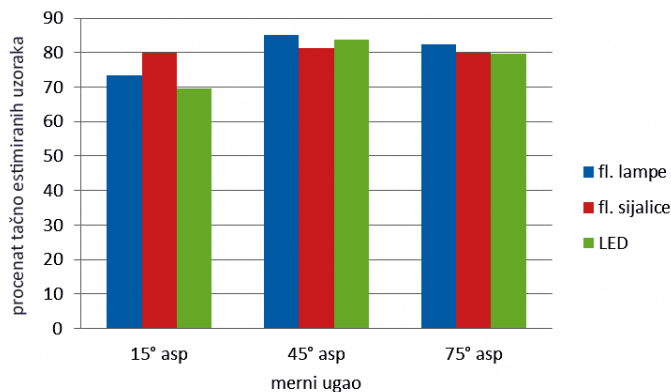
Visoke ΔE^*_{ab} vrednosti u uglu od 15° asp primećene su i kod uzoraka J21, K20, GS14 i F13 za snimke generisane pod svetlom fluorescentnih lampi, kod uzoraka F13, L17, K20 i B20 za fluorescentne sijalice i kod uzoraka sa oznakama D8 i D12, G22 i C17 u slučaju kada su korišćene LED sijalice. Svi navedeni uzorci u uglu od 15° asp zbog korišćenog pigmenta pokazuju dominantan plavi ton i visoku vrednost svetline.

U mernom uglu od 45° asp velika odstupanja u slučaju korišćenja fluorescentnih sijalica primetna su u slučaju uzoraka B14, G15, F13 i A13 (svetla magenta, žuta boja srednje svetline, cijan srednje svetline i najsvetlija cijan boja). Kod preostalih izvora svetla loše su estimirane svetla plava boja (B19), kao i svetli sivi tonovi (polja test karte GS2 i GS3). U slučaju fluorescentnih lampi odstupanja su primetna i kod boja oznaka F13 i GS5 (svetla siva boja i cijan srednje svetline), dok su pri korišćenju fluorescentnih sijalica i LED osvetljenja razlike primetne i na bojama oznaka GS4 i C15 (svetla siva i svetla žuta boja), respektivno.

Pri korišćenju fluorescentnih lampi u mernom uglu od 75° asp najlošije su procenjene svetle boje sive skale (GS2, GS3 i GS4), kao i svetla plava boja (B19). U slučaju fluorescentnih sijalica najveća odstupanja primećena su na bojama sive skale (GS2, GS4, GS6 i GS7), dok je u slučaju LED osvetljenja, pored boja B19, A13 i GS3 (svetla plava, svetla cijan, kao i svetla siva boja), loše estimirana i boja oznake B14 (veoma svetla magenta).

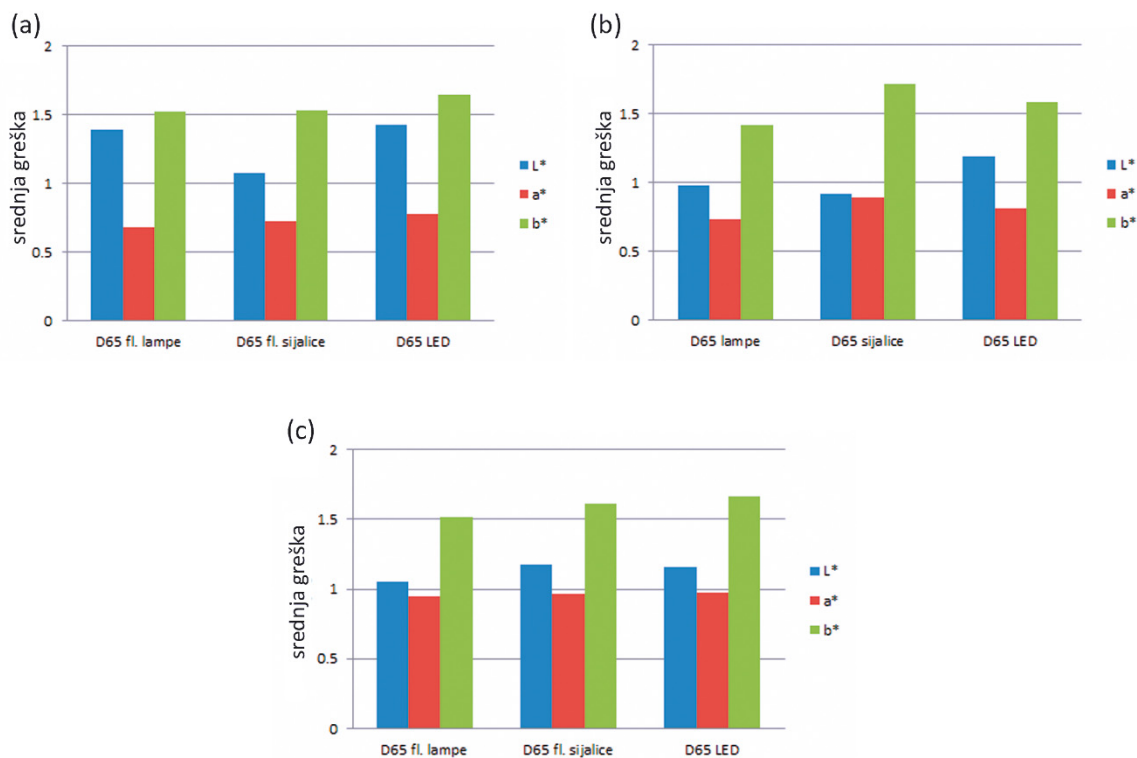
Može se zaključiti da su najveća odstupanja za sve izvore svetla primećena pri proceni svetlih plavih, kao i neutralnih svetlih tonova. Poslednje je naročito primetno u uglu od 75° asp, gde su najveće greške za sve izvore svetla pripadale poljima sive skale.

Procenat uzoraka estimiranih sa definisanim stepenom tačnosti prikazan je na slici 6.14. Može se primetiti da su najtačnije estimirani uzorci mereni u uglu od 45° asp, dok su u uglu od 15° asp primetne najveće varijacije sa korišćenim izvorom svetla. Pri korišćenju fluorescentnih sijalica u svim mernim uglovima dobijaju se gotovo identični rezultati procene.



Slika 6.14. Procenat uzoraka estimiranih sa zadovoljavajućim stepenom tačnosti za izvore svetla D65

Razlika boja kao metrika za određivanje razlika u izgledu dve boje uzima u obzir razlike na sve tri ose CIELAB prostora boja. Kao takva, ne daje informaciju o tome koliko su adekvatno procenjene pojedinačne karakteristike jedne boje. Kako bi se odredilo da li su ove greške identične za sve tri ose izdvojene su srednje vrednosti apsolutnih grešaka između estimiranih i izmerenih CIELAB vrednosti svih uzoraka. Ove greške prikazane su slici 6.15 za izvore svetla D65 i sve uglove merenja.



Slika 6.15. Srednje apsolutne vrednosti razlika CIELAB kanala za izvore svetla D65 i merne uglove od (a) 15° asp, (b) 45° asp i (c) 75° asp

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 6.15 može se zaključiti da je najmanja razlika u svim slučajevima primećena pri estimaciji vrednosti a* CIELAB prostora boja (crveno-zelena osa). Najlošije procenjene su vrednosti b* ose (prelaz od plave ka žutoj boji). Sa promenom tipa osvetljenja u uglu od 15° asp najveće promene primetne su u estimaciji L* ose, dok pri proceni vrednosti a* razlika gotovo da i nema. Slično je primećeno i u uglu od 45° asp, sa nešto izraženijim razlikama u proceni vrednosti a* i b* vrednosti. U uglu od 75° asp najniže greške u proceni svetline i tonova na skali plavo-žuto postižu se korišćenjem fluorescentnih lampi, dok su za preostala dva izvora svetla gotovo da nema razlika u procenjenim vrednostima CIELAB kanala.

Kako bi se procenilo da li su razlike u dobijenim vrednostima sa promenom izvora svetla značajne sprovedena je 3-faktorska ANOVA sa repetitivima, pri čemu su korišćene ΔE^*_{ab} vrednosti uzoraka za 5 ponavljanja algoritma. Zavisni faktor predstavljala je razlika boja uzoraka (ΔE^*_{ab} vrednost), dok su kao nezavisni faktori definisani svetlosni izvor (3 nivoa), ugao merenja (takođe 3 nivoa) i boja uzorka (289 nivoa). Sa histograma prikazanih na slikama 6.11-6.13 primećeno je da je uzorak oznake

GS1 predstavljao ekstrem u svim mernim uglovima i izvorima svetla, pa je isti izostavljen iz analize. Nivo značajnosti definisan je kao 0.05.

Raspodela ΔE^*_{ab} vrednosti je u većini grupa podataka bila normalna, dok varijansa u grupama nije bila identična (tabela 6.2). Iako u navedenom slučaju nije opravdano korišćenje parametrijskih testova za procenu statističke značajnosti, zbog nepostojanja neparametrijskog pandana analiza je ipak sprovedena. Rezultat analize prikazan je u tabeli 6.3.

Tabela P6.2. Rezultati Levene testa procene jednakosti varijanse unutar grupa - podela prema boji uzorka, izvoru svetla (simulatori st. osvetljenja D65) i uglu merenja

| F | df1 | df2 | Sig. |
|-------|------|-------|------|
| 5.905 | 2600 | 10404 | .000 |

Tabela 6.3. Rezultati statističke analize uticaja uzorka, izvora svetla (simulatora standardnog osvetljenja D65) i ugla merenja, kao i njihovih združenih uticaja na tačnost procene kolorimetrijskih vrednosti (3-faktorska ANOVA -procena efekta unutar subjekata)

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. | Partial Eta Squared |
|------------------------------|-------------------------|-------|-------------|-----------|------|---------------------|
| Corrected Model | 30489.870 ^a | 2600 | 11.727 | 10.765 | .000 | .729 |
| Intercept | 65611.102 | 1 | 65611.102 | 60231.233 | .000 | .853 |
| uzorak | 16170.181 | 288 | 56.146 | 51.543 | .000 | .588 |
| ugao | 133.221 | 2 | 66.611 | 61.149 | .000 | .012 |
| izvor_svetla | 19.934 | 2 | 9.967 | 9.150 | .000 | .002 |
| uzorak * ugao | 6790.108 | 576 | 11.788 | 10.822 | .000 | .375 |
| uzorak * izvor_svetla | 2580.023 | 576 | 4.479 | 4.112 | .000 | .185 |
| ugao * izvor_svetla | 91.103 | 4 | 22.776 | 20.908 | .000 | .008 |
| uzorak * ugao * izvor_svetla | 4705.300 | 1152 | 4.084 | 3.750 | .000 | .293 |
| Error | 11333.288 | 10404 | 1.089 | | | |
| Total | 107434.259 | 13005 | | | | |
| Corrected Total | 41823.158 | 13004 | | | | |

a. R Squared = .729 (Adjusted R Squared = .661)

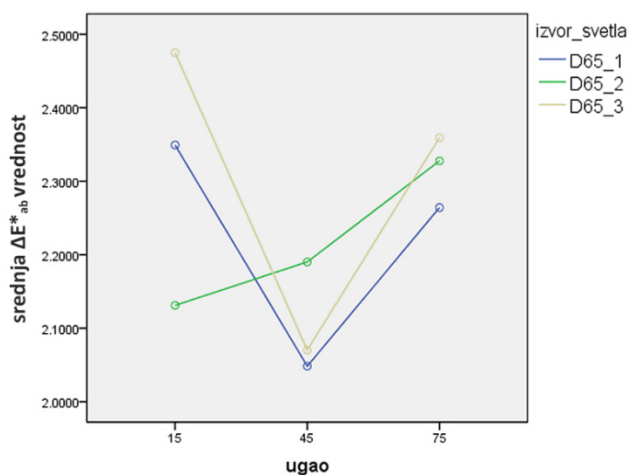
Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je združeni uticaj navedenih faktora na ΔE^*_{ab} vrednost, kao i njihov pojedinačan uticaj **statistički značajan** ($p < 0.05$). Ovaj uticaj može se kategorisati kao veoma veliki⁶ (*parcijalni eta kvadrat* = 0.293) (Cohen, 1988). Procena veličine uticaja dva od tri faktora, kao i pojedinačnih faktora pokazuje da je uticaj uzorka veoma bitan (kod procene uticaja uzorka *parcijalni eta kvadrat* = 0.588, dok su visoke vrednosti primetne i u proceni združenog uticaja uzorka i preostala dva faktora). Ovakav rezultat je i očekivan budući da svaki od uzoraka poseduje različitu boju. U interakciji sa izvorima svetla različitih spektralnih raspodela

⁶ Prema (Cohen, 1988) uticaj nezavisne promenljive na zavisnu se smatra malim ukoliko je vrednost eta kvadrata 0.01, srednjim ukoliko ova vrednost iznosi 0.06 i velikim za vrednost od 0.14.

dolazi do različite raspodele spektralne snage svetlosti reflektovane sa uzorka, odnosno zračenja koje stiže do senzora kamere. Ove razlike značajno utiču na tačnost detekcije boje i samim tim, uspešnost algoritma karakterizacije.

Uticao ugla snimanja, izvora svetla, kao i njihov združen uticaj može se smatrati veoma malim (*parcijalni eta kvadrati* iznose 0.012, 0.002 i 0.008, respektivno). Na slici 6.16. prikazana je promena srednjih ΔE^*_{ab} vrednosti u zavisnosti od izvora svetla i ugla snimanja. Može se primetiti da se za sve izvore svetla, sem fluorescentnih sijalica, najveće greške procene dobijaju u uglu od 15° asp. Takođe, u slučaju korišćenja fluorescentnih lampi i LED osvetljenja srednje ΔE^*_{ab} vrednosti prate isti trend, pri čemu se najmanje greške dobijaju u uglu od 45° asp. Dobijeni rezultat je očekivan, s obzirom da je u navedenom mernom uglu položaj kamere u odnosu na izvor svetla optimalan – kamera ne detektuje spekularnu refleksiju, niti je previše blizu izvoru svetla.

Odstupanje u očitom trendu prisutno je u slučaju korišćenja fluorescentnih sijalica u uglu od 15° asp. Ovo odstupanje može se pripisati činjenici da navedeni svetlosni izvor, u poređenju sa preostala dva, poseduje spektar sa izraženim skokovima u kratkim (od 420 nm), srednjim i delu dugih talasa (slika 5.21). Budući da u uglu od 15° asp reflektanse uzoraka pokazuju veliki skok u plavom delu spektra, interakcija sa svetlosnim izvorom koji poseduje dominantnu zelenu i crvenu komponentu može dovesti do toga da se dominantni plavi ton uzoraka do neke mere minimizira. Time se povećava opseg boja u navedenom mernom uglu, a samim tim i olakšava razlikovanje nijansi različitih boja što svakako utiče na povećanje tačnosti određivanja kolorimetrijskih vrednosti.



Slika 6.16. Srednja ΔE^*_{ab} vrednost u zavisnosti od izvora svetla (D65_1 označava fluorescentne lampe, D65_2 – fluorescentne sijalice, D65_3 - LED) i ugla snimanja

Sa slike 6.16. uočljivo je da vrednosti razlike boja za fluorescentne lampe i LED prate isti trend pa je pretpostavljeno da ne postoje značajne razlike u estimaciji vrednosti boja pri korišćenju navedenih svetlosnih izvora. Da bi se ova pretpostavka proverila sprovedeno je niz naknadnih testova, s ciljem određivanja značajnosti uticaja izvora svetla na estimaciju kolorimetrijskih vrednosti boja.

Kako je pokazano da je združeni uticaj svetlosnog izvora i ugla merenja na razliku boja statistički značajan (tabela 6.2), naknadni testovi vršeni su za svaki od mernih uglova pojedinačno. Uticaj uzorka, koji se takođe pokazao kao značajan, nije posebno razmatran jer je pretpostavljeno da će navedeni uticaj varirati u zavisnosti od definisanog seta boja. Kako se set korišćen u ovom

istraživanju može smatrati reprezentativnim, rezultati su u naknadnim testovima procenjavani za ceo set, pre nego za svaki uzorak pojedinačno. U ovom slučaju kao jedini varijabilni parametar definisani su svetlosni izvori pa su, s obzirom na nepostojanje normalnost raspodele unutar svih grupa, korišćene neparametrijske metode. Konkretno, za rezultate za svaki od mernih uglova sprovedeni su Fridmanovi testovi, pri čemu su uzorci definisani kao pojedinačni slučajevi testiranja, dok su izvori svetla posmatrani kao promenjeni uslovi. I u ovom slučaju iz analize je izostavljeno polje GS1, s obzirom da se pokazalo kao ekstrem u globalnom poretku, dok je nivo značajnosti definisan kao 0.05.

Rezultati Fridmanovog testa za ugao od 15° asp pokazali su da **postoji statistički značajna razlika** u estimaciji kolorimetrijskih vrednosti uzoraka sa promenom izvora svetla c^2 (2, N=289) =25.77, $p < 0,005$. Procenom srednjih vrednosti zaključeno je da se najbolji rezultati u datom mernom uglu postižu korišćenjem fluorescentnih sijalica (2.13), dok su rezultati za fluorescentne lampe (2.35) i LED (2.47) veoma slični.

Kako bi se procenilo da li razlika postoji između svake pojedinačne grupe (odnosno između svakog od izvora svetla) sproveden je niz naknadnih Vilkoksovih testova ranga. Budući da je svaka grupa rezultata poređena sa svakom (3 poređenja ukupno) izvršena je Bonferoni korekcija kako bi koeficijent značajnosti korespondirao broju poređenja. Revidirani alfa nivo za određivanje značajnosti u naknadnim testovima iznosio je stoga 0.017. Veličina uticaja nezavisne promenljive (u ovom slučaju izvora svetla) na zavisnu (ΔE^*_{ab} vrednost) r određena je deljenjem veličine z dobijene Vilkoksovim testovima kvadratnim korenom ukupnog broja uzoraka koji su testirani; za svaki test ukupan broj uzoraka iznosio je 578, te je stoga veličina z deljena brojem 24.04 (Pallant, 2007). Pri definisanju značaja razlika u obzir je uzet Koenov kriterijum gde se uticaj nezavisne promenljive definiše kao slab ako je $r=0.1$, srednji ako je $r=0.3$ i veliki ako je $r=0.5$ (Pallant, 2007).

Rezultati naknadnih poređenja za ugao od 15° asp (Tabela 6.3) pokazali su da **statistički značajna razlika postoji** između vrednosti za fluorescentne lampe i preostala dva izvora svetla (u oba slučaja $p < 0.005$). S obzirom na vrednost r ova razlika može se okarakterisati kao srednje značajna. Pri poređenju vrednosti za fluorescentne lampe i LED nije primećena statistički značajna razlika ($p > 0.05$).

Tabela 6.3. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja D65 (1 – fl. lampe, 2 – fl. sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 15° asp

| | D65_1 - D65_2 | D65_1 - D65_3 | D65_2- D65_3 |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Z | -3.631 ^b | -1.229 ^c | -5.380 ^c |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | .000 | .219 | .000 |
| r | .151 | .051 | .224 |

Rezultati Fridmanovog testa za ugao od 45° asp pokazali su da **ne postoji statistički značajna razlika** u greškama procene boja uzoraka sa promenom izvora svetla c^2 (2, N=289)=0.21, $p=0,99$. Srednja vrednost razlike boja najveća je u slučaju fluorescentnih sijalica (2.19), dok su vrednosti za fluorescentne lampe i LED veoma slične (2.05 i 2.07, respektivno) (slika 6.16). Naknadnim

Vilkoksovim testovima ranga potvrđeno je da statistički značajne razlike ne postoje ni pri poređenju rezultata za dva od tri svetlosna izvora (tabela 6.4).

Tabela 6.4. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja D65 (1 – fl. lampe, 2 – fl. sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 45° asp

| | D65_1 - D65_2 | D65_1 - D65_3 | D65_2- D65_3 |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Z | -.031 ^b | -.010 ^c | -.702 ^c |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | .975 | .992 | .483 |
| r | .001 | .000 | .029 |

Pri poređenju vrednosti za ugao od 75° asp pokazano je takođe da **ne postoji statistički značajna razlika** procene kolorimetrijskih vrednosti uzoraka sa promenom izvora svetla c^2 (2, N=289)=3.25, $p=0,197$. Srednje ΔE^*_{ab} vrednosti najniže su u slučaju korišćenja fluorescentnih lampi (2.26), dok su pri korišćenju fluorescentnih sijalica i LED ove vrednosti slične (2.33 i 2.36, respektivno). Naknadnim testovima pokazano je da ne postoji statistički značajna razlika ni pri poređenju pojedinačnih izvora svetla (tabela 6.5).

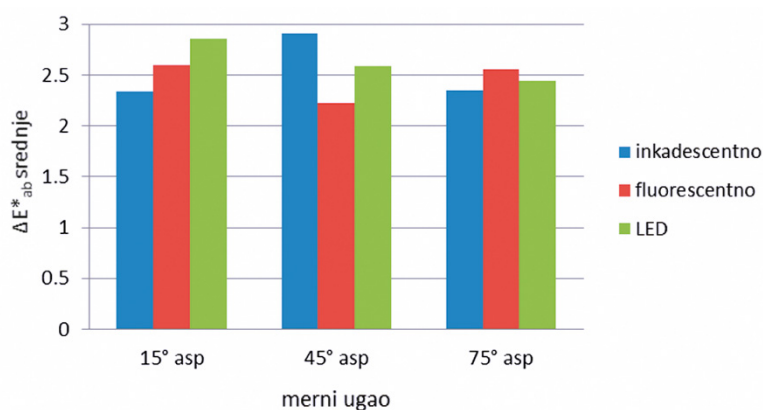
Tabela 6.5. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja D65 (1 – fl. lampe, 2 – fl. sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 75° asp

| | D65_1 - D65_2 | D65_1 - D65_3 | D65_2- D65_3 |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Z | -.100 ^b | -1.922 ^c | -1.593 ^c |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | .921 | .055 | .111 |
| r | .004 | .080 | .066 |

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je inicijalna pretpostavka da ne postoje značajne razlike sa promenom izvora svetla dokazana za slučaj fluorescentnih lampi i LED osvetljenja. Jedine statistički značajne razlike pri promeni izvora svetla primećene su u uglu od 15° asp i to pri poređenju rezultata za fluorescentne lampe i preostala dva izvora svetla.

6.2.2. Rezultati za izvore svetla A

Na slici 6.17 prikazani su rezultati srednjih vrednosti razlika boja između estimiranih i izmerenih CIELAB vrednosti pri korišćenju izvora svetla simulatora standardnog osvetljanja A, dok su maksimalne, minimalne, kao i vrednosti relevantnih percentila prikazane u tabeli 6.6. Pri definisanju navedenih veličina u obzir je uzimana srednja ΔE^*_{ab} vrednost 5 ponavljanja algoritma karakterizacije.



Slika 6.17. Srednja vrednost ΔE^*_{ab} razlika izmerenih i estimiranih vrednosti boja za izvore svetla A i definisane merne uglove

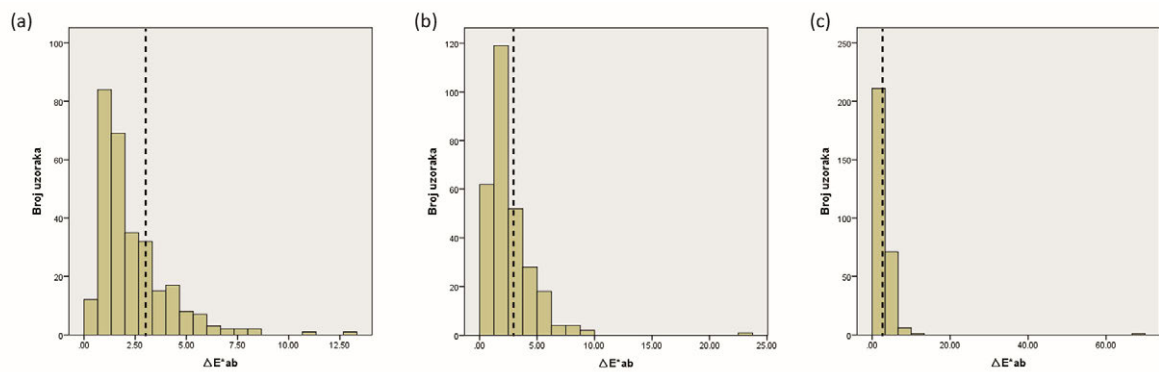
Tabela 6.6. Rezultati procene kolorimetrijskih vrednosti pri korišćenju izvora svetla simulatora st. osvetljenja A u zavisnosti od ugla merenja

| Izvor svetla | A inkadescetno | | | A fluorescentno | | | A LED | | |
|----------------------------|----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp |
| Ugao merenja | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp |
| Min ΔE^*_{ab} | 0.18 | 0.39 | 0.44 | 0.45 | 0.26 | 0.34 | 0.28 | 0.28 | 0.29 |
| Max ΔE^*_{ab} | 13.04 | 25.02 | 31.07 | 23.07 | 38.56 | 61.19 | 67.06 | 20.17 | 12.78 |
| 75 perc. ΔE^*_{ab} | 3.11 | 3.44 | 2.61 | 3.30 | 2.53 | 2.81 | 3.55 | 3.12 | 2.94 |
| 95 perc. ΔE^*_{ab} | 5.77 | 6.15 | 5.36 | 5.91 | 5.16 | 5.64 | 5.98 | 5.29 | 5.17 |

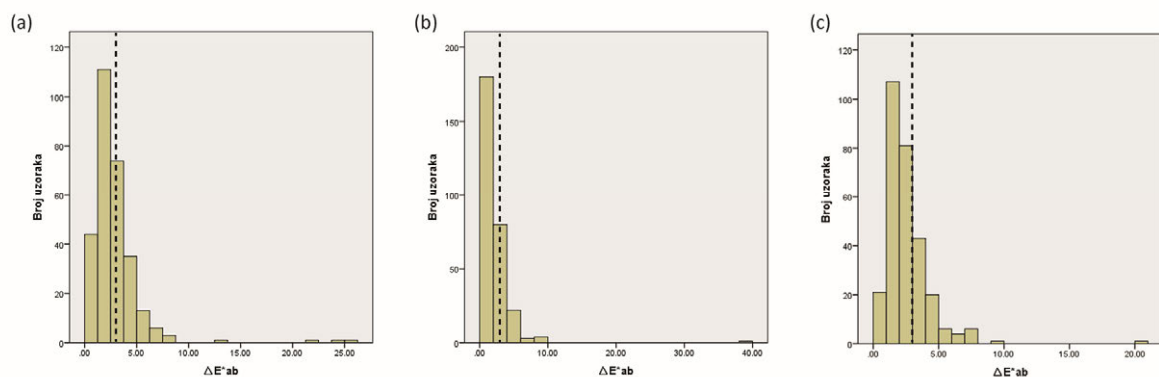
Srednje vrednosti su i u ovom slučaju niže od definisane tolerancije za sve izvore svetla i sve merne uglove. Za uglove merenja od 15° i 75° asp najmanja srednja razlika između izmerenih i estimiranih vrednosti postiže se u slučaju korišćenja inkadescetnog osvetljenja, dok je za ugao od 45° asp najmanja vrednost postignuta primenom fluorescentnog svetla.

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 6.6 primećeno je da postoje odstupanja u rezultatima sa promenom mernog ugla za sve izvore svetla. Ako se posmatraju rezultati za sva tri ugla merenja, najmanja odstupanja rezultata po uglovima i u ovom slučaju postižu se pri korišćenju fluorescentnih sijalica. Ovi izvori svetla omogućavaju i najmanju grešku merenja u mernom uglu od 45° asp, dok se za preostala dva merna ugla najmanja greška postiže korišćenjem inkadescetnih sijalica. Minimalna i maksimalna razlika boja između izmerenih i estimiranih vrednosti primetna je u slučaju LED osvetljenja i to u uglovima od 75° i 15° asp, respektivno.

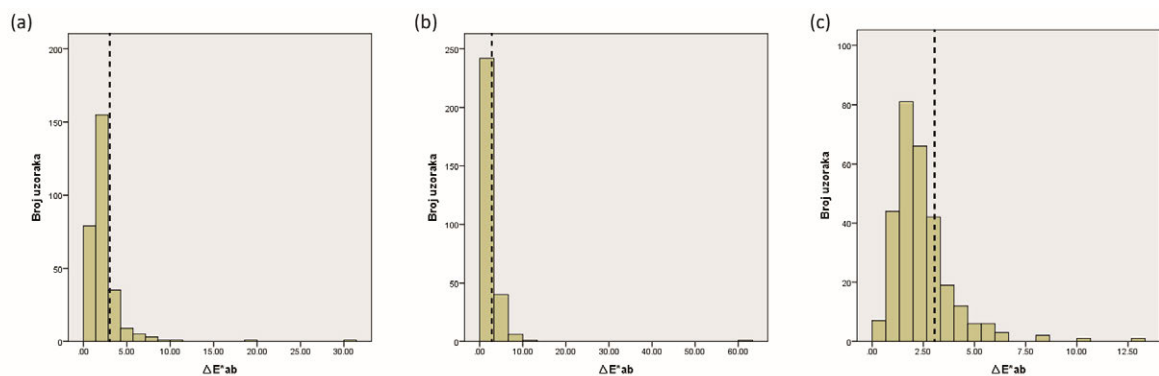
Na slikama 6.18-6.20 prikazani su histogrami raspodele ΔE^*_{ab} vrednosti za sve izvore svetla i uglove merenja. Slika 6.18 predstavlja rezultate za merni ugao od 15° asp, dok su u nastavku prikazane raspodele vrednosti za uglove od 45° asp (slika 6.19) i 75° asp (slika 6.20). Na datim graficima isprekidanom linijom označena je vrednost definisana kao granična za procenu tačnosti estimacije (ΔE^*_{ab} od 3).



Slika 6.18. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 15° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) inkadescentne sijalice, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED



Slika 6.19. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 45° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) inkadescentne sijalice, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED



Slika 6.20. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 75° asp ukoliko su kao izvor svetla korišćene (a) inkadescentne sijalice, (b) fluorescentne sijalice, (c) LED

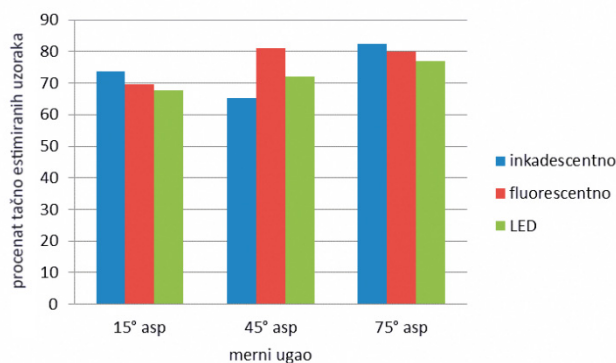
Na svim histogramima uočava se jedan ekstrem koji je, kao i pri korišćenju izvora svetla D65, razlika boja polja GS1. Pored navedenog polja, u uglu od 15° asp visoke vrednosti razlike boja primetne su i za uzorke E20, A13, J13 i E19 pri korišćenju inkadescentnih izvora svetla, dok su pri korišćenju fluorescentnih sijalica loše procenjene boje oznaka B14, A12, D13 i E20. U slučaju primene LED osvetljenja, pored uzorka E20, koji je pokazao velika odstupanja i u prethodnim slučajevima, primetne su i značajne greške pri estimaciji boje sa oznakama F15, D15 i G15. U datom uglu merenja svi navedeni uzorci pokazuju dominantan plavi ton.

Velike vrednosti razlike boja u uglu od 45° asp primetne su kod boja oznaka G22, H21, GS1, B19 (zasićena žuta, slabo zasićena svetla plava, najsvetlija bela i svetla plava boja) u slučaju korišćenja inkadescentnih sijalica, boja oznaka GS4, B19, B14 i C18 (svetla siva, svetla plava, svetla magenta i svetla zelena boja) pri korišćenju fluorescentnih sijalica i kod boja oznaka A6, A7, B14 i B18 (slabo zasićene crveno-magenta boje, svetla magenta i svetla zelena boja) za LED osvetljenja. Problem pri estimaciji vrednosti primetan je dakle kod žutih i plavih tonova za slučaj inkadescentnih sijalica, i kod većine magenta tonova u slučaju LED osvetljenja.

U mernom uglu od 75° asp pri korišćenju inkadescentnih sijalica loše su estimirane boje oznaka A13, B14 i GS5 (najsvetlija cijan, svetla magenta i svetla boja sive skale), dok su za uzorke koji su pri snimanju osvetljeni fluorescentnim sijalicama najlošije procenjene boje oznaka E14, B14, GS2 i B17 (svetle magenta nijanse, svetla siva i svetla crvena boja). Za LED osvetljenja velike razlike između izmerene i procenjene vrednosti boja primetne su i kod svetle magente, tamne slabo zasićene magenta-crvene i svetle magenta-crvene boje (boje oznaka B14, A7 i L12). U ovom slučaju za sve izvore svetla lošije su estimirani neutralni i crveni tonovi.

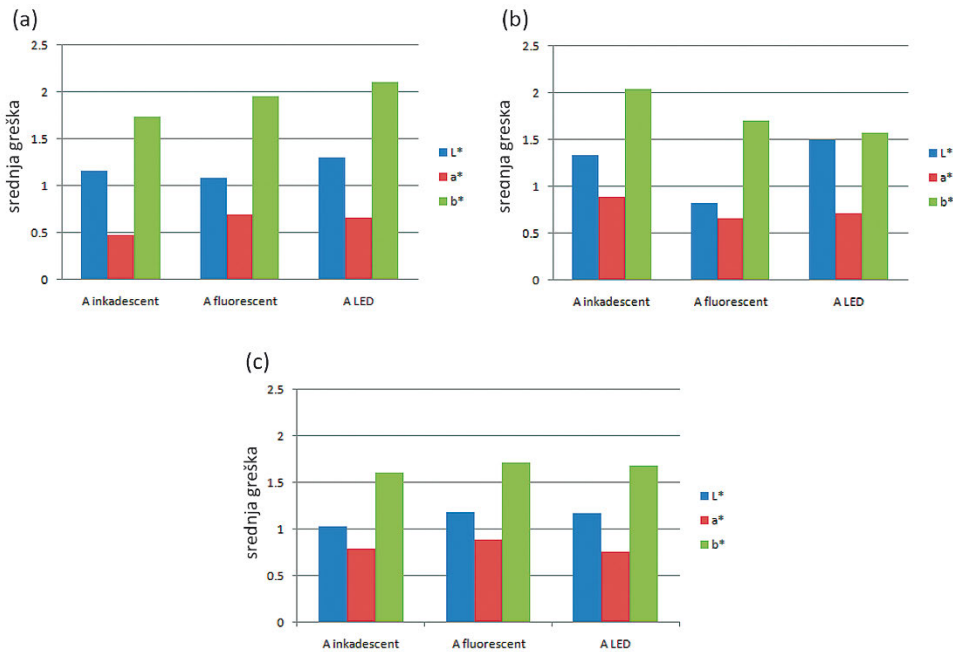
Iz navedenog se zaključuje da su pri korišćenju izvora svetla A najveće greške estimacije primećene u slučaju plavih tonova (za ugao od 15° asp), ali i svih tonova bliskih magenti i crvenoj boji (u ostalim uglovima merenja). Visoke vrednosti primećene su i za pojedine neutralne tonove.

Procenat uzoraka estimiranih sa zadovoljavajućim stepenom tačnosti prikazan je na slici 6.21. Sa slike se može primetiti da tačnost procene zavisi od ugla merenja, pri čemu su najbolji rezultati postignuti u uglu od 45° asp korišćenjem fluorescentnih sijalica. U navedenom uglu merenja primetna su ujedno i najveća odstupanja u rezultatima sa promenom izvora svetla.



Slika 6.21. Procenat uzoraka estimiranih sa zadovoljavajućim stepenom tačnosti za izvore svetla A

Na slici 6.22. prikazane su srednje apsolutne vrednosti razlika L^* , a^* i b^* između izmerenih vrednosti boja uzoraka i njihovih estimiranih vrednosti. I u ovom slučaju primećen je isti trend kao u slučaju osvetljenja D65 – najbolje su estimirane a^* vrednosti, dok je najlošija estimacija u svim slučajevima primetna kod vrednosti b^* . U uglu od 15° asp najniže vrednosti CIELAB kanala primetne su za vrednosti koje korespondiraju inkadescentnim sijalicama, dok su za LED osvetljenja vrednosti L^* i b^* najlošije procenjene. Sličan trend primetan je i u uglu od 75° asp, dok se u uglu od 45° asp korišćenjem inkadescentnih sijalica dobijaju najveća odstupanja. U ovom uglu svetlina, kao i vrednost a^* koordinate najbolje su određeni u slučaju korišćenja fluorescentnih sijalica.



Slika 6.22. Srednje apsolutne vrednosti razlika CIELAB kanala za izvore svetla A i merne uglove od (a) 15° asp, (b) 45° asp i (c) 75° asp

Kako bi se procenio statistički značaj uticaja izvora svetla na estimirane vrednosti boje sprovedena je trofaktorska ANOVA sa repeticijama, kao u slučaju osvetljenja D65. U ovoj analizi nisu posmatrane srednje, već pojedinačne vrednosti procenjene razlike boja dobijenih kroz 5 ponavljanja algoritma karakterizacije. Iz analize su izostavljene ΔE^*_{ab} vrednosti polja GS1, s obzirom na to da su predstavljale ekstreme u gotovo svim raspodelama prikazanim na slikama 6.18-6.20. Zavisni faktor predstavljala je razlika boja uzoraka, dok su kao nezavisni faktori definisani svetlosni izvor (3 nivoa), ugao merenja (takođe 3 nivoa) i boja uzorka (289 nivoa). Raspodela ΔE^*_{ab} vrednosti nije bila normalna u svim slučajevima, a varijansa unutar grupa takođe nije bila jednaka (tabela 6.7). S obzirom na broj pojedinačnih grupa koje su analizirane ($3 \times 3 \times 289 = 2601$) navedena odstupanja definisana su kao prihvatljiva pa je analiza svakako sprovedena. Definisani nivo značajnosti iznosio je 0.05, a rezultati navedene analize prikazani su u tabeli 6.8.

Na osnovu navedenih rezultata može se zaključiti da je združeni uticaj navedenih faktora, kao i njihov pojedinačan uticaj statistički značajan. Vrednost *parcijalnog eta kvadrata* (0.434) ukazuje na to da je ovaj uticaj značajan (Cohen, 1988). Uticaj uzorka, kao i združeni uticaj uzorka i preostala dva faktora takođe se može smatrati veoma značajnim (*parcijalni eta kvadrati* su, u svakom od tri slučaja, veći od 0.14).

Tabela 6.7. Rezultati Levene testa procene jednakosti varijanse unutar grupa - podela prema boji uzorka, izvoru svetla (simulatori st. osvetljenja A) i uglu merenja

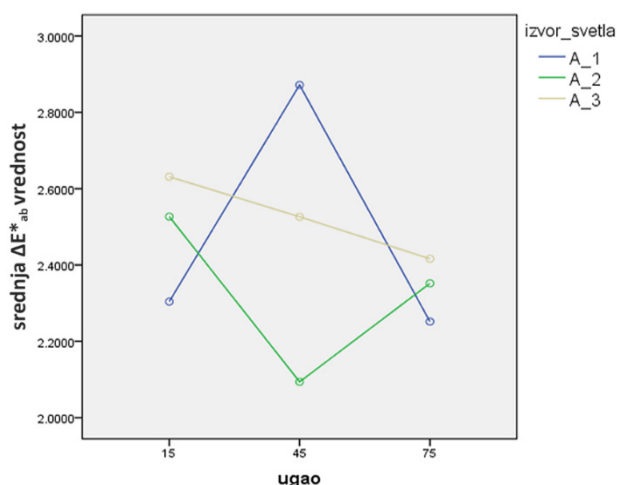
| F | df1 | df2 | Sig. |
|-------|------|-------|------|
| 6.104 | 2600 | 10404 | .000 |

Tabela 6.8. Rezultati statističke analize uticaja uzorka, izvora svetla (simulatora standardnog osvetljenja A) i ugla merenja, kao i njihovih združenih uticaja na tačnost procene kolorimetrijskih vrednosti (3-faktorska ANOVA -procena efekta unutar subjekata)

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. | Partial Eta Squared |
|------------------------------|-------------------------|-------|-------------|-----------|------|---------------------|
| Corrected Model | 38990.620 ^a | 2600 | 14.996 | 15.745 | .000 | .797 |
| Intercept | 77527.391 | 1 | 77527.391 | 81398.055 | .000 | .887 |
| uzorak | 17207.420 | 288 | 59.748 | 62.731 | .000 | .635 |
| ugao | 67.322 | 2 | 33.661 | 35.342 | .000 | .007 |
| izvor_svetla | 94.755 | 2 | 47.377 | 49.743 | .000 | .009 |
| uzorak * ugao | 9786.018 | 576 | 16.990 | 17.838 | .000 | .497 |
| uzorak * izvor_svetla | 3792.448 | 576 | 6.584 | 6.913 | .000 | .277 |
| ugao * izvor_svetla | 445.108 | 4 | 111.277 | 116.833 | .000 | .043 |
| uzorak * ugao * izvor_svetla | 7597.549 | 1152 | 6.595 | 6.924 | .000 | .434 |
| Error | 9909.266 | 10404 | .952 | | | |
| Total | 126427.276 | 13005 | | | | |
| Corrected Total | 48899.885 | 13004 | | | | |

a. R Squared = .797 (Adjusted R Squared = .747)

Uticaj izvora svetla i ugla merenja može se kategorisati kao veoma mali (*parcijalni eta kvadrat* je u oba slučaja manji od 0.01), pri čemu je i njihov združeni uticaj nizak (*parcijalni eta kvadrat*=0.043). Na slici 6.23. prikazana je promena srednjih ΔE^*_{ab} vrednosti u zavisnosti od izvora svetla i ugla snimanja. U ovom slučaju, za razliku od rezultata za izvore svetla D65, ne postoji jasno uočljiv trend, već za svaki izvor svetla srednje ΔE^*_{ab} vrednosti u velikoj meri zavise od ugla merenja.



Slika 6.23. Srednja ΔE^*_{ab} vrednost u zavisnosti od izvora svetla (A_1 označava inkadescentne sijalice, A_2 – fluorescentne sijalice, A_3 - LED) i ugla snimanja

S obzirom na uticaj ugla, u naknadnim testovima sprovedenim u cilju određivanja razlika pri korišćenju testiranih izvora svetla, analize su sprovedene odvojeno za uglove merenja. Pri tom je posmatran samo uticaj svetlosnog izvora, te su za rezultate za svaki od uglova sprovedeni

Fridmanovi testovi. Uzorci su definisani kao pojedinačni slučajevi testiranja, dok su izvori svetla definisani kao promenjeni uslovi testiranja. Iz analize je, kao i u prethodnim slučajevima, izostavljeno polje GS1, dok je nivo značajnosti definisan kao 0.05.

Rezultati Fridmanovog testa za ugao od 15° asp pokazali su da **postoji statistički značajna razlika** u estimaciji kolorimetrijskih vrednosti uzoraka sa promenom izvora svetla c_2 (2, N=289) =15.83, $p < 0,005$. Procenom srednjih vrednosti zaključeno je da se najbolji rezultati u datom mernom uglu postižu korišćenjem inkadescentnih sijalica (srednja vrednost iznosi 2.3), zatim fluorescentnih sijalica (2.53) i LED (2.63).

Naknadni Vilkoksovi testovi ranga pokazali su da statističke razlike srednje značajnosti postoje između inkadescentnih sijalica i preostala dva izvora svetla ($p < 0.005$ u oba slučaja), dok pri korišćenju fluorescentnih sijalica i LED ne postoje značajne razlike (tabela 6.9).

Tabela 6.9. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja A (1 – inkadescentne sijalice, 2 – florescentne sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 15° asp

| | A_1 - A_2 | A_1 - A_3 | A_2 - A_3 |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Z | -3.741 ^b | -3.239 ^b | -.478 ^b |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | .000 | .001 | .633 |
| r | .155 | .135 | .020 |

Pri poređenju vrednosti za ugao od 45° asp rezultati Fridmanovog testa pokazali su da **postoji statistički značajna razlika** estimacije kolorimetrijskih vrednosti sa promenom izvora svetla svetla c_2 (2, N=289) =53.08, $p < 0,005$. Srednje vrednosti greške estimacije najniže su u slučaju korišćenja fluorescentnih sijalica (srednja ΔE^*_{ab} vrednost iznosi 2.09), dok su za LED i inkadescentne sijalice ove vrednosti nešto više (2.53 i 2.87, respektivno).

Na osnovu rezultata naknadnih testova prikazanih u tabeli 6.10 može se zaključiti da nema statistički značajnih razlika u estimaciji vrednosti boja pri korišćenju inkadescentnih i LED sijalica ($p=0.130$). Pri poređenju ostalih kombinacija svetlosnih izvora razlike u estimaciji mogu se okarakterisati kao srednje značajne (razlike u korišćenju inkadescentnih i fluorescentnih sijalica $p < 0.005$, $r=0.321$, dok su razlike u korišćenju fluorescentnih i LED sijalica $p < 0.005$, $r=0.262$).

Tabela 6.10. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja A (1 – inkadescentne sijalice, 2 – florescentne sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 45° asp

| | A_1 - A_2 | A_1 - A_3 | A_2 - A_3 |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Z | -7.734 ^b | -1.514 ^b | -6.307 ^c |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | .000 | .130 | .000 |
| r | .321 | .063 | .262 |

Rezultati Fridmanovog testa za ugao od 75° asp pokazali su da i u ovom slučaju **postoji statistički značajna razlika** u estimaciji kolorimetrijskih vrednosti uzoraka sa promenom izvora svetla c_2 (2, N=289) =18.02, $p < 0,005$. Procenom srednjih vrednosti zaključeno je da se najbolji rezultati u datom

mernom uglu postižu korišćenjem inkadescenčnih sijalica (srednja vrednost iznosi 2.25), zatim fluorescentnih sijalica (2.35) i LED (2.42).

Naknadnim Vilkoksovim testovima ranga pokazano je da značajne razlike postoje samo između inkadescenčnog i LED osvetljenja ($p < 0.005$) (tabela 6.11). Razlike između fluorescentnih sijalica i preostala dva izvora svetla mogu se karakterisati kao slabo značajne ($r < 0.1$), dok je razlika u vrednostima dobijenim za inkadescenčne i LED sijalice srednjeg značaja ($r = 0.172$).

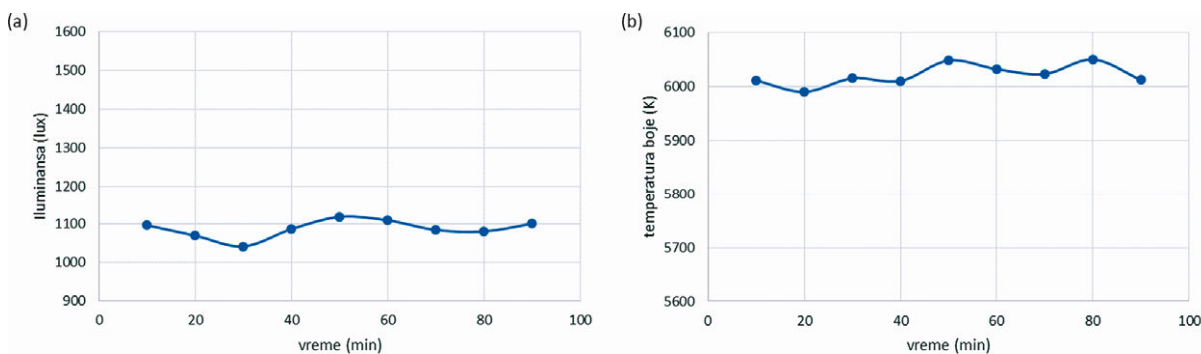
Tabela 6.11. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za simulatore standardnog osvetljenja A (1 – inkadescenčne sijalice, 2 – fluorescentne sijalice, 3 – LED) i merni ugao od 75° asp

| | A_1 - A_2 | A_1 - A_3 | A_2 - A_3 |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Z | -2.138 ^b | -4.135 ^b | -2.346 ^b |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | .032 | .000 | .019 |
| r | .089 | .172 | .097 |

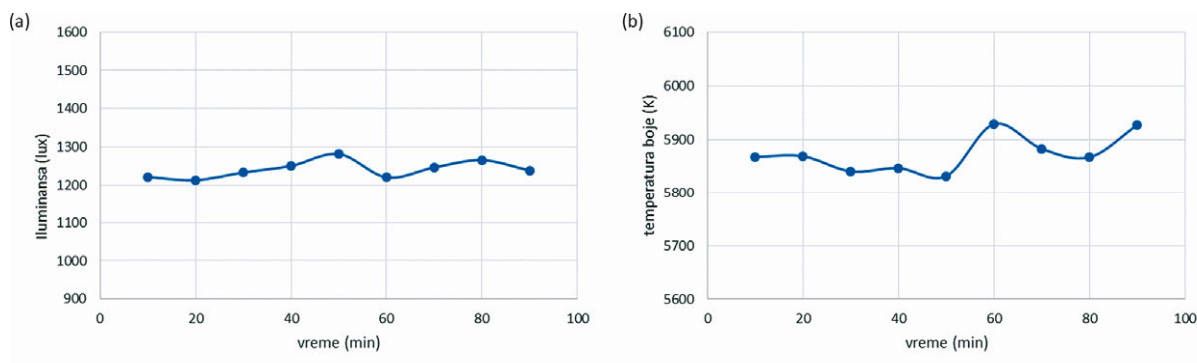
Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je uticaj izvora svetla na estimirane vrednosti boja pri korišćenju simulatora standardnog osvetljenja A znatno veći nego pri korišćenju osvetljenja kojima se simulira standardno osvetljenje D65. Razlike u ΔE^*_{ab} vrednostima sa promenom izvora svetla su u većini slučajeva statistički značajne, te da se algoritam karakterizacije u ovom slučaju nije pokazao efikasnim u zanemarivanju izvora svetla.

6.3. Rezultati procene uticaja ambijentalnog osvetljenja na tačnost estimacije boje

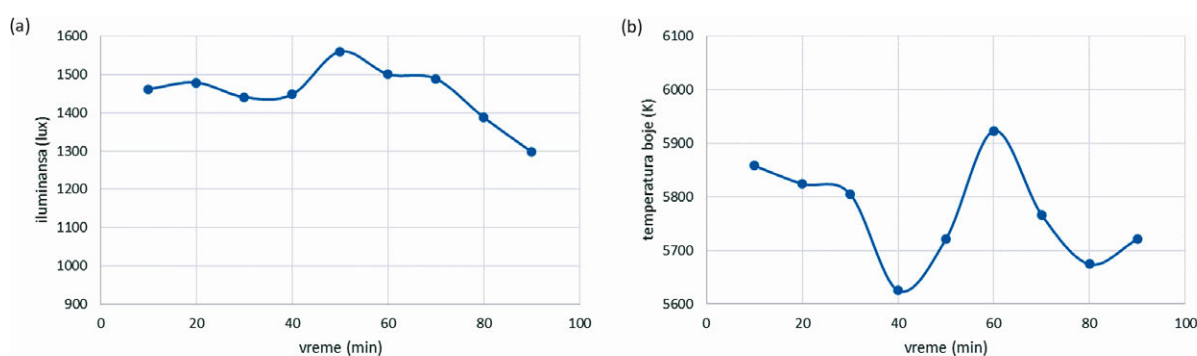
Rezultati karakterizacije ambijentalnog osvetljenja u tri definisana uslova prikazani su na slikama 6.24-6.26. Slika 6.24 prikazuje vrednosti dobijene u slučaju kada su prilikom snimanja u mračnoj komori korišćene samo fluorescentne lampe. Zbog jednostavnosti označavanja u daljem tekstu fluks lampi biće definisan kao *ambijentalno svetlo 1*. Na slici 6.25 prikazani su rezultati za *ambijentalno svetlo 2* – situaciju kada su prilikom snimanja u zatamnjenoj prostoriji pored fluorescentnih korišćene i dodatne lampe, dok su rezultati za fluks zračenja na dnevnom svetlu prikazani na slici 6.26 (*ambijentalno svetlo 3*).



Slika 6.24. Prikaz (a) iluminanse, (b) temperature boje osvetljenja u funkciji vremena u slučaju ambijentalnog svetla 1



Slika 6.25. Prikaz (a) iluminanse, (b) temperature boje osvetljenja u funkciji vremena u slučaju ambijentalnog svetla 2



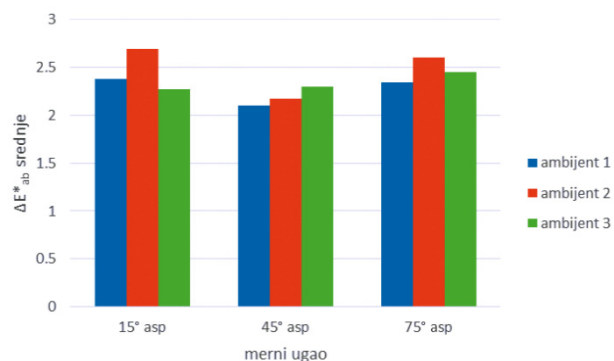
Slika 6.26. Prikaz (a) iluminanse, (b) temperature boje osvetljenja u funkciji vremena u slučaju ambijentalnog svetla 3

Najmanje odstupanje u merenim veličinama primećeno je za ambijentalno svetlo 1, a najveće za ambijentalno svetlo 3, što je, obzirom na kontrolisanost uslova i očekivano. U slučaju ambijentalnog svetla 1 razlika između maksimalne i minimalne iluminanse merene u datom periodu vremena iznosi svega 77 lux, dok je razlika u temperaturi boje 60 K. Ovo ukazuje da postoje izvesne varijacije tokom rada lampi, te da se na njih mora računati prilikom rada.

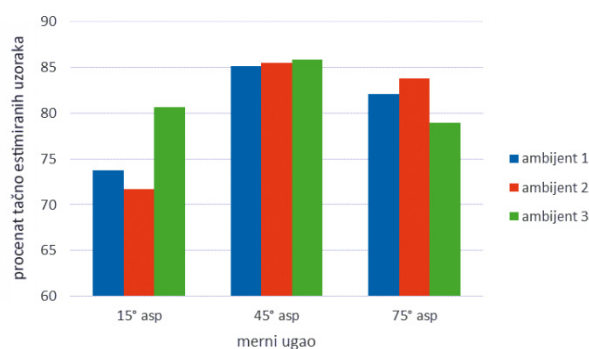
U slučaju ambijentalnog svetla 2 varijacije u iluminansi su veoma slične prethodnom slučaju pri čemu maksimalno odstupanje iznosi 68 lux. Temperatura boje menja se nešto drastičnije, pa su tako приметni određeni skokovi u poslednjim fazama merenja (razlika između maksimalne i minimalne vrednosti iznosi 97 K). Najveće varijacije приметne su u poslednjem slučaju (slika 6.26) gde su odstupanja u luminansi i do 262 lux, dok temperatura boje varira i do 298 K (sa приметnim naglim promenama tokom vremena) (slika 6.26b).

Iluminansa zračenja najmanja je u prvom slučaju (slika 6.24a), sa dodavanjem dodatnih izvora svetla raste (slika 6.25a) i konačno dostiže maksimalne vrednosti pri merenju na dnevnom svetlu (6.26a). Temperatura boje, s druge strane, pokazuje obrnutu tendenciju što je i očekivano.

Srednje vrednosti grešaka estimacije (ΔE^*_{ab} vrednosti) za navedene uslove snimanja prikazane su na slici 6.27, za sve uglove merenja. Na slici 6.28 prikazan je procenat uzoraka estimiranih sa zadovoljavajućim stepenom tačnosti. Ostale vrednosti od značaja date su u tabeli 6.12.



Slika 6.27. Srednja vrednost ΔE^*_{ab} razlika izmerenih i estimiranih vrednosti boja za testirana ambijentalna svetla



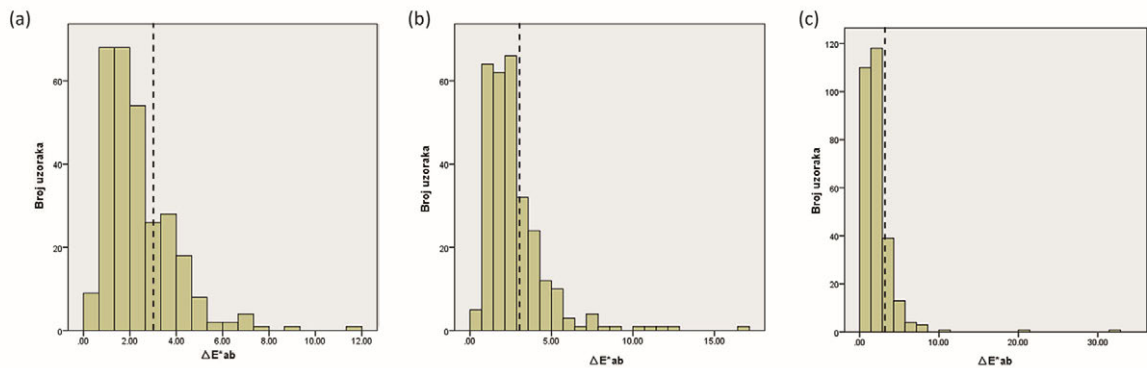
Slika 6.28. Procenat uzoraka estimiranih sa definisanim stepenom tačnosti za testirana ambijentalna svetla

Tabela 6.12. Rezultati greške procene kolorimetrijskih vrednosti pri snimanju u različitim ambijentalnim uslovima i mernim uglovima

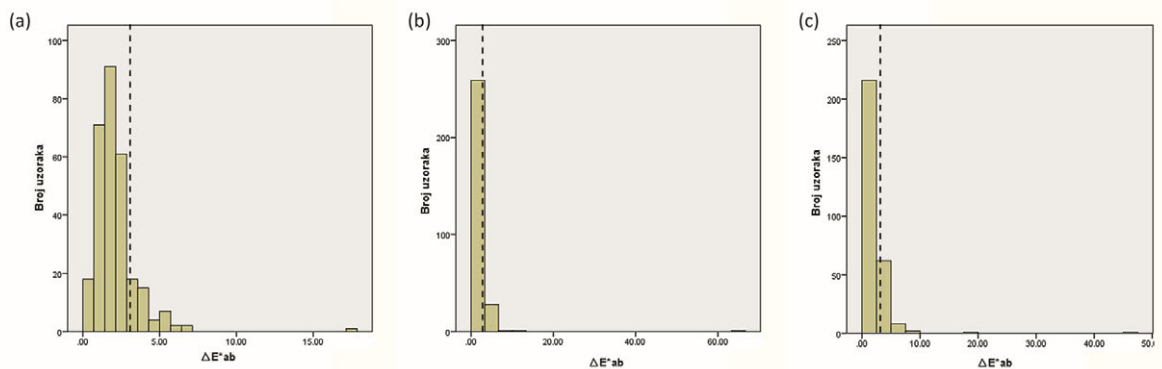
| | Ambijentalno svetlo 1 | | | Ambijentalno svetlo 2 | | | Ambijentalno svetlo 3 | | |
|----------------------------|-----------------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|
| | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp | 15 °asp | 45 °asp | 75 °asp |
| Min ΔE^*_{ab} | 0.45 | 0.30 | 0.43 | 0.46 | 0.29 | 0.39 | 0.39 | 0.31 | 0.39 |
| Max ΔE^*_{ab} | 11.90 | 17.68 | 25.76 | 16.54 | 63.52 | 74.65 | 31.62 | 46.61 | 29.28 |
| 75 perc. ΔE^*_{ab} | 3.11 | 2.48 | 2.70 | 3.23 | 2.50 | 2.69 | 2.67 | 2.52 | 2.82 |
| 95 perc. ΔE^*_{ab} | 4.98 | 4.48 | 4.99 | 5.86 | 4.09 | 4.98 | 4.80 | 4.82 | 5.45 |

Na osnovu procene srednjih vrednosti može se zaključiti da su najbolji rezultati postignuti sa ambijentalnim svetlom 1 – u ovim uslovima snimanja postignuta je najmanja srednja greška estimacije u uglovima od 45° asp i 75° asp, dok je u uglu od 15° asp postignuta gotovo identična vrednost minimalnoj grešci za dati ugao merenja (razlika u odnosu na minimalnu grešku za dati merni ugao, primetnu u slučaju korišćenja ambijentalnog svetla 3, iznosi svega 0.11 ΔE^*_{ab}). Maksimalne vrednosti takođe su najmanje za navedene uslove snimanja (tabela 6.12), dok procenat uzoraka estimiranih sa definisanim stepenom tačnosti ne pokazuje jasno definisan trend. U uglu od 15° asp najviše tačno estimiranih uzoraka primetno je pri snimanju na dnevnom svetlu, u uglu od 45° asp gotovo da nema razlike u vrednostima sa promenom ambijentalnog svetla, dok je u uglu od 75° asp najviše uzoraka tačno estimirano na osnovu vrednosti slika snimljenih u uslovima 2.

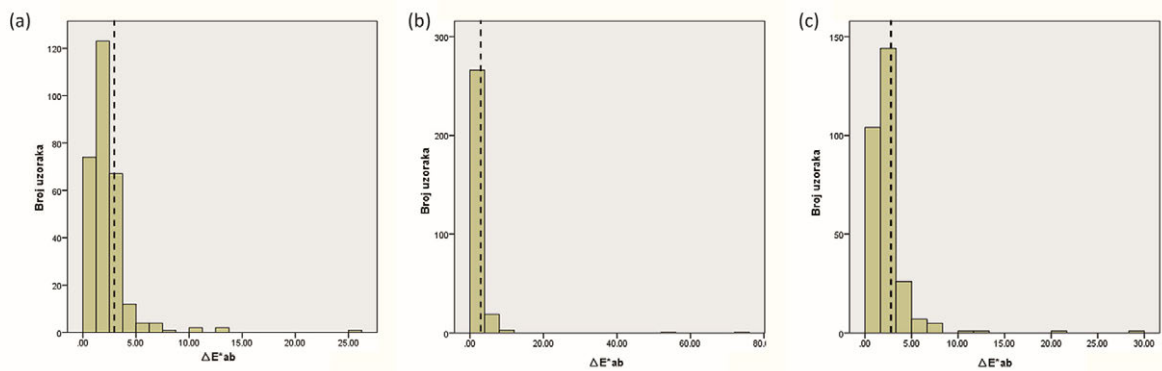
Sve posmatrane veličine (sem maksimalne vrednosti) u uglu od 45° pokazuju vrlo male varijacije sa promenom ambijentalnog osvetljenja. Maksimalne vrednosti su u svim slučajevima najniže u uglu od 15° asp. Histogramski prikazi vrednosti grešaka estimacije, prikazani na slikama 6.29-6.31 pokazuju da je i u ovom slučaju većina uzoraka estimirana sa zadovoljavajućim stepenom tačnosti (isprekidana linija na svakom od histograma predstavlja prihvatljivu granicu tačnosti). Takođe, na svim histogramima primetni su ekstremi koji predstavljaju ΔE^*_{ab} vrednost za najsvetliju belu boju (polje GS1).



Slika 6.29. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 15° asp za slučaj (a) ambijentalnog svetla 1, (b) ambijentalnog svetla 2, (c) ambijentalnog svetla 3

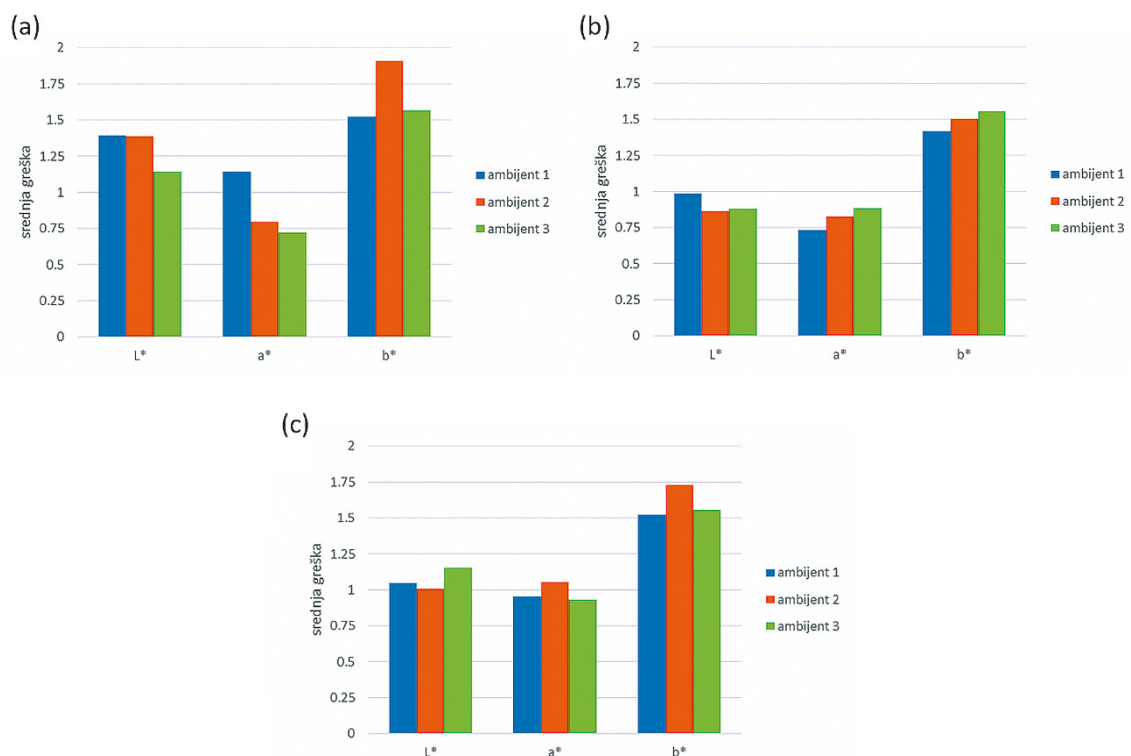


Slika 6.30. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 45° asp za slučaj (a) ambijentalnog svetla 1, (b) ambijentalnog svetla 2, (c) ambijentalnog svetla 3



Slika 6.31. Raspodela ΔE^*_{ab} za ugao merenja od 75° asp za slučaj (a) ambijentalnog svetla 1, (b) ambijentalnog svetla 2, (c) ambijentalnog svetla 3

Na slici 6.32 prikazane su srednje greške procene vrednosti CIELAB kanala u zavisnosti od ambijentalnog svetla i ugla merenja. Sa slike se može videti da se u uglu od 15° asp najbolje estimacije svih CIELAB kanala postižu u slučaju snimanja pod dnevnih svetlom. U uglu od 45° asp razlike u proceni pojedinačnih kanala boje sa promenom ambijentalnih uslova su neznatne, pri čemu su najmanje greške primećene pri snimanju u ambijentalnim uslovima 1. Promene u srednjim greškama procene CIELAB kanala veoma su male i u uglu od 75° asp, gde se nešto veće vrednosti grešaka na a* i b* osi dobijaju u slučaju ambijentalnog svetla 2. U svim procenama najveće greške primećene su pri proceni vrednosti b*, dok su najbolji rezultati postignuti za pri određivanju vrednosti a* ose.



Slika 6.32. Srednje apsolutne vrednosti razlika CIELAB kanala za korišćena ambijentalna svetla i merne uglove od (a) 15° asp, (b) 45° asp i (c) 75° asp

Ukoliko se poredе vrednosti svih prikazanih veličina po uglovima merenja, može se primetiti da postoje izvesna odstupanja u vrednostima za iste uslove snimanja. Kako bi se procenio uticaj ugla snimanja, ali i ambijentalnog osvetljenja izvršena je trofaktorska ANOVA sa repeticijama. Iako raspodela podataka nije bila normalna u svim posmatranim grupama i rezultati Levene testa pokazali su da ni varijanse unutar grupa nisu identične (Tabela 6.13), analiza je ipak sprovedena jer neparametrijski pandan ne postoji. Kao nezavisne varijable definisani su ugao merenja (3 nivoa), ambijentalno svetlo (3 nivoa), kao i uzorci (289 nivoa, bez vrednosti za uzorak GS1), dok je kao zavisna varijabla definisana ΔE^*_{ab} vrednost estimacije. Nivo značajnosti definisan je kao 0.05. Rezultati ove analize prikazani su u tabeli 6.14.

Tabela 6.13. Rezultati Levene testa procene jednakosti varijanse unutar grupa - podela prema boji uzorka, ambijentalnom svetlu korišćenom prilikom snimanja i uglu merenja

| F | df1 | df2 | Sig. |
|-------|------|-------|------|
| 8.049 | 2600 | 10404 | .000 |

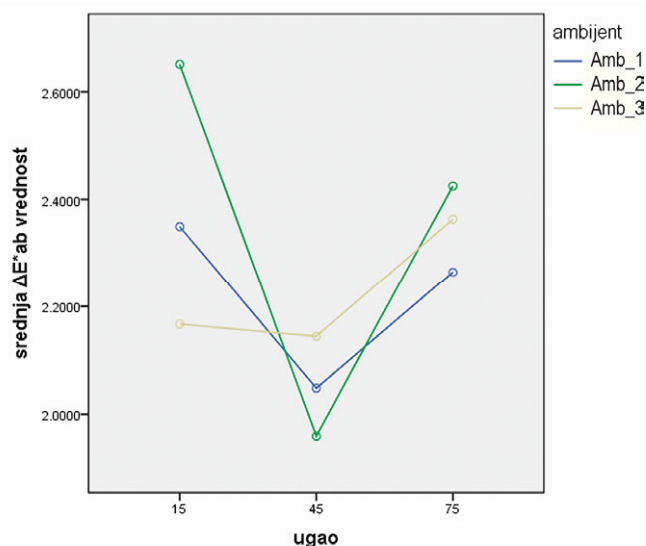
Tabela 6.14. Rezultati statističke analize uticaja uzorka, ambijentalnog svetla i ugla merenja, kao i njihovih združenih uticaja na tačnost procene kolorimetrijskih vrednosti (3-faktorska ANOVA -procena efekta unutar subjekata)

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. | Partial Eta Squared |
|--------------------------|-------------------------|-------|-------------|-----------|------|---------------------|
| Corrected Model | 58188.256 ^a | 2600 | 22.380 | 7.315 | .000 | .646 |
| Intercept | 66632.121 | 1 | 66632.121 | 21777.485 | .000 | .677 |
| uzorak | 23621.018 | 288 | 82.017 | 26.806 | .000 | .426 |
| ugao | 297.300 | 2 | 148.650 | 48.583 | .000 | .009 |
| ambijent | 43.351 | 2 | 21.676 | 7.084 | .001 | .001 |
| uzorak * ugao | 15970.919 | 576 | 27.727 | 9.062 | .000 | .334 |
| uzorak * ambijent | 6309.117 | 576 | 10.953 | 3.580 | .000 | .165 |
| ugao * ambijent | 172.772 | 4 | 43.193 | 14.117 | .000 | .005 |
| uzorak * ugao * ambijent | 11773.780 | 1152 | 10.220 | 3.340 | .000 | .270 |
| Error | 31832.904 | 10404 | 3.060 | | | |
| Total | 156653.281 | 13005 | | | | |
| Corrected Total | 90021.160 | 13004 | | | | |

a. R Squared = .646 (Adjusted R Squared = .558)

Rezultati analize pokazali su da je združeni uticaj testiranih faktora, kao i njihov pojedinačan uticaj na grešku karakterizacije statistički značajan. Od testiranih faktora uticaj uzorka je veoma značajan (*parcijalni eta kvadrat*=0.426), što je pokazano i u prethodnim procenama, dok se uticaji ambijentalnih osvetljenja i ugla mogu karakterisati kao malo značajni (vrednosti parcijalnih eta kvadrata iznose 0.001 i 0.009, respektivno).

Na slici 6.33 prikazana je promena srednje ΔE^*_{ab} vrednosti u zavisnosti od ambijentalnog osvetljenja i ugla merenja. Može se primetiti da vrednosti prate određeni trend, te da se u uglu od 45° asp dobijaju najniže vrednosti. Za ambijentalno svetlo 1 i 2 greške su najveće u uglu od 15° asp, dok se nešto niže vrednosti dobijaju u uglu od 75° asp. Takođe, u navedenim uslovima primetne su najveće oscilacije u vrednostima sa promenom ugla snimanja. U slučaju snimanja pod dnevnim svetlom (ambijentalni uslovi 3) srednja greška je najviša u uglu od 75° asp i znatno niža za merni ugao od 15° asp.



Slika 6.33. Srednja ΔE^*_{ab} vrednost u zavisnosti od ambijentalnog svetla (Amb_1 označava ambijentalno svetlo 1, Amb_2 – ambijentalno svetlo 2, Amb_3 – ambijentalno svetlo 3) i ugla snimanja

S obzirom na uticaj ugla, koji je na osnovu rezultata prikazanih na slici 6.32 više nego evidentan, u naknadnim testovima sprovedenim u cilju određivanja razlika u estimaciji kolorimetrijskih vrednosti sa promenom ambijentalnih uslova analize su sprovedene odvojeno za uglove merenja. Pri tom je posmatran samo uticaj ambijentalnog osvetljenja, te su za rezultate za svaki od uglova sprovedeni Fridmanovi testovi. Uzorci su posmatrani kao pojedinačni slučajevi testiranja, pri čemu su ambijentalna svetla definisana kao promenjeni uslovi testiranja. Nivo značajnosti definisan je kao 0.05, a iz analize je izostavljeno polje GS1.

Rezultati Fridmanovog testa za ugao od 15° asp pokazali su da **postoji statistički značajna razlika** u estimaciji kolorimetrijskih vrednosti uzoraka sa promenom ambijentalnog svetla c2 (2, N=289) =49.02, $p < 0,005$. Procenom srednjih vrednosti zaključeno je da se najbolji rezultati u datom mernom uglu postižu u slučaju snimanja pod dnevnim svetlom (srednja ΔE^*_{ab} vrednost iznosi 2.17), zatim u slučaju snimanja u potpunoj izolaciji (ambijentalno svetlo 1, gde je srednja ΔE^*_{ab} vrednost iznosila 2.35), dok se najlošije vrednosti postižu pri snimanju pod ambijentalnim svetlom 2 (srednja ΔE^*_{ab} vrednost u ovom slučaju iznosi 2.65).

Naknadni Vilkoksovi testovi ranga (tabela 6.15) pokazali su da pri poređenju razlika u estimiranim ΔE^*_{ab} vrednostima za testirana ambijentalna svetla postoje statističke razlike srednje značajnosti ($p < 0.005$, $r > 0.1$).

Tabela 6.15. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za testirana ambijentalna osvetljenja i merni ugao od 15° asp

| | Amb_1 – Amb_2 | Amb_1 – Amb_3 | Amb_2 – Amb_3 |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Z | -4.333 ^b | -3.873 ^c | -6.672 ^c |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | .000 | .000 | .000 |
| r | .180 | .161 | .278 |

Pri proceni dobijenih grešaka estimacije za ugao od 45° asp, rezultati Fridmanovog testa ukazali su na **postojanje statistički značajne razlike** u ΔE^*_{ab} vrednostima sa promenom ambijentalnog osvetljenja (c_2 (2, N=289) =7.89, $p=0,019$). Procenom srednjih vrednosti zaključeno je da su rezultati u sva tri slučaja veoma slični (srednje ΔE^*_{ab} vrednosti za ambijentalne uslove 1, 2 i 3 iznose redom 2.05, 1.96 i 2.14).

Naknadnim testovima pokazano je da statistički značajne razlike ne postoje prilikom snimanja u uslovima 1 i 3 ($p=0.847$), dok su u preostalim slučajevima (poređenje uslova 1 i 2, kao i 2 i 3) navedene razlike malog značaja (tabela 6.16).

Tabela 6.16. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za testirana ambijentalna osvetljenja i merni ugao od 45° asp

| | Amb_1 – Amb_2 | Amb_1 – Amb_3 | Amb_2 – Amb_3 |
|-------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| Z | -2.593 ^b | -.192 ^c | -3.158 ^c |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | .010 | .847 | .002 |
| r | .108 | .008 | .131 |

Rezultati Fridmanovog testa za ugao od 75° asp pokazali su da **ne postoji statistički značajna razlika** u estimaciji kolorimetrijskih vrednosti uzoraka sa promenom ambijentalnog svetla c_2 (2, N=289) =2.89, $p=0,236$. Procenom srednjih vrednosti zaključeno je da se najbolji rezultati u datom mernom uglu postižu u slučaju ambijentalnog svetla 1 (srednja ΔE^*_{ab} vrednost iznosi 2.26), zatim u slučaju snimanja na dnevnom svetlu (srednja ΔE^*_{ab} vrednost 2.36), dok se najlošije vrednosti postižu pri snimanju pod ambijentalnim svetlom 2 (srednja ΔE^*_{ab} vrednost u ovom slučaju iznosi 2.42).

Statistički značajne razlike nisu primećene ni prilikom međusobnog poređenja rezultata dobijenih za različita ambijentalna osvetljenja (tabela 6.17).

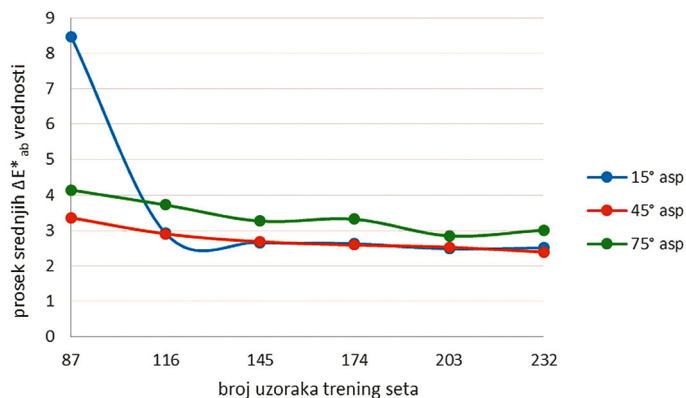
Tabela 6.17. Rezultati Vilkoksovih testova ranga za testirana ambijentalna osvetljenja i merni ugao od 75° asp

| | Amb_1 – Amb_2 | Amb_1 – Amb_3 | Amb_2 – Amb_3 |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Z | -.415 ^b | -1.491 ^c | -1.836 ^c |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | .678 | .136 | .066 |
| r | .017 | .062 | .076 |

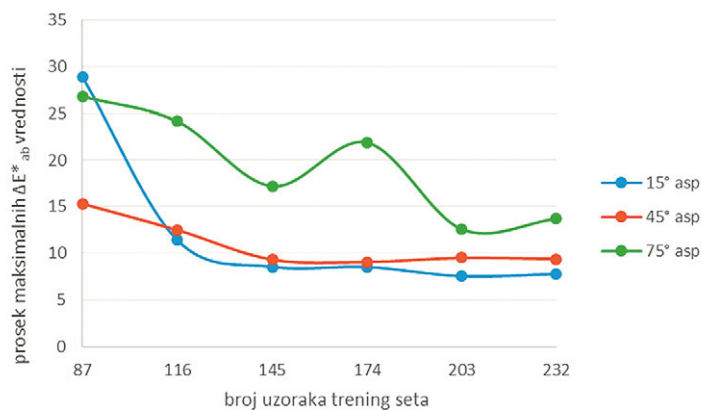
Na osnovu prikazanih rezultata zaključuje se da ambijentalno svetlo ne igra ulogu samo u mernom uglu od 75° asp, dok je u preostalim slučajevima njegov uticaj značajan.

6.4. Rezultati procene broja boja trening seta na tačnost estimacije boje

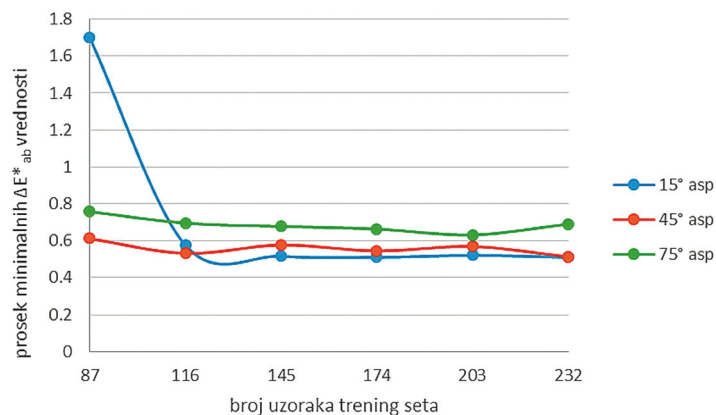
Prosek srednjih vrednosti grešaka estimacije (procenjenih na bojama test seta) za sva ponavljanja algoritma u zavisnosti od broja uzoraka trening seta prikazan je na slici 6.34 i u tabelama 6.18-6.20. Na slikama 6.35 i 6.36 prikazani su proseci maksimalnih i minimalnih grešaka za sva ponavljanja algoritma. Ostale vrednosti od značaja prikazane su u tabelama 6.18-6.20.



Slika 6.34. Prosek srednjih ΔE^*_{ab} vrednosti u zavisnosti od broja uzoraka trening seta



Slika 6.35. Prosek maksimalnih ΔE^*_{ab} vrednosti u zavisnosti od broja uzoraka trening seta



Slika 6.36. Prosek minimalnih ΔE^*_{ab} vrednosti u zavisnosti od broja uzoraka trening seta

Tabela 6.18. Greške procene kolorimetrijskih vrednosti sa promenom broja uzoraka trening seta za ugao merenja od 15° asp

| | Broj uzoraka trening seta | | | | | |
|---|---------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 87 | 116 | 145 | 174 | 203 | 232 |
| Prosek srednjih ΔE^*_{ab} vrednosti | 8.48 | 2.92 | 2.66 | 2.63 | 2.48 | 2.51 |
| St. devijacija | 1.53 | 0.79 | 0.33 | 0.45 | 0.33 | 0.37 |
| Minimalno ΔE^*_{ab} | 0.35 | 0.13 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.1 |
| Maksimalno ΔE^*_{ab} | 195.29 | 152.25 | 37.05 | 30.68 | 28.75 | 25.41 |

Tabela 6.19. Greške procene kolorimetrijskih vrednosti sa promenom broja uzoraka trening seta za ugao merenja od 45° asp

| | Broj uzoraka trening seta | | | | | |
|---|---------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | 87 | 116 | 145 | 174 | 203 | 232 |
| Prosek srednjih ΔE^*_{ab} vrednosti | 3.36 | 2.90 | 2.68 | 2.59 | 2.53 | 2.39 |
| St. devijacija | 1.27 | 0.71 | 0.59 | 0.59 | 1.06 | 1.03 |
| Minimalno ΔE^*_{ab} | 0.17 | 0.09 | 0.14 | 0.11 | 0.13 | 0.07 |
| Maksimalno ΔE^*_{ab} | 115.83 | 93.70 | 65.87 | 84.64 | 143.25 | 289.10 |

Tabela 6.20. Greške procene kolorimetrijskih vrednosti sa promenom broja uzoraka trening seta za ugao merenja od 75° asp

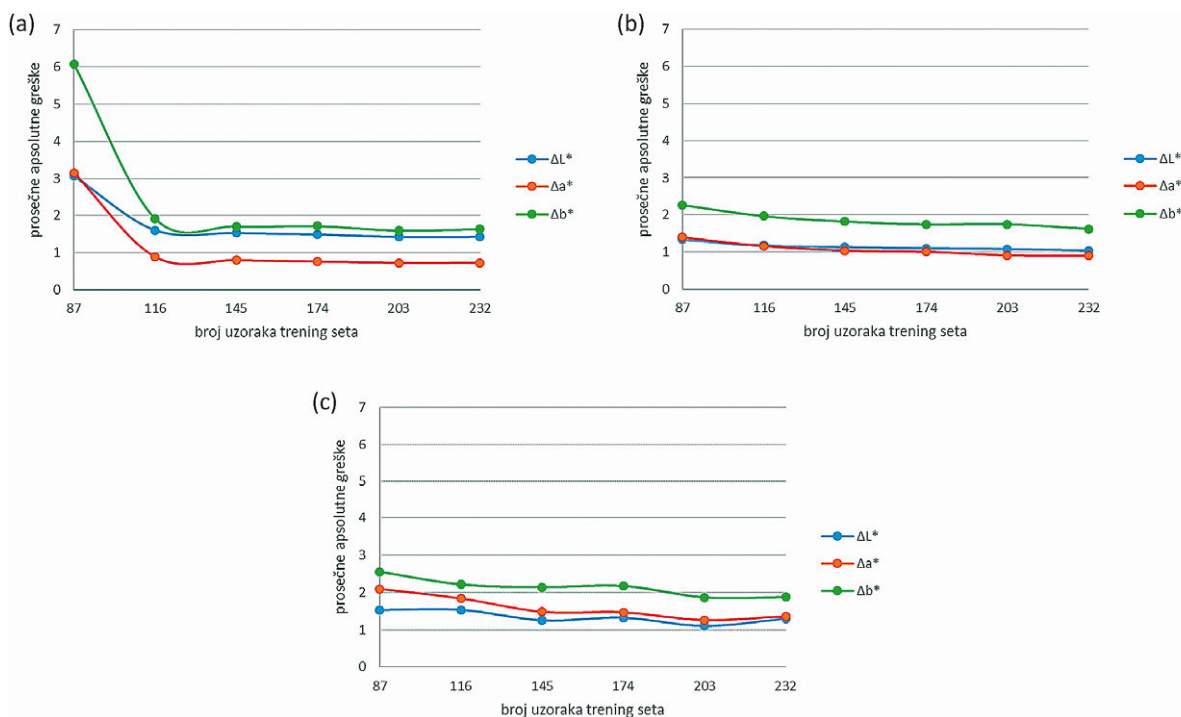
| | Broj uzoraka trening seta | | | | | |
|---|---------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 87 | 116 | 145 | 174 | 203 | 232 |
| Prosek srednjih ΔE^*_{ab} vrednosti | 4.14 | 3.72 | 3.26 | 3.32 | 2.85 | 3.01 |
| St. devijacija | 2.11 | 2.07 | 1.24 | 2.48 | 1.26 | 1.28 |
| Minimalno ΔE^*_{ab} | 0.18 | 0.14 | 0.09 | 0.17 | 0.09 | 0.13 |
| Maksimalno ΔE^*_{ab} | 347.03 | 236.63 | 219.92 | 422.35 | 218.32 | 77.92 |

Posmatrajući promenu proseka srednjih vrednosti prikazanih na slici 6.34 i rezultata u tabelama 6.18 i 6.19 može se zaključiti da vrednosti za uglove od 15° i 45° asp ne osciliraju nakon što broj uzoraka trening seta pređe 150. Promena minimalnih vrednosti za data uglove prati isti trend (slika 6.36), dok kod maksimalnih promene nisu značajne ukoliko trening set ima više od 200 uzoraka (slika 6.35). Za ugao od 75° asp sa porastom broja uzoraka trening seta spomenute greške (srednja, minimalna i maksimalna) se smanjuju, pri čemu su varijacije nešto veće nego u prethodnim slučajevima. Nakon 200 uzoraka dolazi do neznatnog ponovnog rasta kako srednjih, tako i minimalnih i maksimalnih vrednosti (slike 6.34-6.36).

Takođe, primetno je da se sa izabranim načinom treniranja najveće greške estimacije javljaju u uglu od 75° asp. Oscilacije proseka maksimalnih vrednosti sa promenom broja uzoraka trening seta, kao i maksimalno opažene vrednosti (tabela 6.20) najveće su za ovaj ugao.

Može se zaključiti da je za dati set optimalan broj uzoraka trening seta, koji omogućava postizanje zadovoljavajućih vrednosti u svim uglovima merenja 203, dok validacioni set u ovom slučaju iznosi 58 uzoraka (odnos broja uzoraka trening/validacionog/test seta - 7:2:1).

Udeo grešaka pojedinačnih kanala boje u ukupnim razlikama boja procenjen je na način određivanja prosečne srednje vrednosti apsolutnih grešaka L^* , a^* i b^* vrednosti. Rezultati ovih procena prikazani su na slici 6.37. Može se primetiti da su i u ovom slučaju, kao i kod LOO načina treninga, najveće greške za sve merne uglove primetne za estimaciju b^* vrednosti. U mernom uglu od 15° asp velike greške primetne su i kod procene svetline (slika 6.37a).



Slika 6.37. Prosečne apsolutne greške CIELAB kanala za merni ugao od (a) 15° asp, (b) 45° asp i (c) 75° asp

6.5. Rezultati optimizacije metoda

6.5.1. Rezultati optimizacije modela karakterizacije kamere

Pri proceni vrednosti boja dobijenih u svim uglovima merenja jednom neuronskom mrežom, ulazi algoritma predstavljali su RGB vrednosti dobijene merenjem u sva tri ugla, dok su izlazi bile njima pripadajuće CIELAB vrednosti ($D65/10^\circ$). Prilikom treniranja korišćen je odnos broja uzoraka trening, validacionog i test seta koji se u eksperimentu 3 pokazao kao optimalan za procenu vrednosti boja za sva tri ugla (7:2:1). S obzirom na to da su svi uzorci procenjivani jednom mrežom, trening set sastojao se od 609 uzoraka, validacioni set od 174 i test set od 87 uzoraka.

Ispitane su dve mogućnosti – procena CIELAB vrednosti na osnovu unetih RGB podataka (3-18-3 model, kao što je opisano u poglavlju 5.5.1) i procena CIELAB vrednosti na osnovu RGB podataka i vrednosti uglova merenja (4-18-3 model). Pri analizi u obzir su uzimane greške test seta. Rezultati obe procene prikazani su u tabelama 6.21 i 6.22.

Tabela 6.21. Greške procene kolorimetrijskih vrednosti pri korišćenju jedne neuronske mreže

| | 3-18-3 model | 4-18-3 model |
|--|--------------|--------------|
| Prosek srednjih ΔE^*_{ab} vrednosti | 3.00 | 2.54 |
| Standardna devijacija | 0.25 | 0.22 |
| Prosek minimalnih ΔE^*_{ab} vrednosti | 0.44 | 0.38 |
| Minimalno ΔE^*_{ab} | 0.09 | 0.07 |
| Prosek maksimalnih ΔE^*_{ab} vrednosti | 11.67 | 10.53 |
| Maksimalno ΔE^*_{ab} | 49.40 | 35.64 |

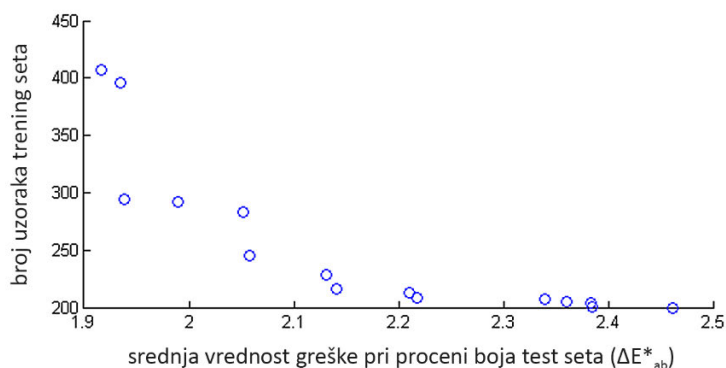
Tabela 6.22. Greške procene pojedinačnih CIELAB kanala pri korišćenju jedne neuronske mreže

| | 3-18-3 model | 4-18-3 model |
|--|--------------|--------------|
| Prosek srednjih ΔL^* vrednosti | 1.49 | 1.22 |
| Prosek srednjih Δa^* vrednosti | 1.07 | 0.94 |
| Prosek srednjih Δb^* vrednosti | 1.92 | 1.64 |

Na osnovu vrednosti prikazanih u tabelama 6.21 i 6.22 može se zaključiti da pristup jedne mreže za procenu vrednosti boja u svim mernim uglovima omogućava postizanje rezultata sa zadovoljavajućim stepenom tačnosti. Bolji rezultati svih procenjenih vrednosti dobijaju se u slučaju 4-18-3 modela. Greške su i u ovom slučaju najizraženije na b^* kanalu (tabela 6.22), što ukazuje na to da je odnos grešaka procene kolorimetrijskih vrednosti boja po kanalima CIELAB prostora nezavistan od načina treniranja.

6.5.2. Rezultati selektivne redukcije boja trening seta

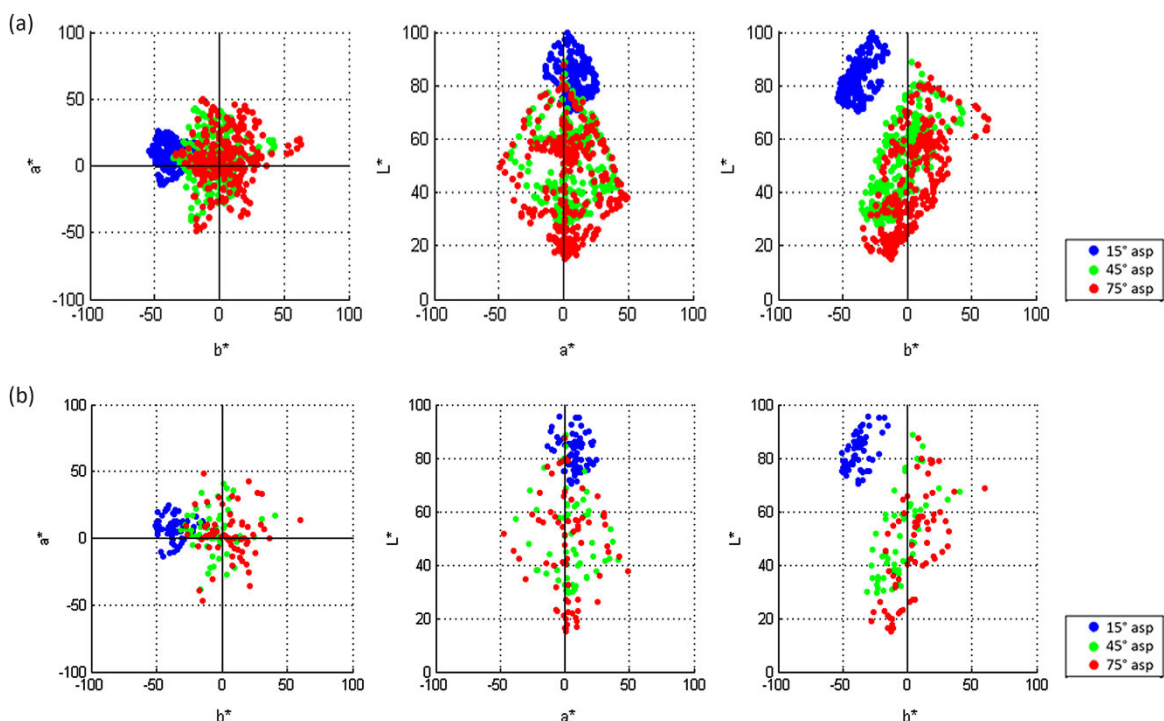
Prilikom implementacije GA testirane su različite kombinacije sledećih parametara: broj generacija, veličina populacije i stopa mutacije. Zadovoljavajući rezultati su postignuti sa 100 generacija, 2000 pojedinaca i stopom mutacije od 0.2, te su navedeni parametri korišćeni za određivanje optimalnog rešenja. Na osnovu zadatih funkcija cilja i definisanih parametara kao rezultat je dobijeno 15 rešenja prikazanih na slici 6.38.



Slika 6.38. Pareto front na kome su prikazana optimalna rešenja za definisane funkcije cilja

Sa slike 6.38 može se videti da se sa većim brojem uzoraka trening seta, greška procene uzoraka test seta smanjuje, što je i očekivano. Najniža greška procene test seta postiže se ukoliko broj je uzoraka trening seta 407 (greška u ovom slučaju iznosi $1.92 \Delta E^*_{ab}$), dok je najmanji broj uzoraka trening seta 200 pri čemu je procenjena greška $2.46 \Delta E^*_{ab}$.

Od 15 ponuđenih rešenja za procenu efikasnosti algoritma izabrano je ono koje omogućava dobar odnos posmatranih veličina - rešenje u kome broj uzoraka seta za treniranje ANN iznosi 208, dok je greška procene 2.22. Na taj način trening set je redukovan za 65.85% u poređenju sa onim koji je biran nasumično (neoptimizovan 4-18-3 model, u kom je broj uzoraka trening seta iznosio 609), dok je greška procene zadržana u granicama tolerancija. Poređenje izmerenih CIELAB vrednosti celog seta boja, kao i optimalnog subseta definisanog od pomoću GA prikazan je na slici 6.39. Optimalan trening set u ovom slučaju sastoji se od 78 vrednosti dobijenih u mernom uglu od 15° asp, 61 za ugao od 45° asp i 69 vrednosti koje korespondiraju mernom uglu od 75° asp.



Slika 6.39. Izgled (a) celog, (b) redukovanog seta boja u formi projekcija u CIELAB prostoru boja. Boja označava ugao u kom je pojedini uzorak meren.

Procenom inicijalnih i redukovanih gamuta boja za sve uglove merenja zaključeno je da su koordinate boja redukovanog seta ravnomerno pozicionirane unutar granica inicijalnih opsega boja. Na taj način omogućava se zadovoljavajuća pokrivenost gamuta, dok se broj redundantnih boja smanjuje.

Kako bi se procenila uspešnost navedenog pristupa izvršeno je treniranje ANN sa definisanim trening setom. Preostalih 662 ($=870-208$) uzorka nasumično su podeljeni na validacioni (575) i test set (87) kako bi se performanse modela mogle uporediti sa pristupom jedne mreže u kom je trening set definisan nasumičnim izborom (4-18-3 model, čije su performanse date u prethodnom poglavlju).

Stoga je broj uzorka test seta definisan tako da bude isti u oba slučaja, dok je validacioni set, koji ne utiče na performanse modela, povećan. Pošto se uzorci validacionog i test seta biraju nasumično, procedura treniranja i testiranja ponovljena je 100 puta, pri čemu su greške procene kolorimetrijskih vrednosti test seta određivane u skladu sa jednačinama 5.4-5.18. Rezultati procene prikazani su u tabelama 6.23 i 6.24.

Poređenjem prikazanih rezultata sa vrednostima dobijenim u slučaju nasumično biranog trening seta (Tabele 6.21 i 6.22, 4-18-3 model) ustanovljeno je da se u oba slučaja dobijaju gotovo identični rezultati. Maksimalna greška estimacije nešto je niža u slučaju optimizovanog pristupa, dok je prosek maksimalnih vrednosti nešto viši. Procena greški po kanalima boje (tabela 6.24) ukazuje na to da se najveća greška i u slučaju jasno preciziranog trening seta javlja na b* kanalu.

Tabela 6.23. Greške procene kolorimetrijskih vrednosti pri korišćenju jedne neuronske mreže i redukovano trening seta

| | |
|--|-------|
| Prosek srednjih ΔE^*_{ab} vrednosti | 2.68 |
| Standardna devijacija | 0.25 |
| Prosek minimalnih ΔE^*_{ab} vrednosti | 0.44 |
| Minimalno ΔE^*_{ab} | 0.09 |
| Prosek maksimalnih ΔE^*_{ab} vrednosti | 12.33 |
| Maksimalno ΔE^*_{ab} | 26.26 |

Tabela 6.24. Greške procene pojedinačnih CIELAB kanala pri korišćenju jedne neuronske mreže i redukovano trening seta

| | |
|--|------|
| Prosek srednjih ΔL^* vrednosti | 1.01 |
| Prosek srednjih Δa^* vrednosti | 0.97 |
| Prosek srednjih Δb^* vrednosti | 1.70 |

6.5.3. Rezultati optimizacije trajanja procedure snimanja uzoraka

Rezultati procene CIELAB vrednosti u slučajevima kada se kao ulazi koriste RGB vrednosti samo za jedan ugao snimanja prikazani su u tabelama 6.25 i 6.26. RGB vrednosti korišćene prilikom treniranja algoritma odgovarale su uglovima naznačenim u tabelama.

Tabela 6.25. Greške estimacije pri korišćenju jedne neuronske mreže (4-18-3) i RGB vrednosti za jedan od mernih uglova

| | Ugao merenja za dobijanje RGB vrednosti | | |
|--|---|---------|---------|
| | 15° asp | 45° asp | 75° asp |
| Prosek srednjih ΔE^*_{ab} vrednosti | 4.66 | 2.79 | 3.01 |
| Standardna devijacija | 0.34 | 0.24 | 0.47 |
| Prosek minimalnih ΔE^*_{ab} vrednosti | 0.62 | 0.43 | 0.43 |
| Minimalno ΔE^*_{ab} | 0.06 | 0.07 | 0.10 |
| Prosek maksimalnih ΔE^*_{ab} vrednosti | 15.96 | 9.40 | 11.24 |
| Maksimalno ΔE^*_{ab} | 39.90 | 31.50 | 46.81 |

Tabela 6.26. Greške estimacije pojedinačnih CIELAB kanala pri korišćenju jedne neuronske mreže (4-18-3) i RGB vrednosti za jedan od mernih uglova

| | Ugao merenja za dobijanje RGB vrednosti | | |
|--|---|---------|---------|
| | 15° asp | 45° asp | 75° asp |
| Prosek srednjih ΔL^* vrednosti | 2.08 | 1.12 | 1.14 |
| Prosek srednjih Δa^* vrednosti | 1.65 | 1.05 | 1.17 |
| Prosek srednjih Δb^* vrednosti | 3.13 | 1.96 | 2.17 |

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da se zadovoljavajući stepen estimacije CIELAB vrednosti može postići ukoliko se koriste RGB vrednosti slika snimljenih u mernom uglu od 45° asp. Slične vrednosti dobijene su i za merni ugao od 75° asp, dok su najveća odstupanja primetna pri korišćenju RGB vrednosti slika snimljenih u uglu od 15° asp.

U svim slučajevima najveće greške estimacije prisutne su na b^* kanalu, pri čemu je najveća greška primetna u slučaju korišćenja fotografija snimljenih u uglu od 15°. Najveće greške svih kanala takođe su prisutne u slučaju kada kada RGB vrednosti (ulazi algoritma karakterizacije) korespondiraju merenju u uglu od 15° asp. Za slučaj korišćenja RGB vrednosti koje korespondiraju mernim uglovima od 45° asp i 75° asp dobijaju se veoma slične vrednosti, gde je greška procene L^* i a^* vrednosti gotovo identična.

7. Diskusija rezultata

7.1. Diskusija rezultata eksperimenta 1

Ukoliko se prilikom snimanja uzoraka digitalnom kamerom koriste izvori svetla kojima se simulira standardno osvetljenje D65 na osnovu rezultata eksperimenta 1 zaključeno je da postoji statistički značajan uticaj izvora svetla na tačnost procene kolorimetrijskih vrednosti. Naknadnim testovima pokazano je da je ovaj uticaj značajan samo u mernom uglu od 15° asp i to pri korišćenju fluorescentnih sijalica (pri poređenju sa preostala dva izvora svetla). U uglovima merenja od 45° asp i 75° asp nije detektovana statistički značajna razlika u proceni kolorimetrijskih vrednosti sa promenom tipa osvetljenja, što govori u prilog tome da je korišćeni algoritam karakterizacije kamere u ovim slučajevima pokazao odlične rezultate u zanemarivanju izvora svetla.

Kako spektralna raspodela fluorescentnih sijalica u velikoj meri odstupa od raspodele standardnog osvetljenja D65, kao i od ostalih izvora svetla korišćenih u eksperimentu (slika 5.21a, strana 69), na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je hipoteza H2 za izvore svetla simulatore D65 dokazana.

Hipoteza H2 međutim nije dokazana za izvore svetla simulatore standardnog osvetljenja A, gde se uticaj izvora svetla pokazao kao značajan u svim mernim uglovima. Takođe, pri poređenju rezultata za pojedinačne izvore svetla uglavnom su postojale značajne razlike u procenjenim kolorimetrijskim vrednostima (jedina odstupanja prisutna su pri poređenju inkadescenčnih i LED osvetljenja u uglu od 45° asp, kao i između fluorescentnih i LED osvetljenja u uglu od 15° asp). Navedeni rezultati potvrđuju prednost korišćenja izvora svetla simulatora standardnog osvetljenja D65 pri karakterizaciji goniohromatskih materijala, jer na taj način ne dolazi do dodatnog naglašavanja dominantnih delova spektra zračenja sa uzorka koji se procenjuje.

Generalno gledano, kolorimetrijske vrednosti su najtačnije određene ukoliko je prilikom snimanja uzoraka korišćen izvor svetla koji u najboljoj meri simulira definisano standardno osvetljenje. Sa svim korišćenim izvorima svetla srednje greške procene kolorimetrijskih vrednosti bile su ispod definisane granice tolerancije, čime je otvorena mogućnost korišćenja predloženog pristupa u praktičnoj primeni. Takođe, broj uzoraka procenjenih sa greškom manjom od definisane granice je zadovoljavajući (u slučaju izvora svetla simulatora st. osvetljenja D65 ovaj procenat iznosi oko 80%, dok je u slučaju izvora svetla simulatora st. osvetljenja A nešto niži – oko 70%).

Pri poređenju dobijenih rezultata sa rezultatima predstavljanim u prethodnim radovima u kojima su korišćeni štampani uzorci oslojeni istim tipom pigmenta (Gebejes et al, 2013; Tomić et al, 2015), došlo se do zaključka da se model zasnovan na neuronskim mrežama predstavljen u ovom istraživanju pokazao kao daleko superiorniji u odnosu na prethodno korišćene pristupe. Naime, korišćenjem ANN modela srednje greške procene vrednosti boja kretale su se u rang od 2.05-2.47 ΔE^*_{ab} za standardno osvetljenja D65 i 2.09-2.87 ΔE^*_{ab} za standardno osvetljenja A. U prethodnim radovima prijavljene greške bile su i do pet puta veće – od 7-11 ΔE^*_{ab} (Gebejes et al, 2013; Tomić et al, 2015).

Analizom grešaka procene u zavisnosti od mernog ugla pokazano je da se najbolji rezultati u gotovo svim slučajevima dobijaju za merni ugao od 45° asp, čime je hipoteza H4 dokazana. Najveće greške procene (u smislu srednjih vrednosti i procenta tačno estimiranih boja), primećene su u mernom uglu od 15° asp. Navedeni rezultat je i očekivan, s obzirom na činjenicu da je u ovom mernom uglu kamera najbliže spekulanoj refleksiji sa uzorka. Kako je digitalna kamera znatno robustnija od detektora mernog uređaja može se pretpostaviti da je u ovom mernom uglu detektovan i deo spekularnog zračenja, koje utiče na greške u određivanju hromatske komponente uzorka koji se snima.

Razlike u određivanju kolorimetrijskih vrednosti sa promenom ugla, iako statistički značajne, mogu se tretirati kao neprimetna razlika u boji (Nussbaum, 2010). Naime, najveća razlika u vrednostima sa promenom ugla merenja primetna je za vrednosti koje korespondiraju fluorescentnim lampama simulatorima standardnog osvetljenja D65 i to između vrednosti dobijenih u uglovima od 15° asp i 45° asp (ova razlika iznosi svega 0.44 ΔE^*_{ab}). U svim ostalim slučajevima razlike su znatno manje.

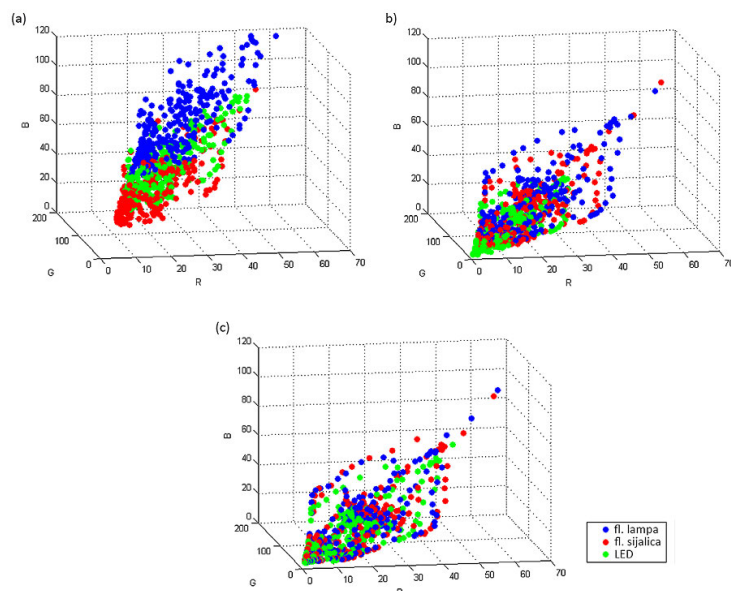
U prethodnim studijama pokazano je da greške estimacije kolorimetrijskih vrednosti variraju sa promenom ugla snimanja, pri čemu je maksimalna prijavljena razlika iznosila 3.8 ΔE^*_{ab} (Gebejes et al, 2013). Budući da je maksimalna razlika sa promenom ugla snimanja u ovom radu iznosila svega 0.44 ΔE^*_{ab} , može se smatrati da se korišćenim algoritmom karakterizacije kamere postižu znatno bolji rezultati u proceni vrednosti boja sa promenom mernog ugla, te da je hipoteza H3 dokazana.

Kako bi se objasnile varijacije u proceni vrednosti boja sa uglom snimanja i izvorima svetla posmatrani su ulazi algoritma karakterizacije, odnosno RGB vrednosti dobijene snimanjem uzoraka pod različitim izvorima svetla i u definisanim uglovima merenja. Na slici 7.1. prikazane su raspodele RGB vrednosti polja test karte za izvore svetla simulatore st. osvetljenja D65 i testirane uglove merenja. U ovom slučaju, sa promenom izvora svetla najveće varijacije srednje ΔE^*_{ab} vrednosti primećene su u mernom uglu od 15° asp (slika 6.10).

Na osnovu raspodela prikazanih na slici 7.1 spomenuti rezultat je evidentan, s obzirom na činjenicu da je najveća razlika u raspodeli RGB vrednosti primetna upravo u navedenom uglu. U uglu od 15° asp uzorci snimljeni pod fluorescentnim lampama detektovani su sa dominantnim plavim, ali i crvenim tonom, pa se može zaključiti da je kompenzacija dominantnog tona (naročito crvenih tonova) predstavljala problem algoritmu estimacije. Pored toga, RGB vrednosti u ovom uglu pokazuju veliko rasipanje, što nije slučaj sa CIELAB vrednostima izmerenih boja. Ako se pored

RGB vrednosti dobijene snimanjem pod fluorescentnim i LED sijalicama, LED lampe neznatno naglašavaju žuti ton (za ove lampe uzorci pokazuju nešto izraženije R i G vrednosti), što takođe može biti razlog nešto lošije estimacije.

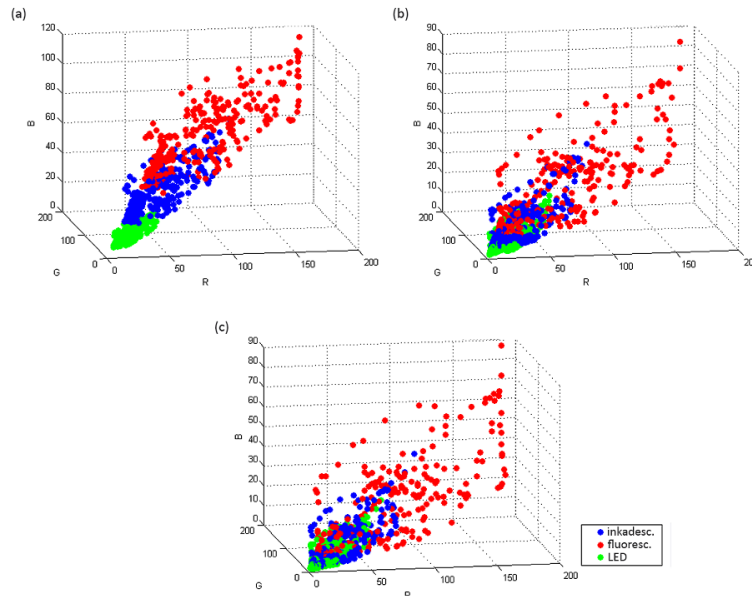
U ostalim uglovima merenja razlike u raspodelama RGB vrednosti sa promenom izvora svetla su manje naglašene (slika 7.1b i 7.1c), pa su samim tim i razlike u rezultatima estimacija za navedene merne uglove minimalne.



Slika 7.1. Prikaz raspodele RGB vrednosti boja test karte dobijenih snimanjem pod izvorima svetla simulatorima osvetljenja D65 u uglu od (a) 15° asp, (b) 45° asp, (c) 75° asp

Kada su u pitanju izvori svetla simulatori standardnog osvetljenja A, razlika u raspodelama RGB vrednosti sa promenom izvora svetla je veoma naglašena (slika 7.2). Stoga ne iznenađuje činjenica da su u ovom slučaju izvori svetla imali značajan uticaj na rezultate procene kolorimetrijskih vrednosti uzoraka. Ukoliko se porede vrednosti za sva tri izvora svetla, najveće odstupanje je primetno za RGB vrednosti koje korespondiraju fluorescentnim sijalicama.

Takođe, procenom raspodela RGB vrednosti prikazanih na slici 7.2 primetno je da su uzorci snimljeni u uglu od 15° asp pod fluorescentnim svetlom detektovani su sa dominantnim plavim i crvenim tonom. S obzirom na to da svetlo žute boje u datom mernom uglu do neke mere kompenzuje dominantan plavi ton uzoraka, može se zaključiti da je prisustvo izražene plave komponente zapravo nepoželjno. Samim tim algoritam ne daje zadovoljavajuće rezultate za navedene uzorke. Slično se može zaključiti za uzorke snimane pod LED osvetljenjem koji, s druge strane, ne poseduju dovoljno plavih tonova.



Slika 7.2. Prikaz RGB vrednosti boja test karte dobijenih snimanjem pod izvorima svetla simulatorima osvetljenja A u uglu od (a) 15° asp, (b) 45° asp, (c) 75° asp

U uglu od 45° i 75° asp CIELAB vrednosti uzoraka dobijene merenjem gonio-spektrofotometrom pokazuju dominantniji žuti ton i veći opseg izmerenih boja. Stoga ne čudi što je estimacija u ovim slučajevima veoma dobra za uzorke snimane fluorescentnim lampama, jer i RGB vrednosti uzoraka poseduju dominantan žuti ton (visoke vrednosti crvene i zelene komponente). U uglu od 75° asp izmerene LAB vrednosti su nešto tamnije od onih detektovanih u uglu od 45° asp, te je u ovom slučaju estimacija bolja za uzorke osvetljavane inkadescentnim lampama (inicijalne RGB vrednosti pokazuju manju svetlinu).

Pri proceni kolorimetrijskih vrednosti primećen je i veoma značajan uticaj boje uzorka na rezultat procene. U svim slučajevima (za sve procenjivane izvore svetla) najveća odstupanja primetna su pri određivanju CIELAB vrednosti čiste bele boje (polje GS1 test karte). Ova boja poseduje svetlinu koja je van ranga svih ostalih boja test karte, a kako su za njenu procenu korišćene ostale boje algoritam karakterizacije nije posedovao zadovoljavajuću referencu, te je samim tim i estimacija znatno lošija. Prilikom snimanja navedenog polja, zbog izuzetno visoke vrednosti svetline, primećen je problem fokusiranja kamere. Može se zaključiti da izabrana vrednost ekspozicije, adekvatna za preostala polja test karte, nije bila odgovarajuća za digitalizaciju polja GS1 kao posledica manjeg dinamičkog opsega kamere (mogućnosti da se istovremeno detektuju najsvetlije i najtamnije nijanse scene koja se snima).

Pored navedenog ekstrema, lošija estimacija je primetna u slučaju neutralnih i to svetlih boja. Razlog navedenom mogu biti niske RGB vrednosti, odnosno mala razlika u svetlini inicijalnih podataka (slika 13). Pri korišćenju izvora svetla simulatora standardnog osvetljenja A lošije su procenjeni crveni i žuti tonovi (poslednje je naročito primetno pri korišćenju LED osvetljenja). Kako RGB podaci dobijeni obradom slika snimljenih pod LED sijalicama pokazuju najmanji procenat crvene boje, kompenzacija manjka crvene boje nije uspešno izvedena od strane korišćenog algoritma pa su odstupanja za navedeni izvor svetla i najveća.

Kada je u pitanju procena pojedinačnih komponenata boja, za sve izvore svetla primećen je isti trend - najlošija estimacija b^* komponente (plavo-žuta osa), a najbolja pri proceni vrednosti a^* (crveno-zelena osa). S obzirom na to da je navedeni trend primetan za sve izvore svetla i sve merne uglove, kao i da je nezavistan od načina treniranja i trening seta, može se zaključiti da uzrok navedenim odstupanjima treba tražiti u korišćenim uzorcima, kao što je i dokazano u (Tomić et al, 2016). Naime, perlascentni pigmeti korišćeni u ovom istraživanju omogućavaju efekat promene boja sa uglom posmatranja upravo duž b^* ose (u pravcu plavo-žuto, sa porastom aspekularnog ugla). Time se boja odštampanih polja test karte menja tako da se u niskim uglovima posmatranja svi uzorci opažaju kao plavi (slika 6.1), dok se u ostalim uglovima plavi tonovi detektuju sa nešto dominantnijim žutim tonom. Na taj način procena vrednosti boja b^* kanala je nešto zahtevnija u odnosu na procenu vrednosti preostalih CIELAB kanala.

7.2. Diskusija rezultata eksperimenta 2

Pri proceni uticaja ambijentalnog svetla na tačnost procene kolorimetrijskih vrednosti boja otisaka primećeno je da se najbolji rezultati dobijaju u slučaju snimanja uzoraka unutar mračne komore. Ovakav rezultat je i očekivan, budući da se u navedenom slučaju u potpunosti izbegava mogućnost detekcije reflektovanog zračenja sa površina u okolini uzorka koji se digitalizuje, te pogrešna interpretacije njegove boje.

U ostalim uslovima snimanja dobijeni su vrlo slični rezultati kao u slučaju snimanja u mračnoj komori, pri čemu su varijacije u greškama procene vrednosti boja najmanje u uglu od 45° asp. S obzirom na činjenicu da su pri snimanju na dnevnom svetlu primećene značajne varijacije kako temperature boja upadnog zračenja, tako i njegovog fluksa, ovakav rezultat ukazuje na visoku adaptivnost algoritma karakterizacije kamere.

Naime, u prethodnim radovima naglašava se neophodnost kontrolisanja varijacija u intenzitetu svetlosti tokom digitalizacije uzoraka, pri čemu je pokazano da varijacija intenziteta od svega 1% može dovesti do greške u proceni vrednosti boje od $0.5 \Delta E^*_{ab}$ (Seymour, 2009). Takođe, napominje se da se ova greška najviše primećuje na osi svetline, kao i da se povećava sa povećanjem intenziteta izvora svetla (Seymour, 2009).

U sprovedenom eksperimentu prilikom snimanja unutar mračne komore varijacije u fluksu upadnog zračenja (veličina proporcijalna intenzitetu svetla) iznosile su do 2.85% (najveće odstupanje od srednje vrednosti fluksa), dok je u slučaju dnevnog svetla maksimalno odstupanje od srednje vrednosti fluksa iznosilo čak 10.6%. Uzrok grešaka estimacije dakle svakako treba tražiti i u varijacijama intenziteta i boje izvora svetla. Međutim, čak i u slučaju kada su varijacije u fluksu zračenja bile veoma izražene (snimanje pod dnevnim svetlom) srednja greška procene vrednosti boja nije prelazila definisanu granicu tačnosti. Stoga se može zaključiti da metod karakterizacije kamere, zasnovan na neuronskim mrežama, omogućava zadovoljavajuću kompenzaciju varijacija u intenzitetu svetlosnog izvora korišćenog prilikom snimanja uzoraka.

Statistička analiza, sprovedena s ciljem procene uticaja ambijentalnog svetla na tačnost određivanja kolorimetrijskih vrednosti, pokazala je da ambijentalna svetla imaju uticaj na rezultate u mernim uglovima 15° asp i 45° asp, pri čemu je navedeni uticaj defisanisan kao srednje značajan (u slučaju

vrednosti za ugao od 15° asp) i malo značajan (u uglu od 45° asp). Navedeni uticaj nije statistički značajan za kolorimetrijske vrednosti koje korespondiraju mernom uglu od 75° asp pa se, s obzirom na stepen značajnosti navedenih razlika za preostale merne uglove, može tvrditi da je hipoteza H5 dokazana.

7.3. Diskusija rezultata eksperimenta 3

U svom istraživanju Cheung i saradnici (Cheung et al, 2004b) dolaze do zaključka da se tačnost merenja boja kamerom koristeći metod karakterizacije zasnovan na neuronskim mrežama ne poboljšava značajno ukoliko broj uzoraka trening seta pređe 100. Autori napominju da su dodatna istraživanja neophodna kako bi se dokazalo da li je 100 uzoraka dovoljno za treniranje algoritma, odnosno da li sa povećanjem broja uzoraka do 200 dolazi do poboljšanja u tačnosti procene. Navedeni rad baziran je na uzorcima koji se ne kategorišu kao goniohromatski, te je prilikom snimanja korišćena fiksna pozicija kamere (geometrija 0°/45°).

Na osnovu rezultata eksperimenta 3 za tri procenjivane merne geometrije zaključeno je da kod procene otisaka štampanih goniohromatskim pigmentima nema značajne razlike u srednjim ΔE^*_{ab} vrednostima ukoliko broj uzoraka trening seta prelazi 150 (za merne uglove od 15° asp i 45° asp), odnosno 200 (za merni ugao od 75° asp). Pri proceni svih posmatranih veličina (prosek srednjih, maksimalnih i minimalnih vrednosti) primećeno je da nema razlike u rezultatima u slučaju kada broj uzoraka trening seta prelazi 200.

Dobijeni rezultati ukazuju na kompleksnost procene vrednosti boja goniohromatskih materijala. Kako je u (Cheung et al, 2004b) korišćena ista metodologija izbora boja trening seta kao u ovom radu, kao i test karta vrlo sličnog opsega boja, moguće je direktno poređenje dobijenih rezultata. Stoga se može zaključiti da je za postizanje istog stepena tačnosti procene vrednosti boja goniohromatskih uzoraka u odnosu na konvencionalne, potreban trening set koji sadrži dva puta više boja. Samim tim može se pretpostaviti da se pri merenju goniohromatskih uzoraka kamerom može očekivati manja tačnost merenja u odnosu na merenje uzoraka koji ne poseduju goniohromatske osobine. Ova pretpostavka eksperimentalno je i dokazana u (Tomić et al, 2016).

Ukoliko se posmatraju razlike estimacije po kanalima boje najveće greške primetne su pri proceni b^* vrednosti, što govori u prilog činjenici da je uzrok grešaka nezavistan od boja trening seta, kao i metode treniranja algoritma.

7.4. Diskusija rezultata optimizacije metoda

Rezultati optimizacije modela karakterizacije kamere pokazali su da je primenom jedne neuronske mreže moguće proceniti vrednost boja za sve testirane merne uglove, čime je hipoteza H1 dokazana. Pristup jedne mreže pokazao se podjednako efikasan kao i korišćenje neuronskih mreža za svaki od uglova pojedinačno. Ukoliko se vrednosti boja procenjuju jednim modelom, povećava se efikasnost predložene metodologije i skraćuje vreme neophodno za procesiranje podataka.

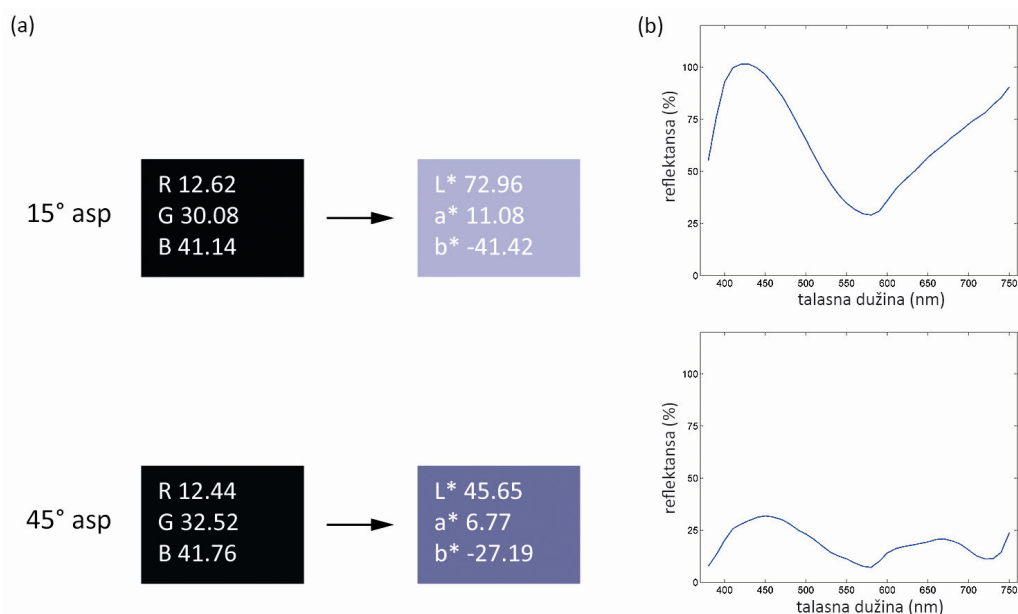
Takođe, pokazano je da je za poboljšanje tačnosti modela od značaja uključivanje dodatne informacije o uglu merenja pored RGB vrednosti pojedinačnih uzoraka. Ukoliko se uporede

vrednosti grešaka estimacije oba testirana modela (3-18-3 i 4-18-3) prikazane u tabelama 6.21 i 6.22, može se zaključiti da se bolji rezultati dobijaju u drugom slučaju (4-18-3 model).

Ovakav rezultat ne iznenađuje s obzirom na dodatni efekat koji ugao merenja ima na procenu vrednosti. Kada se CIELAB vrednosti procenjuju samo za 1 merni ugao greške procene mogu nastati iz dva razloga. Prvi je odstupanje osetljivosti senzora kamere od funkcija usaglašenog stimulusa (Martínez-Verdú et al, 2010), kao i njen dinamički opseg (De Lasarte et al, 2011). Drugi razlog je odstupanje spektralne raspodele izvora svetla od raspodele standardnog iluminanta. Kada se merenje vrši u više uglova rezultujuća refleksija može da naglasi date razlike, naročito pri korišćenju perlascentnih pigmenata. Stoga je odnos RGB i CIELAB vrednosti komplikovaniji za modelovanje.

Kako bi se pretpostavka potvrdila, izvojeno je par uzoraka koji u različitim uglovima merenja imaju slične RGB vrednosti, ali se perceptualno veoma razlikuju (njihove CIELAB koordinate su različite). Primer takvog para prikazan je na slici 7.3.

U slučaju treniranja mreže sa podacima svih mernih uglova ukupan set sadrži veliki broj plavih uzoraka (gotovo svi uzorci snimljeni u uglu od 15° asp i plavi uzorci snimljeni u preostalim mernim uglovima). Za dva slična plava uzorka detektovana u uglu od 15° asp, RGB i CIELAB koordinate će biti slične jer prate isti trend. Međutim, za slučaj dva uzorka detektovana u različitim mernim geometrijama (primer prikazan na slici 7.3), za veoma sličan ulaz (slične RGB vrednosti) korespondirajuće CIELAB vrednosti su različite. Kako se tokom procesa učenja neuronska mreža adaptira na dati set podataka (odnosno formira vezu ulaz-izlaz), više „zbunjujućih“ parova dovodi do veće greške procene. Stoga je za poboljšanje procesa učenja i performanse ANN modela neophodno kao ulaz uključiti i informaciju o mernom uglu.



Slika 7.3. (a) RGB vrednosti dva uzorka detektovanih kamerom u uglu od 15° asp (gore) i 45° asp (dole) i njima pripadajuće CIELAB vrednosti, (b) reflektanse datih uzoraka (izvor: Tomić et al, 2016)

Primena genetskog algoritma kao metode optimizacije procesa učenja ANN omogućila je znatno efikasnije treniranje modela. Navedenim pristupom boje trening seta izabrane su tako da njihove koordinate ravnomerno pokrivaju gamute izmerenih CIELAB vrednosti za sve uglove merenja (slika

6.39), uz minimalan broj korišćenih boja. Time su zadovoljeni zahtevi definisani u prethodnim radovima (Harderberg et al, 1998; Cheung & Westland, 2006) i omogućena je značajna redukcija broja boja trening seta u poređenju sa slučajem kada se boje biraju nasumično (smanjenje broja boja za 65.85%).

Naknadnim treningom pokazano je da se korišćenjem redukovanoog trening seta, selektovanim od strane genetskog algoritma, obezbeđuje gotovo isti stepen tačnosti procene kolorimetrijskih vrednosti boja kao u slučaju trening seta koji sadrži skoro tri puta više vrednosti. Navedenim rezultatima dokazana je hipoteza H6 i ukazano je na značaj adekvatne selekcije boja trening seta, elaborirane u nizu prethodnih studija (Harderberg et al, 1998; Cheung & Westland, 2006; Eckhard et al, 2014).

Veštačke neuronske mreže pokazale su se i kao veoma efikasne pri simulaciji ulaznih podataka. Naime, zahvaljujući njihovoj adaptivnosti pokazano je da je moguće proceniti CIELAB vrednosti za sve merne uglove na osnovu snimaka dobijenim u jednom od uglova merenja, čime je hipoteza H7 dokazana. Ovaj rezultat je od velikog značaja jer ne samo da drastično smanjuje vreme neophodno za digitalizaciju uzoraka, već omogućava i fiksnu poziciju kamere prilikom snimanja. Time se izbegavaju greške usled pomeranja kamere i obezbeđuje veća fleksibilnost pristupa.

Procenom rezultata prikazanih u tabelama 6.25 i 6.26, može se zaključiti da se najbolji rezultati dobijaju ukoliko se kao ulazni podaci koriste RGB vrednosti polja test karte snimane u mernom uglu od 45° asp. Najlošija estimacija se postiže u slučaju kada se koriste podaci koji korespondiraju mernom uglu od 15°. Ovakav rezultat je i očekivan, s obzirom na činjenicu da je opseg RGB vrednosti u uglu od 15° asp najmanji i različit od opsega za preostala dva ugla (slika 7.1, vrednosti koje korespondiraju fluorescentnim lampama). Takođe, u mernom uglu od 45° asp kamera se nalazi u idealnoj poziciji merenja jer je dovoljno udaljena od izvora svetla i ne detektuje spekularnu refleksiju sa uzoraka koji se digitalizuju. Stoga je detekcija boja u navedenom mernom uglu i najpouzdanija. Pored toga opseg RGB vrednosti polja test karte merenih u uglu od 45° asp je nešto veći od opsega koji odgovara mernom uglu od 15° asp i gotovo identičan gamutu za ugao od 75° asp. Samim tim, transformacija vrednosti boja, ukoliko se kao ulaz koriste podaci za ugao od 45° asp, zahteva manje adaptiranja mreže i posledično omogućava postizanje većeg stepena tačnosti.

Na osnovu svega izloženog može se zaključiti da je glavna hipoteza istraživanja dokazana. Odnosno, pokazano je da se karakterizacija kolorimetrijskih vrednosti otisaka štampanih goniohromatskim pigmentima može izvršiti korišćenjem digitalne kamere uz dati metod snimanja i razvijeni model karakterizacije kamere.

8. Zaključci istraživanja

Automatizacija procesa proizvodnje grafičkih proizvoda nametnula je potrebu za razvojem sistema procesne kontrole koji bi omogućili brzu i efikasnu detekciju nedostataka reprodukcije. U ovom segmentu sve je prisutnija upotreba digitalnih kamera, koje omogućavaju brzu i bez-kontaktnu procenu štampanog otiska, kao i analizu više elemenata reprodukcije na osnovu jednog snimka. Istraživanja u navedenoj oblasti ne gube na aktuelnosti zahvaljujući činjenici da su kamere znatno fleksibilnije i ekonomičnije od klasičnih mernih uređaja. U nizu prethodnih studija pokazano je da se kamere mogu uspešno primeniti i za procenu vrednosti boja uzoraka ukoliko se ta procena vrši u jednoj geometriji merenja.

U sprovedenom istraživanju ispitana je mogućnost korišćenja digitalne kamere za više-ugaono merenje boja, precizirani su problemi vezani za ovakav tip merenja i predložena rešenja za njihovo prevazilaženje. Na osnovu analize aktuelnog stanja u istraživanoj oblasti i definisanog predmeta istraživanja predložen je metodološki okvir korišćenja digitalne kamere kao gonio-kolorimetra. Predloženo rešenje razvijeno je s ciljem procene vrednosti boja otisaka štampanih goniohromatskim pigmentima, koji zbog svoje specifične refleksije zahtevaju korišćenje više geometrija merenja.

Kako bi se dati problem rešio izvršena je detaljna analiza sličnosti sistema baziranih na merenju boja kamerom sa mernim uređajem, pri čemu su izdvojeni parametri koji u datim sistemima mogu uticati na tačnost procene vrednosti boje. Kroz definisane eksperimente ispitivan je uticaj spektralne raspodele izvora svetla pod kojim se snimanje uzoraka vrši, mogućnost merenja u različitim ambijentalnim uslovima (u smislu kontrolisanosti ambijentalnog svetla), kao i broja uzoraka trening seta na tačnost određivanja vrednosti boja kamerom. Da bi se navedeni uticaji mogli proceniti, bilo je neophodno razviti model karakterizacije kamere pa je veliki segment istraživanja posvećen analizi postojećih pristupa i definisanju optimalnog rešenja.

Uporednom procenom rezultata do sada primenjenih metoda karakterizacije kamere zaključeno je da se najveća tačnost određivanja vrednosti boja postiže metodama polinomne regresije i veštačkih neuronskih mreža. Daljom analizom mogućnosti primene datih metoda u slučaju više-ugaonog merenja definisano je niz prednosti na strani ANN, pa je model karakterizacije kamere baziran upravo na navedenom pristupu.

Razvijeni model pokazao se kao veoma efikasan ne samo pri definisanju RGB-CIELAB transformacija za svaki od testiranih uglova merenja, već i pri fitovanju više-ugaonih podataka. Srednje greške merenja bile su u granicama tolerancija definisanih za kolorimetrijsko merenje boja u grafičkoj reprodukciji, dok je veoma mali broj boja procenjen sa greškom većom od dozvoljene. Time je potvrđena osnovna hipoteza istraživanja, odnosno dokazano je da se komercijalna digitalna kamera može koristiti za određivanje kolorimetrijskih vrednosti boja goniohromatskih štampanih otisaka.

Da bi se povećala efikasnost predložene metodologije izvršena je analiza trajanja pojedinih operacija i predložene su mogućnosti njihove optimizacije. U ovom segmentu velika pažnja posvećena je optimizaciji samog modela, jer se povećanjem njegove efikasnosti utiče na efikasnost metode u celini.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata i njihove detaljne analize izvedeni su sledeći zaključci:

- Promena u opažaju boja otisaka štampanih goniohromatskim pigmentima sa promenom ugla posmatranja u velikoj meri zavisi od tona osnovne boje. Rezultati instrumentalne karakterizacije ukazuju na to da se najmanja promena javlja kod boja koje se goniohromatskim pigmentima dodatno naglašavaju. Takođe, primećeno je da osnovna boja značajno utiče na promenu tona i zasićenja krajnje opažene boje, dok je njen uticaj na promenu opažene svetline neznatan.
- Rezultati statističke analize ukazali su da postoji značajan uticaj interakcije boje uzorka, izvora svetla i ugla merenja na tačnost procene vrednosti boja goniohromatskih uzoraka kamerom. Kako kolorimetrijske vrednosti predstavljaju međuzavisnost uzorka, izvora svetla i posmatrača ovaj uticaj je i očekivan. Interakcija izvora svetla različite spektralne raspodele sa pigmentima uzoraka dovodi do različite raspodele spektralne snage svetlosti koja se sa uzorka reflektuje, a promena položaja kamere dodatno utiče na tačnost detekcije pojedinih talasnih dužina. Budući da RGB vrednosti uzoraka predstavljaju ulaze algoritma karakterizacije njegova efikasnost nužno zavisi od spomenutih faktora.
- Ukoliko se kao metod karakterizacije kamere koriste veštačke neuronske mreže spektralna raspodela izvora svetla pod kojim se snimanje uzoraka vrši nema velikog uticaja na rezultate merenja boja kamerom za izvore svetle simulatore standardnog osvetljenja D65. Spomenuti uticaj pak ne može se zanemariti ako se kao izvori svetla koriste simulatori standardnog osvetljenja A. U oba posmatrana slučaja preporučuje se korišćenje izvora svetla koji u većoj meri simuliraju spektar referentnih iluminanata.
- Tačnost procene kolorimetrijskih vrednosti goniohromatskih štampanih uzoraka na osnovu odziva kamere zavisi u manjoj meri od temporalnih varijacija intenziteta i temperature boje izvora svetla pod kojim se snimanje vrši, odnosno ambijentalnog osvetljenja u uslovima snimanja. Iako se najpouzdaniji rezultati dobijaju u slučaju kada se merenje vrši u kontrolisanim uslovima, pokazano je da srednja greška procene ne prelazi definisanu granicu tolerancije čak ni u slučajevima kada postoje značajne varijacije ambijentalnog osvetljenja. To govori u prilog činjenici da se predloženo rešenje može koristiti i u industrijskim uslovima, odnosno u uslovima kada ambijentalno osvetljenje nije strogo kontrolisano.

- Pri merenju goniohromatskih štampanih otisaka kamerom može se očekivati manja tačnost dobijenih rezultata u odnosu na merenje uzoraka koji ne poseduju goniohromatske osobine. Kako bi se postigao isti stepen tačnosti merenja u oba slučaja, trening set korišćen za obučavanje algoritma karakterizacije kamere pri merenju goniohromatskih materijala mora sadržati dva puta više uzoraka. Navedeni zaključak validan je za slučaj kada se vrednosti boja trening seta biraju nasumičnim izborom i ukazuje na kompleksnost merenja boja goniohromatskih uzoraka.
- Tačnost procene vrednosti boje kamerom zavisi u manjoj meri od ugla merenja, pri čemu se najbolji rezultati uglavnom postižu u slučaju geometrije $45^\circ/\text{asp}45^\circ$, a najlošiji merenjem u uglu od 15° asp (merna geometrija $45^\circ/\text{asp}15^\circ$). Razlike u određivanju kolorimetrijskih vrednosti sa promenom ugla merenja, iako statistički značajne, mogu se tretirati kao neprimetna razlika u boji te ne utiču značajno na efikasnost merenja. Smanjenje navedenih razlika može se postići modifikovanjem korišćene aparature, na način izbegavanja detekcije spekularne refleksije sa uzorka.
- U poređenju sa rezultatima prethodnih istraživanja, primenom veštačkih neuronskih mreža omogućava se postizanje manjih razlika boja sa promenom mernog ugla, čime se povećava pouzdanost merenja.
- Određivanje kolorimetrijskih vrednosti boja za više mernih uglova moguće je korišćenjem jedne neuronske mreže, pri čemu je za postizanje zadovoljavajućeg stepena tačnosti pored uređajno-zavisnih koordinata boja (RGB) kao ulaz algoritma neophodno definisati i korespondirajući merni ugao.
- Primena genetskog algoritma za izbor boja trening seta omogućava formiranje seta boja u skladu sa kriterijumima ustanovljenim u prethodnim istraživanjima – trening set formiran na ovaj način sastoji se od minimalnog broja uzoraka koji ravnomerno pokrivaju opseg boja koji se želi reprodukovati. Na taj način povećava se efikasnost, ali i tačnost modela karakterizacije.
- Korišćenjem ANN moguća je procena vrednosti boja za više mernih uglova na osnovu odziva kamere za jedan od mernih uglova. Najveći stepen tačnosti osigurava se korišćenjem snimaka dobijenih u mernom uglu od 45° asp (merna geometrija $45^\circ/\text{asp}45^\circ$), jer se u navedenom uglu u potpunosti izbegava detekcija spekularno reflektovanog zračenja.
- Tip korišćenog pigmenta utiče na greške procene, pri čemu se pravac promene izgleda boje sa uglom posmatranja koji pigment korišćen u ovom istraživanju omogućava može direktno povezati sa CIELAB kanalom boje na kom su greške najizraženije. Kako bi se navedeni zaključak generalizovao potrebna su dodatna istraživanja u kojima bi se uvrstio veći broj goniohromatskih pigmenata.

Pored navedenih zaključaka rezultati istraživanja otvaraju i niz istraživačkih pitanja i ukazuju na moguće pravce daljeg istraživanja. Analizom tačnosti procene pojedinačnih boja definisanog seta pokazano je da greška procene zavisi od boje uzorka, pri čemu se u slučaju određenih tonova dobijaju znatno veće greške od prosečnih. Naime, najveći problem primećen je pri proceni kolorimetrijskih

vrednosti najsvetlije boje seta, dok su veće greške u globalu primećene kod svetlijih nezasićenih tonova. Kako su za digitalizaciju uzoraka svih boja korišćena ista podešavanja kamere i adekvatno definisana ekspozicija, uzrok problemu treba tražiti u dinamičkom opsegu senzora kamere.

U sprovedenom istraživanju korišćena je komercijalna digitalna kamera sa CMOS senzorom, koji omogućava zadovoljavajuću brzinu snimanja, ali ne i visoku preciznost detekcije boja zbog nižeg dinamičkog opsega (u poređenju sa ostalim tipovima senzora). U daljim istraživanjima navedeni problem mogao bi biti rešen korišćenjem senzora većeg dinamičkog opsega, primenom HDR pristupa (Kim & Kautz, 2008; Tomić et al, 2010) ili modela adaptacije na luminansu s ciljem proširenja dostupnog tonskog opsega (De Lasarte et al, 2011).

Perlascentni pigment korišćen u ovom istraživanju omogućio je promenu obojenja koja se može pratiti na b^* osi CIELAB prostora boja, dok su pri proceni parcijalnih grešaka merenja najveće greške takođe detektovane na navedenoj osi. Pokazalo se da su dobijena odstupanja nezavisna od načina treniranja, tipa procene, ali i uzoraka trening seta, što ukazuje na činjenicu da model kolorimetrijske karakterizacije mora uzeti u obzir karakteristike korišćenih pigmentata. Dalji razvoj predloženog modela dakle treba usmeriti na smanjenje grešaka uzrokovanih tipom oslojavanja, što bi moglo biti izvedeno uvođenjem koeficijenta kompenzacije određenog u zavisnosti od aspekularnog pomeraja reprodukovanih tonova. Opsežno istraživanje neophodno je u cilju definisanja tonova od značaja, kao i preciziranja načina kompenzacije.

Kako je izbor mernih uglova za koje su kolorimetrijske vrednosti procenjivane bio ograničen dostupnim mernim uređajem, dodatna istraživanja su neophodna radi potvrđivanja primene predložene metode za procenu vrednosti boja u geometrijama koje istraživanjem nisu obuhvaćene. Takođe, u prethodnom radu (Gebejes et al, 2013) naglašen je problem snimanja uzoraka u mernom uglu od 110° asp, jer zbog položaja kamere u navedenom uglu nije moguća adekvatna detekcija uzoraka koji se digitalizuju. Činjenica da je pomoću ANN modela bilo moguće proceniti vrednosti boja svih mernih geometrija na osnovu vrednosti dobijenih u jednoj geometriji, može se pretpostaviti da bi se isti pristup mogao iskoristiti za rešavanje problema merenja u teško dostupnim uglovima.

Tipičan gonio-spektrofotometar (ili gonio-kolorimetar) je zatvoren sistem sa visoko usmerenim svetlosnim izvorom i detektorima koji su postavljeni tako da detektuju određeni deo reflektovanog zračenja. U sprovedenom istraživanju izvor svetla nije bio fokusiran, dok je udaljenost kamere od uzorka koji se snimao (određena žižnom daljinom njenog objektiva) bila mnogo veća nego udaljenost izvora svetla od detektora mernog unutar mernog uređaja. To može uticati na lošiju detekciju reflektovanog zračenja, pa se u cilju poboljšanja rezultata može razmotriti i mogućnost modifikovanja postavke snimanja.

Na osnovu izloženog može se zaključiti da je postavljeni cilj istraživanja ostvaren, odnosno razvijen je pristup u kom se digitalna kamera može koristiti kao gonio-kolorimetar. Kroz navedene zaključke precizirana je postavka snimanja uzoraka, kao i mogućnosti za njeno dodatno unapređenje čime je i primenjeni cilj istraživanja ispunjen.

Eksperimentalni rezultati predstavljeni u ovom istraživanju ukazuju na mogućnosti primene digitalnih kamera u domenu kontrole reprodukcije spektralno kompleksnih materijala. U tom smislu polje njihove primene može biti prošireno i na druge industrije, pored grafičke (upotreba perlascentnih pigmenata veoma je zastupljena u automobilskoj industriji, i sl.).

Primena algoritama inspirisanih biološkim sistemima pokazala se kao veoma efikasna u rešavanju svih zadataka postavljenih u istraživanju. Velika moć ovih algoritama leži u njihovoj sposobnosti adaptacije i učenja (u slučaju veštačkih neuronskih mreža), kao i mogućnosti odbacivanja lošijih rešenja i unapređenja zadovoljavajućih (pri primeni genetskog algoritma). Ni jedan od navedenih pristupa ne zahteva prethodno znanje o problemu koji se rešava čime se omogućava efikasno modelovanje i u slučaju veoma kompleksnih veza. Stoga je moguće pretpostaviti da će u narednim godinama navedeni pristupi sve više nalaziti primenu u modernim sistemima upravljanja bojama.

9. Naučni doprinos istraživanja i mogućnost primene u praksi

Kao najznačajniji naučni doprinosi istraživanja mogu se navesti:

- Korišćenje digitalne kamere kao gonio-kolorimetra na bazi predloženog metodološkog okvira,
- Razvijeni model karakterizacije kamere za više-ugaono merenje boja baziran na veštačkim neuronskim mrežama,
- Metod selekcije boja trening seta baziran na genetskom algoritmu.

Predloženi metodološki okvir zajedno sa razvijenim modelom karakterizacije kamere zasnovanim na primeni sistema veštačke inteligencije, predstavlja pragmatično rešenje za određivanje vrednosti boja goniohromatskih štampanih uzoraka na osnovu odziva digitalne kamere. Da bi predloženo rešenje moglo biti primenjeno u industrijskim okvirima, neophodno je dodatno unapređenje metode s ciljem minimiziranja maksimalnih razlika boja dobijenih ovakvim tipom merenja. Kako se u industrijskoj primeni za određivanje vrednosti boja i detekciju grešaka uglavnom koriste 3 CCD, trilinearne ili bilinearne kamere (He, 2013), a ne komercijalne kamere sa CMOS senzorom (kao ona korišćena u ovom istraživanju), može se pretpostaviti da bi korišćenje senzora dizajniranih s ciljem precizne detekcije boja dodatno unapredilo predloženo rešenje i omogućilo njegovo implementiranje u proizvodne procese.

Predloženi metod selekcije vrednosti boja baziran na genetskom algoritmu, uspešno primenjen u ovom istraživanju za redukciju broja boja trening seta, može biti iskorišćen i za definisanje minimalnog seta boja neophodnog za karakterizaciju ostalih uređaja koji se u grafičkoj reprodukciji koriste. Ovaj pristup poseban značaj mogao bi imati za karakterizaciju štampača, s obzirom na činjenicu da je za precizno definisanje CMYK → CIELAB (i obrnute) transformacije neophodan veliki broj uzoraka.

Kao važni naučni doprinosi mogu se izdvojiti:

- Pregled aktuelnog stanja u oblasti
 - specijalnih (perlascentnih) pigmenata i njihove primene u grafičkoj reprodukciji,
 - određivanja vrednosti boja goniohromatskih materijala,
 - karakterizacije kamere sa osvrtom na korišćene metode,

- Predloženi metod definisanja adekvatnih podešavanja kamere prilikom snimanja uzoraka,
- Predložene metode optimizacije modela karakterizacije kamere.

U okviru pregleda aktuelnog stanja u oblasti primene perlascentnih pigmenata u grafičkoj reprodukciji izdvojene su i preporuke za njihovu praktičnu primenu korišćenjem različitih tehnika štampe, dok deo posvećen karakterizaciji kamere sadrži i pregled parametara koji utiču na tačnost merenja boja navedenim uređajem.

Segment optimizacije predložene metode obrađuje problematiku više-ugaonog merenja boja kamerom u odnosu na konvencionalnu postavku (korišćenje jedne merne geometrije). Izdvojeni problemi i predložena rešenja predstavljaju osnovu za razvoj industrijski primenjenog sistema za kontrolu vrednosti boja goniohromatskih materijala na osnovu odziva kamere.

Sistemi zasnovani na analizi slike uveliko se koriste za procesnu kontrolu parametara štampe (reprodukcija detalja, detekcija grešaka registra i tome sl.), dok se procena reprodukcije boje bazirana na odzivu kamere svodi na poređenje detektovanih boja sa prethodno definisanim vrednostima (kao primer se može navesti QualiTronic Professional sistem kompanije KBA). Rezultati istraživanja ukazuju da bi uloga digitalnih kamera u ovom segmentu mogla biti dodatno unapređena, te da bi se (uz adekvatnu metodu obrade snimljenih slika i model karakterizacije kamere) mogle koristiti i kao konvencionalni uređaji za merenje boja.

Uz prethodnu pripremu adekvatnog trening seta i formiranje modela, snimak uzorka koji se procenjuje mogao bi biti dovoljan za određivanje njegovih kolorimetrijskih vrednosti. Pored toga, pokazano je da položaj kamere tokom snimanja nije neophodno menjati (odnosno da se procena vrednosti boja za više mernih uglova može izvršiti na osnovu snimaka generisanim u jednom mernom uglu), što otvara niz mogućnosti za praktičnu implementaciju. Ukoliko bi se na štamparsku mašinu postavio stabilan izvor svetla usmeren ka otisku koji se štampa i kamera pod uglom od 45° u odnosu na njega, bila bi omogućena *in-line*⁷ kontrola reprodukovane boje. Za tehnike štampe kod kojih, zbog konstrukcije same mašine, nije moguća ovakva postavka, isti princip bi mogao biti korišćen *off-line* (van mašine). Da bi se navedena ideja primenila pored navedenih komponenti neophodno je razviti i programsko okruženje koje bi omogućilo procesiranje odziva kamere i povezivanje dobijenih RGB vrednosti sa razvijenim modelom. Na taj način dobilo bi se rešenje koje bi bilo fleksibilnije i značajno finansijski isplativije od trenutnih sistema.

Budući da je u istraživanju korišćen metod empirijske karakterizacije, kao nedostatak predloženog pristupa može se izdvojiti činjenica da se razvijeni model može koristiti pri proceni vrednosti boja otisaka koji su generisani na isti način kao i otisci korišćeni za treniranje modela (ista podloga, tehnika štampe, kao i isti tip korišćenih pigmenata). Ukoliko se neki od parametara procesa štampe promeni, neophodno je ponovno treniranje ANN korišćenjem novog seta uzoraka. Navedeni nedostatak mogao bi biti prevaziđen karakterizacijom baziranom na modelu, koja u ovom istraživanju nije korišćena zbog nepostojanja adekvatne laboratorijske opreme neophodne za definisanje odziva senzora kamere.

⁷ Kontrola tokom procesa štampe

10. Literatura

A.

1. Admesy: Spectroscopy: general spectroscopy [Online] Available at: <http://www.admesy.com/application/general-spectroscopy/> [Accessed: April 21, 2015]
2. ANSI: ANSI IT8.7/2-1993 (R2013) Graphic technology - Color reflection target for input scanner calibration [Online] Available at: <http://www.ansi.org/> [Accessed August 21, 2014].
3. Andersen, C. F., Harderberg, J. Y.: Colorimetric characterization of digital cameras preserving hue planes, 13th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings, Springfield: IS&T, Vol. 6, pp. 141-146. ISSN: 2169-2629.
4. ASTM E2539 - 12: Standard Practice for Multiangle Color Measurement of Interference Pigments, ASTM International, West Conshohocken, 2014 [Online] Available at: www.astm.org [Accessed May 22, 2014].
5. Atamas, T., Hauer, K-O., Höpe, A.: Appearance Measurements of Goniochromatic Colours, In the Predicting Perceptions: Proceedings of the 3rd International Conference on Appearance, April 2012, Edinburgh, UK. pp. 149-154.
6. Attwood, D.: Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation Principles and Applications, Chapter 4: Multilayer interference coatings, Cambridge: Cambridge University Press, 1999. ISBN 9781139164429.

B.

7. BabelColor, 2015: BabelColor Color Translator & Analyzer (CT&A) [Online] Available at: <http://www.babelcolor.com/index.htm#CTandA> [Accessed November 8, 2015].
8. Balasubramanian, R.: Device Characterization. In Sharma, G. (Ed.): Digital Color Imaging Handbook, 2003. Boca Raton: CLC Press. ISBN: 0-8493-0900-X.
9. Barnard, K., Funt, B.: Camera Characterization for Color Research, Color Research and Application, 2002, 27(3), pp. 152-163.
10. Berns, R. S.: Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, 3rd Edition, 2000. Chichester: John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-19459-0.

11. Bianco, S., Schettini, R., Vanneschi, L.: Empirical modeling for colorimetric characterization of digital cameras. In the Proceedings of 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 7-10 Nov. 2009, Cairo, Egypt. pp. 3469 - 3472.
12. Blickle, T., Thiele, L.: A comparison of selection schemes used in evolutionary algorithms, *Evolutionary Computation*, 4(4), 1996. pp. 361-394.
13. Boncelet, C.: Image Noise Models, Ch. 4.5. In Bovik, A. (Ed.) *Handbook of Image & Video Processing*, 2000. San Diego: Academic Press. ISBN 0-12-119790-5.
14. Briggs, J.C.: Application note: Graininess Measurements of Halftones, Quality Engineering Associates, Inc. Report 2002.
15. Brydges, D., Deppner, F., Künzli, H., Heuberger, K., Hersch, R.D.: Application of a 3-CCD color camera for colorimetric and densitometric measurements. *SPIE Proceedings 3300, Color Imaging: Device Independent Color, Color Hardcopy and Graphics Arts III*. 1998. Pp. 292—301.

C.

16. Canon: Canon EOS 550D [Online] Available at: http://www.canon.rs/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_550d/ [Accessed September 7, 2014]
17. Centropapir, 2014.: Katalog mašina [Online] Available at: http://www.centropapir.rs/CP_PLUS_kratki_katalog_2014.pdf [Accessed August 15, 2015]
18. Chandu, K.: Automatic Image Registration and Defect Identification of a Class of Structural Artifacts in Printed Documents. MsC Thesis, Department of Electrical Engineering, Rochester Institute of Technology, Rochester, New York, 2008.
19. Cheung, T.L.V., Westland, S.: Color Camera Characterisation Using Artificial Neural Networks, 10th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings, IS&T, Springfield, VA, 2002, pp. 117-120.
20. Cheung, T. L. V., Westland, S.: Color selections for characterization charts, In the Proc. of IS&T Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision, IS&T, Springfield, VA, 2004(a), pp.116–119.
21. Cheung, V., Westland, S., Connah, D., Ripamonti, C.: A comparative study of the characterization of color cameras by means of neural networks and polynomial transforms. *Coloration Technology*, 2004(b). No. 120. pp. 19-25.
22. Cheung, T. L. V., Westland, S.: Methods for Optimal Color Selection, *Journal of Imaging Science and Technology*, 2006. 50(5), pp. 481-488.
23. Chorro, E., Perales, E., Burgos, F. J., Gómez, O., Vilaseca, M., Viqueira, V., Pujol, J., Martínez-Verdú, F. M.: The minimum number of measurements for colour, sparkle, and graininess characterisation in gonio-apparent panels, *Coloration Technology*, 2015. 131(4), pp. 303-309.
24. Chouikha, M. B., Placais, B., Pouleau, G., Sautot, S., Viénot, F.: Benefits and Drawbacks of two Methods for Characterizing Digital Cameras, *Conference on Colour in Graphics*,

- Imaging, and Vision, CGIV 2006 Final Program and Proceedings, IS&T, 2006. pp. 185-188(4).
25. Chu, C. Feng, X.: Preliminary studies on color space conversion from RGB to L*a*b* using nonlinear neural networks, Quad Tech Internal Report, April 30, 1996.
 26. Chuan, Z., Shi-Sheng, Z.: Research on color space transformation model between RGB and L*a*b* based on BP neural network. 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. 12-14 Dec. 2008, Wuhan, China. Vol. 6. pp. 306-308.
 27. CIE, 1986.: CIE Recommendations on Colorimetry, Second Ed. Publication CIE 15.2-1986, ISBN 3 900 734 00 3.
 28. CIE/IEC 17.4:1987.: International Lighting Vocabulary, ISBN 978 3 900734 07 7.
 29. CIE, 1995.: Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, CIE Publication 13.3-1995, ISBN: 978 3 900734 57 2.
 30. CIE, 2004.: CIE 15: Technical Report: Colorimetry, 3rd Edition. ISBN 3 901 906 33 9.
 31. CIE, 2007.: Colour Rendering of White LED Light Sources, CIE Technical Report 177:2007, CIE Lighting Quality & Energy Efficiency Conference, March 3-5, 2016, Melbourne, Australia. ISBN: 9783 901906 57 2.
 32. Coffin, D. J.: Decoding raw digital photos in Linux, [Online] Available at: www.cybercom.net/~dcoffin/dcrow [Accessed March 2013]
 33. Cohen, J.: Statistical power analysis for the behavioural sciences, 2nd Ed. 1988. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
 34. Cramer, W.R, Gabel, P. W.: Measuring special effect – A Comparison of Various Spectrophotometers. Paint and Coating Industry Magazine, 2001. No. 9, pp. 36-46.
 35. Cramer, W. R.: Characterization of Interference Pigments [Online] Available at: <http://web.ua.es/es/gvc/documentos/docs/cramer/cramer5.pdf> [Accessed June 21, 2013].

D.

36. Darling, D.: Encyclopedia of science. [Online] Available at: <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/D/diffgrating.html> [Accessed: July 21, 2015]
37. Davidson, M. W.: Concepts in Digital Imaging Technology, Quantum Efficiency. Graphics & Webb Programming Team, The Florida State University. [Online] Available at: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/quantumefficiency.html> [Accessed January 12, 2016]
38. Deb, K.: Multi-objective optimization using evolutionary algorithms, Vol. 16. New York: John Wiley & Sons, 2001. ISBN: 978-0-471-87339-6.
39. De Lasarte, M., Arjona, M., Vilaseca, M., Pujol, J: Influence of the Number of Samples of the Training Set on Accuracy of Color Measurement and Spectral Reconstruction, JIST, 2010, 54(3), pp. 30501-1-30501-10.
40. De Lasarte, M., Arjona, M., Vilaseca, M., Martínez-Verdú, F. M., Pujol, J.: Luminance adaptation model for increasing the dynamic range of an imaging system based on a CCD camera, Optik, 2011, 122(15), pp. 1367-1372.

41. Demuth, H., Beale, M., Hagan, M.: *Neural Network Toolbox – User’s Guide*, The MathWorksInc, Natick, 2010.
42. Du, K-L., Swamy, M. N. S.: *Neural Networks and Statistical Learning*. Springer: Verlag London, 2013. ISBN 978-1-4471-5570-6.

E.

43. Eldred, N. R.: *What the printer should know about ink*, Sewickley: GATFPRESS, 2001. ISBN: 978-0883622841.
44. Eid, T.: *Challenges for automated Measurement Systems*, BYK-Gardner European User Meeting Innsbruck 2013.
45. Eckhard, T., Valero, E. M., Hernández-Andrés, J., Schnitzlein, M.: Adaptive Global Training Set Selection for Spectral Estimation of Printed Inks Using Reflectance Modeling, *Applied Optics*, 53(4), 2014. pp. 709-719.

F.

46. Fairchild, M.: *Color Appearance Models*. Chichester: John Wiley and Sons, 2005. ISBN: 0-470-01216-1.
47. Fang, J., Xu, H., Wang, Z., Wu, X.: Colorimetric characterization of digital cameras with unrestricted capture settings applicable for different illumination circumstances, *Journal of Modern Optics*, 63(9), pp. 847-860.
48. Fdhal, N., Kyan, M., Androustos, D., Sharma, A.: Color Space Transformation from RGB to CIELAB Using Neural Networks, *Advances in Multimedia Information Processing - PCM 2009*, Volume 5879 of the series Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg. pp 1011-1017. ISBN 978-3-642-10466-4.
49. Ferrero, A., Rabal, A.M., Campos, J., Martínez-Verdú, F., Chorro, E., Perales, E., Pons, A., Hernanz, M.L.: Spectral BRDF-based determination of proper measurement geometries to characterize color shift of special effect coatings, *J. Opt. Soc. Am. A*, 2013, 30, pp. 206–214.
50. Ferrero, A., Perales, E., Rabal, A. M., Campos, J., Martínez- Verdú, F. M., Chorro, E., Pons, A.: Color representation and interpretation of special effect coatings, *J. Opt. Soc. Am. A*, 2014., 31(2), pp. 436–447.
51. Ferrero, A., Campos, J., Perales, E., Rabal, A. M., Martínez- Verdú, F. M., Pons, A., Chorro, E., Hernanz, M. L.: Measuring and specifying goniochromatic colors, In the Proceedings of 23rd ICO conference, Santiago de Compostela, Spain, 26-29 August 2014, pp. 1-3.
52. Ferrero, A. Campos, J., Perales, E., Martínez-Verdú, F.M., Van der Lans, I., Kirchner, E.: Global color estimation of special-effect coatings from measurements by commercially available portable multiangle spectrophotometers, *JOSA A*, 2015. 32(1), pp.1-10.
53. Fraser, B., Murphy, C., Buntig, F.: *Real world color management*, Second Ed. Industrial Strength Production Techniques, 2005. Berkeley: Peachpit Press. ISBN: 0-321-26722-2.

54. Freeman, M.: *The Low Light Photography Field Guide: The Essential Guide to Getting Perfect Images in Challenging Light*, Oxford: Taylor & Francis Ltd, 2011. ISBN13 9780240820804.

G.

55. Gebeješ, A., Tomić, I., Karlović, I., Jurič, I.: Evaluation of the algorithms for recovering reflectance from virtual digital camera response, *JGED - Journal of Graphic Engineering and Design*, 2012, Vol. 3, No. 2. pp. 23-30.
56. Gebeješ, A., Martinez Domingo, M.A., Heikkinen, V., Tomić, I.: Reflectance recovery for coated printed color samples via multiangular RGB camera measurements, *Proc. of Color and Visual Computing Symposium - CVCS*, Norwegian Color and Visual Computing Laboratory, Gjøvik, Norway, 2013. pp. 1-6.
57. Gen, M., Cheng, R.: *Genetic Algorithms and Engineering Design*. New York: John Wiley & Sons, 1997. ISBN: 9780471127413.
58. González, R. C., Woods, R. E., Eddinns, S.L.: *Digital Image Processing Using MATLAB*, Second Ed. 2009. Gatesmark Publishing. ISBN: 978-0982085400.
59. GretagMacbeth, 2001: ColorEye® 640 & 74 [Online] Available at: http://www.xrite.com/documents/literature/gmb/en/coloreye-740_brochure_en.pdf [Accessed: November 11, 2015]
60. Guo, X., Houser, K. W.: A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources, *Lighting Research and Technology*, 2004. 36 (3): pp. 183–199.
61. Gupte, V. C.: Expressing colours numerically, In: *Colour measurement: Principles, advances and industrial applications*, Gulrajani, M.L (Ed.). 2010. Cambridge: Woodhead Publishing. ISBN: 1845695593.
62. Guo, X., Houser, K.: A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources, *Lighting Research and Technology*, 2004. 36 (3). pp.183–199.
63. Gurney, K.: *Neural Networks for Perceptual Processing: From Simulation Tools to Theories*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007. 362(1479), pp. 339–53.

H.

64. Hagan, M. T., Demuth, H.B., Beale, M. H., De Jesús, O.: *Neural Network Design*, 2nd Ed. e-book. ISBN-10: 0-9717321-1-6 [Online] Available at: <http://hagan.okstate.edu/NNDesign.pdf> [Accessed April 10, 2015]
65. Harderberg, J. Y., Brettel, H., Schmitt, F. J. M.: Spectral characterisation of electronic cameras, In the *Proc. of SPIE 3409, Electronic Imaging: Processing, Printing, and Publishing in Color*, SPIE, Bellingham, WA, 1998, pp. 100-109.
66. Hardeberg, J. Y.: *Acquisition and reproduction of color images: colorimetric and multispectral approaches*, PhD thesis, 2001. Parkland: Universal Publishers. ISBN-13: 978-1581121353.

67. Haupt, R. L., Haupt, S. E.: Practical Genetic Algorithms, 2nd Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. ISBN: 978-0-471-45565-3.
68. He, X-F.: Trilinear Cameras Offer High Speed Color-Imaging Solutions, Photonics Spectra, Laurin Publishing, May 2013. [Online] Available at: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=53763> [Accessed October 10, 2015]
69. Heikkinen, V., Jetsu, T., Parkkinen, J., Hauta-Kasari, M., Jääskeläinen, T., and Lee, S.D.: Regularized learning framework in estimation of reflectance spectra from camera responses, Journal of the Optical Society of America A, 2007, Vol. 24(9), pp. 2673-2683.
70. Hetch E.: Optics, 4th Ed. 2001. San Francisco: Adison Wesley. ISBN: 978-0805385663.
71. Hong, G., Luo, M. R., Rhodes, P. A.: A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling, Color Research & Application, 2001, Vol 26, No.1, pp. 76-84.
72. Huber Group: Pearlescent effects in offset printing - Finishing in the inking unit, Technical information, March 2002. [Online] Available at: <http://www.druckfarben.gr/en/inks/PEARLESCENT1.pdf> [Accessed May 10, 2014]
73. Hunt, R. W. G, Pointer, M.R.: Measuring color, Fourth Ed. 2011. Chichester: John Wiley and Sons. ISBN: 978-1-119-97537-3.
74. Hunter, R., Harold, R. W.: The measurement of appearance, Second Edition. 1987. New York: John Wiley and Sons. pp. 75-89. ISBN: 978-0-471-83006-1.
75. Hünerhoff, D., Grusemann, U., Höpe, A.: New robot-based gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflection, Metrologia 43(2), 2006. pp. S11-S16.
76. Hupp, H., Dörsam, E.: Quality control for printed interference colours - investigation for a basic measuring geometry. In Proceedings of the 34th International Research Conference of IARIGAI, 2007, pp. 257-266.

I.

77. Ihara U.S. Inc.: Agile Radiant - Colour Viewing Cabinets, Operating manual. 2005. [Online] Available at: <http://iharaus.com/pdf/AgileRadiantLightbox.pdf> [Accessed May 16, 2009].
78. ISO: ISO 12641:1997 Graphic technology -- Prepress digital data exchange -- Colour targets for input scanner calibration, ISO, Geneva. [Online] Available at: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=2079 [Accessed July 19, 2014].
79. ISO/CIE: ISO 11664-1:2007 (CIE S 014-1/E:2006), Colorimetry -- Part 1: CIE standard colorimetric observers, ISO, Geneva. [Online] Available at: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=52495 [Accessed September 21, 2015].
80. ISO: ISO 17321-1:2006 Graphic technology and photography -- Colour characterisation of digital still cameras (DSCs) -- Part 1: Stimuli, metrology and test procedures, ISO, Geneva [Online] Available at: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=35835 [Accessed April 12, 2015].

81. ISO: ISO 12647-2:2013 Graphic technology: Process control for the production of half-tone color separations, proof and production prints, ISO, Geneva [Online] Available at: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=57833 [Accessed March 19, 2014].
82. ISO: ISO 15739:2013 Photography -- Electronic still-picture imaging -- Noise measurements, ISO, Geneva [Online] Available at: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=59420 [Accessed April 08, 2015].

J.

83. Jang, S-W., Kim, E-S., Lee, S-H., Sohng, K-I.: Adaptive Colorimetric Characterization of Digital Camera with White Balance, In M. Kamel, A. Campilho (Eds.) *Image Analysis and Recognition, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3656, Berlin: Springer-Verlag, 2005. pp. 712–719.
84. Johnson, A.J.: Methods for characterizing colour scanners and digital cameras, In: *Colour Engineering*, P. Green and L.W. MacDonald (Eds), 2002. Chichester: John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-48688-6

K.

85. Kang, H.R.: *Computational color technology*, Vol. PM159. 2006. SPIE Press. ISBN: 9780819461193
86. Kaushik, P., Sharma, Y.: Comparison Of Different Image Enhancement Techniques Based Upon Psnr & Mse. *International Journal of Applied Engineering Research*, 7(11). pp. 2010-2014. ISSN 0973-4562.
87. Kehren, K.: *Optical Properties and Visual Appearance of Printed Special Effect Colors*, PhD dissertation, TU Darmstadt, 2013.
88. Kingslake, R.: *Optics in Photography*, 1992. Bellingham: SPIE. ISBN: 0-8194-0763-1.
89. Kinoshita, S., Yoshioka, S., Miyazaki, J.: Physics of structural colors, *Reports on Progress in Physics*, 71, 2008. Pp. 1-30.
90. Kim, M. H., Kautz, J.: Characterization for High Dynamic Range Imaging, *Computer Graphics Forum*, 2008, 27(2), pp. 691–697.
91. Kim, D. B., Jang, I. Y., Choi, H. K., Lee, K. H.: Recovery and representation of spectral bidirectional reflectance distribution function from an image-based measurement system, *Color Research & Application – Early View*, pp. 1-14. (2015) website: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/col.21973/> accessed May 2016.
92. Kipphan, H: *Handbook of Print Media*, 2001. Heidelberg: Springer. pp. 105-107. ISBN: 978-3-642-63142-9.
93. Kirchner, E., Cramer, W.: Making sense of measurement geometries for multi-angle spectrophotometers, *Color Research & Application*, 2012, 37(3), pp. 186–198.
94. Klein, G. A.: *Industrial Color Physics*. 2010. London: Springer. ISBN: 978-1-4419-1197-1.

95. Koenig & Bauer AG.: QualiTronic Professional [Online] Available at: <http://www2.kba.com/gb/sheetfed-offset/measuring-technology/quality-measuring/qualitronic-professional/> [Accessed May 12, 2015].
96. Kolorjet Chemicals Pvt. Ltd.: Pearlescent Pigments [Online] Available at: <http://www.dyes-pigments.com/pearlescent.html> [Accessed June 21, 2015].
97. Konica Minolta: Multi-Angle Spectrophotometer CM-512m3A, Technical Specifications, 2011-2015. [Online] Available at: http://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/color/pdf/cm512m3a_catalog_eng.pdf [Accessed December 11, 2015]
98. Konica Minolta: Precise Color Communication, Part II, 2016. [Online] Available at: <http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part2/07.html> [Accessed: April 21, 2015]
99. Krenker, A., Bešter, J., Kos. A.: Introduction to the Artificial Neural Networks, In Suzuki, K. (Ed.) Artificial Neural Networks - Methodological Advances and Biomedical Applications, 2011. Rijeka: InTech. ISBN 978-953-307-243-2.

L.

100. Lam, W.: Spectrophotometer Light Sources, X-Rite Technical Report, 2000. pp.1-2.
101. Lazar, M., Hladnik, A., Javoršek, D., Jerman, Tim.: Prediction of RGB Camera Values by Means of Artificial Neural Networks. In the Proceedings of XI Symposium of Graphic Arts, 17-18 June 2013, Pardubice, Czech Republic. Pp. 185-194.
102. Leverington, D.: A Basic Introduction to Feedforward Backpropagation Neural Networks, Texas Tech University, 2009. [Online] Available at: http://www.webpages.ttu.edu/dleverin/neural_network/neural_networks.html [Accessed February 18, 2016]
103. Lewis, P. A. (Ed.): Pigment Handbook. 1998. John Wiley & Sons, New York, p. 829. ISBN: 978-0-471-82833-4.
104. León, K., Mery, D., Pedreschi, F., León, J.: Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images, Food Research International, 39(10), December 2006, Pp. 1084-1091, ISSN 0963-9969.
105. Liu, Y., Yu, H., Shi, J.: Camera characterization using back-propagation artificial neural network based on Munsell system, Proc. SPIE 6621, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007, Photoelectronic Imaging and Detection. doi:10.1117/12.790592;
106. Long, B.: Complete Digital Photography, 6th Ed. 2012. Boston: Cengage Learning. ISBN-13: 978-4354-5920-5.

M.

107. Maile, F. J., Reynders, P.: Substrates for pearlescent pigments, European Coatings Journal, No. 4, 2003., pp. 124-131.

108. Maile, F. J., Pfaff, G., Reynders, P.: Effect pigments—past, present and future, *Progress in Organic Coatings*. 2005, Vol. 54, pp. 150–163.
109. Martínez-Verdú, M., Pujol, J., Capilla, P.: Calculation of the Color Matching Functions of Digital Cameras from Their Complete Spectral Sensitivities, *J. Imaging Sci. Technol.*, 2002, 46, pp. 15-25.
110. Martínez-Verdú, F., Pujol, J., Capilla, P.: Characterization of a Digital Camera as an Absolute Tristimulus Colorimeter, *JIST*, 2003, Vol 47, No. 4, pp. 279-374.
111. Martínez-Verdú, F., Chorro, E., Perales, E., Vilaseca, M., Pujol, J.: Camera-based color measurement, In: M. L. Gulrajani (Ed.) *Color measurement: Principles, advances and industrial applications*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2010, pp. 147-166.
112. Martínez-Verdú, F.: Characterization of goniochromism: current status and pending challenges, CIMET course lecture, Granada, Spain, 2011. [Online] Available at: <http://web.ua.es/en/gvc/documentos/cimet-2011-goniochromism.pdf> [Accessed June 21, 2015]
113. MathWorks, 2015: MATLAB – The language of technical computing [Online] Available at: <http://www.mathworks.com/products/matlab/> [Accessed June 26, 2015]
114. Matsapey, N., Faucheu, J., Flury, M., Delafosse, D.: Design of a gonio-spectrophotometer for optical characterization of gonio-apparent materials, *Measurement Science and Technology*, 24 (2013) pp. 1-10.
115. Meadows, M. G., Butler, M.W., Morehouse, N. I., Taylor, L. A., Toomey, M. B., McGraw, K. J., Ronald, L.: Iridescence: views from many angles, *Journal of the Royal Society Interface*, No. 6, 2009. pp. S107–S113
116. Mehta, N.: *Textbook of Engineering Physics, Part I*. 2008. New Delhi: PHI Learning Private Limited. ISBN: 978-81-203-3361-1.
117. Merck KGaA, 2015: For Extraordinary Prints: Effect Pigments from Merck [Online] Available at: <http://www.merck-performance-materials.com/en/printing/printing.html> [Accessed: August 03, 2015]
118. Merck KGaA, 2015b: Iriodin® – for Coatings with Unique Luster and Color Effects [Online] Available at: http://www.merck-performance-materials.com/en/coatings/coatings_iriodin/coatings_iriodin.html [Accessed: August 03, 2015]
119. Mitchell, M.: *An introduction to genetic algorithms*. Cambridge: MIT press, 1998. ISBN 0–262–13316–4
120. Monie, S.A., Stief, B.C., Krupkin, N.V.: Evaluation of Glossy Inkjet Papers Using Distinctness of Image (DOI) Measurement, *IS&T NIP19*, 2003. pp. 763-768.

N.

121. Nadal, M. E., Early, E. A.: Color measurements for pearlescent coatings, *Color Research and Application*, 2004, Vol. 29, pp. 38–42.

122. Nussbaum, P.: Colour Measurement and Print Quality Assessment in a Colour Managed Printing Workflow. Doctoral Dissertation, Faculty of Mathematics and Natural Science, University of Oslo, 2010. ISSN 1501-7710.
123. Nyström, D: Colorimetric and Multispectral Image Acquisition, Licentiate Thesis, Linköping University, Institute of Technology, 2006.

O.

124. Ohno, Y.: CIE Fundamentals for Color Measurements, NIP & Digital Fabrication Conference, 2000 International Conference on Digital Printing Technologies. 2000. Pp. 425-873.
125. Ohno, Y.: Fundamentals of Colorimetry and Practical Color Measurement. UNEP GELC Lamp Performance Testing Training Workshop April 22-24, 2015, Beijing. [Online] Available at:
http://www.lites.asia/files/otherfiles/0000/0413/Session_2_Fundamentals_of_Colorimetry_and_Practical_Color_Measurements.pdf [Accessed March 9, 2016]
126. Ohta, N., Robertson, A. R.: Colorimetry: Fundamentals and Application. 2005. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. ISBN: 978-0-470-09472-3.
127. Oleari. C.: Standard Colorimetry: Definitions, Algorithms and Software. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.

P.

128. Pallant, J.: Spss Survival Manual: A step by step guide to data analysis using SPSS (Version 15), Third Ed. 2007. Crows Nest:Allen&Unwin.
129. Pedersen, M., Bonnier, N., Hardeberg, J. Y., Albregtsen, F.: Attributes of a New Image Quality Model for Color Prints, 17th Color Imaging Conference Final Program and Proceedings, Albuquerque, New Mexico, November 2009. pp. 204-209.
130. Pešterac, Č.: Reprodukciona tehnika, skripta. Grafičko inženjerstvo i dizajn, Fakultet tehničkih nauka, 2007.
131. Pfaff, G. (ed.): Special Effect Pigments, 2nd Ed. 2008. Hannover: Vincentz Network. ISBN: 978-0-8155-1566-1.
132. Pfaff, G.: Special Effect Pigments. In: Faulkner, E. B. & Schwartz, R. J. (eds.) High Performance Pigments, 2nd Ed. 2009. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. ISBN: 978-3-527-31405-8.
133. Pot, M.: Veštačka inteligencija - skripta. Visoka tehnička škola, Subotica. 2011. [Online] Available at: people.vts.su.ac.rs/~pmiki/AI/Vest%20Int%20Skripta%20Pot%20Miklos.doc [Accessed April 12, 2015]

R.

134. Rabal, A. M., Ferrero, A., Campos, J., Fontecha, J. L., Pons, A., Rubiño, A. M., Corróns, A.: Automatic gonio-spectrophotometer for the absolute measurement of the spectral BRDF at in- and out-of-plane and retroreflection geometries, *Metrologia* 49, 2012. pp. 213-223.
135. Ram Charan: Application, Characteristics and Information of Pearl Pigments, *Product Development information*, Vol. 3, No. 4., July 2013. [Online] Available at: <http://www.ramcharan.org/pdf/Pearl%20Pigments.pdf> [Accessed September 21, 2014]
136. Rand, G., Litschel, D., Davis, R.: *Digital Photographic Capture*, 2005. Burlington: Focal Press. ISBN 0-240-80632-8.
137. Robert, T.: Green ink in all colors - Printing ink from renewable resources, *Progress in Organic Coatings*, vol. 78, 2015. pp. 287-292.
138. Rojas, R.: *Neural Networks: A Systematic Introduction*. Berlin: Springer, 1996. ISBN-13: 978-3-540-60505-8.
139. Rösler, G.: Multigeometry Color Measurement of Effect Surfaces: Results, Possibilities and Limitations, *Die Farbe*, 1990. Vol. 37, pp.111-121.

S.

140. Sakoda, K.: *Optical Properties of Photonic Crystals*, Berlin: Springer, 2001.
141. Shanda, J.: CIE Standards for assessing quality of light sources, Short Report. University of Pannonia, Veszprém. [Online] Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.42.3077&rep=rep1&type=pdf> [Accessed: November 11, 2015]
142. Sharma, G.: *Digital Imaging Handbook*. Ch. 1. Color Fundamentals for Digital Imaging. Boca Raton: CLC Press. 2003. ISBN: 0-8493-0900-X.
143. Shevell, S. K.: *The Science of Color*, Second Ed. Oxford: Elsevier. 2003. ISBN 0-444-512-519.
144. Sekonic Corporation, 2014.: *Sekonic DIGITALMASTER L-758DR, L-758D, L-758Cine - Operating Manual* [Online] Available at: http://www.sekonic.com/downloads/l-758_english.pdf [Accessed November 7, 2015]
145. Seymour, J.: Color measurement with an RGB camera, In *Proc. TAGA - Technical Association of the Graphic Arts, Proceedings of the 61st Annual Meeting*, New Orleans, LA, USA, 2009, pp. 79-105.
146. Seymour, J.: Why do color transforms work? In the *Proceedings of IS&T's 49th Annual Conference*, May 19-24, 1996. Minneapolis, Minnesota. Society for Imaging Science. pp. 1-8.
147. Sharma, K. K.: *Optics – Principles and Applications*, 2006. Burlington: Elsevier Inc. ISBN: 978-0-12-370611-9.

148. Shiomi, H., Misaki, E., Adachi, M., Suzuki, F.: High chroma pearlescent pigments designed by optical simulation, *Journal of Coatings Technology and Research*, 2008, Vol. 5, No. 4. pp. 455-464.
149. Sole, A., Farup, I., Tominaga, S.: An image based multi-angle method for estimating reflection geometries of flexible objects, In the Proceedings of 22nd Color and Imaging Conference Final Program and 2nd Congress of the International Academy of Digital Pathology, November 3-7, 2014, Society for Imaging Science and Technology, Boston, Massachusetts. pp. 91-96.
150. Solli, M., Andersson, M., Kruse, B., Lenz, R.: Digital Camera Characterization for Color Measurements, 2005, Beijing International Conference on Imaging: Technology and Applications for the 21st Century. pp. 278-279.
151. Spratlin, T.L., Simpson, M. L.: Color measurements using a colorimeter and a CCD camera, SPIE Vol. 1670 Color Hard Copy and Graphic Arts, 1992, pp. 375-385.
152. Srinivasarao M.: Nano-Optics in the Biological World: Beetles, Butterflies, Birds, and Moths, *Chem. Rev.*, 1999, No. 99, pp. 1935–1961.
153. Stone, M.C.: *A Field Guide to Digital Color*, 2003. Boca Raton: CRC Press. ISBN: 978-1-4665-7833-3.

T.

154. Teany, S., Pfaff, G., Nitta, K.: New effect pigments using innovative substrates, *European Coatings Journal*, No. 4, 1999. pp. 90-96.
155. Tilley, R. J. D.: Irridescence (Goniochromism). In: Luo, R. (Ed), *Encyclopedia of Color Science and Technology*, 2013. New York: Springer. ISBN: 978-3-642-27851-8.
156. Tomić I., Ljumić Z., Đokić M.: Spatially uniform and varying HDR tone mapping techniques evaluation, 5. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, Graphic Engineering and Design, 11-12 Novembar, 2010, pp. 177-186.
157. Tomić, I., Karlović, I., Jurič, I.: Practical Assessment of Veiling Glare in Camera Lens System. *JGED -Journal of graphic engineering and design*, 2014, Vol. 5, No.2, ISSN 2217-379X, pp. 23-28.
158. Tomić, I., Novaković, D., Gebeješ, A., Hladnik, A., Dedijer, S.: Determining color of goniochromatic prints using DSLR camera, 5th International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies, 19 – 20 November 2015, Budapest, Hungary. pp. 104-112.
159. **Tomić I.**, Dedijer S., Martínez-Cañada P., Novaković D., Hladnik A.: Camera Characterization for Colorimetric Assessment of Goniochromatic Prints, *Journal of Imaging Science and Technology*, (*Forthcoming*), Accepted for Publication 2016.
160. Tse, M-K., Briggs, J. C.: Distinctness of Image (DOI) of Inkjet Photo Papers, Proceedings of IS&T's NIP21 International Conference on Digital Printing Technologies, September 18-23, 2005, Baltimore, Maryland.

161. Tsuchida, M., Arai, H., Nishiko, M., Sakaguchi, Y., Uchiyama, T., Yamaguchi, M., Haneishi, H., Ohyama, N.: Development of BRDF and BTF measurement and computer-aided design systems based on multispectral imaging. Proceedings of AIC Colour 05, International Colour Association, Granada, Spain, Vol. 1, 2005. p 129–132.

U.

162. Umbaugh, S. E.: Digital Image Processing and Analysis: Human and Computer Vision Applications with CVIPtools, Second Ed., 2010. Boca Raton: CRC Press. ISBN 9781439802052.
163. Urban, P., Berns, R., Grigat, R. R.: Color Correction by Considering the Distribution of Metamers within the Mismatch Gamut, IS&T/SID Color Imaging Conference, 2007. Albuquerque, New Mexico. pp. 222-227.
164. U.S. Department of Energy, 2008.: LED Measurement Series: Color Rendering Index and LEDs, Technical Report PNNL-SA-56891. [Online] Available at: http://cool.conservation-us.org/byorg/us-doe/color_rendering_index.pdf [Accessed: November 11, 2015]

W.

165. Wandell B. A., Farell J. E.: Water into Wine - Converting Scanner RGB to Tristimulus XYZ, In the Proc. of SPIE 1909, Device-Independent Color Imaging and Imaging Systems Integration, 1993, pp. 92-101.
166. Wang, Z., Bovik, A. C.: Mean Squared Error: Love It or Leave It? A new look at signal fidelity measures. IEEE Signal Processing Magazine, 26(1). January 2009. pp. 98-117. ISSN: 1053-5888.
167. Weitzel, J.: Special effect pigments in printing inks. In: Pfaff, G. (Ed.) Special Effect Pigments, 2nd Ed. 2008. Hannover: Vincentz Network. ISBN: 978-0-8155-1566-1.
168. Weixel, S.: BYK-mac with smart-chart The QC Solution for Effect Coatings, 9th BYK-Gardner User Meeting, Bad Tölz, Germany - November 2010.
169. Westland, S., Ripamonti, C., Cheung, V.: Computational Colour Science Using MATLAB, 2nd Edition, 2012. Chichester: John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-66569-5
170. Widenhorn, R., Blouke, M. M., Weber, A., Rest, A., Bodegom, E.: Temperature Dependence of Dark Current in a CCD, Proc. SPIE 4669, Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications III, 193, April 26, 2002. pp. 193-201.
171. Widenhorn, R., Dunlap, J.C., Bodegom, E.: Dark Current in Consumer Cameras: Not What you Expect, Photonics Media, 2010. [Online] Available at: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=44298> [Accessed: September 22, 2015]
172. White, H.: Connectionist nonparametric regression: Multilayer feedforward networks can learn arbitrary mappings, Neural Networks, 1990, 3(50), pp. 535-549.
173. Wolin, D., Johnson, K., Kipman, Y.: The Importance of Objective Analysis in Image Quality Evaluation, Proc. of IS&Ts NIP 14: 1998 International Conference on Digital Printing Technologies, Springfield, VA, 1998, pp.603-606.

174. Wu, W., Allebach, J. P., Analoui, M.: Imaging Colorimetry Using a Digital Camera, JIST, 2000, Vol. 44, pp. 267-279.
175. Wyszecki, G., Stiles, W.S.: Color Science - Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, Second Ed. Chichester: John Wiley & Sons. 2000.

X.

176. Xerox Corporation, 2010: Xerox DocuColor® 252/260, Easy affordable color for any environment [Online] Available at: <http://www.office.xerox.com/latest/D60BR-01E.PDF> [Accessed August 15, 2014]
177. X-Rite, 2006: Eye-One color management system [Online] Available at: http://www.xrite.com/documents/literature/gmb/en/Eye-One_Monitor_Solutions_en.pdf [Accessed August 15, 2015]
178. X-Rite, 2009: ColorChecker – Product Line Comparison [Online] Available at: http://xritephoto.com/documents/literature/en/L11-268_CC_Comparison_en.pdf [Accessed November 10, 2015]
179. X-Rite: X-Rite MA98 Portable Multi-Angle Spectrophotometers, Technical Specifications, 2010. [Online] Available at: https://www.xrite.com/documents/literature/en/L10-372_MA98_en.pdf [Accessed December 11, 2015]

Y.

180. Yu, L., Wang, S., Lai, K. K.: Foreign-Exchange-Rate Forecasting with Artificial Neural Networks, Part II - Basic Learning Principles of Artificial Neural Networks and Data Preparation. 2007. Springer:New York, ISBN: 978-0-387-71719-7.

11. Prilozi

PRILOG 1

Tabela P1. 1. Vrednosti boja test karte definisane u CIELAB prostoru boja

| Oznaka polja | L* | a* | b* | Oznaka polja | L* | a* | b* |
|--------------|-------|-------|--------|--------------|-------|--------|--------|
| A1 | 20.73 | 10.89 | 3.45 | C9 | 71.35 | 2.9 | 8.88 |
| A2 | 20.28 | 24.18 | 7.8 | C10 | 72.13 | 6.65 | 14.88 |
| A3 | 21.74 | 36.53 | 12.01 | C11 | 73.15 | 12.71 | 23.94 |
| A4 | 24.32 | 41.05 | 13.58 | C12 | 73.19 | 17.79 | 34.22 |
| A5 | 40.62 | 15.07 | 5.91 | C13 | 82.82 | -13.73 | -10.23 |
| A6 | 40.55 | 28.61 | 9.98 | C14 | 80.18 | 18.11 | -10.47 |
| A7 | 40.08 | 40.84 | 11.97 | C15 | 87.75 | 0.5 | 21.16 |
| A8 | 40.6 | 53.53 | 16.27 | C16 | 71.99 | 0.74 | 1.86 |
| A9 | 68.53 | 5.67 | 2.71 | C17 | 78.19 | 15.99 | 10.01 |
| A10 | 68.29 | 10.43 | 4.76 | C18 | 80.76 | -14.21 | 11.12 |
| A11 | 68.87 | 18.94 | 6.91 | C19 | 74.19 | 3.01 | -16.42 |
| A12 | 69.24 | 27.16 | 9.39 | C20 | 15.71 | 11.26 | 8.96 |
| A13 | 89.76 | -0.42 | -2.7 | C21 | 51.72 | 28.1 | 30.17 |
| A14 | 90.23 | 1.37 | -2 | C22 | 66.48 | 10.39 | 9.84 |
| A15 | 90.01 | 0.85 | 1.55 | D1 | 26.21 | -2.82 | 10.99 |
| A16 | 89.2 | -0.3 | 0.62 | D2 | 25.84 | -2.94 | 20.38 |
| A17 | 89.87 | 1.1 | 1.44 | D3 | 27.11 | -2.83 | 23.27 |
| A18 | 89.33 | -0.57 | 0.98 | D4 | 27.09 | -3.02 | 23.37 |
| A19 | 89.35 | 0 | -1.94 | D5 | 58.9 | -1.85 | 19.09 |
| A20 | 10.06 | 8.11 | 0.65 | D6 | 58.59 | -1.44 | 38.35 |
| A21 | 23.22 | 36.11 | 21.73 | D7 | 57.89 | -2.18 | 55.46 |
| A22 | 29.74 | 48.36 | 32.21 | D8 | 59.97 | -2.32 | 69.57 |
| B1 | 20.48 | 7.07 | 8.51 | D9 | 75.89 | -1.72 | 10.53 |
| B2 | 20.86 | 17.08 | 16.4 | D10 | 76.57 | -2.38 | 18.49 |
| B3 | 24.35 | 27.33 | 22.44 | D11 | 77.53 | -4.42 | 27.53 |
| B4 | 24.43 | 28.61 | 22.44 | D12 | 79.13 | -5.05 | 37.49 |
| B5 | 40.43 | 14.94 | 14.78 | D13 | 79.7 | -18.55 | -13.19 |
| B6 | 40.28 | 26.67 | 25.2 | D14 | 75.69 | 24.78 | -13.62 |
| B7 | 39.82 | 38.56 | 35.74 | D15 | 86.84 | 0.94 | 28.17 |
| B8 | 40.18 | 48.49 | 42.86 | D16 | 65.01 | 1.29 | 1.19 |
| B9 | 68.35 | 5.07 | 5.16 | D17 | 73.3 | 21.86 | 12.3 |
| B10 | 67.72 | 10.22 | 8.68 | D18 | 76.74 | -19.56 | 13.59 |
| B11 | 68.38 | 16.59 | 14 | D19 | 67.73 | 4.3 | -21.88 |
| B12 | 69.21 | 23.71 | 19.22 | D20 | 42.73 | 27.09 | 30.74 |
| B13 | 85.61 | -8.73 | -7.32 | D21 | 56.76 | 7.03 | 10.2 |
| B14 | 84.99 | 10.38 | -6.67 | D22 | 69.91 | 6.7 | 9.02 |
| B15 | 88.76 | 0.37 | 12.98 | E1 | 25.5 | -8.52 | 9.77 |
| B16 | 79.35 | -0.63 | 1.63 | E2 | 24.76 | -13.47 | 18.1 |
| B17 | 83.44 | 9.36 | 7.2 | E3 | 27.32 | -17.58 | 22.54 |
| B18 | 84.37 | -9.11 | 7.13 | E4 | 27.11 | -17.65 | 22.33 |
| B19 | 80.62 | 1.06 | -10.74 | E5 | 44.46 | -9.47 | 13.91 |
| B20 | 17.79 | 20.12 | 12.41 | E6 | 43.75 | -16.56 | 27.49 |
| B21 | 28.39 | 45.16 | 30.04 | E7 | 42.36 | -23.69 | 39.72 |
| B22 | 60.04 | 18.48 | 13.63 | E8 | 44.5 | -28.27 | 45.67 |
| C1 | 26.56 | 2.42 | 11.12 | E9 | 66.82 | -4.12 | 7.32 |
| C2 | 25.77 | 6.34 | 20.38 | E10 | 67.24 | -7.29 | 12.28 |
| C3 | 28.16 | 9.58 | 25.83 | E11 | 67.15 | -10.94 | 19.66 |
| C4 | 28.34 | 10.67 | 26.12 | E12 | 69.03 | -16.65 | 27.53 |
| C5 | 54.78 | 7.04 | 20.81 | E13 | 75.27 | -24.66 | -17.24 |
| C6 | 54.2 | 15.17 | 40.54 | E14 | 70.25 | 32.37 | -16.95 |
| C7 | 54.14 | 22.75 | 60.75 | E15 | 85.69 | 1.74 | 36.89 |
| C8 | 56.29 | 28.28 | 66.7 | E16 | 56.33 | 0.38 | 0.3 |

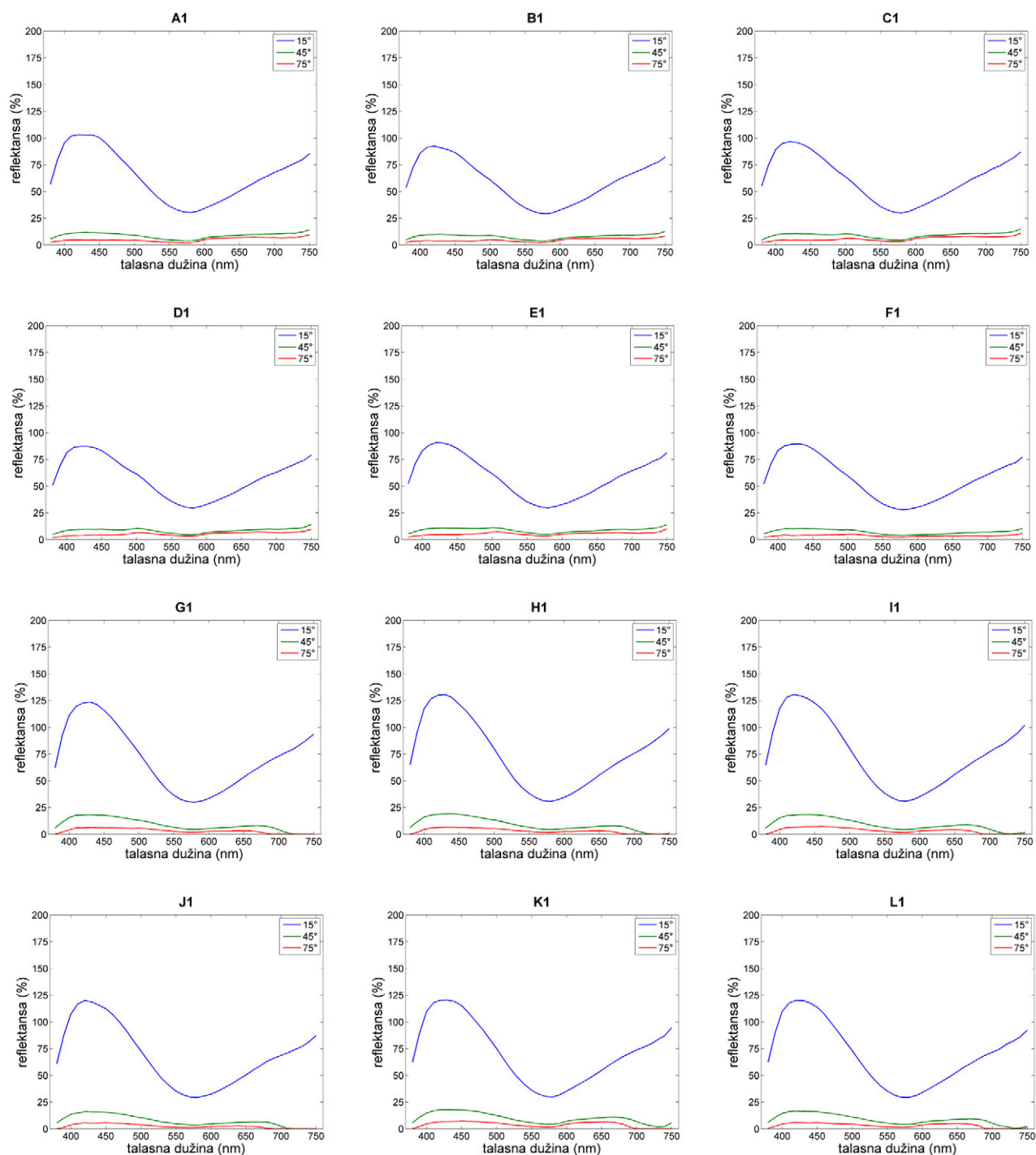
Nastavak tabele P1.1. Vrednosti boja test karte definisane u CIELAB prostoru boja

| Oznaka polja | L* | a* | b* | Oznaka polja | L* | a* | b* |
|--------------|-------|--------|--------|--------------|-------|--------|--------|
| E17 | 67.38 | 28.52 | 15.82 | H3 | 21.99 | -17.04 | -20.74 |
| E18 | 71.73 | -25.69 | 16.15 | H4 | 21.8 | -16.39 | -21.39 |
| E19 | 59.78 | 5.11 | -27.77 | H5 | 39.13 | -9.98 | -9.89 |
| E20 | 50.83 | 35 | 59.62 | H6 | 37.7 | -16.97 | -18.09 |
| E21 | 49.27 | 20.37 | 41.18 | H7 | 37.53 | -24.54 | -26.01 |
| E22 | 60.93 | 15.05 | 29.01 | H8 | 36.01 | -29.04 | -33.13 |
| F1 | 14.62 | -12.42 | 2.43 | H9 | 66.24 | -4.75 | -4.49 |
| F2 | 16.8 | -19.7 | 5.51 | H10 | 66.21 | -6.91 | -8.13 |
| F3 | 17.68 | -21.37 | 6.92 | H11 | 66.35 | -10.79 | -15.54 |
| F4 | 17.28 | -20.59 | 6.62 | H12 | 66.64 | -13.72 | -21.36 |
| F5 | 33.67 | -15.71 | 3.93 | H13 | 62.96 | -37.54 | -26.28 |
| F6 | 33.36 | -28.14 | 7.85 | H14 | 56.1 | 49.63 | -23.81 |
| F7 | 32.04 | -40.29 | 11.01 | H15 | 81.52 | 6.14 | 63.15 |
| F8 | 34.13 | -49.08 | 15.19 | H16 | 33.99 | -1.91 | 0.73 |
| F9 | 67.01 | -5.34 | 2.14 | H17 | 52.34 | 43.29 | 28.06 |
| F10 | 66.92 | -8.79 | 2.93 | H18 | 56.14 | -40.75 | 25.13 |
| F11 | 67.45 | -15.22 | 5.04 | H19 | 38.67 | 9.1 | -42.1 |
| F12 | 68.49 | -22.22 | 7.71 | H20 | 69.66 | -0.16 | 24.29 |
| F13 | 72.28 | -28.15 | -19.58 | H21 | 66.35 | -0.99 | 6.3 |
| F14 | 66.56 | 37.2 | -18.89 | H22 | 69.43 | -5.84 | 33.07 |
| F15 | 84.41 | 2.92 | 45.48 | I1 | 25.23 | -1.54 | -13.18 |
| F16 | 50.8 | 0 | 1.09 | I2 | 24.69 | 0.05 | -25.79 |
| F17 | 63.48 | 32.59 | 19.32 | I3 | 23.85 | 0.92 | -35.44 |
| F18 | 67.75 | -29.84 | 19.1 | I4 | 23.14 | 1.67 | -43.38 |
| F19 | 54.22 | 6.2 | -31.75 | I5 | 43.87 | -0.79 | -9.8 |
| F20 | 59.54 | 6.28 | 15.98 | I6 | 43.66 | -0.65 | -18.08 |
| F21 | 64.44 | 10.37 | 27.38 | I7 | 43.78 | -0.61 | -24.78 |
| F22 | 68.87 | 7.04 | 16.78 | I8 | 42.88 | 0.76 | -34.1 |
| G1 | 19.67 | -13.11 | -2.85 | I9 | 66.45 | -0.27 | -4.46 |
| G2 | 19.62 | -21.59 | -4.66 | I10 | 66.61 | 0.33 | -8.74 |
| G3 | 22.95 | -26.21 | -5.09 | I11 | 66.61 | 1.61 | -15.72 |
| G4 | 22.47 | -25.6 | -5.24 | I12 | 66.86 | 1.76 | -22.12 |
| G5 | 38.96 | -14.63 | -3.01 | I13 | 58.12 | -41.14 | -28.98 |
| G6 | 38.13 | -25.43 | -4.95 | I14 | 51.87 | 54.05 | -25.36 |
| G7 | 37.2 | -37.31 | -7.97 | I15 | 80.28 | 7.63 | 69.96 |
| G8 | 37.79 | -46.52 | -9.93 | I16 | 27.04 | -1.65 | -0.14 |
| G9 | 66.66 | -5.55 | -0.29 | I17 | 47.71 | 47.21 | 31.83 |
| G10 | 66.69 | -10.62 | -1.07 | I18 | 51.52 | -44.15 | 27.77 |
| G11 | 67.1 | -17.17 | -1.6 | I19 | 31.88 | 12.37 | -45.99 |
| G12 | 68.04 | -24.5 | -1.46 | I20 | 71.96 | -9.17 | 27.11 |
| G13 | 67.89 | -32.92 | -22.94 | I21 | 48.66 | -21.64 | 35.69 |
| G14 | 61.73 | 43.14 | -21.37 | I22 | 67.82 | -21.24 | 16.74 |
| G15 | 83.09 | 4.29 | 53.59 | J1 | 14.3 | 5.72 | -15.14 |
| G16 | 43.07 | -0.16 | 0.79 | J2 | 14.07 | 13.24 | -26.91 |
| G17 | 58.23 | 37.8 | 23.3 | J3 | 13.69 | 19.83 | -38.88 |
| G18 | 62.82 | -34.69 | 21.82 | J4 | 13.66 | 23.98 | -46.76 |
| G19 | 47.3 | 7.96 | -36.45 | J5 | 39 | 3.37 | -10.83 |
| G20 | 66.87 | 3.96 | 19.12 | J6 | 38.61 | 8.01 | -18.94 |
| G21 | 65.99 | 5.05 | 33.45 | J7 | 39.51 | 13.18 | -25.82 |
| G22 | 72.43 | 8.15 | 77.38 | J8 | 38.9 | 16.98 | -32.68 |
| H1 | 19.74 | -8.81 | -8.35 | J9 | 66.31 | 1.73 | -4.37 |
| H2 | 18.69 | -13.73 | -15.12 | J10 | 66.45 | 3.85 | -8.82 |

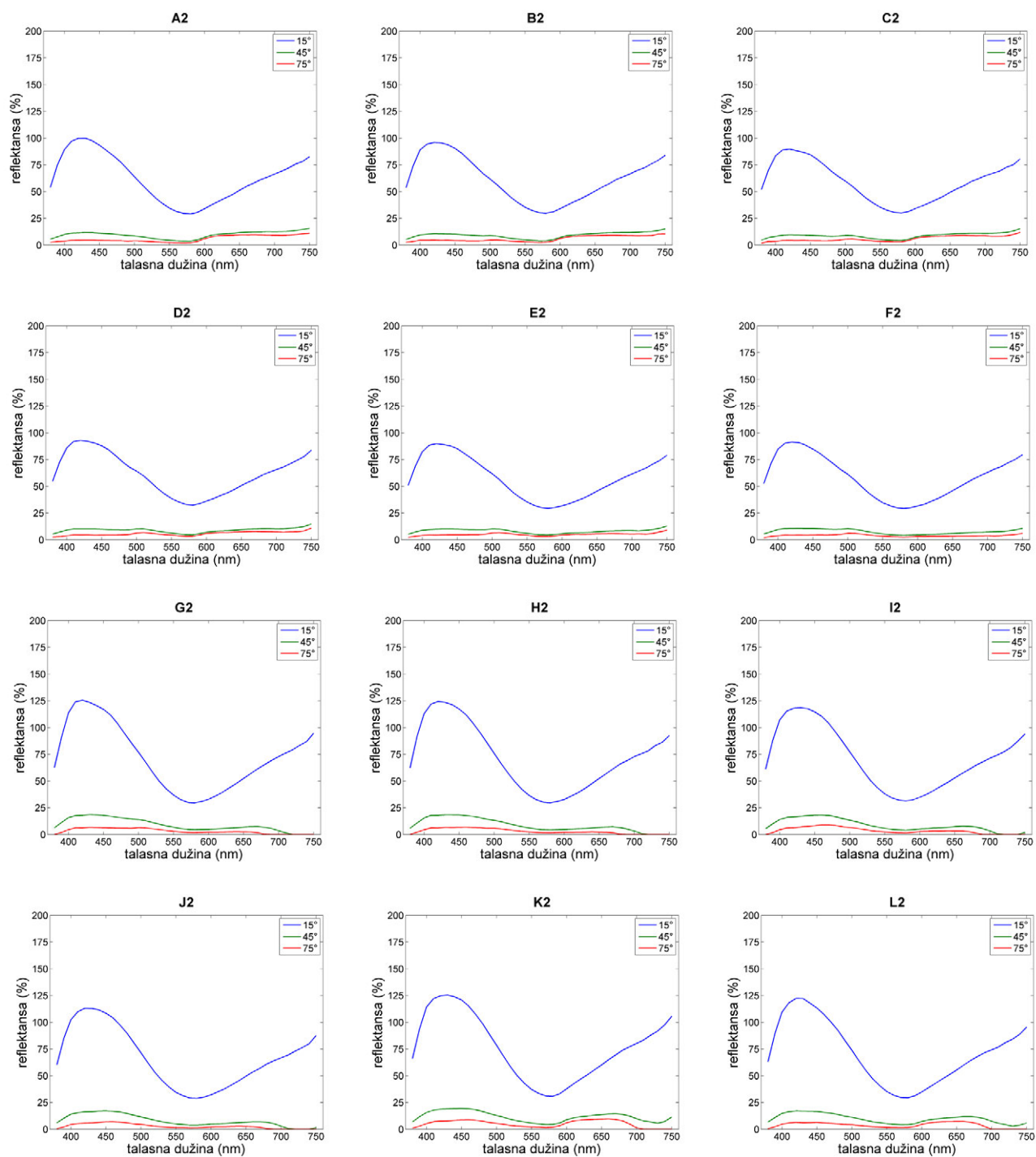
Nastavak tabele P1.1. Vrednosti boja test karte definisane u CIELAB prostoru boja

| Oznaka polja | L* | a* | b* | Oznaka polja | L* | a* | b* |
|--------------|-------|--------|--------|--------------|-------|-------|--------|
| J11 | 66.67 | 6.6 | -15.13 | L19 | 11.82 | 25.44 | -52.45 |
| J12 | 66.2 | 9.56 | -22.42 | L20 | 8.18 | -3.59 | -4.15 |
| J13 | 54.21 | -43.05 | -30.84 | L21 | 7.2 | 3.43 | -6.18 |
| J14 | 46.43 | 59.01 | -26.74 | L22 | 14.37 | 15.24 | -2.54 |
| J15 | 76.5 | 12.1 | 85.24 | GS1 | 100 | 0 | 0 |
| J16 | 18.66 | -2.34 | -0.79 | GS2 | 96 | 0 | 0 |
| J17 | 42.28 | 50.98 | 36.76 | GS3 | 92 | 0 | 0 |
| J18 | 45.46 | -47.91 | 29.97 | GS4 | 88 | 0 | 0 |
| J19 | 23.98 | 16.02 | -49.83 | GS5 | 84 | 0 | 0 |
| J20 | 66.53 | -23.07 | 8.38 | GS6 | 80 | 0 | 0 |
| J21 | 33.24 | -42.05 | 28.9 | GS7 | 76 | 0 | 0 |
| J22 | 15.64 | -17.94 | 6.71 | GS8 | 72 | 0 | 0 |
| K1 | 24.9 | 11.13 | -10.88 | GS9 | 68 | 0 | 0 |
| K2 | 24.69 | 26.15 | -20.57 | GS10 | 64 | 0 | 0 |
| K3 | 23.9 | 38.64 | -28.29 | GS11 | 60 | 0 | 0 |
| K4 | 24.33 | 47.49 | -33.17 | GS12 | 56 | 0 | 0 |
| K5 | 43.82 | 10.02 | -9.04 | GS13 | 52 | 0 | 0 |
| K6 | 42.96 | 20.58 | -16.03 | GS14 | 48 | 0 | 0 |
| K7 | 43.51 | 30.71 | -21.31 | GS15 | 44 | 0 | 0 |
| K8 | 42.77 | 42.2 | -33.25 | GS16 | 40 | 0 | 0 |
| K9 | 66.38 | 4.9 | -4.19 | GS17 | 36 | 0 | 0 |
| K10 | 65.89 | 9.72 | -7.78 | GS18 | 32 | 0 | 0 |
| K11 | 66.46 | 16.31 | -14.31 | GS19 | 28 | 0 | 0 |
| K12 | 66.75 | 21.8 | -20.1 | GS20 | 24 | 0 | 0 |
| K13 | 50.84 | -43.75 | -32.25 | GS21 | 20 | 0 | 0 |
| K14 | 41.53 | 62.39 | -27.2 | GS22 | 16 | 0 | 0 |
| K15 | 75.16 | 13.27 | 88.13 | GS23 | 12 | 0 | 0 |
| K16 | 10.33 | -1.67 | -1.48 | GS24 | 8 | 0 | 0 |
| K17 | 38.18 | 52.66 | 41.09 | GS25 | 4 | 0 | 0 |
| K18 | 36.55 | -49.41 | 32.3 | GS26 | 0 | 0 | 0 |
| K19 | 15.99 | 21.83 | -52.21 | | | | |
| K20 | 20.96 | -15.66 | 4.26 | | | | |
| K21 | 14.83 | -14.32 | -2.87 | | | | |
| K22 | 17.11 | -12.91 | -14.44 | | | | |
| L1 | 20.4 | 10.73 | -2.9 | | | | |
| L2 | 19.14 | 24.89 | -5.78 | | | | |
| L3 | 20.82 | 36.89 | -7.79 | | | | |
| L4 | 23.04 | 41.42 | -9.01 | | | | |
| L5 | 39.88 | 14.26 | -3.52 | | | | |
| L6 | 39.5 | 29.94 | -6.34 | | | | |
| L7 | 38.36 | 43.71 | -9.99 | | | | |
| L8 | 39.05 | 51.7 | -10.56 | | | | |
| L9 | 66.89 | 5.8 | -1.6 | | | | |
| L10 | 66.46 | 10.86 | -1.81 | | | | |
| L11 | 67.24 | 18.41 | -1.59 | | | | |
| L12 | 68.04 | 29.14 | -0.66 | | | | |
| L13 | 45.56 | -43.62 | -33.87 | | | | |
| L14 | 37.85 | 64.08 | -26.98 | | | | |
| L15 | 73.53 | 14.61 | 89.92 | | | | |
| L16 | 6.4 | -0.05 | -4.46 | | | | |
| L17 | 33.96 | 54.1 | 38.87 | | | | |
| L18 | 35.06 | -50.57 | 30.12 | | | | |

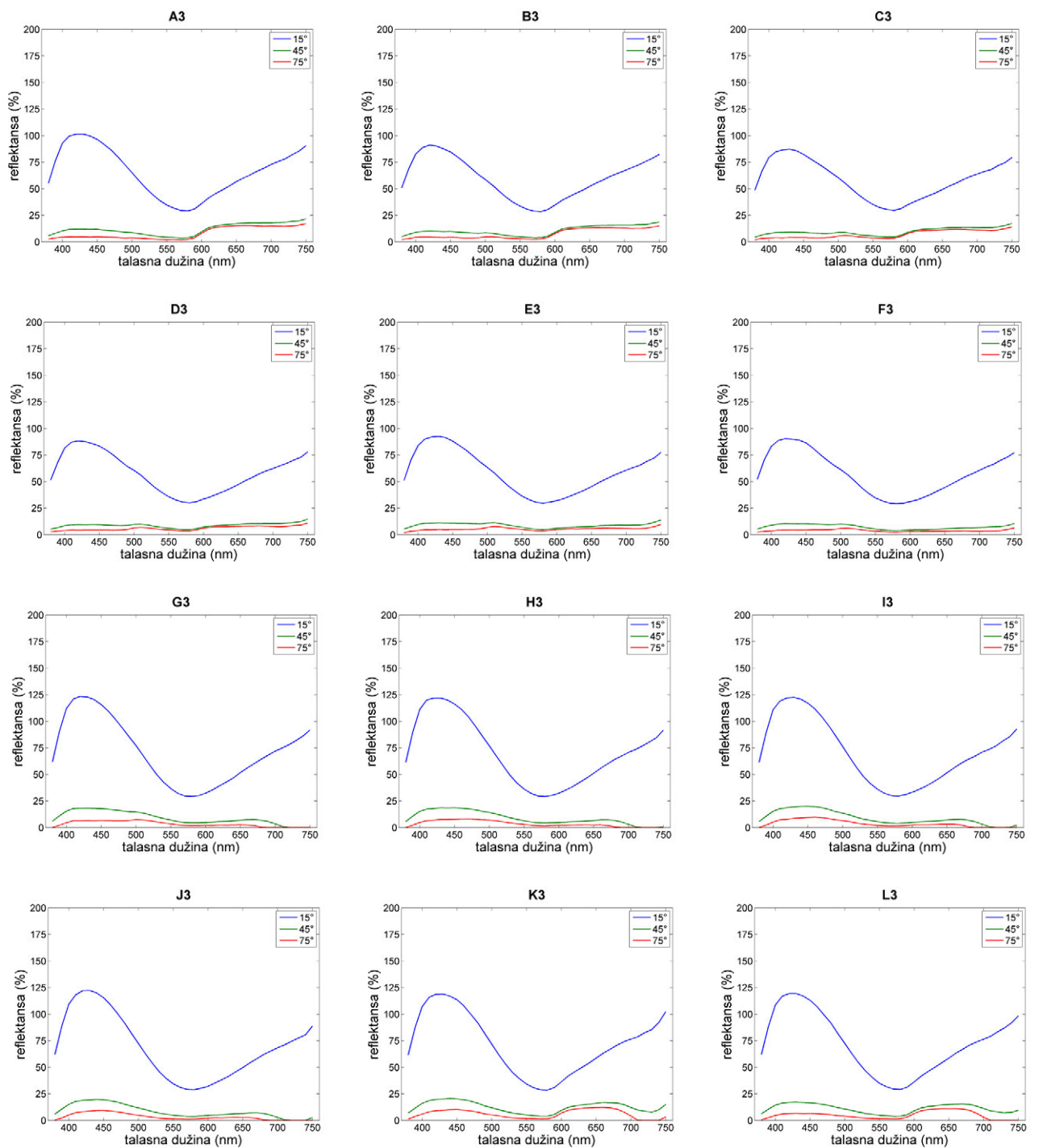
PRILOG 2



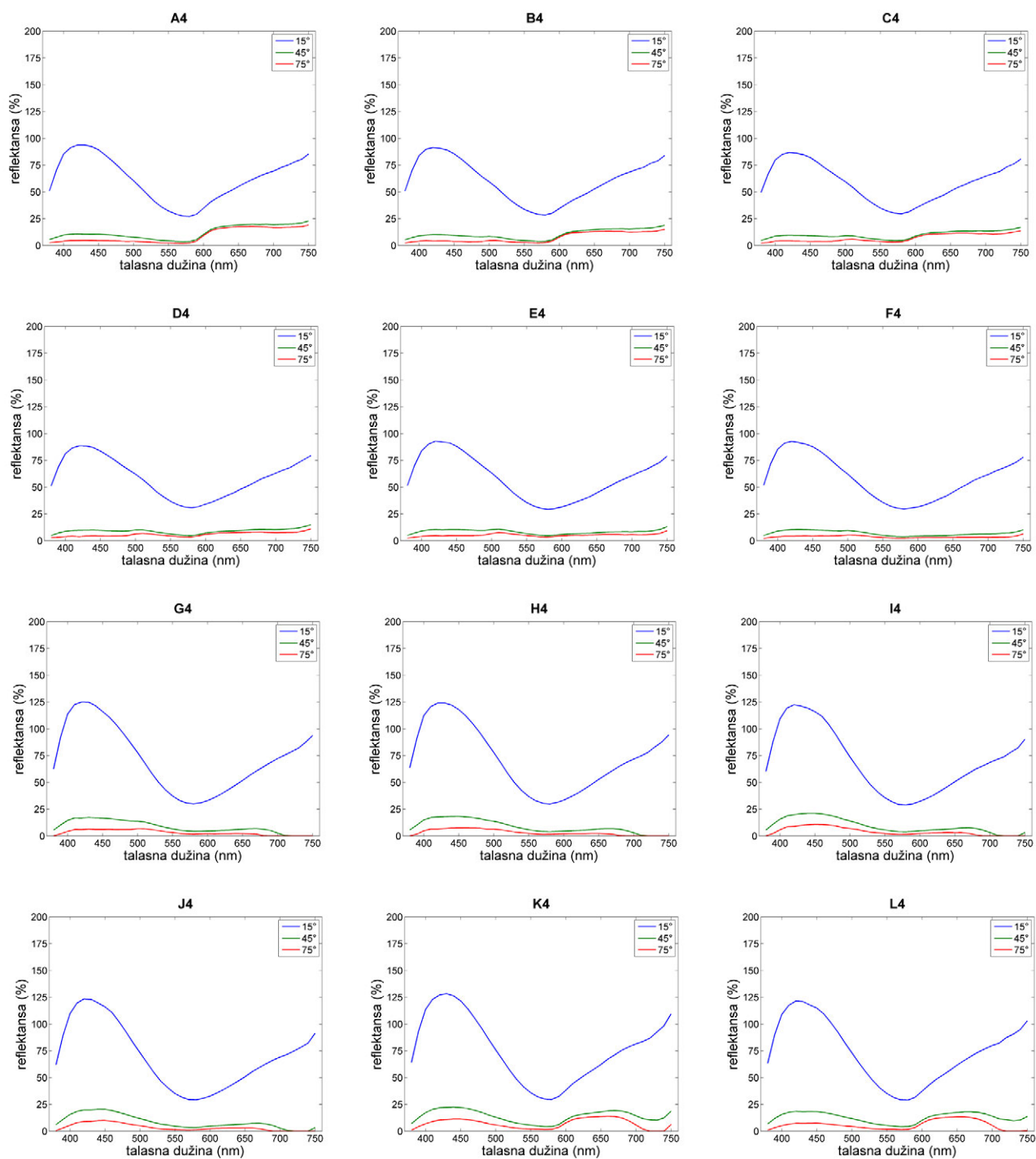
Slika P2.1. Reflektanse polja A1-L1 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



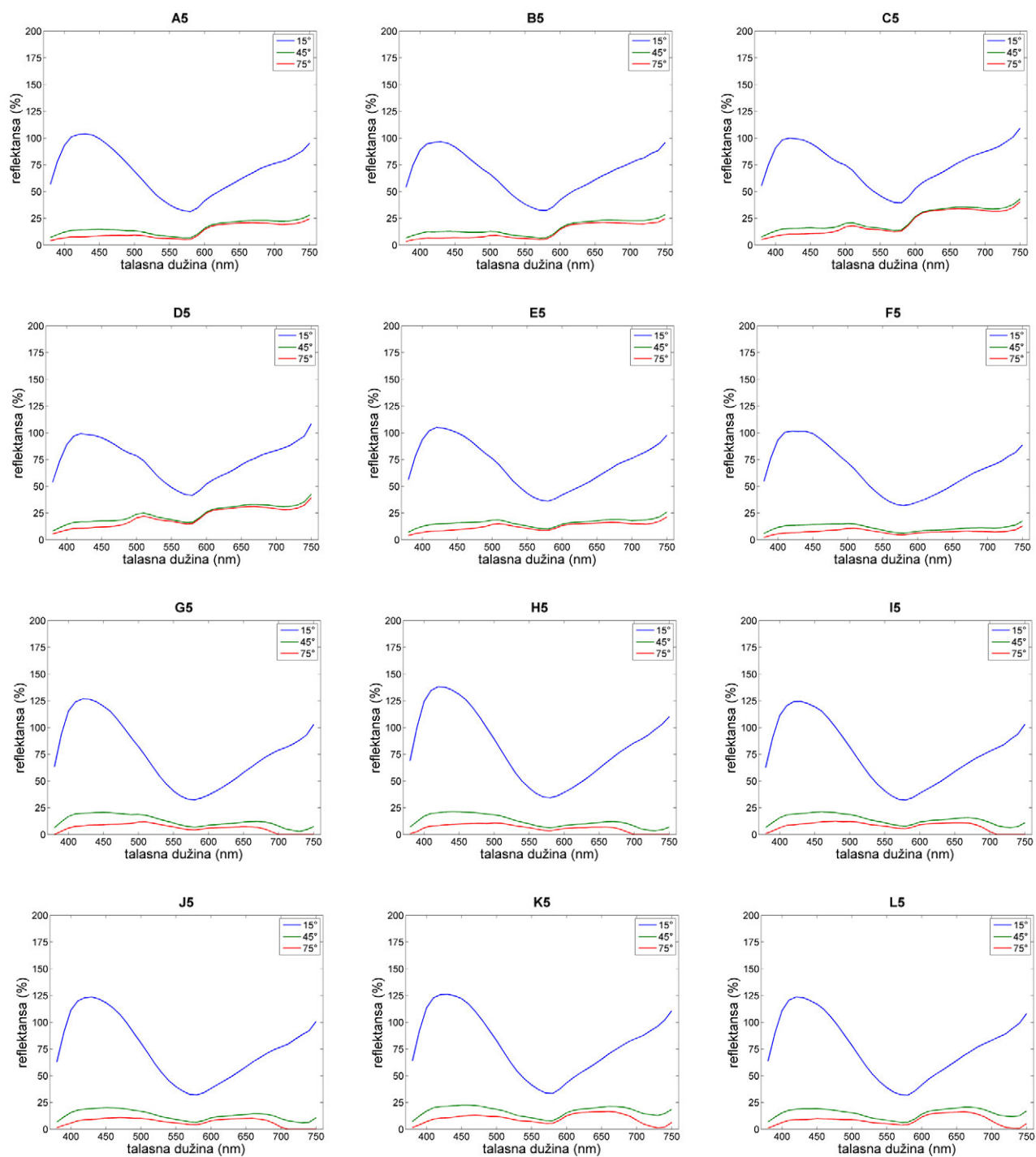
Slika P2.2. Reflektanse polja A2-L2 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



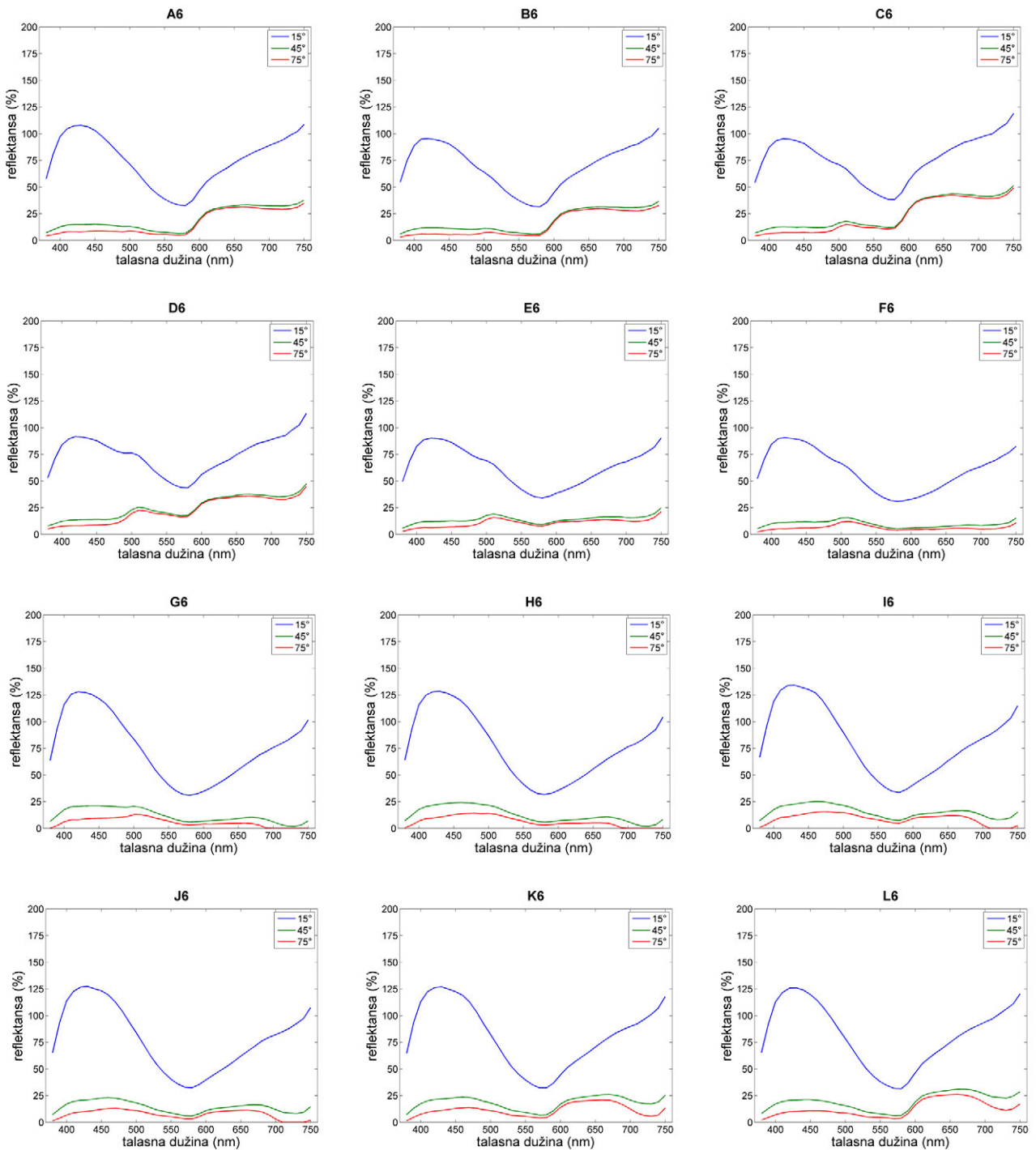
Slika P2.3. Reflektanse polja A3-L3 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



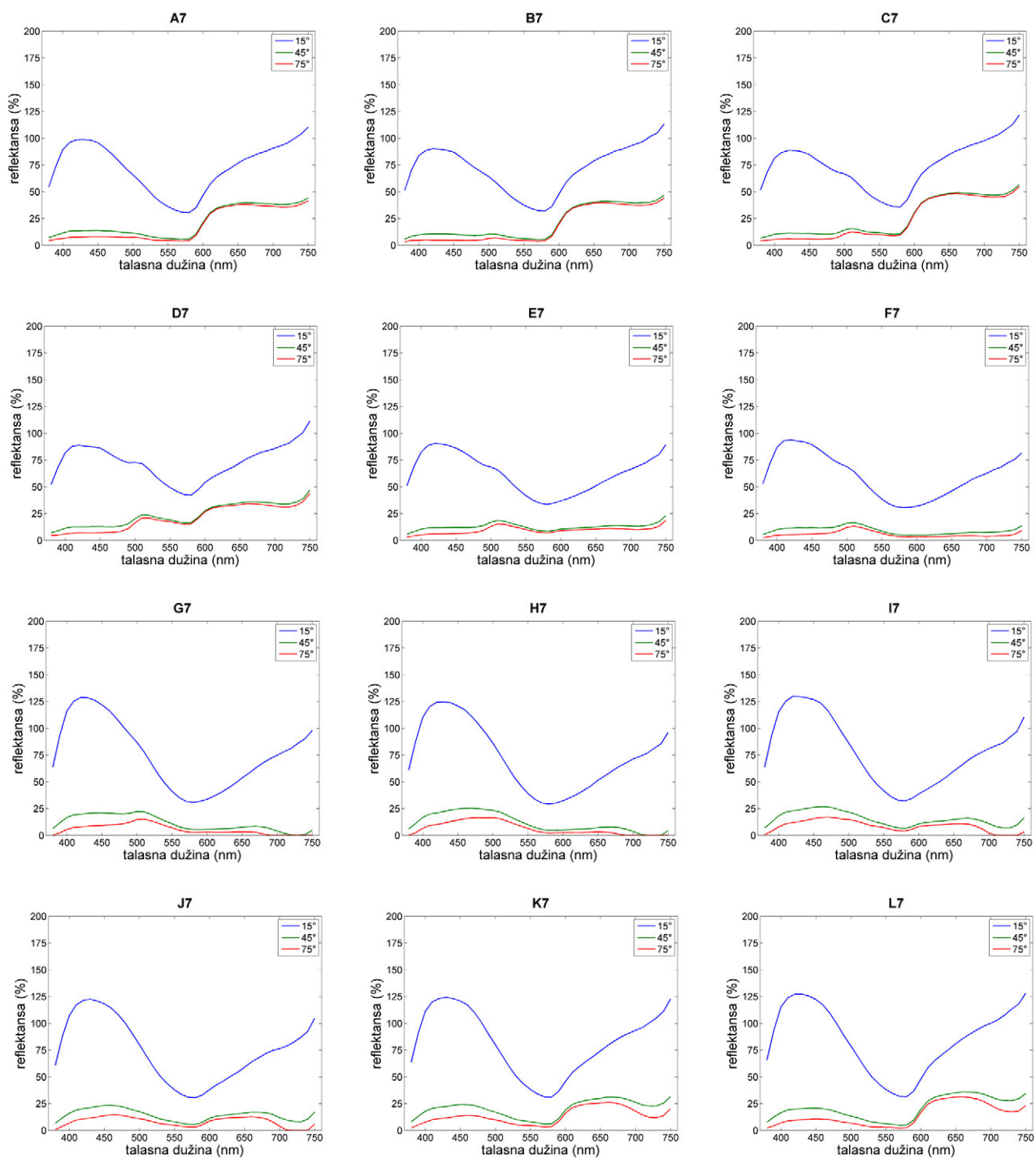
Slika P2.4. Reflektanse polja A4-L4 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



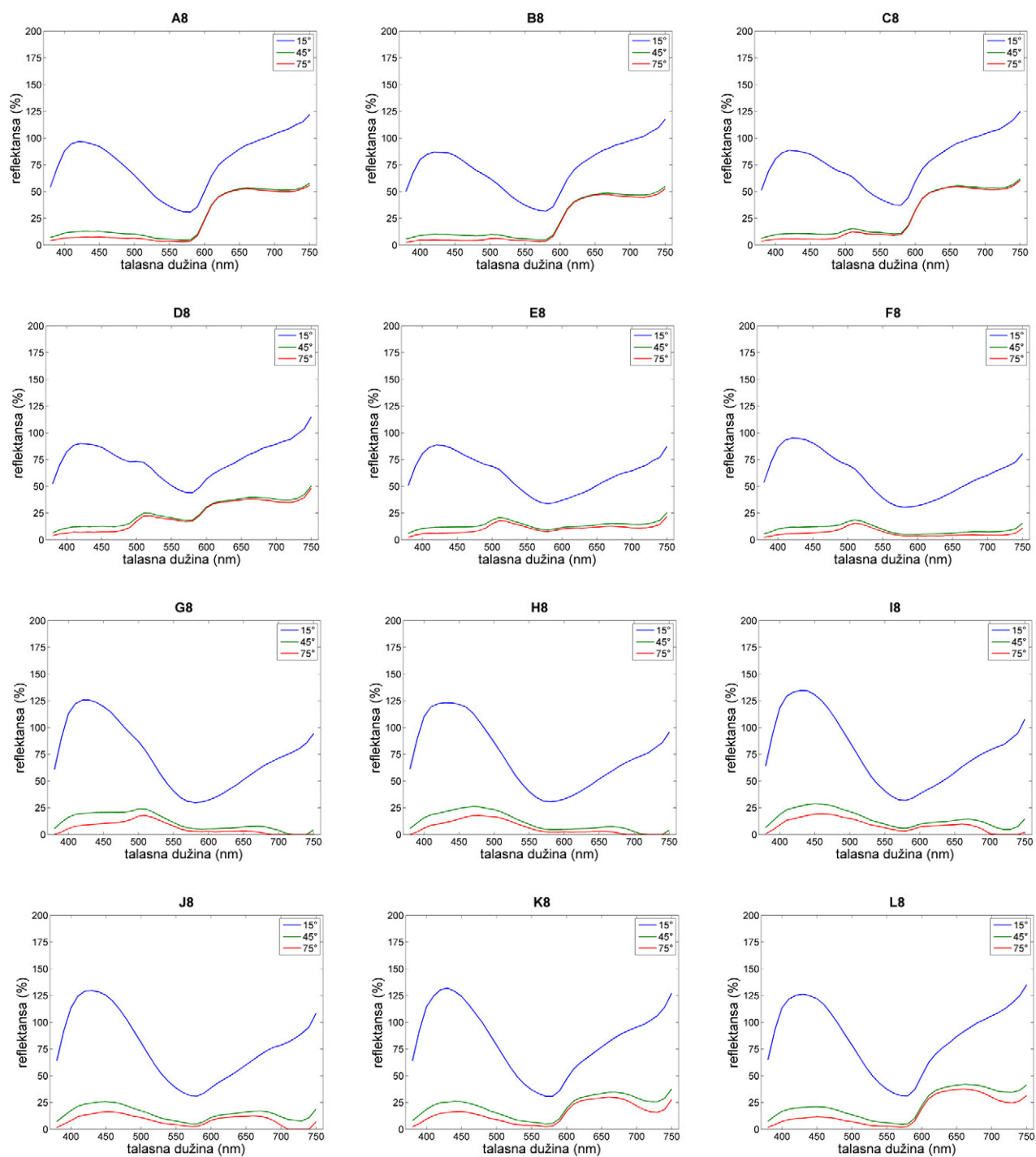
Slika P2.5. Reflektanse polja A5-L5 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



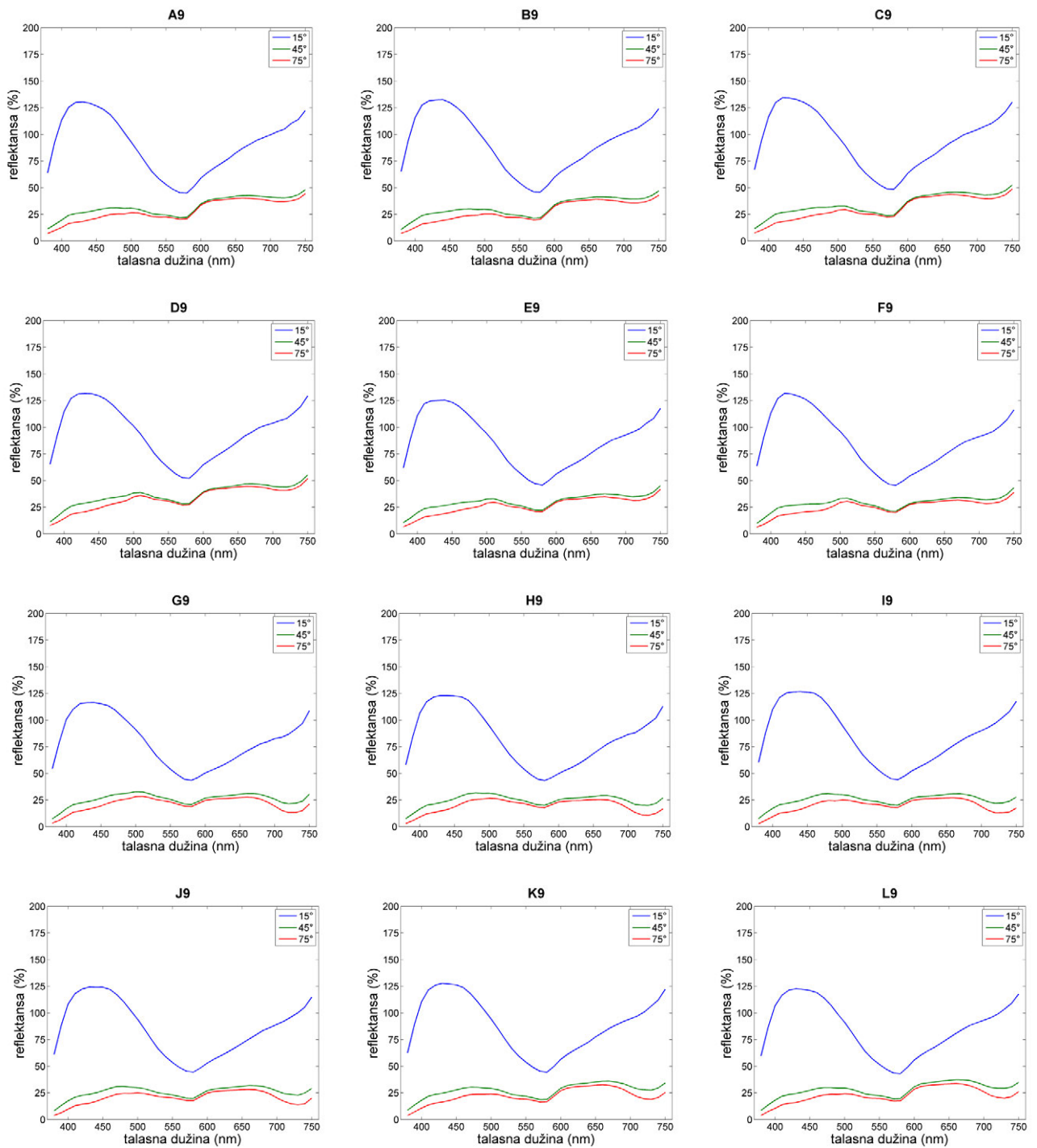
Slika P2.6. Reflektanse polja A6-L6 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



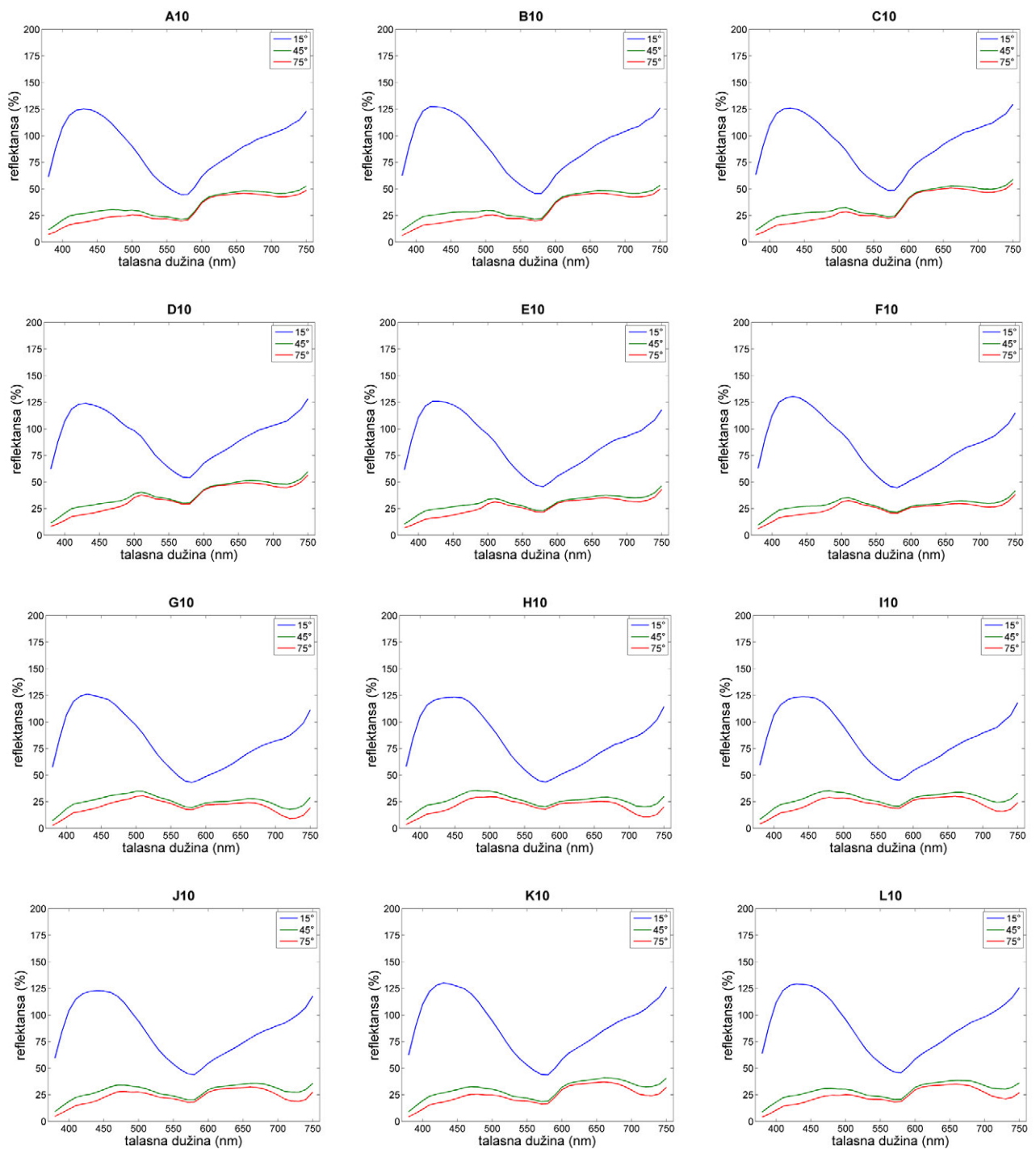
Slika P2.7. Reflektanse polja A7-L7 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



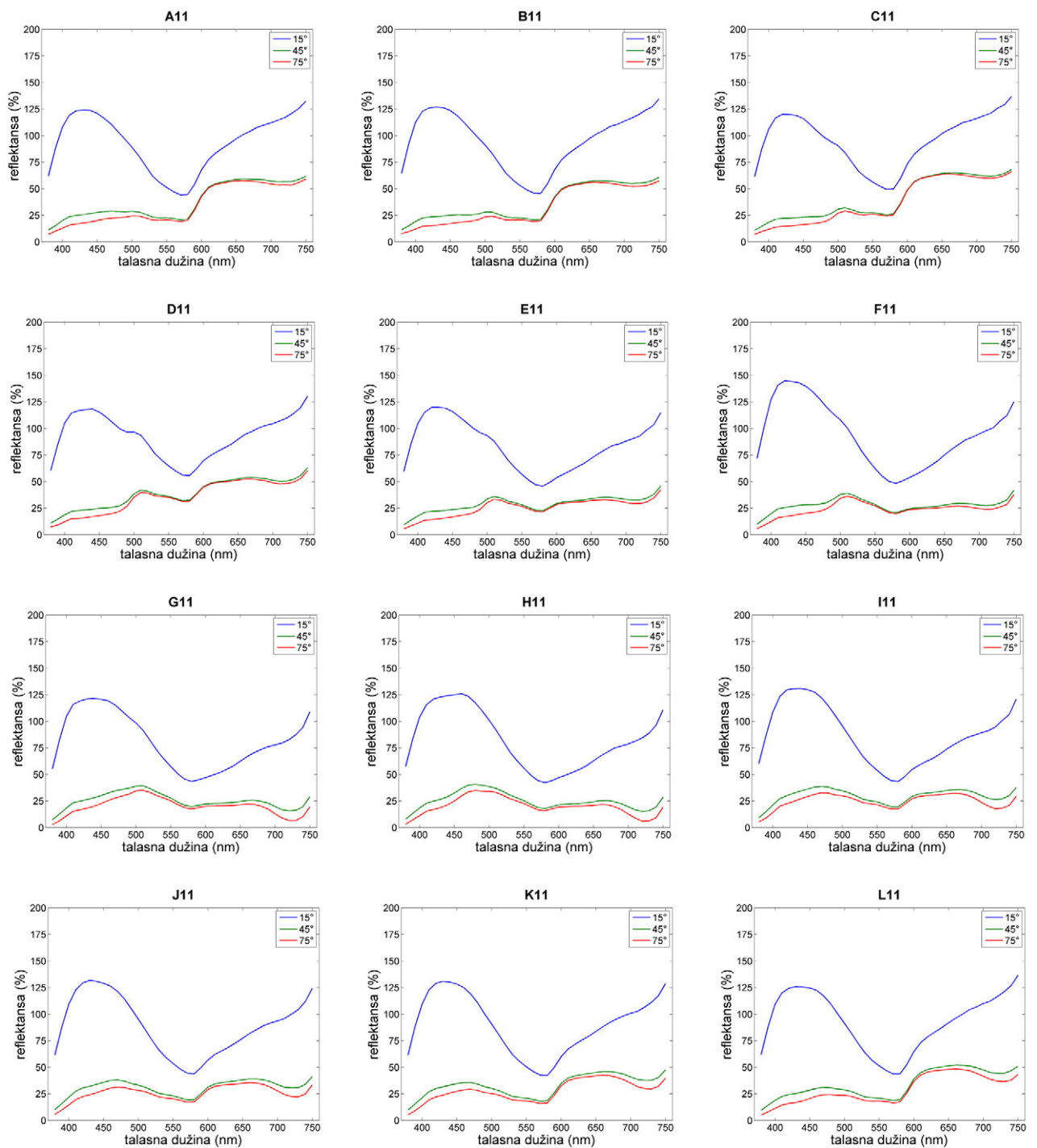
Slika P2.8. Reflektanse polja A8-L8 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



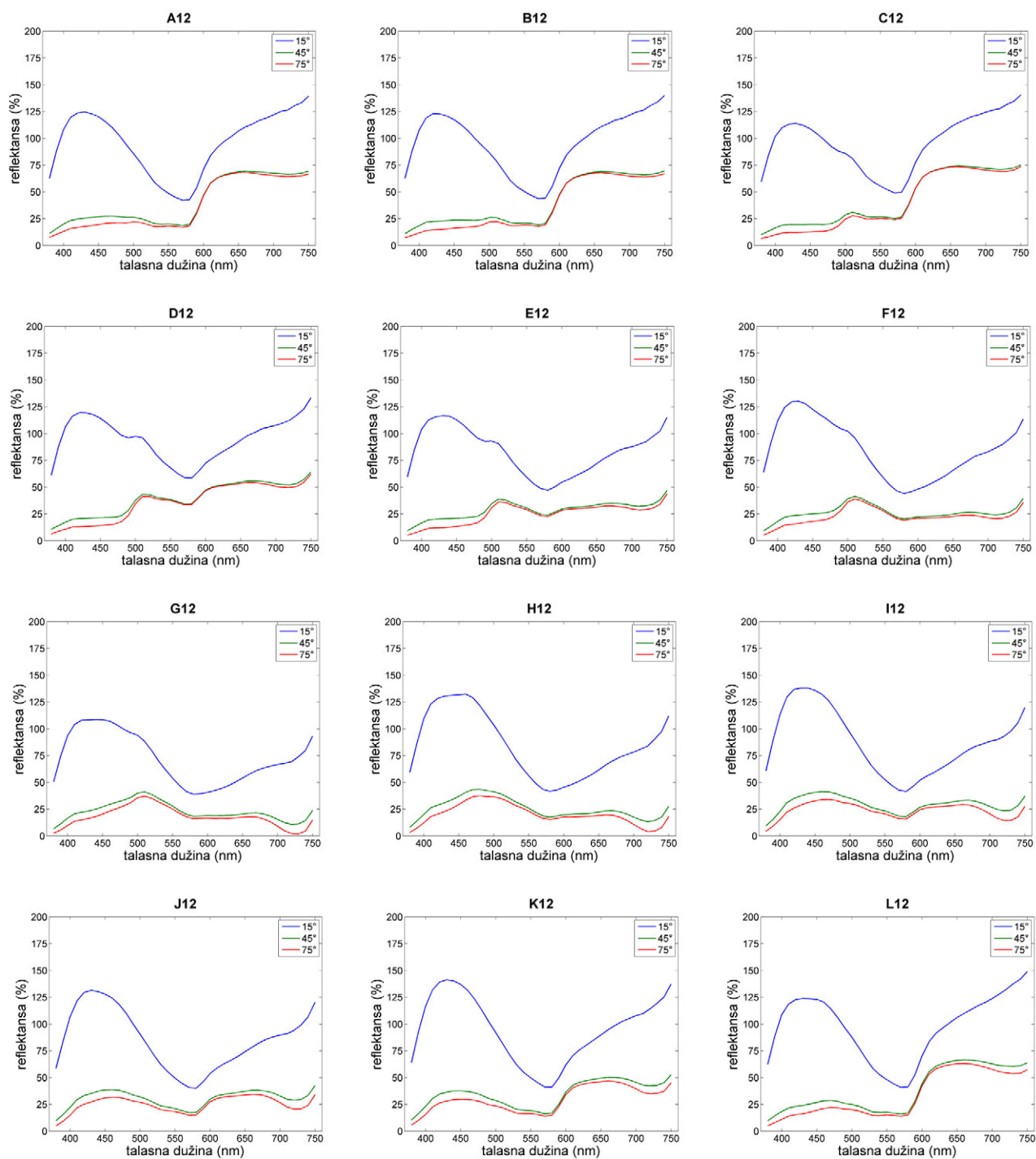
Slika P2.9. Reflektanse polja A9-L9 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



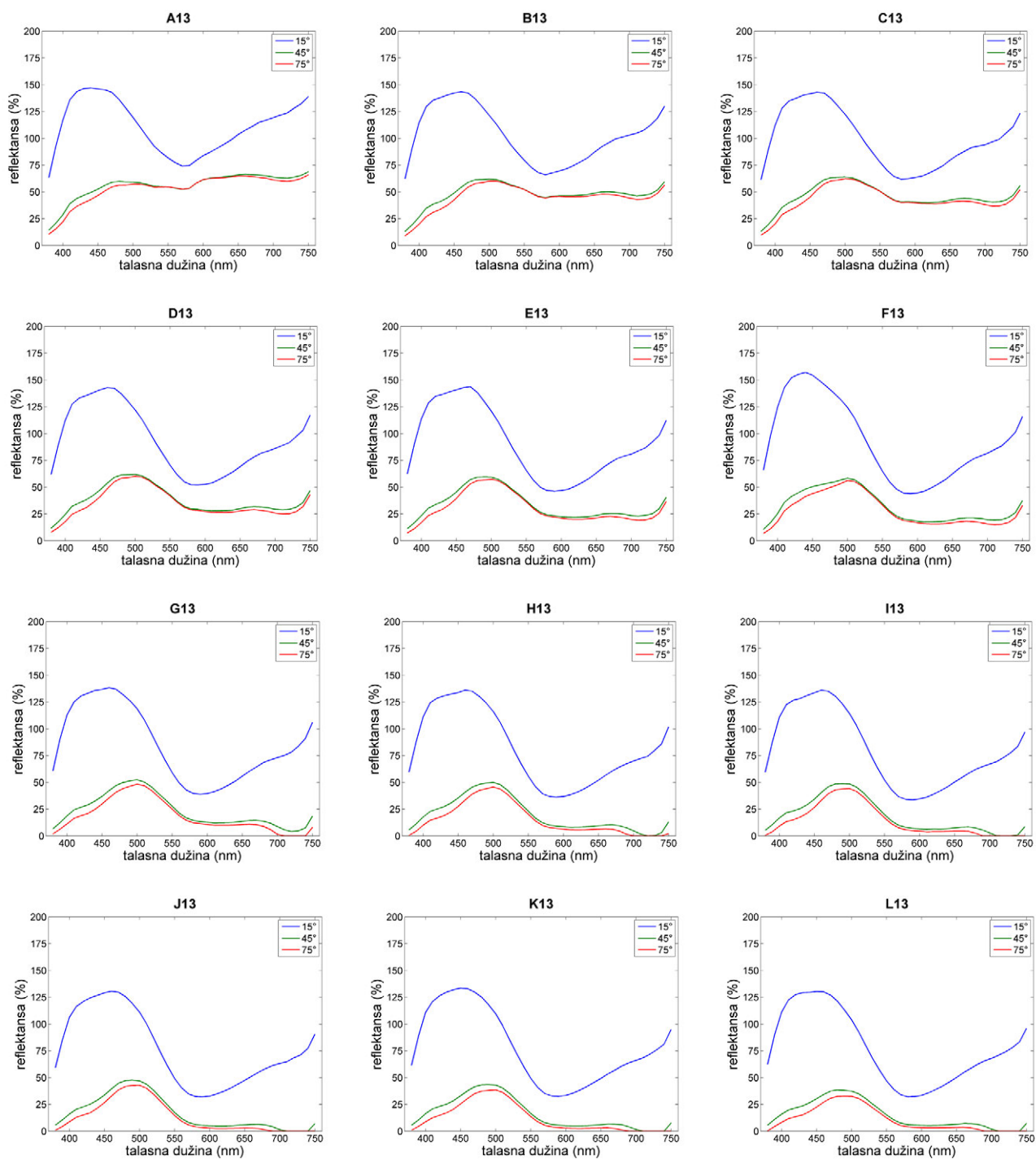
Slika P2.10. Reflektanse polja A10-L10 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



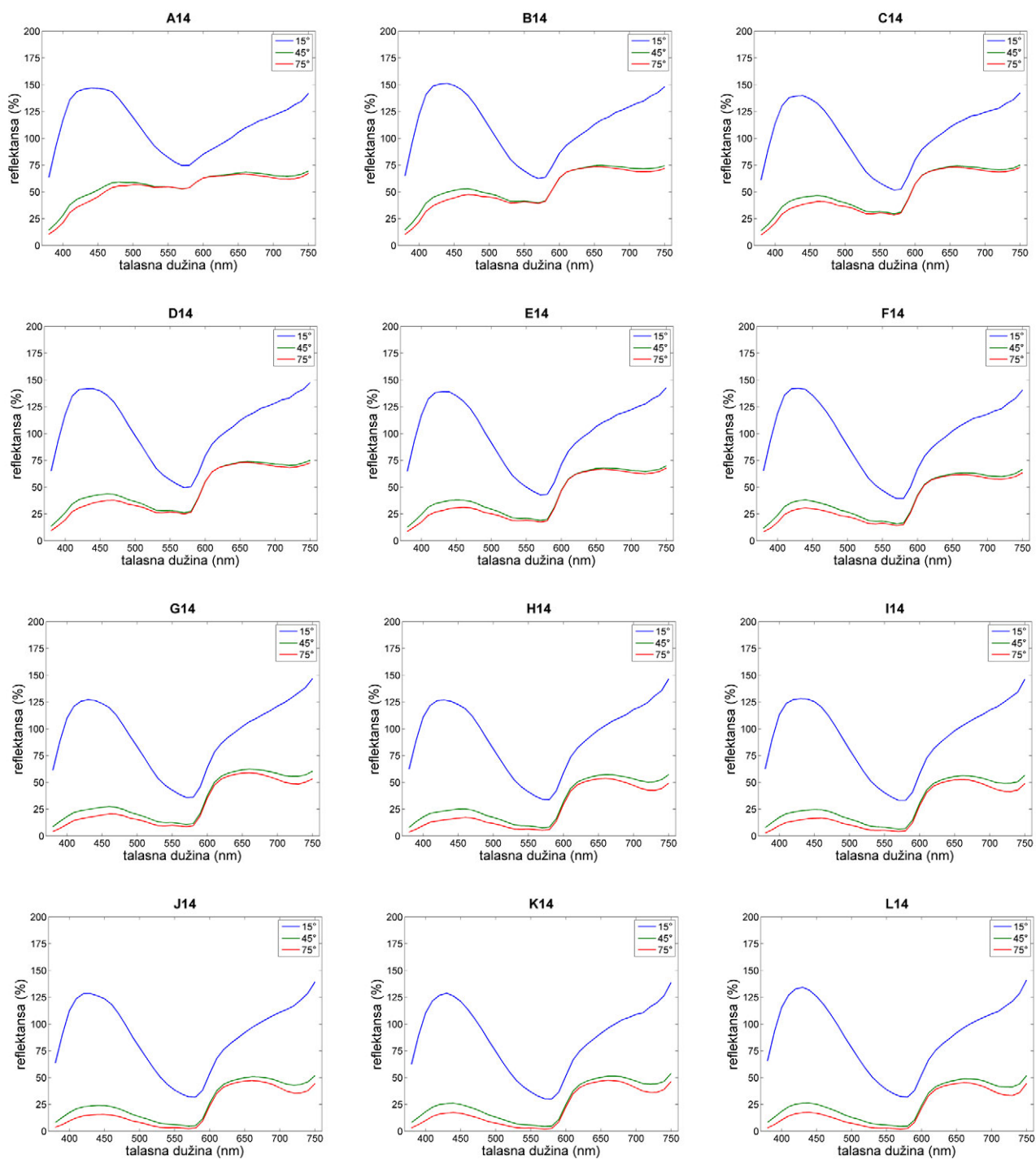
Slika P2.11. Reflektanse polja A11-L11 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



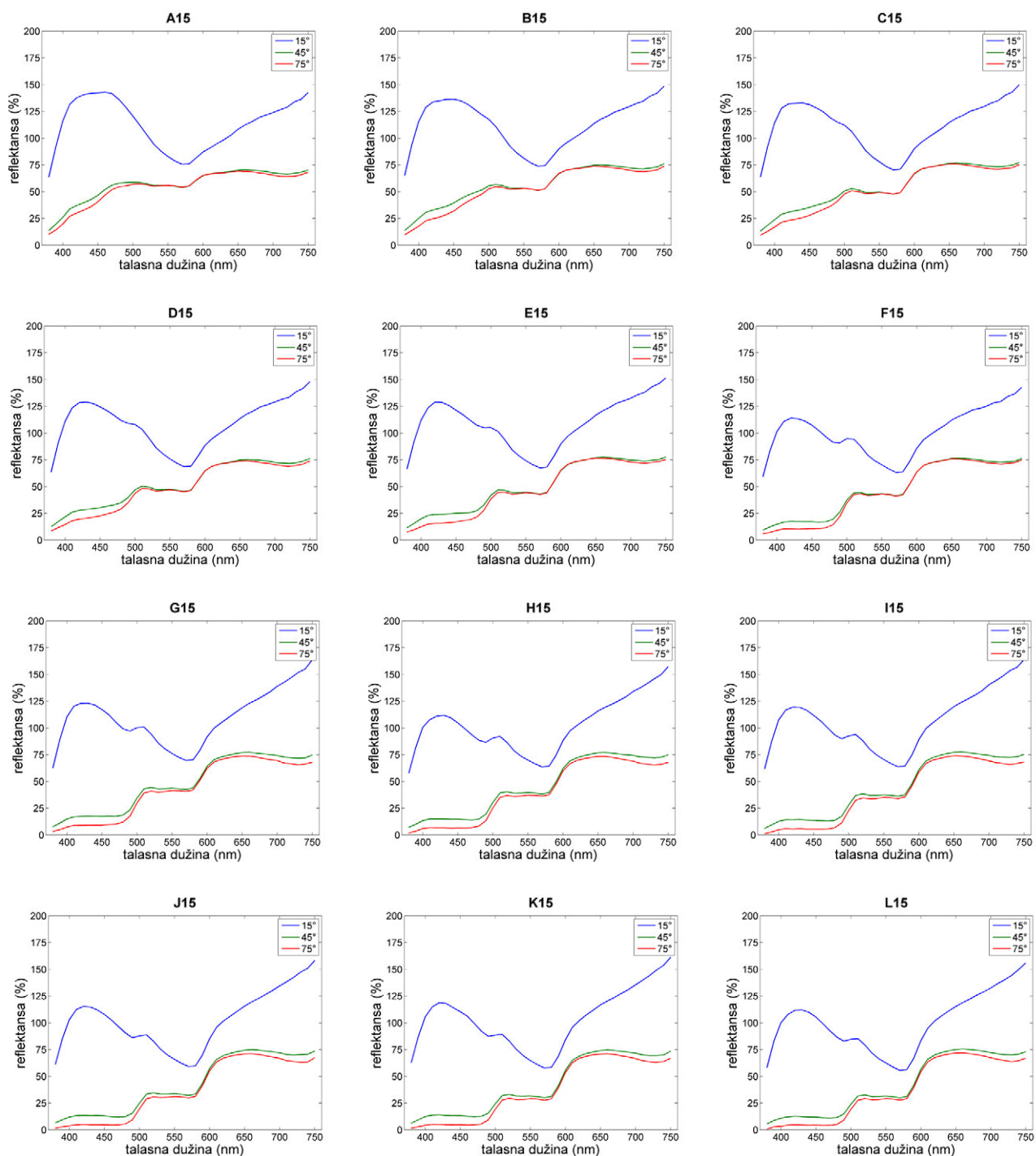
Slika P2.12. Reflektanse polja A12-L12 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



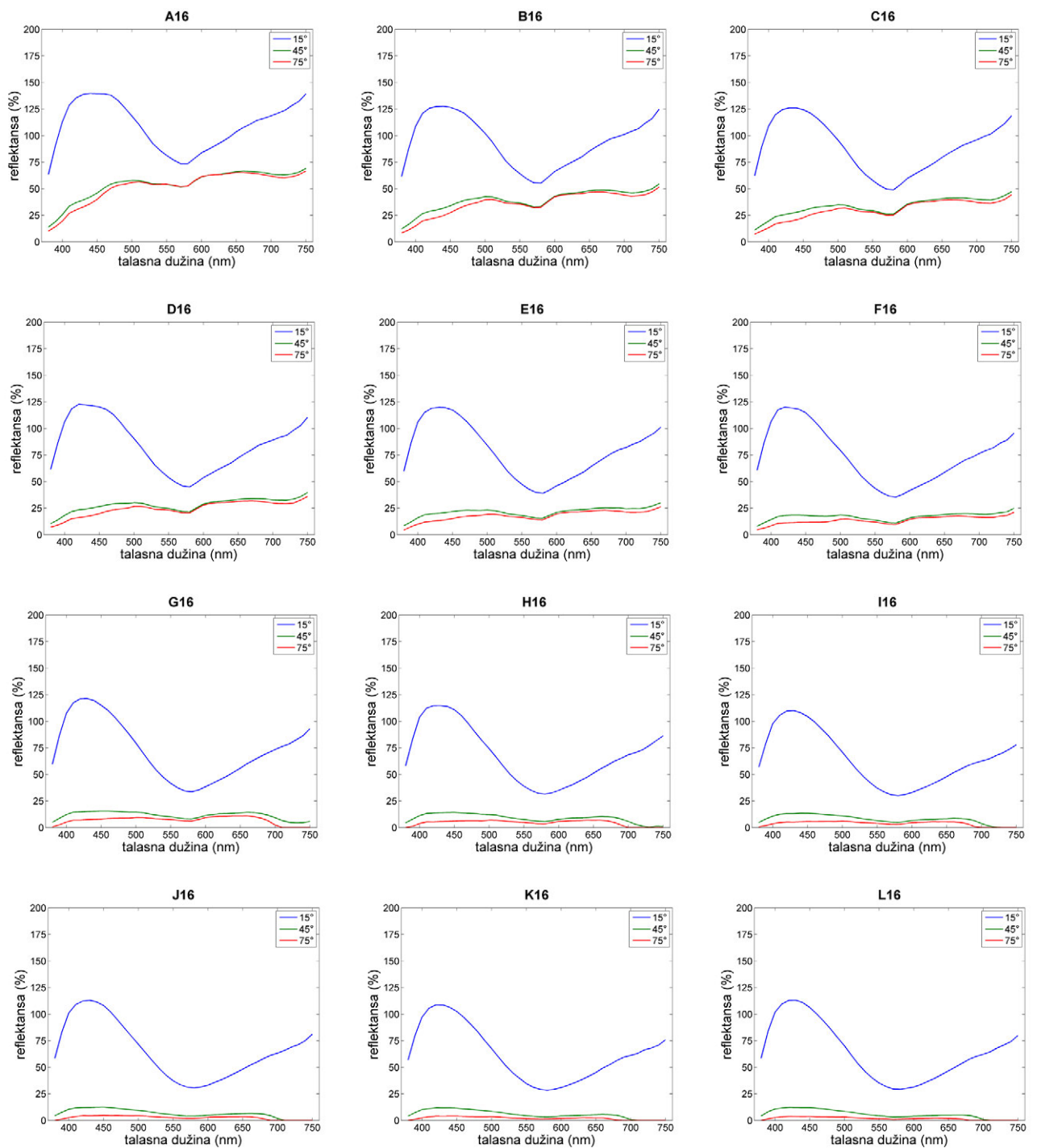
Slika P2.13. Reflektanse polja A13-L13 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



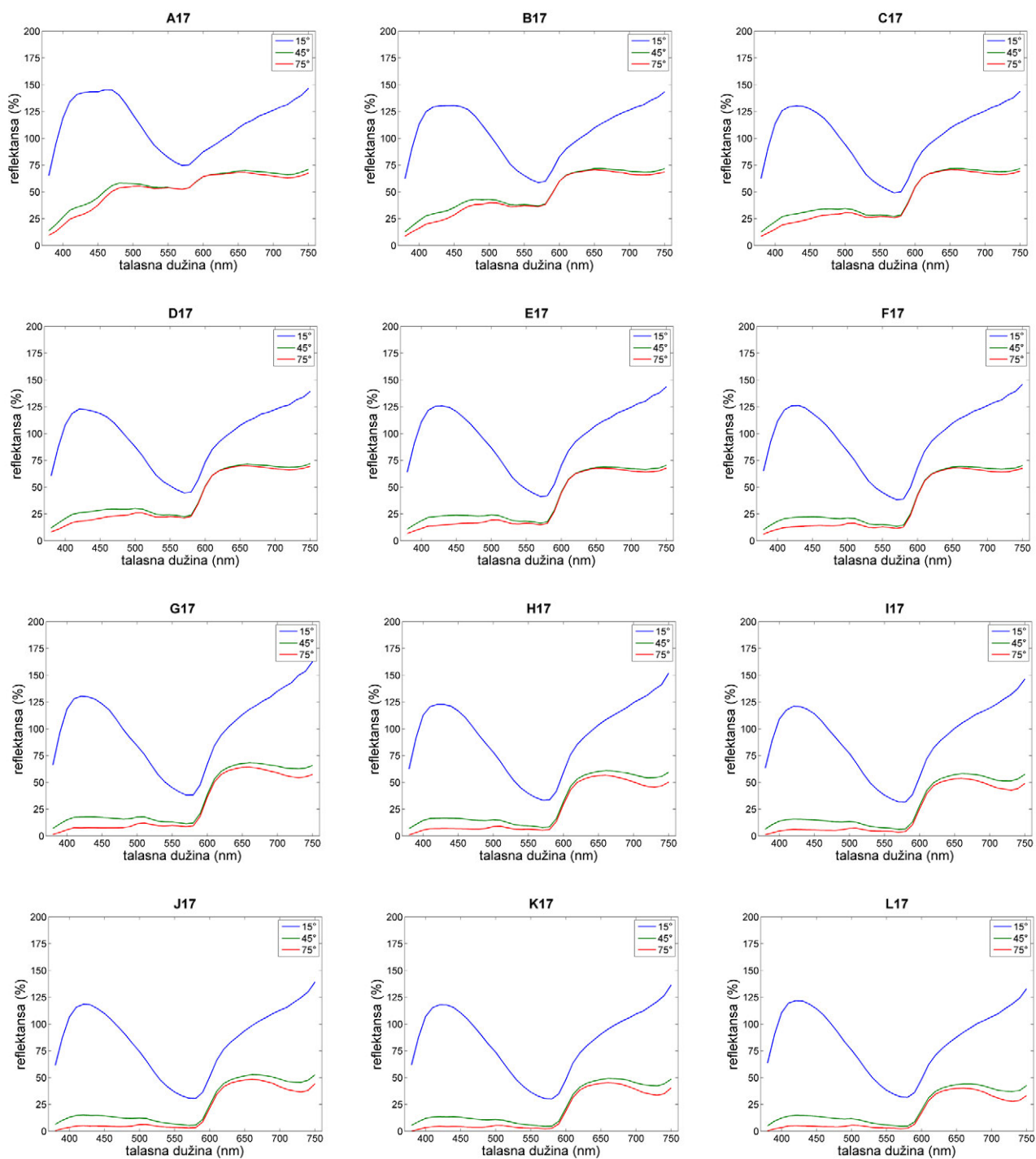
Slika P2.14. Reflektanse polja A14-L14 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



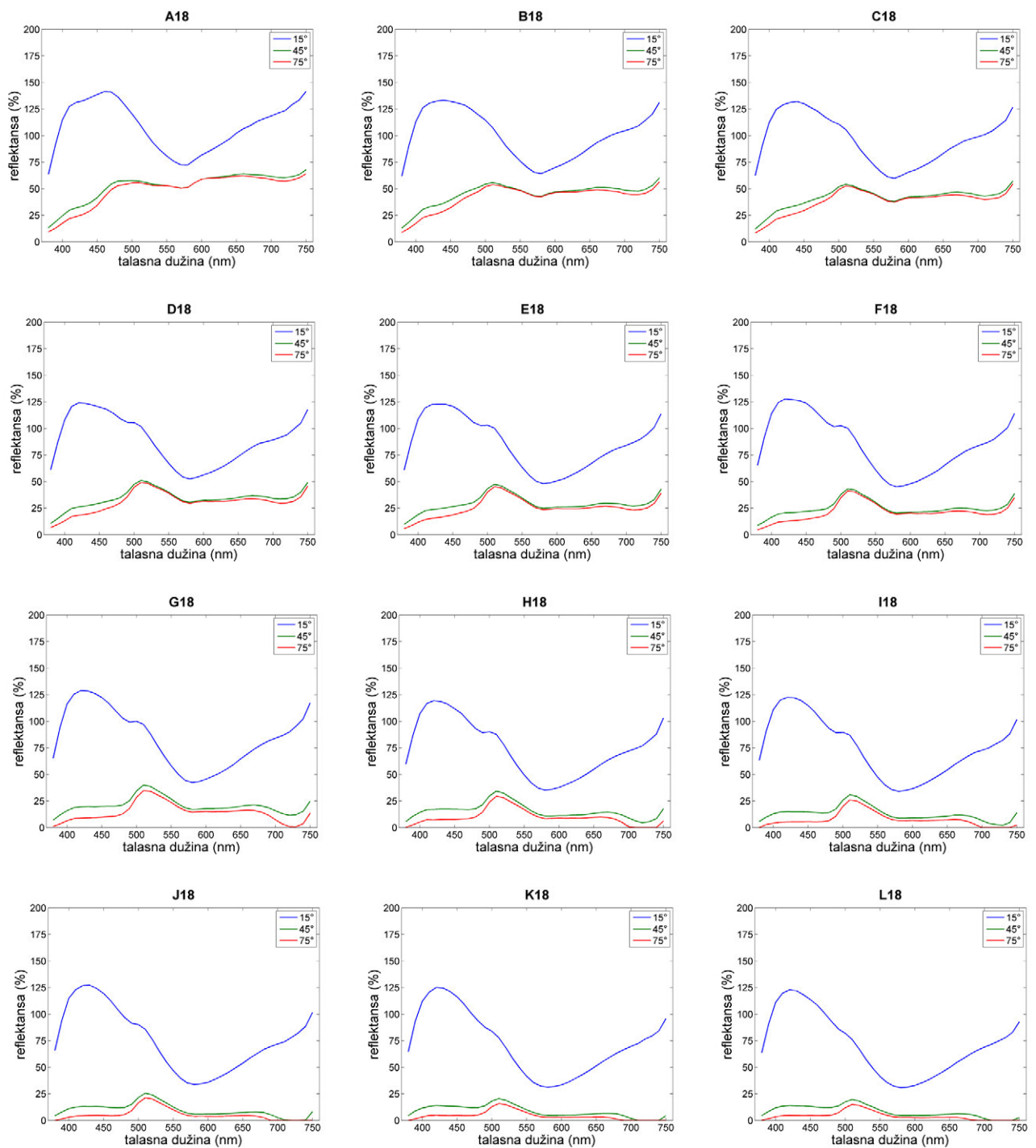
Slika P2.15. Reflektanse polja A15-L15 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



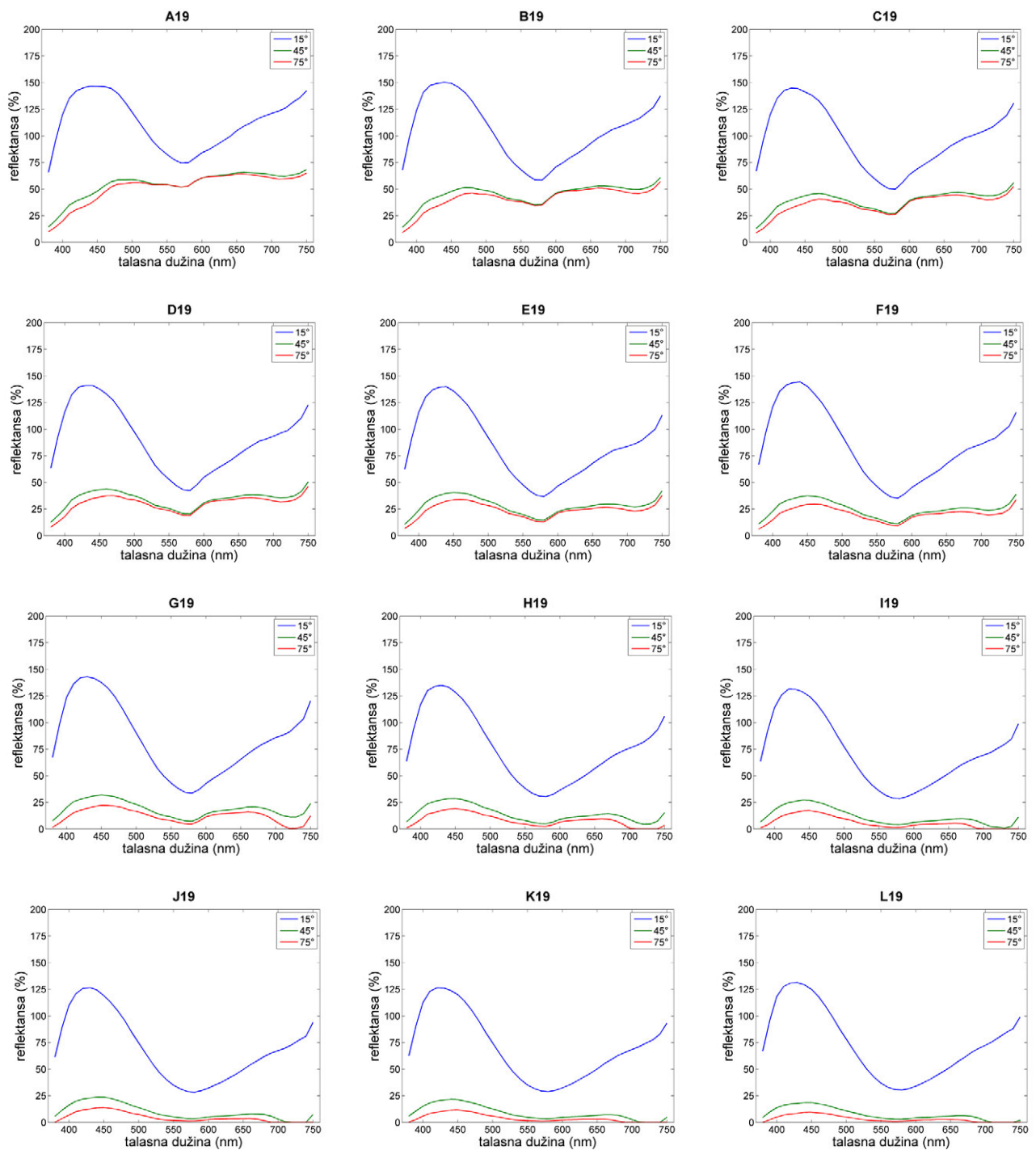
Slika P2.16. Reflektanse polja A16-L16 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



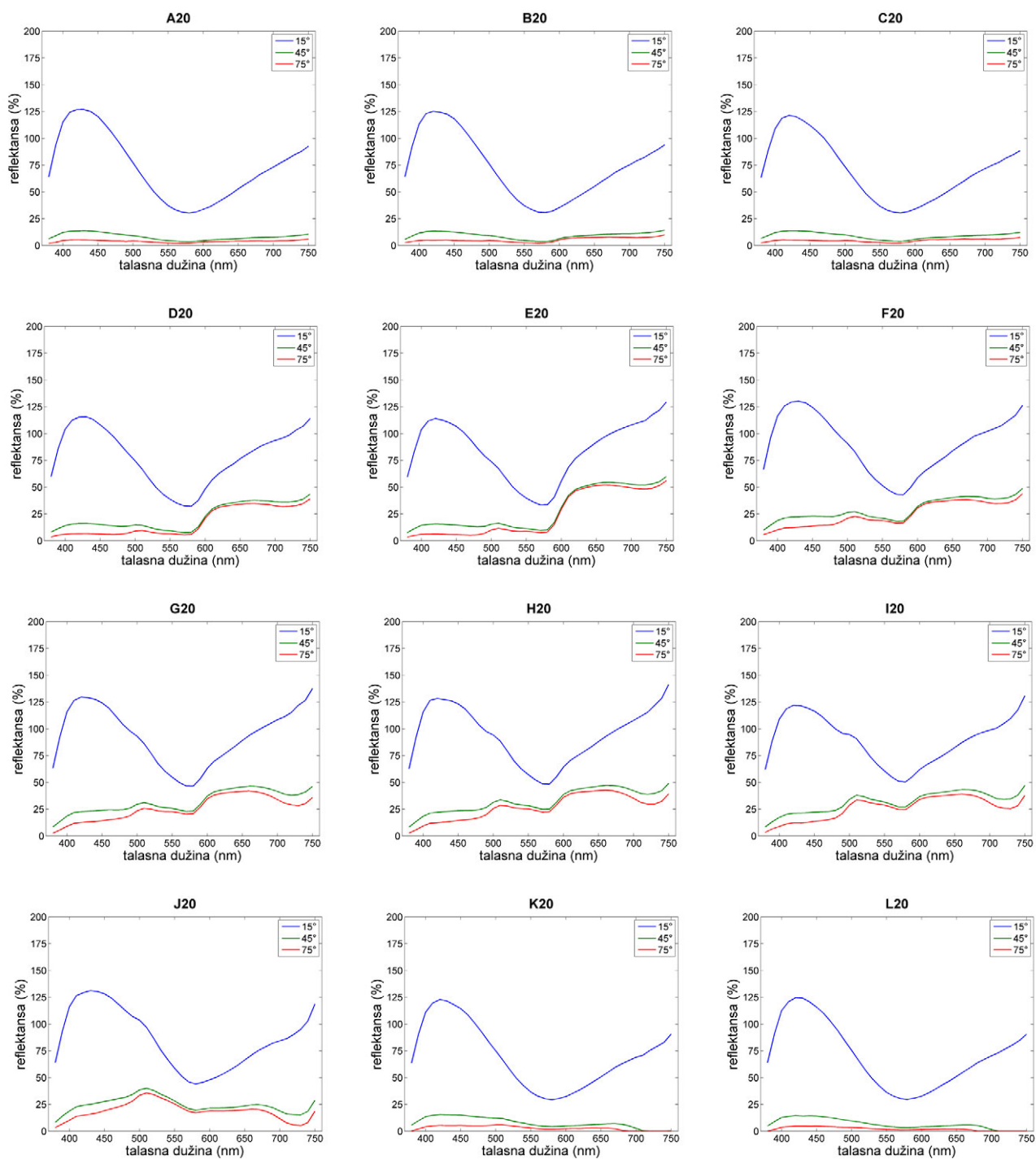
Slika P2.17. Reflektanse polja A17-L17 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



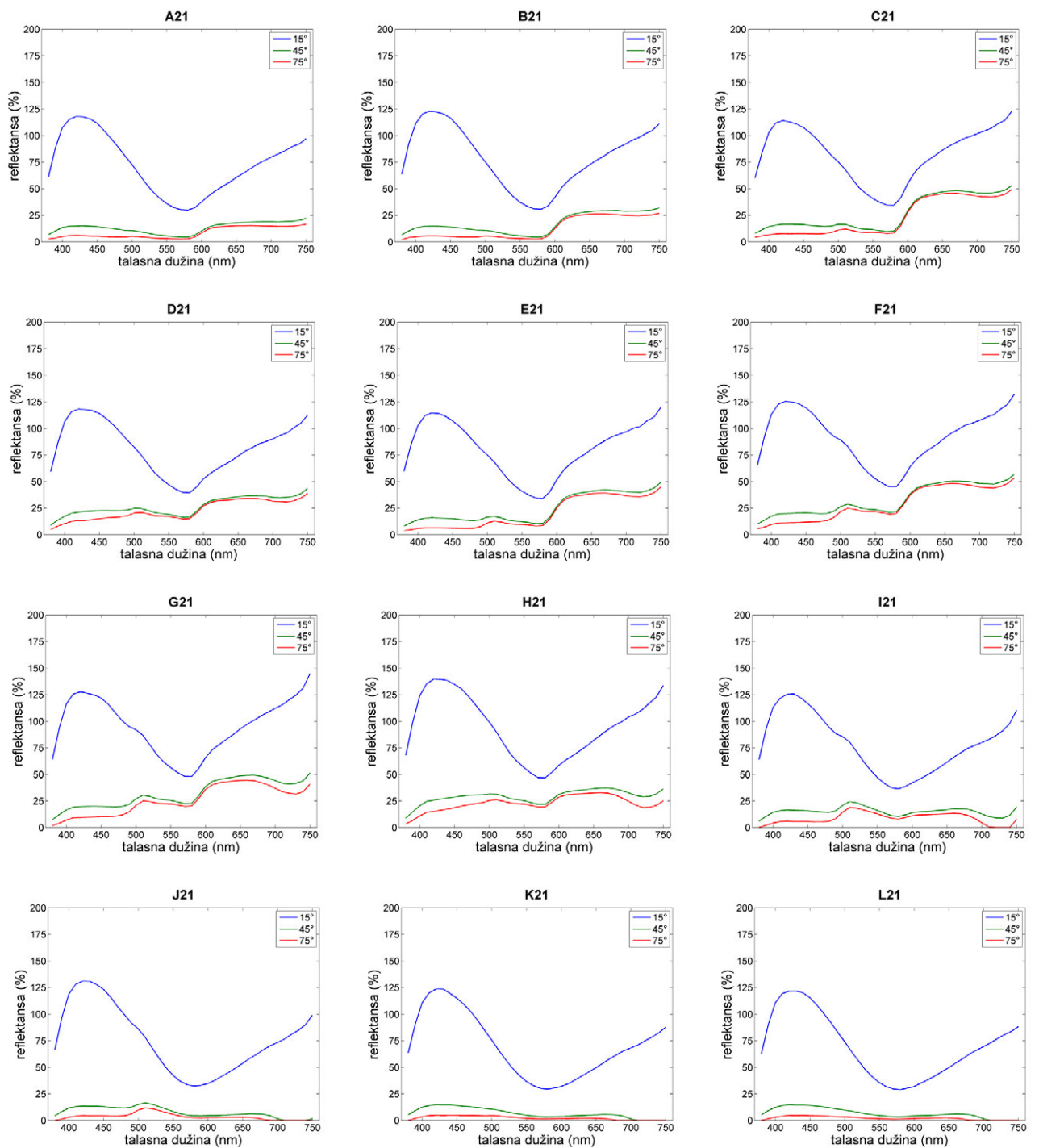
Slika P2.18. Reflektanse polja A18-L18 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



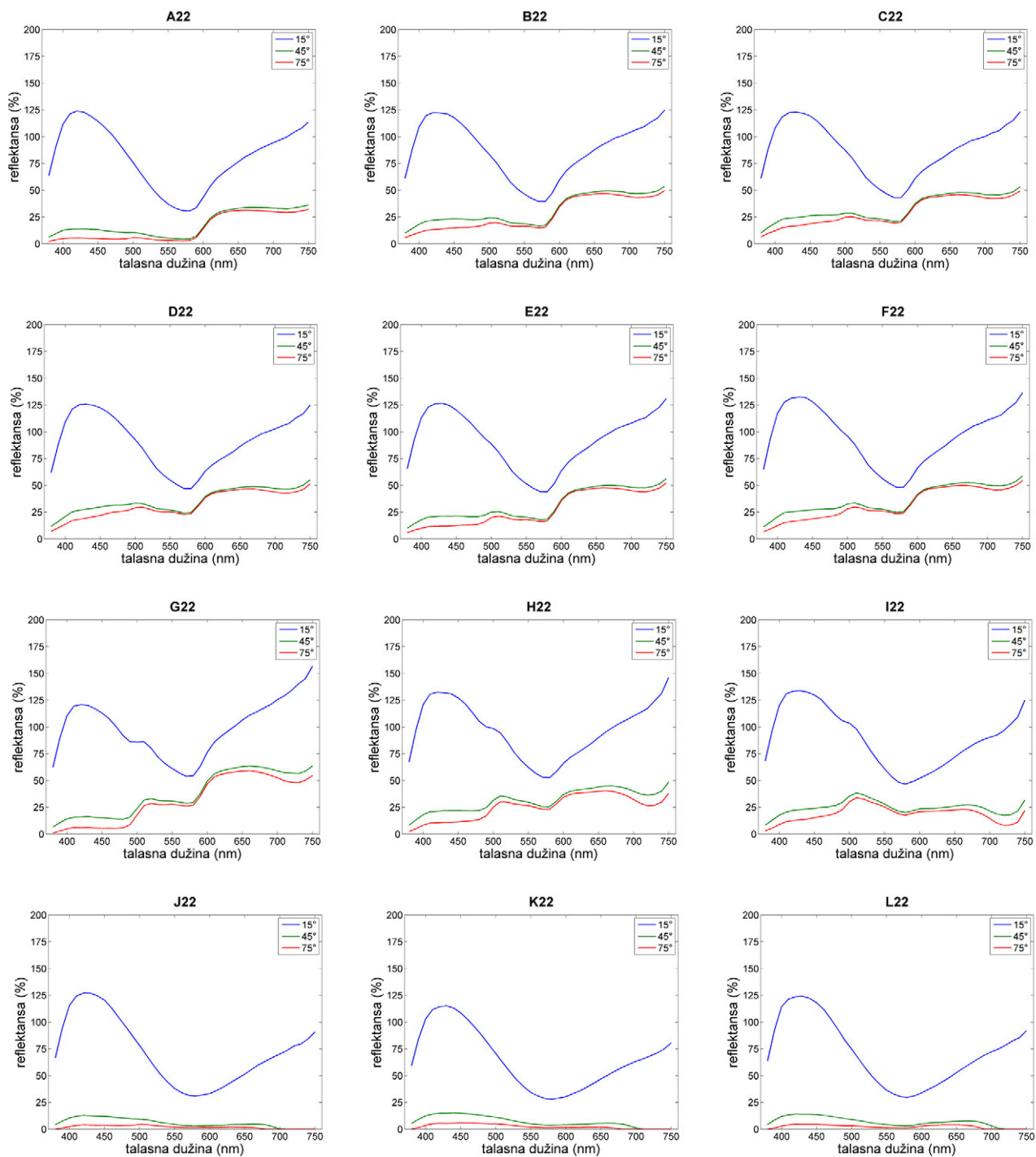
Slika P2.19. Reflektanse polja A19-L19 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



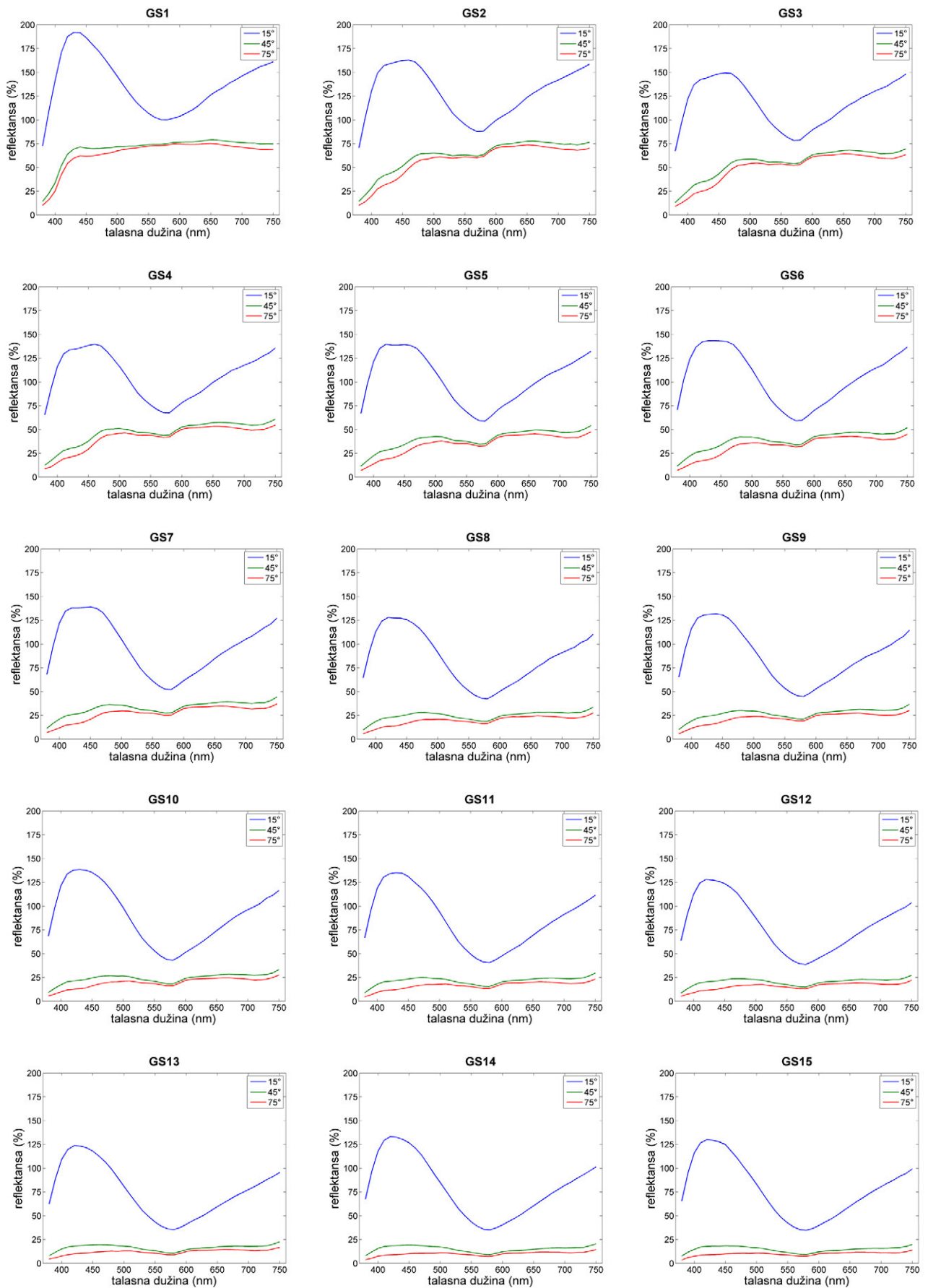
Slika P2.20. Reflektanse polja A20-L20 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



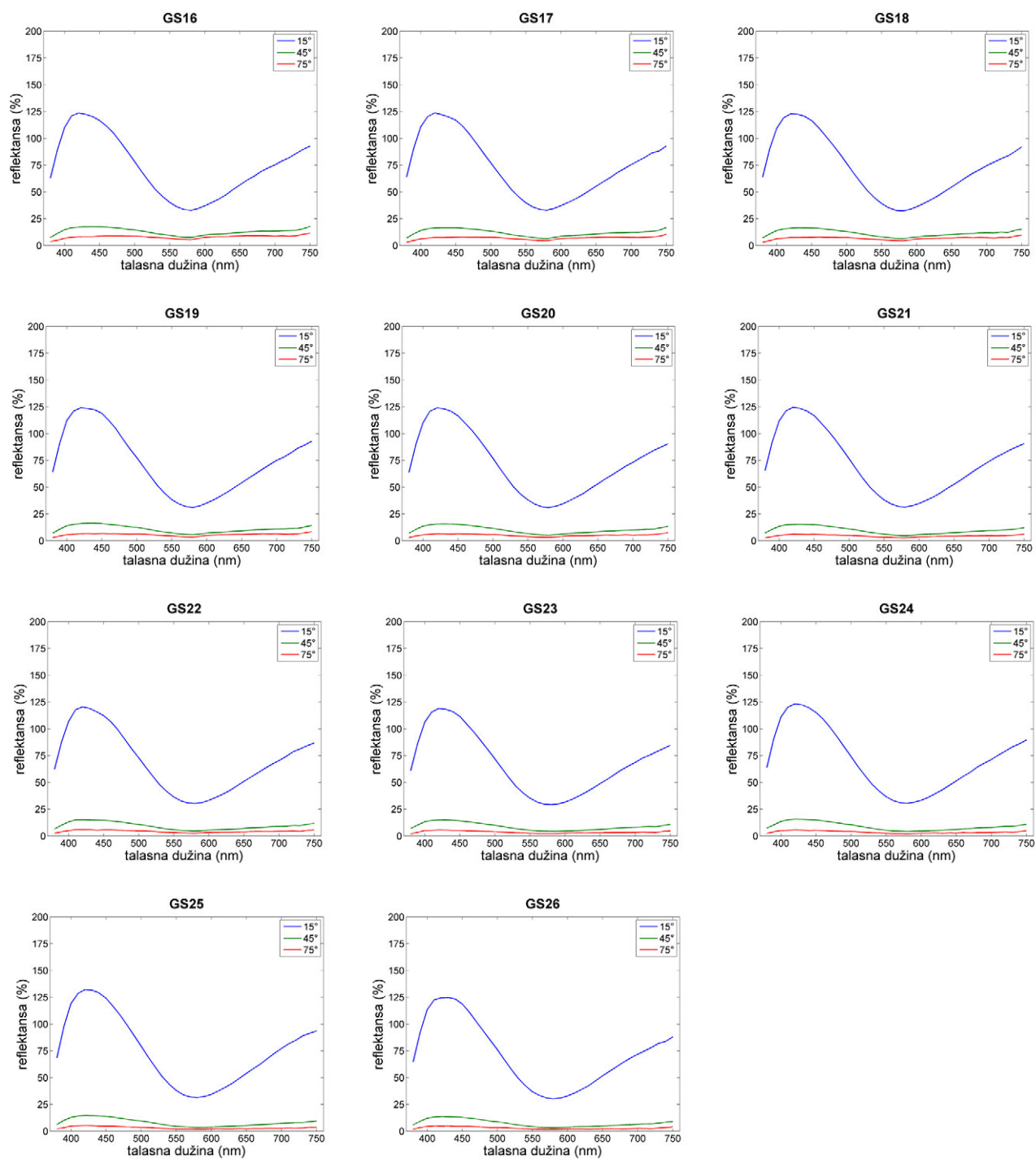
Slika P2.21. Reflektanse polja A21-L21 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



Slika P2.22. Reflektanse polja A22-L22 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



Slika P2.23. Reflektanse polja GS1-GS15 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja



Slika P2.24. Reflektanse polja GS16-GS26 test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima prikazane u zavisnosti od ugla merenja

Tabela P2. 1. Izmerene CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|-----|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| A1 | 73.494 | 7.449 | -42.324 | 30.445 | 5.813 | -15.698 | 22.354 | 9.04 | -5.031 |
| A2 | 72.251 | 8.73 | -40.927 | 30.466 | 10.898 | -15.011 | 22.816 | 15.123 | -2.841 |
| A3 | 72.969 | 11.087 | -41.428 | 32.211 | 18.004 | -13.065 | 24.965 | 24.333 | -0.099 |
| A4 | 71.017 | 11.92 | -39.533 | 32.197 | 20.736 | -9.84 | 26.081 | 26.501 | 1.715 |
| A5 | 75.174 | 10.934 | -39.612 | 40.03 | 14.311 | -7.849 | 35.715 | 16.582 | 1.559 |
| A6 | 76.907 | 14.916 | -38.764 | 41.827 | 24.325 | -5.383 | 37.589 | 28.358 | 4.735 |
| A7 | 75.389 | 17.535 | -36.32 | 41.319 | 31.48 | -3.323 | 37.336 | 36.197 | 6.37 |
| A8 | 76.078 | 21.331 | -33.181 | 42.111 | 41.009 | 1.182 | 38.678 | 46.134 | 11.551 |
| A9 | 85.353 | 10.262 | -39.216 | 59.93 | 8.389 | -0.977 | 57.628 | 8.289 | 6.934 |
| A10 | 84.934 | 12.039 | -36.791 | 60.25 | 12.648 | -0.326 | 57.859 | 13.116 | 8.07 |
| A11 | 85.478 | 16.408 | -35.264 | 60.924 | 20.095 | 2.949 | 58.672 | 21.201 | 11.566 |
| A12 | 85.093 | 21.418 | -35.476 | 60.361 | 28.296 | 3.465 | 58.178 | 30.12 | 12.044 |
| A13 | 97.466 | 4.44 | -29.381 | 80.084 | 0.893 | 4.191 | 79.651 | -0.372 | 9.307 |
| A14 | 97.692 | 4.88 | -29.121 | 80.26 | 1.701 | 5.254 | 79.777 | 0.527 | 10.55 |
| A15 | 98.078 | 4.143 | -26.639 | 80.685 | 0.913 | 10.436 | 80.308 | -0.271 | 16.054 |
| A16 | 97.131 | 3.233 | -26.758 | 79.51 | -0.389 | 9.317 | 79.151 | -1.556 | 14.715 |
| A17 | 98.143 | 4.555 | -27.74 | 80 | 1.139 | 10.693 | 79.368 | -0.043 | 17.361 |
| A18 | 97.04 | 1.343 | -26.544 | 78.869 | -2.883 | 11.714 | 78.242 | -4.319 | 18.585 |
| A19 | 97.882 | 3.3 | -28.974 | 79.618 | -0.603 | 7.292 | 79.094 | -1.925 | 13.603 |
| A20 | 75.717 | 9.066 | -51.029 | 29.271 | 3.586 | -21.625 | 20.201 | 4.26 | -9.789 |
| A21 | 75.126 | 12.845 | -46.868 | 35.004 | 15.783 | -15.179 | 27.223 | 20.198 | -0.305 |
| A22 | 77.258 | 17.164 | -45.741 | 37.918 | 28.516 | -7.279 | 32.232 | 33.723 | 10.26 |
| B1 | 71.369 | 6.278 | -37.178 | 29.581 | 2.913 | -11.789 | 22.575 | 4.581 | -1.155 |
| B2 | 72.106 | 8.059 | -38.641 | 30.73 | 7.59 | -11.716 | 24.186 | 10.33 | -0.027 |
| B3 | 70.987 | 9.694 | -36.655 | 31.692 | 13.574 | -8.461 | 25.816 | 17.309 | 3.455 |
| B4 | 71.17 | 9.529 | -36.941 | 31.415 | 13.617 | -8.689 | 25.398 | 17.864 | 3.601 |
| B5 | 74.851 | 10.013 | -35.003 | 39.681 | 14.062 | -3.619 | 35.514 | 16.43 | 6.902 |
| B6 | 74.932 | 14.081 | -33.791 | 39.918 | 23.445 | 0.258 | 35.726 | 27.501 | 12.48 |
| B7 | 75.514 | 15.986 | -30.257 | 40.594 | 31.154 | 4.511 | 36.779 | 35.656 | 18.418 |
| B8 | 75.413 | 17.772 | -28.229 | 40.992 | 35.726 | 7.137 | 37.303 | 40.877 | 21.337 |
| B9 | 86.06 | 9.707 | -39.214 | 59.378 | 8.061 | -0.849 | 56.894 | 8.064 | 7.389 |
| B10 | 85.74 | 11.69 | -36.591 | 60.322 | 12.023 | 1.702 | 57.849 | 12.496 | 10.989 |
| B11 | 86.311 | 15.289 | -35.231 | 60.374 | 18.801 | 5.948 | 58.079 | 19.871 | 15.874 |
| B12 | 85.615 | 20.041 | -33.279 | 60.596 | 26.666 | 8.897 | 58.408 | 28.295 | 19.04 |
| B13 | 95.603 | -3.811 | -30.626 | 77.371 | -11.395 | 2.362 | 76.745 | -13.503 | 7.696 |
| B14 | 94.473 | 14.21 | -35.087 | 75.006 | 14.792 | -1.732 | 74.082 | 14.739 | 3.706 |
| B15 | 97.597 | 5.971 | -23.9 | 79.614 | 3.243 | 16.44 | 78.99 | 2.328 | 24.158 |
| B16 | 89.688 | 4.415 | -31.93 | 68.533 | 0.334 | 5.411 | 67.295 | -0.678 | 12.105 |
| B17 | 92.224 | 12.741 | -29.896 | 72.335 | 12.859 | 9.842 | 71.258 | 12.567 | 17.129 |
| B18 | 94.047 | -1.556 | -28.196 | 75.112 | -8.39 | 8.922 | 74.267 | -10.252 | 15.873 |
| B19 | 92.652 | 6.599 | -38.181 | 71.405 | 2.581 | -4.603 | 70.115 | 1.608 | 1.438 |
| B20 | 75.785 | 10.34 | -49.724 | 30.615 | 8.185 | -18.454 | 22.786 | 10.365 | -5.204 |
| B21 | 77.015 | 16.179 | -46.433 | 37.586 | 24.589 | -10.219 | 30.961 | 30.098 | 6.973 |
| B22 | 82.612 | 16.052 | -38.175 | 56.141 | 18.652 | 2.245 | 53.112 | 19.927 | 13.25 |
| C1 | 72.541 | 6.492 | -37.961 | 32.391 | 2.003 | -9.759 | 26.181 | 2.913 | 1.501 |
| C2 | 71.514 | 6.675 | -35.421 | 31.144 | 4.681 | -8.092 | 25.552 | 6.588 | 2.311 |
| C3 | 71.586 | 6.236 | -34.252 | 32.305 | 8.375 | -4.997 | 27.302 | 10.467 | 6.312 |
| C4 | 71.4 | 7.051 | -34.055 | 32.403 | 8.165 | -6.111 | 27.074 | 10.5 | 5.936 |
| C5 | 79.768 | 9.162 | -29.518 | 50.786 | 11.45 | 6.667 | 48.493 | 12.324 | 15.228 |
| C6 | 79.461 | 12.817 | -26.717 | 49.633 | 19.977 | 13.053 | 47.038 | 22.075 | 24.291 |
| C7 | 77.956 | 15.58 | -24.892 | 48.459 | 26.575 | 15.19 | 45.824 | 29.35 | 28.046 |
| C8 | 79.028 | 16.981 | -23.361 | 49.315 | 30.004 | 17.991 | 46.913 | 32.854 | 31.03 |
| C9 | 87.591 | 9.273 | -37.376 | 61.994 | 7.407 | 1.343 | 59.857 | 7.133 | 9.757 |
| C10 | 87.028 | 11.304 | -33.461 | 62.486 | 11.697 | 5.592 | 60.343 | 11.954 | 15.03 |
| C11 | 87.329 | 14.954 | -29.239 | 64.143 | 17.394 | 14.798 | 62.493 | 17.942 | 24.887 |

Nastavak tabele P2.1. Izmerene CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| C12 | 87.142 | 18.048 | -25.538 | 64.524 | 22.353 | 21.559 | 62.869 | 23.268 | 33.517 |
| C13 | 94.577 | -6.882 | -32.238 | 76.293 | -15.7 | -1.767 | 75.659 | -18.001 | 2.984 |
| C14 | 89.888 | 18.825 | -36.371 | 69.535 | 21.955 | -4.941 | 68.257 | 22.543 | -0.03 |
| C15 | 96.304 | 8.21 | -23.407 | 77.762 | 6.612 | 18.992 | 77.111 | 5.837 | 27.379 |
| C16 | 86.775 | 5.862 | -35.293 | 62.93 | 2 | 2.712 | 61.289 | 1.285 | 9.922 |
| C17 | 88.522 | 18.251 | -33.983 | 66.69 | 21.288 | 6.018 | 65.113 | 21.994 | 13.689 |
| C18 | 92.396 | -2.152 | -29.229 | 72.797 | -10.38 | 8.957 | 71.847 | -12.42 | 15.923 |
| C19 | 88.905 | 8.546 | -40.949 | 66.004 | 5.273 | -8.97 | 64.398 | 4.687 | -3.78 |
| C20 | 74.901 | 9.041 | -48.376 | 30.777 | 4.864 | -19.448 | 21.975 | 6.14 | -6.849 |
| C21 | 79.309 | 18.688 | -37.75 | 48.715 | 26.882 | 3.389 | 44.688 | 30.07 | 18.894 |
| C22 | 84.17 | 12.71 | -36.436 | 59.577 | 12.69 | 2.957 | 57.293 | 12.858 | 11.765 |
| D1 | 71.565 | 4.264 | -34.595 | 31.971 | -1.006 | -8.517 | 25.928 | -0.947 | 2.494 |
| D2 | 73.678 | 4.691 | -34.52 | 32.652 | 0.114 | -8.208 | 26.719 | 0.527 | 2.782 |
| D3 | 71.621 | 4.958 | -34.824 | 32.443 | 0.97 | -6.8 | 27.333 | 1.005 | 4.217 |
| D4 | 72.296 | 4.152 | -34.147 | 32.732 | 0.405 | -7.406 | 27.135 | 0.562 | 3.922 |
| D5 | 80.944 | 5.01 | -27.956 | 53.245 | 3.909 | 6.879 | 50.871 | 4.063 | 15.499 |
| D6 | 81.431 | 5.045 | -21.876 | 54.434 | 5.33 | 16.413 | 52.35 | 5.711 | 26.586 |
| D7 | 80.495 | 5.15 | -21.76 | 52.995 | 5.695 | 17.171 | 50.594 | 6.092 | 29.598 |
| D8 | 81.353 | 6.076 | -20.787 | 54.733 | 6.792 | 20.736 | 52.725 | 7.156 | 32.363 |
| D9 | 89.036 | 6.074 | -34.404 | 65.441 | 2.12 | 4.226 | 63.789 | 1.211 | 12.08 |
| D10 | 89.152 | 5.571 | -29.438 | 66.835 | 2.764 | 9.257 | 65.348 | 2.001 | 17.708 |
| D11 | 89.398 | 5.217 | -25.58 | 67.785 | 1.716 | 17.823 | 66.557 | 0.878 | 27.261 |
| D12 | 90.576 | 4.881 | -23.392 | 68.804 | 0.806 | 24.69 | 67.594 | -0.235 | 36.477 |
| D13 | 91.832 | -10.189 | -36.465 | 71.353 | -23.386 | -6.535 | 70.391 | -26.532 | -1.858 |
| D14 | 89.581 | 20.054 | -38.287 | 67.371 | 24.374 | -5.298 | 65.891 | 25.335 | 0.082 |
| D15 | 95.22 | 8.555 | -21.816 | 76.183 | 6.856 | 22.944 | 75.327 | 6.185 | 32.783 |
| D16 | 84.459 | 5.508 | -37.054 | 58.521 | 1.114 | -0.074 | 56.459 | 0.472 | 7.382 |
| D17 | 86.087 | 19.86 | -33.27 | 63.523 | 24.557 | 6.103 | 61.648 | 25.716 | 14.964 |
| D18 | 89.427 | -5.196 | -29.517 | 68.323 | -16.548 | 10.439 | 67.022 | -19.301 | 19.031 |
| D19 | 85.362 | 8.758 | -44.613 | 61.214 | 4.985 | -15.961 | 59.036 | 4.483 | -11.346 |
| D20 | 77.664 | 16.487 | -41.269 | 44.344 | 23.484 | -1.999 | 39.088 | 27.379 | 15.088 |
| D21 | 81.481 | 10.472 | -38.052 | 54.469 | 9.003 | -0.007 | 51.495 | 9.162 | 9.558 |
| D22 | 86.157 | 10.313 | -35.332 | 62.6 | 9.183 | 2.058 | 60.48 | 9.119 | 10.564 |
| E1 | 71.672 | 4.899 | -36.084 | 33.223 | -2.548 | -9.774 | 26.901 | -3.5 | 0.332 |
| E2 | 71.378 | 4.029 | -36.438 | 31.601 | -2.971 | -10.091 | 25.558 | -3.89 | -0.277 |
| E3 | 72.132 | 3.606 | -37.308 | 33.463 | -4.439 | -10.24 | 27.524 | -5.513 | 1.332 |
| E4 | 71.763 | 3.788 | -37.862 | 32.747 | -4.6 | -9.253 | 27.081 | -6.073 | 1.431 |
| E5 | 77.935 | 4.233 | -36.022 | 44.74 | -1.322 | -3.346 | 40.957 | -1.829 | 6.195 |
| E6 | 75.592 | 0.992 | -30.322 | 43.497 | -7.04 | 1.909 | 39.844 | -8.322 | 12.193 |
| E7 | 75.275 | 0.056 | -30.998 | 42.121 | -10.418 | 0.933 | 38.082 | -12.348 | 11.639 |
| E8 | 75.298 | -1.082 | -29.194 | 43.953 | -11.99 | 3.815 | 40.508 | -14.169 | 14.194 |
| E9 | 85.576 | 5.349 | -36.633 | 60.112 | 0.723 | 0.628 | 57.887 | -0.102 | 8.788 |
| E10 | 85.673 | 4.406 | -36.263 | 60.853 | -1.303 | 3.317 | 58.702 | -2.416 | 12.511 |
| E11 | 85.228 | 1.8 | -33.198 | 60.615 | -5.301 | 7.506 | 58.728 | -6.814 | 16.74 |
| E12 | 85.857 | -0.148 | -30.13 | 61.724 | -9.198 | 13.643 | 59.743 | -11.27 | 25.32 |
| E13 | 90 | -11.175 | -39.932 | 68.01 | -26.667 | -10.149 | 66.811 | -30.171 | -5.895 |
| E14 | 86.355 | 22.003 | -41.364 | 61.647 | 28.751 | -8.532 | 59.549 | 30.528 | -2.43 |
| E15 | 94.771 | 10.486 | -21.069 | 74.676 | 9.702 | 28.706 | 73.794 | 9.28 | 40.554 |
| E16 | 80.963 | 6.087 | -40.626 | 51.546 | 1.35 | -3.55 | 48.665 | 0.6 | 4.384 |
| E17 | 85.017 | 21.522 | -35.928 | 58.622 | 29.785 | 5.578 | 56.088 | 32.076 | 16.436 |
| E18 | 87.672 | -6.288 | -31.947 | 64.391 | -19.818 | 8.76 | 62.644 | -23.153 | 18.271 |
| E19 | 82.39 | 8.51 | -48.239 | 55.687 | 3.899 | -21.696 | 52.883 | 3.443 | -17.544 |
| E20 | 79.192 | 20.842 | -37.357 | 49.244 | 30.165 | 7.465 | 44.931 | 33.905 | 27.297 |
| E21 | 78.887 | 16.433 | -38.436 | 48.249 | 21.256 | 4.751 | 43.814 | 23.747 | 22.912 |
| E22 | 84.97 | 14.231 | -36.054 | 57.15 | 16.479 | 6.721 | 54.18 | 17.631 | 20.106 |

Nastavak tabele P2.1. Izmerene CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| F1 | 70.274 | 5.314 | -37.966 | 29.448 | -2.744 | -14.24 | 21.615 | -3.678 | -4.409 |
| F2 | 71.14 | 4.93 | -37.044 | 30.54 | -4.564 | -13.658 | 23.033 | -7.029 | -3.323 |
| F3 | 71.139 | 4.118 | -37.236 | 30.109 | -5.508 | -13.355 | 23.035 | -7.597 | -3.748 |
| F4 | 71.643 | 4.499 | -37.782 | 29.375 | -4.19 | -14.4 | 21.839 | -5.823 | -5.205 |
| F5 | 75.235 | 3.363 | -39.212 | 38.112 | -6.082 | -10.958 | 32.631 | -7.716 | -1.639 |
| F6 | 73.371 | 0.461 | -34.161 | 36.723 | -13.934 | -6.928 | 31.642 | -17.725 | 2.512 |
| F7 | 73.615 | -0.444 | -35.736 | 36.543 | -18.051 | -7.525 | 31.334 | -23.736 | 2.286 |
| F8 | 73.983 | -1.52 | -36.06 | 38.179 | -21.059 | -6.36 | 33.579 | -26.902 | 3.308 |
| F9 | 85.796 | 4.326 | -38.17 | 59.498 | -1.942 | -0.151 | 57.443 | -3.196 | 8.066 |
| F10 | 85.456 | 2.442 | -38.115 | 59.921 | -5.756 | 1.188 | 58.01 | -7.421 | 9.269 |
| F11 | 88.772 | 0.469 | -40.354 | 60.468 | -11.606 | 0.471 | 58.588 | -14.033 | 9.992 |
| F12 | 86.179 | -3.762 | -36.43 | 60.506 | -17.839 | 4.517 | 58.58 | -20.812 | 13.447 |
| F13 | 90.104 | -9.286 | -45.339 | 66.061 | -26.707 | -16.803 | 64.616 | -30.753 | -12.497 |
| F14 | 84.725 | 23.042 | -44.237 | 58.771 | 30.334 | -11.98 | 56.39 | 32.405 | -6.391 |
| F15 | 92.184 | 10.621 | -16.556 | 73.124 | 9.625 | 39.753 | 72.4 | 8.989 | 52.563 |
| F16 | 78.643 | 7.113 | -42.913 | 45.773 | 2.023 | -6.346 | 42.323 | 1.327 | 2.758 |
| F17 | 83.731 | 24.027 | -37.472 | 56.119 | 33.814 | 4.121 | 53.091 | 36.992 | 15.77 |
| F18 | 86.813 | -5.736 | -34.866 | 60.613 | -21.893 | 9.725 | 58.878 | -25.516 | 20.614 |
| F19 | 82.12 | 9.136 | -50.738 | 51.887 | 4.787 | -24.17 | 48.138 | 4.562 | -19.331 |
| F20 | 84.614 | 11.384 | -38.817 | 56.594 | 9.557 | 3.096 | 53.38 | 9.807 | 15.762 |
| F21 | 85.354 | 13.158 | -34.58 | 59.4 | 12.846 | 12.102 | 56.825 | 13.034 | 25.687 |
| F22 | 87.399 | 11.668 | -36.06 | 63.103 | 10.169 | 6.771 | 60.943 | 10.08 | 17.349 |
| G1 | 75.209 | 8.935 | -49.705 | 34.225 | -0.347 | -24.139 | 21.739 | -2.869 | -13.031 |
| G2 | 75.348 | 8.31 | -50.234 | 34.601 | -3.176 | -23.932 | 22.268 | -7.279 | -13.409 |
| G3 | 75.173 | 7.488 | -49.802 | 35.067 | -5.095 | -23.326 | 23.579 | -10.76 | -12.474 |
| G4 | 75.563 | 7.589 | -49.838 | 34.13 | -5.157 | -22.468 | 22.706 | -10.622 | -11.918 |
| G5 | 77.898 | 6.912 | -47.811 | 41.541 | -5.576 | -17.723 | 33.136 | -9.311 | -5.603 |
| G6 | 77.714 | 5.064 | -48.992 | 41.155 | -10.639 | -19.84 | 32.125 | -17.01 | -8.311 |
| G7 | 78.091 | 2.73 | -48.777 | 41.468 | -16.891 | -18.986 | 32.785 | -26.186 | -7.261 |
| G8 | 77.655 | 0.826 | -48.173 | 42.302 | -21.007 | -17.564 | 34.683 | -30.673 | -7.121 |
| G9 | 83.839 | 1.54 | -35.375 | 58.889 | -4.403 | 0.055 | 55.914 | -5.472 | 6.726 |
| G10 | 84.829 | -0.082 | -38.316 | 58.689 | -8.534 | -2.975 | 55.57 | -10.301 | 4.144 |
| G11 | 85.197 | -3.958 | -36.312 | 60.098 | -14.633 | -3.587 | 57.078 | -16.927 | 2.832 |
| G12 | 82.61 | -8.481 | -33.617 | 59.431 | -21.583 | -0.607 | 56.43 | -24.383 | 5.167 |
| G13 | 87.337 | -13.349 | -42.195 | 60.834 | -34.46 | -12.638 | 58.005 | -39.091 | -8.082 |
| G14 | 82.547 | 23.48 | -41.511 | 53.381 | 35.082 | -7.121 | 49.637 | 37.993 | -0.796 |
| G15 | 94.978 | 10.793 | -17.566 | 73.267 | 10.663 | 40.023 | 71.251 | 10.42 | 55.087 |
| G16 | 77.673 | 6.887 | -45.385 | 40.244 | 1.803 | -9.762 | 34.39 | 1.687 | 0.437 |
| G17 | 83.995 | 24.824 | -38.993 | 53.219 | 35.541 | 8.506 | 48.421 | 39.518 | 25.922 |
| G18 | 85.558 | -4.74 | -36.515 | 57.464 | -22.885 | 8.277 | 53.322 | -27.878 | 23.563 |
| G19 | 80.676 | 10.559 | -52.246 | 45.656 | 6.767 | -27.193 | 39.255 | 7.46 | -22.465 |
| G20 | 86.264 | 11.1 | -35.886 | 60.69 | 8.342 | 7.913 | 56.979 | 8.098 | 19.932 |
| G21 | 86.846 | 11.705 | -33.334 | 60.353 | 9.932 | 14.274 | 56.523 | 9.913 | 29.721 |
| G22 | 88.724 | 14.548 | -25.36 | 64.5 | 14.272 | 31.011 | 61.184 | 14.465 | 53.415 |
| H1 | 76.462 | 9.126 | -51.254 | 34.167 | 0.143 | -25.73 | 21.026 | -1.05 | -15.419 |
| H2 | 75.16 | 8.841 | -50.608 | 33.668 | -1.177 | -26.089 | 20.706 | -3.765 | -17.28 |
| H3 | 75.061 | 7.687 | -50.23 | 34.374 | -2.781 | -25.692 | 22.848 | -6.014 | -17.921 |
| H4 | 75.545 | 8.317 | -50.291 | 33.442 | -1.966 | -26.481 | 21.288 | -4.356 | -18.658 |
| H5 | 80.147 | 7.307 | -50.194 | 40.697 | -3.687 | -20.433 | 31.718 | -6.497 | -9.382 |
| H6 | 78.372 | 4.68 | -49.229 | 41.704 | -8.95 | -23.456 | 33.104 | -13.802 | -14.974 |
| H7 | 77.145 | 2.491 | -49.69 | 41.368 | -15.45 | -25.164 | 33.455 | -22.503 | -18.506 |
| H8 | 77.699 | 2.154 | -48.991 | 40.917 | -15.911 | -25.449 | 33.282 | -22.993 | -19.609 |
| H9 | 84.47 | 2.009 | -38.611 | 57.724 | -4.208 | -1.517 | 54.486 | -5.414 | 5.93 |
| H10 | 84.986 | 0.303 | -38.019 | 59.058 | -6.969 | -3.343 | 55.784 | -8.408 | 3.766 |
| H11 | 85.194 | -3.275 | -38.964 | 58.92 | -12.481 | -8.945 | 55.803 | -14.522 | -3.669 |

Nastavak tabele P2.1. Izmerene CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| H12 | 85.575 | -3.408 | -41.953 | 59.514 | -14.413 | -13.214 | 56.36 | -16.75 | -8.427 |
| H13 | 85.811 | -13.59 | -43.482 | 57.308 | -38.305 | -16.589 | 53.911 | -44.567 | -12.087 |
| H14 | 81.341 | 23.197 | -43.099 | 49.398 | 37.07 | -10.6 | 44.588 | 41.756 | -3.123 |
| H15 | 92.12 | 12.432 | -14.976 | 70.923 | 13.437 | 42.342 | 68.622 | 13.327 | 60.15 |
| H16 | 75.574 | 6.716 | -45.618 | 35.615 | 0.399 | -14.13 | 27.803 | -0.462 | -3.001 |
| H17 | 80.654 | 25.135 | -40.632 | 48.823 | 37.157 | 3.487 | 43.283 | 42.177 | 20.435 |
| H18 | 81.016 | -4.761 | -38.29 | 51.177 | -26.572 | 3.21 | 46.343 | -33.462 | 18.471 |
| H19 | 77.125 | 10.796 | -53.302 | 39.892 | 6.963 | -31.99 | 31.825 | 8.233 | -28.71 |
| H20 | 87.024 | 9.585 | -34.073 | 62.274 | 5.897 | 11.097 | 58.858 | 5.357 | 22.815 |
| H21 | 86.939 | 8.299 | -40.819 | 59.674 | 3.048 | -1.266 | 55.836 | 2.293 | 8.724 |
| H22 | 89.059 | 7.256 | -32.742 | 62.522 | 2.008 | 14.253 | 58.906 | 1.1 | 29.638 |
| I1 | 76.718 | 9.316 | -51.253 | 34.062 | 1.674 | -25.246 | 22.087 | 1.295 | -16.063 |
| I2 | 75.997 | 7.167 | -47.623 | 33.598 | -0.35 | -25.75 | 22.214 | -0.899 | -19.642 |
| I3 | 75.007 | 8.837 | -50.599 | 33.441 | 1.801 | -29.471 | 21.572 | 1.896 | -24.289 |
| I4 | 74.424 | 9.307 | -51.038 | 33.761 | 2.007 | -30.866 | 22.412 | 2.254 | -26.339 |
| I5 | 77.966 | 7.488 | -47.292 | 42.701 | -0.03 | -16.182 | 35.75 | -1.214 | -6.388 |
| I6 | 80.372 | 7.043 | -49.244 | 44.238 | -0.738 | -19.985 | 37.115 | -1.833 | -11.54 |
| I7 | 78.919 | 7.3 | -49.609 | 43.417 | -0.649 | -23.664 | 36.037 | -1.899 | -16.425 |
| I8 | 78.703 | 8.191 | -51.749 | 42.475 | 0.567 | -28.451 | 35.216 | -0.266 | -23.809 |
| I9 | 85.008 | 4.122 | -39.56 | 57.46 | -0.641 | -2.101 | 54.066 | -1.499 | 5.807 |
| I10 | 85.442 | 3.525 | -37.236 | 59.363 | -0.99 | -3.805 | 56.213 | -1.816 | 2.861 |
| I11 | 85.168 | 6.159 | -40.878 | 59.47 | 3.183 | -11.215 | 56.456 | 2.799 | -6.669 |
| I12 | 84.792 | 6.877 | -44.572 | 58.89 | 2.84 | -16.928 | 55.525 | 2.281 | -12.47 |
| I13 | 84.524 | -13.222 | -45.228 | 55.145 | -40.066 | -19.143 | 51.54 | -46.916 | -15.053 |
| I14 | 80.966 | 23.931 | -44.585 | 47.845 | 39.127 | -12.36 | 42.94 | 44.168 | -5.117 |
| I15 | 92.79 | 13.845 | -18.127 | 69.755 | 15.34 | 42.599 | 67.367 | 15.525 | 62.774 |
| I16 | 74.124 | 6.007 | -44.632 | 33.52 | 0.464 | -15.669 | 25.118 | 0.04 | -5.145 |
| I17 | 79.441 | 24.508 | -41.134 | 46.082 | 38.425 | 1.702 | 40.011 | 44.429 | 20.09 |
| I18 | 80.418 | -3.405 | -40.64 | 47.803 | -27.571 | 3.519 | 42.451 | -35.75 | 21.315 |
| I19 | 75.283 | 11.06 | -54.124 | 36.239 | 6.155 | -35.454 | 26.451 | 8.083 | -33.705 |
| I20 | 87.413 | 4.424 | -29.976 | 63.653 | -1.426 | 15.198 | 60.553 | -2.808 | 26.791 |
| I21 | 80.586 | 3.642 | -41.484 | 47.406 | -10.275 | 1.203 | 41.5 | -14.176 | 20.408 |
| I22 | 87.497 | -1.193 | -37.163 | 59.547 | -14.025 | 4.874 | 56.099 | -16.894 | 15.456 |
| J1 | 74.184 | 9.096 | -49.279 | 30.607 | 3.276 | -25.331 | 17.135 | 4.561 | -17.698 |
| J2 | 73.51 | 8.558 | -48.122 | 31.615 | 2.61 | -26.826 | 18.016 | 4.6 | -20.963 |
| J3 | 73.845 | 10.659 | -51.336 | 31.786 | 5.359 | -30.718 | 18.806 | 8.968 | -27.443 |
| J4 | 74.281 | 10.534 | -51.175 | 31.619 | 6.736 | -32.246 | 18.984 | 10.493 | -28.833 |
| J5 | 77.454 | 8.284 | -47.517 | 40.345 | 2.523 | -18.587 | 32.469 | 2.375 | -9.292 |
| J6 | 78.444 | 8.999 | -48.504 | 40.861 | 4.451 | -22.189 | 32.379 | 5.347 | -14.175 |
| J7 | 76.782 | 9.596 | -48.469 | 40.141 | 7.567 | -23.691 | 32.457 | 9.054 | -17.423 |
| J8 | 77.42 | 11.25 | -50.846 | 39.82 | 10.228 | -28.175 | 31.825 | 12.575 | -23.376 |
| J9 | 84.693 | 4.766 | -38.516 | 57.348 | 0.697 | -2.921 | 53.969 | 0.048 | 4.553 |
| J10 | 84.956 | 5.007 | -37.43 | 58.908 | 2.371 | -4.353 | 55.75 | 1.831 | 2.052 |
| J11 | 85.38 | 8.023 | -40.316 | 59.311 | 7.167 | -10.837 | 56.164 | 7.101 | -5.779 |
| J12 | 83.46 | 9.826 | -42.63 | 57.864 | 9.706 | -15.605 | 54.493 | 9.968 | -11.346 |
| J13 | 83.137 | -13.455 | -44.955 | 53.185 | -41.272 | -21.458 | 49.526 | -48.781 | -17.947 |
| J14 | 79.646 | 23.53 | -46 | 44.483 | 40.849 | -16.499 | 38.847 | 47.172 | -9.757 |
| J15 | 90.817 | 14.802 | -18.993 | 67.276 | 17.251 | 40.878 | 64.666 | 17.665 | 62.303 |
| J16 | 74.484 | 6.599 | -45.743 | 30.365 | 0.687 | -18.259 | 20.044 | 0.206 | -8.684 |
| J17 | 78.032 | 23.131 | -41.558 | 43.829 | 36.713 | -0.116 | 37.345 | 43.127 | 19.854 |
| J18 | 80.298 | -1.862 | -43.358 | 42.413 | -28.29 | -0.822 | 36.93 | -38.138 | 16.395 |
| J19 | 74.33 | 10.413 | -52.891 | 33.444 | 6.34 | -34.812 | 22.523 | 9.317 | -33.027 |
| J20 | 86.4 | -3.289 | -38.238 | 59.955 | -16.978 | -0.202 | 56.621 | -20.31 | 8.342 |
| J21 | 78.502 | 3.689 | -48.282 | 35.98 | -16.613 | -11.124 | 28.415 | -25.832 | 5.23 |
| J22 | 76.063 | 7.903 | -50.435 | 28.279 | -2.532 | -21.006 | 17.468 | -6.464 | -8.926 |

Nastavak tabele P2.1. Izmerene CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| K1 | 75.167 | 10.276 | -48.937 | 34.106 | 6.451 | -24.14 | 22.701 | 8.865 | -14.82 |
| K2 | 76.591 | 11.633 | -49.823 | 35.429 | 11.28 | -25.012 | 24.145 | 16.784 | -16.862 |
| K3 | 74.323 | 13.93 | -49.368 | 34.988 | 17.11 | -26.736 | 24.501 | 24.091 | -20.209 |
| K4 | 76.046 | 14.674 | -50.944 | 36.581 | 18.352 | -27.466 | 26.291 | 25.266 | -20.787 |
| K5 | 78.971 | 10.862 | -46.72 | 43.963 | 8.254 | -16.774 | 36.842 | 9.436 | -7.165 |
| K6 | 78.781 | 13.383 | -47.604 | 43.545 | 14.839 | -18.552 | 36.085 | 18.052 | -9.829 |
| K7 | 78.276 | 15.903 | -47.218 | 43.36 | 21.746 | -19.599 | 35.779 | 26.898 | -11.05 |
| K8 | 77.998 | 19.558 | -49.22 | 42.395 | 29.343 | -23.235 | 35.422 | 35.163 | -17.146 |
| K9 | 85.289 | 7.307 | -38.751 | 57.091 | 5.594 | -3.916 | 53.668 | 5.462 | 3.442 |
| K10 | 85.379 | 9.101 | -39.374 | 58.105 | 8.936 | -5.424 | 54.652 | 9.165 | 1.533 |
| K11 | 84.619 | 13.096 | -40.763 | 58.642 | 14.871 | -9.931 | 55.478 | 15.467 | -4.928 |
| K12 | 85.029 | 16.919 | -44.245 | 57.98 | 21.518 | -14.328 | 54.597 | 22.915 | -9.436 |
| K13 | 83.106 | -10.458 | -46.75 | 51.698 | -37.317 | -22.091 | 47.675 | -44.934 | -18.183 |
| K14 | 78.239 | 25.51 | -46.888 | 43.9 | 42.799 | -19.174 | 38.12 | 49.272 | -12.731 |
| K15 | 90.705 | 15.509 | -20.894 | 66.17 | 18.563 | 38.503 | 63.525 | 19.066 | 60.469 |
| K16 | 72.481 | 7.166 | -46.11 | 28.139 | 0.941 | -19.637 | 16.474 | 0.475 | -11.376 |
| K17 | 77.582 | 22.226 | -42.46 | 41.578 | 36.966 | -0.556 | 35.164 | 43.339 | 19.385 |
| K18 | 77.684 | 1.376 | -45.954 | 38.747 | -22.457 | -7.554 | 32.089 | -32.929 | 8.882 |
| K19 | 74.502 | 10.596 | -52.818 | 32.104 | 6.032 | -33.241 | 20.333 | 9.085 | -30.821 |
| K20 | 74.902 | 7.872 | -49.402 | 32.981 | -3.317 | -20.452 | 21.929 | -7.362 | -9.306 |
| K21 | 74.869 | 7.788 | -50.104 | 30.119 | -1.354 | -23.038 | 18.211 | -4.004 | -13.336 |
| K22 | 73.082 | 7.728 | -48.804 | 30.867 | -1.563 | -23.623 | 18.736 | -4.38 | -16.329 |
| L1 | 74.467 | 10.547 | -49.321 | 32.509 | 5.625 | -23.318 | 20.149 | 8.263 | -13.311 |
| L2 | 74.729 | 11.365 | -49.312 | 33.11 | 9.711 | -23.353 | 20.819 | 14.991 | -14.027 |
| L3 | 74.715 | 12.95 | -48.641 | 33.64 | 15.676 | -22.427 | 22.62 | 22.776 | -12.12 |
| L4 | 75.119 | 13.87 | -48.931 | 35.345 | 17.186 | -22.619 | 24.223 | 24.915 | -12.212 |
| L5 | 77.433 | 12.07 | -46.723 | 40.65 | 11.908 | -16.14 | 33.123 | 14.37 | -6.076 |
| L6 | 78.168 | 16.961 | -46.808 | 42.79 | 22.526 | -15.945 | 35.301 | 27.226 | -5.357 |
| L7 | 78.632 | 19.251 | -47.249 | 41.482 | 30.193 | -16.8 | 33.69 | 37.378 | -6.619 |
| L8 | 78.843 | 21.199 | -46.449 | 42.548 | 34.337 | -15.479 | 35.388 | 41.598 | -5.685 |
| L9 | 84.203 | 7.899 | -37.873 | 57.769 | 6.083 | -2.32 | 54.405 | 5.894 | 5.167 |
| L10 | 86.002 | 7.823 | -38.338 | 58.662 | 6.103 | -1.7 | 55.37 | 5.923 | 5.897 |
| L11 | 85.53 | 14.107 | -37.383 | 59.097 | 17.327 | -1.475 | 55.883 | 18.154 | 6.016 |
| L12 | 85.038 | 21.227 | -36.898 | 58.37 | 29.616 | 0.25 | 55.261 | 31.412 | 7.688 |
| L13 | 81.854 | -7.298 | -47.547 | 49.443 | -32.323 | -21.734 | 45.15 | -39.357 | -17.278 |
| L14 | 79.614 | 24.142 | -47.34 | 43.469 | 41.53 | -20.09 | 37.481 | 48.564 | -14.028 |
| L15 | 89.437 | 16.441 | -19.347 | 66.103 | 19.171 | 41.618 | 63.597 | 19.521 | 62.367 |
| L16 | 73.196 | 7.742 | -47.3 | 28.011 | 1.208 | -21.079 | 15.068 | 1.155 | -12.302 |
| L17 | 78.442 | 20.487 | -43.232 | 40.99 | 33.829 | -4.061 | 34.187 | 40.445 | 15.292 |
| L18 | 77.234 | 1.106 | -45.587 | 38.151 | -21.724 | -8.659 | 31.234 | -32.047 | 7.837 |
| L19 | 75.931 | 10.287 | -53.138 | 29.921 | 5.803 | -31.51 | 18.354 | 8.833 | -28.529 |
| L20 | 75.006 | 8.845 | -50.285 | 29.357 | 1.388 | -23.969 | 16.446 | 0.263 | -14.867 |
| L21 | 74.32 | 9.136 | -50.532 | 29.535 | 2.135 | -23.814 | 16.273 | 2.529 | -14.782 |
| L22 | 75.175 | 10.019 | -50.594 | 29.165 | 6.154 | -23.12 | 16.757 | 9.476 | -12.863 |
| GS1 | 106.838 | 4.957 | -31.371 | 88.858 | 1.07 | 3.926 | 87.591 | -0.338 | 8.823 |
| GS2 | 103.325 | 4.399 | -27.372 | 84.524 | 0.705 | 11.714 | 82.937 | -0.634 | 18.158 |
| GS3 | 99.716 | 2.914 | -26.862 | 80.316 | -1.094 | 12.613 | 78.655 | -2.476 | 19.511 |
| GS4 | 95.22 | 3.433 | -29.263 | 74.86 | -1.369 | 9.847 | 72.807 | -2.675 | 16.846 |
| GS5 | 92.358 | 5.469 | -34.391 | 69.163 | 0.567 | 5.996 | 66.682 | -0.619 | 14.061 |
| GS6 | 92.63 | 5.397 | -36.02 | 68.469 | -0.008 | 5.368 | 65.669 | -1.212 | 14.455 |
| GS7 | 89.267 | 5.737 | -38.987 | 63.305 | 0.294 | 1.324 | 60.101 | -0.835 | 10.758 |
| GS8 | 83.498 | 6.91 | -41.412 | 55.086 | 1.136 | -4.365 | 51.142 | 0.344 | 5.046 |
| GS9 | 85.082 | 6.485 | -40.992 | 57.668 | 0.201 | -2.339 | 54.226 | -0.597 | 6.438 |
| GS10 | 85.192 | 6.423 | -43.906 | 54.791 | 0.625 | -2.837 | 51.143 | -0.224 | 6.461 |
| GS11 | 83.274 | 6.611 | -44.695 | 51.586 | 0.625 | -6.325 | 47.271 | -0.281 | 3.736 |

Nastavak tabele P2.1. Izmerene CIELAB (D65/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|-------------|---------|-------|---------|---------|-------|---------|---------|--------|---------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| GS12 | 81.419 | 6.582 | -43.884 | 50.689 | 0.254 | -6.201 | 46.493 | -0.619 | 3.38 |
| GS13 | 78.91 | 7.463 | -44.824 | 45.019 | 1.141 | -9.68 | 40.223 | 0.494 | -0.225 |
| GS14 | 79.659 | 8.041 | -48.323 | 42.783 | 0.795 | -12.753 | 36.793 | -0.039 | -1.788 |
| GS15 | 78.89 | 8.546 | -47.931 | 42.404 | 1.236 | -12.104 | 36.688 | 0.499 | -1.466 |
| GS16 | 77.069 | 8.04 | -47.152 | 39.286 | 1.446 | -15.145 | 32.312 | 1.016 | -4.623 |
| GS17 | 76.868 | 8.447 | -47.247 | 37.26 | 1.657 | -16.571 | 29.86 | 1.044 | -5.82 |
| GS18 | 76.393 | 8.622 | -47.734 | 36.823 | 1.515 | -16.893 | 29.21 | 1.225 | -6.427 |
| GS19 | 76.282 | 8.399 | -49.021 | 35.268 | 1.593 | -18.534 | 26.545 | 0.995 | -7.113 |
| GS20 | 75.845 | 8.41 | -48.944 | 33.935 | 1.732 | -19.502 | 24.889 | 1.084 | -8.825 |
| GS21 | 75.867 | 8.662 | -48.932 | 32.78 | 1.522 | -20.563 | 22.933 | 1.421 | -9.731 |
| GS22 | 74.579 | 8.84 | -48.627 | 32.196 | 1.466 | -20.813 | 22.312 | 0.686 | -10.014 |
| GS23 | 73.737 | 8.759 | -49.259 | 30.756 | 1.821 | -22.142 | 19.9 | 1.588 | -11.484 |
| GS24 | 74.926 | 9.329 | -49.75 | 31.072 | 1.577 | -23.196 | 19.776 | 0.964 | -12.095 |
| GS25 | 76.513 | 9.505 | -51.91 | 29.22 | 1.726 | -23.74 | 18.403 | 1.405 | -12.529 |
| GS26 | 75.272 | 8.826 | -50.607 | 28.134 | 2.148 | -23.318 | 17.793 | 1.429 | -12.16 |

Tabela P2. 2. Izmerene CIELAB (A/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|-----|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| A1 | 70.369 | -1.53 | -45.819 | 29.761 | 5.031 | -16.33 | 23.026 | 10.747 | -3.718 |
| A2 | 69.443 | 0.613 | -43.895 | 30.494 | 10.791 | -14.267 | 24.408 | 17.086 | 0.2 |
| A3 | 70.411 | 3.621 | -43.958 | 33.336 | 18.992 | -10.366 | 27.907 | 26.193 | 5.394 |
| A4 | 68.771 | 5.271 | -41.539 | 33.952 | 22.368 | -6.147 | 29.405 | 28.534 | 7.822 |
| A5 | 72.83 | 4.36 | -41.869 | 41.114 | 16.67 | -5.75 | 37.75 | 20.327 | 4.778 |
| A6 | 76.907 | 14.916 | -38.764 | 41.827 | 24.325 | -5.383 | 37.589 | 28.358 | 4.735 |
| A7 | 75.389 | 17.535 | -36.32 | 41.319 | 31.48 | -3.323 | 37.336 | 36.197 | 6.37 |
| A8 | 75.785 | 19.459 | -31.99 | 47.231 | 43.713 | 10.636 | 45.015 | 48.145 | 22.842 |
| A9 | 83.052 | 4.525 | -41.631 | 60.81 | 11.848 | 0.012 | 59.013 | 13.19 | 8.173 |
| A10 | 83.113 | 7.315 | -38.384 | 61.676 | 16.34 | 1.748 | 59.872 | 18.169 | 10.56 |
| A11 | 84.366 | 13.023 | -35.61 | 63.451 | 24.498 | 6.964 | 61.834 | 26.69 | 16.085 |
| A12 | 84.591 | 18.608 | -34.644 | 63.918 | 32.542 | 9.501 | 62.442 | 35.102 | 18.792 |
| A13 | 95.538 | 0.577 | -31.824 | 80.468 | 4.192 | 3.683 | 80.22 | 3.98 | 8.622 |
| A14 | 95.843 | 1.21 | -31.446 | 80.806 | 5.23 | 4.977 | 80.524 | 5.11 | 10.109 |
| A15 | 96.378 | 1.546 | -28.944 | 81.47 | 5.793 | 10.017 | 81.289 | 5.656 | 15.391 |
| A16 | 95.308 | 0.435 | -29.248 | 80.079 | 4.328 | 8.605 | 79.912 | 4.223 | 13.766 |
| A17 | 96.386 | 1.986 | -30.171 | 80.823 | 6.318 | 10.182 | 80.445 | 6.35 | 16.593 |
| A18 | 95.012 | -0.89 | -29.677 | 79.304 | 2.832 | 10.171 | 78.912 | 2.706 | 16.679 |
| A19 | 95.859 | -0.094 | -31.74 | 80.036 | 3.702 | 6.399 | 79.749 | 3.608 | 12.477 |
| A20 | 71.709 | -3.036 | -55.669 | 27.624 | -0.661 | -23.503 | 19.872 | 3.531 | -9.78 |
| A21 | 72.146 | 3.754 | -49.82 | 35.646 | 16.238 | -13.177 | 29.612 | 22.723 | 4.237 |
| A22 | 75.011 | 10.392 | -47.441 | 40.871 | 31.202 | -1.386 | 36.916 | 36.981 | 18.574 |
| B1 | 68.698 | -1.134 | -39.989 | 28.926 | 3.138 | -12.535 | 22.999 | 7.292 | -0.542 |
| B2 | 69.491 | 0.271 | -41.255 | 30.661 | 8.201 | -11.29 | 25.377 | 13.097 | 2.15 |
| B3 | 68.797 | 3.162 | -38.604 | 32.651 | 15.466 | -6.278 | 28.076 | 20.551 | 7.496 |
| B4 | 68.931 | 2.966 | -38.96 | 32.36 | 15.523 | -6.517 | 27.735 | 20.999 | 7.769 |
| B5 | 72.912 | 4.713 | -36.644 | 41.058 | 17.212 | -1.07 | 37.846 | 20.797 | 10.561 |
| B6 | 73.643 | 10.106 | -34.252 | 42.717 | 27.114 | 5.383 | 39.696 | 31.502 | 19.166 |
| B7 | 74.839 | 13.979 | -29.877 | 44.627 | 35.148 | 11.768 | 42.031 | 39.54 | 27.257 |
| B8 | 75.175 | 16.771 | -27.141 | 45.768 | 39.845 | 15.652 | 43.347 | 44.454 | 31.585 |
| B9 | 83.694 | 3.814 | -41.697 | 60.23 | 11.393 | 0.158 | 58.281 | 12.887 | 8.707 |
| B10 | 83.905 | 6.996 | -38.202 | 61.812 | 16.049 | 3.877 | 59.957 | 17.916 | 13.603 |
| B11 | 85.069 | 11.689 | -35.757 | 62.934 | 23.581 | 9.993 | 61.308 | 25.808 | 20.424 |
| B12 | 85.166 | 17.647 | -32.382 | 64.273 | 31.582 | 15.009 | 62.794 | 34.061 | 25.747 |
| B13 | 92.561 | -8.005 | -35.361 | 76.253 | -7.576 | -1.414 | 75.757 | -8.366 | 3.524 |
| B14 | 93.15 | 9.979 | -35.932 | 76.586 | 17.474 | 0.727 | 76.019 | 18.379 | 6.379 |
| B15 | 96.366 | 4.418 | -25.299 | 81.008 | 9.391 | 16.983 | 80.686 | 9.682 | 24.483 |
| B16 | 87.467 | 0.34 | -34.729 | 68.925 | 4.858 | 4.791 | 67.984 | 5.188 | 11.362 |
| B17 | 91.227 | 10.627 | -30.606 | 74.431 | 18.31 | 12.122 | 73.723 | 19.117 | 19.379 |
| B18 | 91.508 | -5.016 | -31.862 | 74.764 | -3.412 | 6.52 | 74.133 | -3.834 | 13.11 |
| B19 | 90.06 | 0.81 | -41.323 | 71.349 | 5.018 | -5.382 | 70.381 | 5.411 | 0.663 |
| B20 | 72.118 | -0.807 | -53.789 | 29.936 | 6.561 | -18.74 | 23.607 | 11.928 | -3.417 |
| B21 | 74.553 | 8.574 | -48.453 | 39.8 | 26.788 | -5.573 | 35.018 | 33.259 | 14.245 |
| B22 | 81.131 | 11.461 | -38.915 | 58.454 | 22.759 | 6.159 | 56.207 | 25.305 | 17.846 |
| C1 | 69.812 | -0.991 | -40.836 | 31.823 | 3.037 | -10.505 | 26.595 | 6.528 | 1.826 |
| C2 | 69.094 | -0.149 | -37.867 | 31.044 | 6.124 | -7.948 | 26.45 | 10.023 | 3.688 |
| C3 | 69.237 | 0.172 | -36.739 | 32.902 | 10.654 | -3.712 | 28.894 | 14.45 | 8.779 |
| C4 | 69.176 | 1.121 | -36.264 | 32.885 | 10.367 | -4.981 | 28.648 | 14.485 | 8.411 |
| C5 | 78.328 | 5.875 | -30.575 | 52.52 | 16.36 | 9.23 | 50.789 | 18.297 | 18.198 |
| C6 | 78.752 | 11.127 | -26.531 | 52.73 | 25.436 | 18.034 | 50.869 | 28.183 | 29.905 |
| C7 | 77.757 | 14.938 | -23.863 | 52.455 | 31.941 | 21.827 | 50.657 | 35.031 | 35.46 |
| C8 | 79.15 | 16.937 | -21.857 | 53.862 | 35.403 | 25.531 | 52.279 | 38.398 | 39.338 |
| C9 | 85.382 | 4.099 | -39.674 | 62.92 | 11.346 | 2.354 | 61.28 | 12.569 | 10.976 |
| C10 | 85.479 | 7.533 | -34.667 | 64.188 | 16.403 | 7.969 | 62.611 | 18.074 | 17.681 |
| C11 | 86.653 | 12.764 | -28.913 | 67.041 | 23.315 | 19.044 | 65.931 | 24.951 | 29.342 |

Nastavak tabele P2.2. Izmerene CIELAB (A/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| C12 | 87.201 | 17.15 | -23.987 | 68.339 | 28.817 | 27.326 | 67.273 | 30.648 | 39.468 |
| C13 | 90.999 | -11.755 | -37.95 | 74.398 | -12.722 | -6.831 | 73.859 | -13.692 | -2.5 |
| C14 | 88.986 | 14.917 | -36.3 | 71.745 | 24.464 | -1.013 | 70.878 | 25.846 | 4.281 |
| C15 | 95.381 | 6.808 | -24.068 | 79.671 | 12.938 | 20.696 | 79.346 | 13.371 | 28.887 |
| C16 | 84.366 | 0.701 | -38.163 | 63.332 | 5.962 | 2.444 | 62.063 | 6.651 | 9.68 |
| C17 | 87.787 | 15.427 | -33.749 | 69.547 | 25.986 | 10.412 | 68.487 | 27.651 | 18.415 |
| C18 | 89.676 | -6.185 | -33.004 | 72.232 | -5.31 | 6.32 | 71.479 | -5.847 | 12.917 |
| C19 | 86.221 | 2.087 | -44.072 | 65.918 | 7.052 | -9.459 | 64.641 | 7.774 | -4.151 |
| C20 | 71.226 | -2.038 | -52.54 | 29.567 | 2.27 | -20.704 | 22.145 | 6.999 | -6.152 |
| C21 | 78.192 | 14.665 | -37.777 | 52.117 | 31.002 | 9.529 | 49.261 | 35.038 | 26.31 |
| C22 | 82.466 | 8.111 | -37.736 | 61.227 | 16.893 | 5.393 | 59.485 | 18.425 | 14.518 |
| D1 | 68.939 | -2.282 | -37.533 | 31.163 | 0.181 | -9.843 | 25.971 | 2.895 | 1.96 |
| D2 | 71.128 | -1.967 | -37.285 | 32.004 | 1.232 | -9.146 | 26.948 | 4.226 | 2.751 |
| D3 | 69.052 | -1.798 | -37.642 | 32.018 | 2.449 | -7.358 | 27.71 | 4.932 | 4.414 |
| D4 | 69.71 | -2.307 | -37.059 | 32.189 | 1.752 | -8.187 | 27.445 | 4.473 | 3.972 |
| D5 | 79.16 | 1.962 | -29.879 | 54.125 | 9.055 | 7.662 | 52.247 | 10.522 | 16.52 |
| D6 | 80.242 | 3.849 | -22.936 | 56.012 | 11.893 | 18.017 | 54.421 | 13.385 | 28.255 |
| D7 | 79.328 | 3.809 | -22.737 | 54.652 | 12.08 | 19.065 | 52.816 | 13.697 | 31.563 |
| D8 | 80.387 | 4.966 | -21.385 | 56.691 | 13.477 | 23.006 | 55.179 | 14.942 | 34.596 |
| D9 | 86.761 | 1.492 | -37.02 | 65.955 | 6.605 | 4.174 | 64.682 | 7.242 | 11.993 |
| D10 | 87.32 | 2.264 | -31.423 | 67.743 | 8.088 | 9.783 | 66.642 | 8.795 | 18.186 |
| D11 | 87.9 | 2.793 | -27.001 | 69.062 | 8.319 | 18.638 | 68.195 | 8.883 | 27.871 |
| D12 | 89.248 | 2.898 | -24.487 | 70.33 | 8.094 | 25.743 | 69.5 | 8.564 | 37.113 |
| D13 | 87.389 | -16.167 | -43.711 | 68.237 | -20.981 | -13.97 | 67.312 | -22.6 | -9.875 |
| D14 | 88.632 | 15.994 | -38.224 | 69.852 | 27.033 | -0.858 | 68.86 | 28.797 | 5.021 |
| D15 | 94.482 | 7.47 | -22.082 | 78.32 | 13.629 | 25.029 | 77.834 | 14.186 | 34.671 |
| D16 | 81.801 | -0.533 | -40.262 | 58.629 | 4.323 | -0.635 | 56.986 | 5.191 | 6.938 |
| D17 | 85.618 | 17.501 | -32.522 | 66.781 | 29.34 | 11.381 | 65.531 | 31.39 | 20.749 |
| D18 | 86.303 | -9.415 | -33.989 | 67.184 | -10.966 | 6.681 | 66.092 | -11.836 | 14.74 |
| D19 | 82.247 | 0.936 | -48.275 | 60.491 | 5.189 | -17.107 | 58.651 | 5.994 | -12.288 |
| D20 | 75.858 | 10.876 | -42.385 | 46.99 | 27.017 | 3.027 | 43.158 | 32.035 | 21.823 |
| D21 | 79.305 | 4.772 | -40.121 | 55.49 | 12.661 | 1.502 | 53.131 | 14.437 | 11.458 |
| D22 | 84.285 | 5.895 | -37.115 | 63.781 | 13.322 | 3.51 | 62.178 | 14.674 | 12.27 |
| E1 | 68.956 | -2.259 | -39.085 | 32.124 | -2.017 | -11.606 | 26.51 | -0.181 | -0.945 |
| E2 | 68.507 | -3.409 | -39.767 | 30.422 | -2.817 | -11.981 | 25.082 | -0.995 | -1.532 |
| E3 | 69.111 | -4.217 | -40.889 | 32.104 | -4.491 | -12.445 | 26.985 | -2.529 | -0.099 |
| E4 | 68.695 | -4.24 | -41.486 | 31.462 | -4.546 | -11.349 | 26.489 | -3.177 | -0.075 |
| E5 | 75.189 | -1.9 | -39.288 | 44.327 | 1.577 | -4.48 | 41.139 | 3.176 | 5.389 |
| E6 | 73.058 | -3.8 | -33.397 | 42.827 | -3.015 | 0.093 | 39.668 | -2.145 | 10.439 |
| E7 | 72.554 | -5.214 | -34.386 | 41.013 | -6.854 | -1.653 | 37.449 | -6.312 | 9.033 |
| E8 | 72.629 | -5.743 | -32.594 | 42.875 | -7.519 | 1.057 | 39.823 | -7.313 | 11.186 |
| E9 | 82.951 | -0.319 | -39.75 | 60.222 | 4.526 | 0.08 | 58.433 | 5.349 | 8.331 |
| E10 | 82.976 | -1.143 | -39.509 | 60.92 | 3.018 | 2.575 | 59.21 | 3.729 | 11.775 |
| E11 | 82.538 | -3.242 | -36.497 | 60.509 | -0.175 | 6.238 | 58.99 | 0.155 | 15.297 |
| E12 | 83.256 | -4.552 | -33.325 | 61.564 | -3.09 | 12.012 | 59.958 | -3.031 | 23.249 |
| E13 | 85.029 | -18.384 | -48.03 | 64.224 | -25.286 | -18.73 | 63.018 | -27.31 | -15.111 |
| E14 | 85.305 | 17.305 | -41.263 | 64.442 | 30.837 | -3.202 | 63 | 33.35 | 3.718 |
| E15 | 94.328 | 9.611 | -20.665 | 77.4 | 16.915 | 31.838 | 76.94 | 17.74 | 43.393 |
| E16 | 77.947 | -1.431 | -44.205 | 51.429 | 3.552 | -4.157 | 49.017 | 4.516 | 3.977 |
| E17 | 84.482 | 18.771 | -35.077 | 62.492 | 34.243 | 12.252 | 60.81 | 37.278 | 23.981 |
| E18 | 84.158 | -11.565 | -36.944 | 62.796 | -14.513 | 4.301 | 61.269 | -15.646 | 13.192 |
| E19 | 78.768 | -1.008 | -52.59 | 54.265 | 2.485 | -23.772 | 51.801 | 3.44 | -19.379 |
| E20 | 78.398 | 17.411 | -36.744 | 53.294 | 34.705 | 14.746 | 50.294 | 39.136 | 35.921 |
| E21 | 77.406 | 11.7 | -39.049 | 51.043 | 25.733 | 9.768 | 47.776 | 29.576 | 29.014 |
| E22 | 83.505 | 9.985 | -36.828 | 59.483 | 21.301 | 10.519 | 57.339 | 23.922 | 24.5 |

Nastavak tabele P2.2. Izmerene CIELAB (A/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| F1 | 67.375 | -2.737 | -41.207 | 27.872 | -4.403 | -16.649 | 20.835 | -2.334 | -6.026 |
| F2 | 68.312 | -2.744 | -40.191 | 28.816 | -6.091 | -16.357 | 21.97 | -5.458 | -5.542 |
| F3 | 68.185 | -3.793 | -40.615 | 28.304 | -6.999 | -16.26 | 21.873 | -6.122 | -6.138 |
| F4 | 68.678 | -3.578 | -41.201 | 27.606 | -6.241 | -17.124 | 20.747 | -5.032 | -7.318 |
| F5 | 71.99 | -4.403 | -43.214 | 36.502 | -5.579 | -13.913 | 31.623 | -4.432 | -4.228 |
| F6 | 70.34 | -6.032 | -37.943 | 34.597 | -12.712 | -11.049 | 29.872 | -13.57 | -1.823 |
| F7 | 70.291 | -7.516 | -39.997 | 33.915 | -17.543 | -12.568 | 28.938 | -20.165 | -3.293 |
| F8 | 70.487 | -8.892 | -40.628 | 35.336 | -20.284 | -11.965 | 30.938 | -23.186 | -2.891 |
| F9 | 82.879 | -2.178 | -41.642 | 59.252 | 1.425 | -1.138 | 57.6 | 1.951 | 7.138 |
| F10 | 82.31 | -4.249 | -42.022 | 59.342 | -2.154 | -0.568 | 57.777 | -1.999 | 7.432 |
| F11 | 85.161 | -7.013 | -45.023 | 59.188 | -7.877 | -2.686 | 57.682 | -7.991 | 6.633 |
| F12 | 82.469 | -10.298 | -41.51 | 58.839 | -13.265 | 0.283 | 57.169 | -14.025 | 8.794 |
| F13 | 84.718 | -19.267 | -53.449 | 61.643 | -29.057 | -25.444 | 60.171 | -31.685 | -21.725 |
| F14 | 83.476 | 17.357 | -44.197 | 61.508 | 31.504 | -6.306 | 59.812 | 34.198 | 0.244 |
| F15 | 92.144 | 10.651 | -15.46 | 76.278 | 17.9 | 43.074 | 75.887 | 18.384 | 55.173 |
| F16 | 75.458 | -1.779 | -46.471 | 45.514 | 3.309 | -6.679 | 42.648 | 4.636 | 2.864 |
| F17 | 83.35 | 21.144 | -36.216 | 60.409 | 37.858 | 11.742 | 58.388 | 41.525 | 24.595 |
| F18 | 83.046 | -12.016 | -40.056 | 58.866 | -16.484 | 5.079 | 57.388 | -17.667 | 15.303 |
| F19 | 78.256 | -1.132 | -55.397 | 50.29 | 2.845 | -26.433 | 46.995 | 4.359 | -21.196 |
| F20 | 82.493 | 5.835 | -40.687 | 57.887 | 13.88 | 5.029 | 55.425 | 15.943 | 18.151 |
| F21 | 83.914 | 9.113 | -35.3 | 61.619 | 18.323 | 15.418 | 59.708 | 20.072 | 29.202 |
| F22 | 85.628 | 7.209 | -37.48 | 64.701 | 15.021 | 8.953 | 63.118 | 16.432 | 19.762 |
| G1 | 71.353 | -2.346 | -54.152 | 31.82 | -5.661 | -27.441 | 20.197 | -4.573 | -15.443 |
| G2 | 71.34 | -3.258 | -54.951 | 31.875 | -8.859 | -27.844 | 20.166 | -9.755 | -16.84 |
| G3 | 71.112 | -3.931 | -54.652 | 32.187 | -10.385 | -27.633 | 21.192 | -12.83 | -16.612 |
| G4 | 71.517 | -3.934 | -54.656 | 31.338 | -10.355 | -26.636 | 20.39 | -12.701 | -15.93 |
| G5 | 74.073 | -3.251 | -52.395 | 39.321 | -7.59 | -21.265 | 31.613 | -7.472 | -8.785 |
| G6 | 73.492 | -5.762 | -54.28 | 38.101 | -13.884 | -24.888 | 29.511 | -16.537 | -13.472 |
| G7 | 73.601 | -8.068 | -54.615 | 37.788 | -20.656 | -25.34 | 29.305 | -26.576 | -14.337 |
| G8 | 72.992 | -9.905 | -54.391 | 38.323 | -24.426 | -24.708 | 30.758 | -31.381 | -15.182 |
| G9 | 80.872 | -4.062 | -39.365 | 58.376 | -0.646 | -1.949 | 55.728 | -0.257 | 4.672 |
| G10 | 81.344 | -6.848 | -43.085 | 57.486 | -5.473 | -6.072 | 54.68 | -5.417 | 0.891 |
| G11 | 81.468 | -10.344 | -41.747 | 58.17 | -11.56 | -8.25 | 55.379 | -12.074 | -2.102 |
| G12 | 78.614 | -14.301 | -39.733 | 56.984 | -18.017 | -6.537 | 54.108 | -19.192 | -1.215 |
| G13 | 81.802 | -21.505 | -51.2 | 55.969 | -34.46 | -23.234 | 53.089 | -37.644 | -19.446 |
| G14 | 81.649 | 19.571 | -41.203 | 57.106 | 37.617 | -0.288 | 54.171 | 40.726 | 7.12 |
| G15 | 94.882 | 10.328 | -16.484 | 76.552 | 18.429 | 43.814 | 74.955 | 19.217 | 58.161 |
| G16 | 74.142 | -2.835 | -49.55 | 39.659 | 2.115 | -10.625 | 34.583 | 4.3 | 0.27 |
| G17 | 83.567 | 21.694 | -37.642 | 57.988 | 39.94 | 16.985 | 54.445 | 44.14 | 35.763 |
| G18 | 81.72 | -11.532 | -41.656 | 55.519 | -17.908 | 3.543 | 51.731 | -19.644 | 17.904 |
| G19 | 76.777 | -0.282 | -56.855 | 43.907 | 4.162 | -29.578 | 38.066 | 6.706 | -24.237 |
| G20 | 84.437 | 6.498 | -37.34 | 62.144 | 13.211 | 9.835 | 59.041 | 14.599 | 22.001 |
| G21 | 85.365 | 7.809 | -34.176 | 62.353 | 15.637 | 17.09 | 59.209 | 17.266 | 32.58 |
| G22 | 88.385 | 12.477 | -24.233 | 67.794 | 20.912 | 35.821 | 65.155 | 22.472 | 57.559 |
| H1 | 72.446 | -2.652 | -55.938 | 31.618 | -5.847 | -29.219 | 19.427 | -3.615 | -17.787 |
| H2 | 71.171 | -2.919 | -55.3 | 30.891 | -7.537 | -30.063 | 18.531 | -7.34 | -20.787 |
| H3 | 70.966 | -3.79 | -55.221 | 31.458 | -8.666 | -30.085 | 20.349 | -9.536 | -22.172 |
| H4 | 71.533 | -3.101 | -55.099 | 30.504 | -8.154 | -30.849 | 18.86 | -8.166 | -22.672 |
| H5 | 76.098 | -3.419 | -55.131 | 38.397 | -6.355 | -24.017 | 30.171 | -5.505 | -12.43 |
| H6 | 74.076 | -5.871 | -54.817 | 38.424 | -12.844 | -28.996 | 30.151 | -14.733 | -20.733 |
| H7 | 72.482 | -8.392 | -56.01 | 37.091 | -21.189 | -32.685 | 29.111 | -26.752 | -26.934 |
| H8 | 73.098 | -8.457 | -55.318 | 36.538 | -21.607 | -33.341 | 28.74 | -27.683 | -28.554 |
| H9 | 81.21 | -4.338 | -43.099 | 57.118 | -0.826 | -3.749 | 54.255 | -0.339 | 3.623 |
| H10 | 81.582 | -5.796 | -42.876 | 58.002 | -3.54 | -6.499 | 55.076 | -3.192 | 0.491 |
| H11 | 81.243 | -9.835 | -44.958 | 56.786 | -9.931 | -14.082 | 53.87 | -10.27 | -9.082 |

Nastavak tabele P2.2. Izmerene CIELAB (A/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| H12 | 81.263 | -11.259 | -48.397 | 56.783 | -13.567 | -19.092 | 53.787 | -14.271 | -14.59 |
| H13 | 80.066 | -22.23 | -52.854 | 51.628 | -40.497 | -28.586 | 48.058 | -45.703 | -25.151 |
| H14 | 80.224 | 18.794 | -43.081 | 53.143 | 38.989 | -3.469 | 49.492 | 43.533 | 5.74 |
| H15 | 92.431 | 12.738 | -13.211 | 74.582 | 21.281 | 46.853 | 72.735 | 22.196 | 63.677 |
| H16 | 71.967 | -3.621 | -49.854 | 34.444 | -0.692 | -15.803 | 27.495 | 1.552 | -3.887 |
| H17 | 80.067 | 21.576 | -39.519 | 53.528 | 40.864 | 12.08 | 49.434 | 45.722 | 30.899 |
| H18 | 76.928 | -12.426 | -43.78 | 48.508 | -22.807 | -2.556 | 43.953 | -25.923 | 11.626 |
| H19 | 73.053 | -1.366 | -58.057 | 37.477 | 1.379 | -35.161 | 29.852 | 4.217 | -31.384 |
| H20 | 85.203 | 5.236 | -35.593 | 63.638 | 11.31 | 12.646 | 60.753 | 12.369 | 24.366 |
| H21 | 84.228 | 1.698 | -43.809 | 59.913 | 6.239 | -1.387 | 56.64 | 7.358 | 8.799 |
| H22 | 87.106 | 2.829 | -34.477 | 63.63 | 7.79 | 15.304 | 60.628 | 8.898 | 30.524 |
| I1 | 72.73 | -2.275 | -55.938 | 31.767 | -3.298 | -28.391 | 20.706 | -0.23 | -18.179 |
| I2 | 72.196 | -3.232 | -52.285 | 30.966 | -5.277 | -29.788 | 20.104 | -3.3 | -23.319 |
| I3 | 71.01 | -2.804 | -55.391 | 30.567 | -5.068 | -33.603 | 19.148 | -3.133 | -28.075 |
| I4 | 70.42 | -2.712 | -55.782 | 30.715 | -5.557 | -35.218 | 19.742 | -3.859 | -30.397 |
| I5 | 74.276 | -2.104 | -51.767 | 41.301 | -0.487 | -18.472 | 35.081 | 1.13 | -8.126 |
| I6 | 76.41 | -2.73 | -54.246 | 42.362 | -1.672 | -23.118 | 35.911 | 0.163 | -14.189 |
| I7 | 74.92 | -2.769 | -54.663 | 41.134 | -2.574 | -27.411 | 34.332 | -1.071 | -19.777 |
| I8 | 74.529 | -3.095 | -56.921 | 39.746 | -3.634 | -32.642 | 32.848 | -2.46 | -27.811 |
| I9 | 81.904 | -2.332 | -43.672 | 57.216 | 2.453 | -3.485 | 54.263 | 3.231 | 4.482 |
| I10 | 82.524 | -2.059 | -41.173 | 58.949 | 2.338 | -5.573 | 56.178 | 3.073 | 1.108 |
| I11 | 82.16 | -0.55 | -44.674 | 58.942 | 4.866 | -12.536 | 56.249 | 5.682 | -7.831 |
| I12 | 81.44 | -1.315 | -48.721 | 57.812 | 2.758 | -18.763 | 54.772 | 3.472 | -14.11 |
| I13 | 78.585 | -22.282 | -54.953 | 48.988 | -43.538 | -32.1 | 45.133 | -49.773 | -29.211 |
| I14 | 79.771 | 19.045 | -44.6 | 51.734 | 40.486 | -4.795 | 48.044 | 45.209 | 4.317 |
| I15 | 93.012 | 13.514 | -16.333 | 73.627 | 23.083 | 47.586 | 71.761 | 24.272 | 66.66 |
| I16 | 70.527 | -4.135 | -48.924 | 32.189 | -1.465 | -17.509 | 24.693 | 1.182 | -6.027 |
| I17 | 78.714 | 20.934 | -40.268 | 50.865 | 41.864 | 10.526 | 46.445 | 47.42 | 31.16 |
| I18 | 76.214 | -11.914 | -46.147 | 45.061 | -24.038 | -2.238 | 39.999 | -27.885 | 14.197 |
| I19 | 71.094 | -1.923 | -59 | 33.12 | -2.307 | -39.671 | 23.513 | 0.487 | -37.826 |
| I20 | 85.385 | 0.662 | -32.102 | 64.431 | 4.67 | 15.334 | 61.737 | 5.038 | 26.603 |
| I21 | 77.16 | -4.644 | -45.445 | 46.326 | -6.875 | -0.952 | 41.112 | -6.864 | 17.98 |
| I22 | 84.031 | -7.704 | -41.708 | 58.311 | -9.487 | 1.521 | 55.206 | -10 | 11.704 |
| J1 | 70.385 | -2.322 | -53.662 | 28.444 | -2.44 | -28.118 | 15.897 | 1.591 | -19.295 |
| J2 | 69.783 | -2.21 | -52.574 | 29.183 | -3.353 | -30.241 | 16.357 | 0.737 | -23.411 |
| J3 | 69.965 | -1.698 | -55.718 | 29.161 | -2.523 | -34.108 | 16.764 | 1.993 | -30.014 |
| J4 | 70.416 | -1.631 | -55.561 | 28.943 | -1.588 | -35.627 | 16.929 | 3.264 | -31.33 |
| J5 | 73.83 | -1.365 | -51.847 | 38.992 | 1.383 | -20.563 | 31.962 | 4.033 | -10.411 |
| J6 | 74.801 | -0.386 | -52.928 | 39.355 | 3.306 | -24.448 | 31.765 | 6.935 | -15.447 |
| J7 | 73.191 | 0.21 | -52.805 | 38.847 | 6.325 | -25.498 | 31.972 | 10.043 | -18.29 |
| J8 | 73.744 | 0.694 | -55.086 | 38.331 | 7.098 | -29.9 | 31.12 | 11.422 | -24.066 |
| J9 | 81.78 | -1.41 | -42.282 | 57.196 | 3.734 | -4.056 | 54.259 | 4.644 | 3.546 |
| J10 | 82.193 | -0.343 | -41.067 | 58.838 | 5.724 | -5.375 | 56.072 | 6.616 | 1.131 |
| J11 | 82.669 | 1.837 | -43.573 | 59.286 | 9.059 | -11.159 | 56.529 | 10.232 | -5.831 |
| J12 | 80.691 | 2.816 | -45.779 | 57.731 | 10.362 | -15.661 | 54.752 | 11.709 | -11.023 |
| J13 | 77.178 | -22.433 | -54.735 | 46.617 | -46.57 | -35.04 | 42.599 | -54.621 | -32.853 |
| J14 | 78.22 | 17.761 | -46.268 | 48.289 | 40.928 | -8.663 | 44.074 | 46.576 | 0.411 |
| J15 | 91.076 | 14.449 | -17.119 | 71.288 | 24.705 | 46.343 | 69.244 | 26.121 | 66.663 |
| J16 | 70.826 | -4.136 | -50.025 | 28.755 | -2.573 | -20.422 | 19.312 | 0.168 | -9.891 |
| J17 | 77.068 | 19.174 | -41.105 | 48.298 | 40.127 | 8.244 | 43.61 | 46.099 | 30.659 |
| J18 | 75.952 | -11.449 | -49.001 | 39.277 | -26.204 | -7.074 | 34.032 | -31.423 | 8.747 |
| J19 | 70.209 | -2.473 | -57.691 | 30.366 | -2.648 | -38.94 | 19.705 | 0.926 | -36.906 |
| J20 | 82.548 | -10.176 | -43.611 | 58.035 | -13.527 | -4.8 | 54.94 | -14.62 | 3.274 |
| J21 | 74.206 | -7.499 | -53.577 | 33.153 | -18.204 | -15.949 | 26.03 | -22.508 | -0.112 |
| J22 | 71.987 | -4.243 | -55.216 | 25.907 | -7.488 | -24.373 | 15.922 | -7.37 | -11.523 |

Nastavak tabele P2.2. Izmerene CIELAB (A/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| K1 | 71.583 | -0.333 | -52.967 | 32.56 | 3.143 | -25.967 | 22.418 | 8.731 | -14.938 |
| K2 | 73.092 | 1.524 | -53.759 | 34.42 | 8.711 | -25.886 | 24.689 | 16.415 | -15.405 |
| K3 | 71.146 | 4 | -52.653 | 34.544 | 14.309 | -26.337 | 25.685 | 22.558 | -17.184 |
| K4 | 72.788 | 4.337 | -54.223 | 36.234 | 15.554 | -26.832 | 27.577 | 23.65 | -17.51 |
| K5 | 75.798 | 2.258 | -50.259 | 43.509 | 8.544 | -17.2 | 37.363 | 12.101 | -6.522 |
| K6 | 75.821 | 5.497 | -50.818 | 43.737 | 15.691 | -17.806 | 37.453 | 20.663 | -7.561 |
| K7 | 75.687 | 8.721 | -49.767 | 44.339 | 22.576 | -17.272 | 38.187 | 28.742 | -6.667 |
| K8 | 75.631 | 11.512 | -50.995 | 44.021 | 28.548 | -19.17 | 38.421 | 34.586 | -10.874 |
| K9 | 82.668 | 1.509 | -41.887 | 57.429 | 8.766 | -3.941 | 54.5 | 10.102 | 3.684 |
| K10 | 82.911 | 3.613 | -42.22 | 58.72 | 12.183 | -4.862 | 55.785 | 13.74 | 2.461 |
| K11 | 82.488 | 7.365 | -42.828 | 59.616 | 17.076 | -8.265 | 56.906 | 18.655 | -2.83 |
| K12 | 82.993 | 10.377 | -45.801 | 59.412 | 22.47 | -11.243 | 56.597 | 24.653 | -5.607 |
| K13 | 77.289 | -20.308 | -55.979 | 45.464 | -42.898 | -34.714 | 41.103 | -50.775 | -32.123 |
| K14 | 76.959 | 19.31 | -46.714 | 47.751 | 42.006 | -10.929 | 43.432 | 47.634 | -1.985 |
| K15 | 90.884 | 14.932 | -19.093 | 70.241 | 25.961 | 44.2 | 68.204 | 27.53 | 65.167 |
| K16 | 68.819 | -3.831 | -50.375 | 26.374 | -3.094 | -21.952 | 15.482 | -0.664 | -12.784 |
| K17 | 76.396 | 17.721 | -42.344 | 46.069 | 40.188 | 7.89 | 41.447 | 46.085 | 30.225 |
| K18 | 73.38 | -9.12 | -51.363 | 35.634 | -22.793 | -13.205 | 29.254 | -28.662 | 2.233 |
| K19 | 70.423 | -2.282 | -57.529 | 29.189 | -2.686 | -37.09 | 17.781 | 0.963 | -34.243 |
| K20 | 70.941 | -3.715 | -54.05 | 30.648 | -7.467 | -23.831 | 20.259 | -7.827 | -12.195 |
| K21 | 70.801 | -4.163 | -54.939 | 27.663 | -6.823 | -26.496 | 16.467 | -6.363 | -16.112 |
| K22 | 69.147 | -3.973 | -53.452 | 28.319 | -7.25 | -27.313 | 16.581 | -7.753 | -19.855 |
| L1 | 70.856 | -0.461 | -53.313 | 30.939 | 1.729 | -25.082 | 19.933 | 7.569 | -13.113 |
| L2 | 71.231 | 0.768 | -53.128 | 32.074 | 6.705 | -24.138 | 21.409 | 14.504 | -12.293 |
| L3 | 71.512 | 3.134 | -51.968 | 33.497 | 13.963 | -21.621 | 24.431 | 22.658 | -8.229 |
| L4 | 72.007 | 4.386 | -52.101 | 35.394 | 15.797 | -21.46 | 26.312 | 24.829 | -7.76 |
| L5 | 74.396 | 3.436 | -49.926 | 40.701 | 12.296 | -15.487 | 34.334 | 16.766 | -3.907 |
| L6 | 75.766 | 9.53 | -48.821 | 44.211 | 23.594 | -12.737 | 38.188 | 29.368 | -0.077 |
| L7 | 76.486 | 12.279 | -48.805 | 43.838 | 30.948 | -11.776 | 37.84 | 38.08 | 1.23 |
| L8 | 77.052 | 15.172 | -47.431 | 45.569 | 35.397 | -9.33 | 40.163 | 42.16 | 3.236 |
| L9 | 81.744 | 2.562 | -40.783 | 58.28 | 9.498 | -2.088 | 55.396 | 10.736 | 5.618 |
| L10 | 83.498 | 2.311 | -41.286 | 59.222 | 9.608 | -1.445 | 56.412 | 10.842 | 6.367 |
| L11 | 83.905 | 10.159 | -38.774 | 60.996 | 21.45 | 1.307 | 58.359 | 23.339 | 9.222 |
| L12 | 84.362 | 18.475 | -36.507 | 61.888 | 33.684 | 6.105 | 59.447 | 36.017 | 14.235 |
| L13 | 76.307 | -17.298 | -56.116 | 43.777 | -37.168 | -33.097 | 39.246 | -43.702 | -29.8 |
| L14 | 78.111 | 17.54 | -47.522 | 47.066 | 40.585 | -12.244 | 42.6 | 46.685 | -3.545 |
| L15 | 89.861 | 16.227 | -17.114 | 70.345 | 26.749 | 47.4 | 68.366 | 28.003 | 66.991 |
| L16 | 69.464 | -3.577 | -51.619 | 26.098 | -3.536 | -23.59 | 14.04 | -0.683 | -13.674 |
| L17 | 76.946 | 15.305 | -43.655 | 44.845 | 36.94 | 3.329 | 39.94 | 43.257 | 25.39 |
| L18 | 72.937 | -9.404 | -51.043 | 35.013 | -22.699 | -14.276 | 28.421 | -28.287 | 1.337 |
| L19 | 71.794 | -2.611 | -57.935 | 27.178 | -2.198 | -35.15 | 16.082 | 1.925 | -31.589 |
| L20 | 71.054 | -2.998 | -54.877 | 27.116 | -4.391 | -26.922 | 15.022 | -2.737 | -16.819 |
| L21 | 70.359 | -2.904 | -55.104 | 27.411 | -3.44 | -26.553 | 15.139 | -0.059 | -16.223 |
| L22 | 71.339 | -1.819 | -54.933 | 27.642 | 2.054 | -24.764 | 16.73 | 8.694 | -12.3 |
| GS1 | 104.824 | -0.851 | -33.459 | 89.26 | 2.166 | 4.194 | 88.152 | 1.668 | 8.968 |
| GS2 | 101.604 | 1.596 | -29.682 | 85.368 | 5.587 | 11.307 | 84.001 | 5.386 | 17.469 |
| GS3 | 97.853 | 0.534 | -29.566 | 81.007 | 4.432 | 11.649 | 79.58 | 4.272 | 18.197 |
| GS4 | 93.175 | 0.412 | -32.137 | 75.347 | 3.913 | 8.686 | 73.552 | 3.89 | 15.391 |
| GS5 | 90.03 | 1.07 | -37.331 | 69.62 | 5.078 | 5.373 | 67.489 | 5.33 | 13.275 |
| GS6 | 90.126 | 0.627 | -39.262 | 68.821 | 4.367 | 4.479 | 66.432 | 4.797 | 13.402 |
| GS7 | 86.463 | -0.231 | -42.546 | 63.419 | 3.754 | 0.417 | 60.688 | 4.398 | 9.816 |
| GS8 | 80.518 | -0.333 | -44.996 | 54.882 | 3.189 | -5.243 | 51.505 | 4.265 | 4.435 |
| GS9 | 82.112 | -0.668 | -44.555 | 57.51 | 2.724 | -3.304 | 54.574 | 3.634 | 5.649 |
| GS10 | 81.877 | -1.401 | -47.992 | 54.643 | 3.14 | -3.706 | 51.531 | 4.173 | 5.772 |
| GS11 | 79.865 | -1.766 | -48.838 | 51.17 | 2.162 | -7.377 | 47.479 | 3.37 | 3.021 |

Nastavak tabele P2.2. Izmerene CIELAB (A/10°) vrednosti polja test karte nakon oslojavanja perlascentnim pigmentima

| | 45°/15° | | | 45°/45° | | | 45°/75° | | |
|-------------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
| | L* | a* | b* | L | a* | b* | L | a* | b* |
| GS12 | 78.083 | -1.925 | -47.899 | 50.24 | 1.655 | -7.292 | 46.64 | 2.828 | 2.611 |
| GS13 | 75.54 | -1.816 | -48.744 | 44.382 | 1.55 | -10.742 | 40.249 | 3.057 | -0.758 |
| GS14 | 75.936 | -2.426 | -52.684 | 41.827 | 0.241 | -14.145 | 36.647 | 2.008 | -2.442 |
| GS15 | 75.272 | -1.803 | -52.076 | 41.56 | 0.708 | -13.317 | 36.627 | 2.415 | -1.961 |
| GS16 | 73.462 | -2.269 | -51.346 | 38.171 | -0.088 | -16.625 | 32.07 | 2.133 | -5.169 |
| GS17 | 73.295 | -2.149 | -51.309 | 36.016 | -0.352 | -18.195 | 29.522 | 1.864 | -6.452 |
| GS18 | 72.774 | -2.134 | -51.844 | 35.527 | -0.821 | -18.564 | 28.843 | 1.637 | -7.038 |
| GS19 | 72.465 | -2.723 | -53.456 | 33.796 | -1.323 | -20.387 | 26.089 | 1.313 | -7.765 |
| GS20 | 72.03 | -2.78 | -53.373 | 32.362 | -1.737 | -21.472 | 24.288 | 0.643 | -9.628 |
| GS21 | 72.088 | -2.708 | -53.259 | 31.047 | -2.486 | -22.75 | 22.281 | 0.526 | -10.513 |
| GS22 | 70.843 | -2.555 | -52.879 | 30.419 | -2.766 | -23.07 | 21.543 | -0.389 | -11.013 |
| GS23 | 69.891 | -3.057 | -53.648 | 28.848 | -3.437 | -24.484 | 19.081 | -0.653 | -12.328 |
| GS24 | 71.11 | -2.486 | -54.083 | 29.002 | -3.993 | -25.803 | 18.814 | -1.373 | -13.223 |
| GS25 | 72.457 | -2.926 | -56.57 | 27.067 | -4.177 | -26.448 | 17.438 | -1.323 | -13.59 |
| GS26 | 71.283 | -3.385 | -55.188 | 26.067 | -3.708 | -25.887 | 16.864 | -1.218 | -13.18 |

Biografija sa bibliografijom

Ivana Tomić

Datum rođenja: 08.04.1984.

Obrazovanje

- 2009-2016 Doktorske akademske studije
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Grafičko inženjerstvo i dizajn
- 2003-2009 Diplomске akademske (Master) studije
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Grafičko inženjerstvo i dizajn

Kretanje u poslu

- 2009-2010 Saradnik u nastavi, Departman za Grafičko inženjerstvo i dizajn
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
- 2010-2016 Asistent – Master, Departman za Grafičko inženjerstvo i dizajn
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Učešće na projektima

- 2009 Istraživač na projektu Ministarstva Nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije
„Istraživanje implementacije modela osećaja boja u savremenim sistemima za upravljanje bojom u grafičkoj industriji“ (TR-12009)
- 2010-2016 Istraživač na projektu tehnološkog razvoja Republike Srbije *„Razvoj softverskog modela za unapređenje znanja i proizvodnje u grafičkoj industriji“* (TR 35027)
- 2014-2015 Učešće na bilateralnom projektu Republike Srbije i Republike Slovenije
„Development of a method for using commercial digital camera as color measurement device“ (451-03-3095/2014-09/40)
- 2013-2015 Saradnik na istraživačkom projektu Ministarstva nauke i inovacije Španije
„Advanced Colorimetry: Texture and Color in Images“ (FIS2013-45952-P)

Specijalizacije i studijski boravci u inostranstvu

- Maj 2013 Jyväskylä (Finska), učešće na Tempus projektu "Visuality and Mathematics"
- Jul 2013 Eger (Mađarska), letnja škola Tempus projekta "Visuality and Mathematics"
- Decembar 2013-Jun 2014
Granada (Španija), studijski boravak u okviru doktorskih studija podržan od strane Join EU-SEE programa studentske razmene
- Jun 2015 Kemnic (Nemačka), pohađanje *Print Promotions* specijalističkog kursa za nastavnike iz oblasti grafičkog inženjerstva

Bibliografija

Spisak rezultata M23 - Rad u međunarodnom časopisu (3)

Jurić (Rilovski) I., Karlović I., **Tomić I.**, Novaković D.: Optical paper properties and their influence on colour reproduction and perceived print quality, *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2013, Vol. 28, No 2, pp.264-273, ISSN 0283-2631.

Jurić (Rilovski) I., Karlović I., Novaković D., **Tomić I.**: Comparative study of different methods for the assessment of print mottle, *Color Research and Application*, 2015, ISSN 0361-2317.

Tomić I., Dedijer S., Martínez-Cañada P., Novaković D., Hladnik A.: Camera Characterization for Colorimetric Assessment of Goniochromatic Prints, *Journal of Imaging Science and Technology*, (*Forthcoming*) Accepted for Publication 2016.

Spisak rezultata M33 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (35)

Karlović I., Novaković D., **Tomić I.**, Bišćan V.: Colour rendering differences of ICC profiles in Internet browsers, 9. Seminar in Graphic Arts, Pardubice: University Of Pardubice, Department of Graphic Arts and Photophysics, 23-24 Septembar, 2009, pp. 116-120, ISBN 978-80-7395-200-6

Karlović I., Novaković D., **Tomić I.**: Uticaj debljine folije za plastifikaciju na geometrijske i hromatske karakteristike ofsetnih otisaka, 16. Međunarodni simpozijum iz oblasti celuloze, papira, ambalaže i grafike, Zlatibor: Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Centar celulozno-papirne, ambalažne i grafičke industrije Srbije, 15-18 Jun, 2010, pp. 141-145, ISBN 978-86-7401-267-3

Tomić I., Karlović I., Novaković D.: Definisanje razlika pri generisanju profila skenera, 16. Međunarodni simpozijum iz oblasti celuloze, papira, ambalaže i grafike, Zlatibor: Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Centar celulozno-papirne, ambalažne i grafičke industrije Srbije, 15-18 Jun, 2010, pp. 147-154, ISBN 978-86-7401-267-3

Tomić I., Ljumić Z., Đokić M.: Spatially uniform and varying HDR tone mapping techniques evaluation, 5. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, Graphic Engineering and Design, 11-12 Novembar, 2010, pp. 177-186, ISBN 978-86-7892-294-7.

Karlović I., **Tomić I.**, Novotny E.: The comparison of print gloss and colour difference of conventional and hybrid inks coated with glossy aqueous conventional and hybrid inks coated with glossy aqueous and UV coatings in correlation with surface, 5. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 11-12 Novembar, 2010, pp. 243-248, ISBN 978-86-7892-294-7.

Karlović I., **Tomić I.**, Dedijer S., Pál (Apro) M., Novaković D.: The correlation of surface roughness parameters of print enhancement foils and optical and colourimetric properties of offset prints, 1. International Joint Conference on Environment and Light Industry Technologies, Budimpešta: Rejto Sándor Faculty of Light Industry and Environmental Engineering, Óbuda University., 18-19 Novembar, 2010, pp. 181-188, ISBN 978-615-5018-08-4.

Tomić I., Karlović I., Novaković D.: The influence of UCR and GCR colour separation techniques on reproducible colours in ink-jet printing, 14. "Blaž Baromić" International Conference on printing, design and graphic communications, Senj: Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, 6-9 Oktobar, 2010, pp. 380-388, ISBN 978-953-7644-06-2.

Milić N., Novaković D., **Tomić I.**: Effects of display gamma and the viewing conditions on the appearance of colours viewed on LCD monitors, 14. "Blaž Baromić" International Conference on printing, design and graphic communications, Senj: Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, 6-9 Oktobar, 2010, pp. 259-266, ISBN 978-953-7644-06-2.

Karlović I., Novaković D., **Tomić I.**: The influence of the surface roughness parameters of offset coated samples on print gloss, 5. International Symposium on Novelties in Graphics, Ljubljana: University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Department of Textiles, 27-29 Maj, 2010, pp. 646- 651, ISBN 978-961-6045-80-3.

Karlović I., Novaković D., **Tomić I.**: The influence of the surface roughness of aqueous coated offset prints samples on the colourimetric values, 42. 42nd Conference of International Circle of Educational Institutes for Graphic Arts Technology and Management, Moskva: International Circle of Educational Institutes, Moscow State University of printing, 19-20 Oktobar, 2010, pp. 62-69

Karlović I., **Tomić I.**, Jurič (Rilovski) I.: Accelerated Ageing of Digitally Printed Foils With HP Latex Inks, 10. Seminar in Graphic Arts, Pardubice: University of Pardubice, 19-21 Septembar, 2011, ISBN 978-80-7395-420-8.

Tomić I., Karlović I.: Noise and Dynamic Range at Pseudo-HDR Images, 10. Seminar in Graphic Arts, Pardubice: University of Pardubice, 19-21 Septembar, 2011, pp. 93-99, ISBN 978-80-7395-420-8.

Karlović I., Novotny E., **Tomić I.**, Novaković D.: The Influence of UV coating application on printed cardboard surface properties and colourimetric values, 38. IARIGAI, Budimpešta: IARIGAI, 11-14 Septembar, 2011, pp. 153-158, ISBN 9783981270426.

Tomić I., Gebeješ A., Karlović I.: The usability of S-CIELAB for predicting perceived colour differences of simulated textile samples, 4. "Printig Future Days" international Scientific Conference on print and Media Technology for junior scientists and PhD students, Chemnitz: Chemnitz University of Technology, Verlag für Wissenschaft und Bildung, 7-10 Novembar, 2011, pp. 333-339, ISBN 9783861356233.

Karlović I., **Tomić I.**, Novaković D., Jurič (Rilovski) I.: Evaluation of distinctness of image enhanced printed samples, 43. conference of the International Circle of Educational Institutes for Graphic Arts Technology and Management, Norrköping: International Circle, 19-23 Septembar, 2011, pp. 13-19.

Jurič (Rilovski) I., Karlović I., **Tomić I.**: Digital Print Mottle as a Quantitative Tool for Print Quality Assessment, 10. Seminar in Graphic Arts, Pardubice: University of Pardubice, 19-21 Septembar, 2011, pp. 83-87, ISBN 978-80-7395-420-8.

Karlović I., **Tomić I.**, Jurić (Rilovski) I., Bašić D.: Influence of the Scanning Resolution on the Modulation Transfer Function, 18. Međunarodni simpozijum iz oblasti celuloze, papira, ambalaže i grafike, Zlatibor: Tehnološko Metalurški Fakultet, Univerzitet u Beogradu, 19-22 Jun, 2012, pp. 75-83, ISBN 978-86-7401-283-3.

Jurić (Rilovski) I., Karlović I., **Tomić I.**: The possibility of using G7 method for calibration and characterization of Xerox Docucolor digital press, 6. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 15-16 Novembar, 2012, pp. 203-208, ISBN 978-86-7892-457-6.

Gebeješ A., **Tomić I.**, Huertas R., Stepanić M.: A preliminary perceptual scale for texture feature parameters, 6. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 15-16 Novembar, 2012, pp. 195-201, ISBN 978-86-7892-457-6.

Jurić (Rilovski) I., Karlović I., **Tomić I.**: Influence of surface properties of ink jet papers on print sharpness, 11. Seminar in Graphic Arts, Pardubice: University of Pardubice, Department of Graphic Arts and Photophysics, 2013, 17-18 Jun, 2013, pp. 121-126, ISBN 978-80-7395-660-8.

Tomić I., Karlović I., Jurić (Rilovski) I., Szentgyörgyvölgyi R.: An influence of accelerated ageing on distinctness of image for coated offset prints, 11. Seminar in Graphic Arts, Pardubice: University of Pardubice, Department of Graphic Arts and Photophysics, 2013, 17-18 Jun, 2013, pp. 68-73, ISBN 978-80-7395-660-8.

Jurić (Rilovski) I., Karlović I., Novaković D., **Tomić I.**: Comparative view of the quality of prints using iCtP and conventional plates, 10. Conference of Chemists, Technologists and Environmentalists of Republic of Srpska, Banja Luka: University in Banja Luka Faculty of Technology, 15-16 Novembar, 2013, pp. 477-482, ISBN 978-99938-54-50-0.

Tomić I., Karlović I., Jurić (Rilovski) I., Vukojević J.: Testiranje kvaliteta objektiv digitalnog fotoaparata kroz procenu hromatske aberacije, 10. Conference of Chemists, Technologists and Environmentalists of Republic of Srpska, Banja Luka: University in Banja Luka Faculty of Technology, 15-16 Novembar, 2013, pp. 541-549, ISBN 978-99938-54-50-0.

Gebeješ A., Huertas R., **Tomić I.**, Stepanić M.: Selection of optimal features for texture characterization and perception, 1. Colour and Visual Computing Symposium - CVCS, Gjovik, 5-6 Septembar, 2013, pp. 1-5, UDK: DOI 10.1109/CVCS.2013.6626278.

Gebeješ A., Martínez Domingo M., Heikkinen V., **Tomić I.**: Reflectance recovery for coated printed color samples via multiangular RGB camera measurements, 1. Colour and Visual Computing Symposium - CVCS, Gjovik: IEEE, 5-6 Septembar, 2013, pp. 1-6, UDK: DOI 10.1109/CVCS.2013.6626287.

Jurić (Rilovski) I., Karlović I., Novaković D., **Tomić I.**: Possibility of using concentric halftoning to improve print quality, 4. 4th International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies, Budimpešta: Faculty of light industry and environmental engineering, Obuda University, 20-22 Novembar, 2013, pp. 386-391, ISBN 978-615-5018-93-0.

Tomić I., Karlović I., Jurič (Rilovski) I.: Influence of lens aperture on lateral chromatic aberration in digital photography, 4th International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies, Budimpešta: Faculty of light industry and environmental engineering, Obuda University, 20-22 Novembar, 2013, pp. 345-351, ISBN 978-615-5018-93-0.

Karlović I., **Tomić I.**, Jurič (Rilovski) I.: The influence of halftone dot shapes on S-CIELab values, 4th International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies, Budimpešta: Faculty of light industry and environmental engineering, Obuda University, 20-22 Novembar, 2013, pp. 368-373, ISBN 978-615-5018-93-0.

Jurič (Rilovski) I., Karlović I., **Tomić I.**, Zdravković S.: Visual experience of Graininess, 7. International Symposium on Graphic Engineering and Design GRID, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 13-14 Novembar, 2014, pp. 267-271, ISBN 978-86-7892-645-7.

Tomić I., Huertas R., Jurič (Rilovski) I.: Colour to texture fusion in HSI colour space, 7. International Symposium on Graphic Engineering and Design GRID, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 13-14 Novembar, 2014, pp. 309-316, ISBN 978-86-7892-645-7.

Karlović I., **Tomić I.**, Jurič (Rilovski) I., Rađelović D., Randelović D.: Determination of substrate and halftone dot shape influence on image reproduction with image difference metric, 7. INTERNATIONAL Symposium on Graphic Engineering and Design GRID, Novi Sad: Faculty of technical sciences, Department of graphic engineering and design, 13-14 Novembar, 2014, pp. 261-266, ISBN 978-86-7892-645-7, UDK: 655 (082).

Jurič (Rilovski) I., Karlović I., Majnarić I., Novaković D., **Tomić I.**: Different methods for quantification of micro-uniformity, 46. Annual International Conference on Graphic Arts and Media Technology, Management and Education, Atina: Hellenic Union of Graphic Arts and Media Technology Engineers, 25-29 Maj, 2014, pp. 205-210, ISBN 978-618-81734-0-8.

Karlović I., **Tomić I.**, Jurič (Rilovski) I., Pinčjer I.: Finding the relation between AM and FM halftoning with scie lab metrics, 8. Sigt - 7th Symposium of Information and Graphic Arts Technology, Ljubljana: University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences, 5-6 Jun, 2014, pp. 50-55, ISBN 978-961-6900-09-6, UDK: 655.1.

Tomić I., Del Mar Lazaro M., Carrasco Sanchez A., Benjumea A., Ou L., Garcia J., Karlović I., Huertas R.: Texture in Color Emotions, 15. AIC 2015 Midterm Meeting, Tokyo: Color Science Association of Japan, 19-22 Maj, 2015, pp. 1058-1063.

Tomić I., Novaković D., Gebeješ A., Hladnik A., Dedijer S.: Determining Color of Goniochromatic Prints using DSLR Camera, 5. International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies, Budimpešta, 19-20 Novembar, 2015, pp. 104-112.

Spisak rezultata M34 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (3)

Tomić I., Karlović I., Novaković D., Jurič (Rilovski) I.: Image analysis techniques for assessing print quality, 44. Annual Conference of the International Circle of Educational Institutes for Graphic Arts Technology and Management, Budimpešta: Obuda University, 19-22 Jun, 2012

Jurič (Rilovski) I., Karlović I., Novaković D., **Tomić I.**: Influence of marking engines and toner/ink types on the formed elements of the image in digital printing, 44. Annual Conference of the International Circle of Educational Institutes for Graphic Arts Technology and Management, Budimpešta: Obuda University, 19-22 Jun, 2012.

Tomić I., Carrasco-Sanz A., Huertas R., Lazaro M., Benjumea A., Ou L., Garcia J.: Escalas para el estudio de emociones del color en muestras con textura, 11. Reunión Nacional de Óptica, Salamanca, 1-3 Septembar, 2015, ISBN 978-84-608-4609.

Spisak rezultata M51 - Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja (1)

Nedeljković U., Novaković D., Puškarević I., **Tomić I.**: Helvetica as a Type Convention for the Youthful and Trendy Image: A Consumer Response to Designer Safe Option, Marketing - Časopis za marketing, teoriju i praksu, 2014, Vol. 45, No 1, pp. 50-62, ISSN 0354-3471, UDK: 003 655.26.

Spisak rezultata M52 - Rad u časopisu nacionalnog značaja (1)

Jurič (Rilovski) I., Novaković D., Karlović I., **Tomić I.**: The possibility of using recycled paper in digital printing, Advanced Technologies, 2013, Vol. 2, No 1, pp. 26-32, ISSN 2217-9720, UDK: 676:655.3:628.477.6.

Spisak rezultata M53 - Rad u naučnom časopisu (21)

Tomić I., Novaković D., Karlović I.: Testiranje CIE CAM02 modela osećaja boja kod kalibracije monitora za ekranski probni prikaz, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2009, Vol. 24, No 7, pp. 2311-2314, ISSN 0350-428X

Novaković D., **Tomić I.**: The usability of calibrating monitor for soft proof according to CIE CAM02 colour appearance model, Acta Graphica, 2010, Vol. 21, No 1-2, pp. 15-25, ISSN 0353-4707, UDK: 655.3:004.9:004.353

Novaković D., Karlović I., **Tomić I.**: Black point compensation and its influence on image appearance, JGED Journal of Graphic Engineering and Design, 2010, Vol. 1, No 1, pp. 9-15, ISSN 2217-379X, UDK: 070.1

Veselinović D., Karlović I., **Tomić I.**: Tipične greške kod digitalne fotografije i mogućnost korekcije, Zbornik radova FTN - Novi Sad, 2011, Vol. 26, No 2, pp. 277-281.

Keler A., Karlović I., **Tomić I.**: Uticaj ubrzanog starenja na kolorimetrijske vrednosti konvencionalnih i hibridnih boja, Zbornik radova FTN - Novi Sad, 2011, Vol. 26, No 2, pp. 297-301, UDK: 655.2

Jurič (Rilovski) I., Karlović I., **Tomić I.**: Oštrina digitalnog otiska kao način procene kvaliteteta štampe, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2011, Vol. 26, No 6, pp. 1473-1476, ISSN 0350-428X

Nenadić I., Karlović I., **Tomić I.**: Opseg boja sa dodatnim bojama u ink jet štampi, Zbornik radova FTN, 2011, Vol. 26, No 15, pp. 3529-3532

Jurič (Rilovski) I., Karlović I., Novaković D., **Tomić I.**: Influence of paper surface properties and toner type on digital print mottle, *Celuloza si Hartie*, 2012, Vol. 61, No 2, pp. 4-9, ISSN 1220-9848

Karlović I., **Tomić I.**, Jurič (Rilovski) I., Novaković D., Vučinić-Vasić M., Kozmidis-Luburić U.: The Influence of the Surface Roughness of Aqueous Coated Samples and the Particle Size of the Coatings on the Reflection and Colourimetric Values of Offset Printed Samples, *International Circular of Graphic Education and Research*, 2012, Vol. 5, No 1, pp. 18-29, ISSN 2166-465X, UDK: 655

Gebeješ A., **Tomić I.**, Karlović I., Jurič (Rilovski) I.: Evaluation of the algorithms for recovering reflectance from virtual digital camera response, *JGED Journal of Graphic Engineering and Design*, 2012, Vol. 3, No 2, pp. 23-30, ISSN 2217-379X, UDK: 519.65 : 519.876.5 : 535.653.3

Stančić M., Novaković D., **Tomić I.**, Karlović I.: Influence of Substrate and Screen Thread Count on Reproduction of Image Elements in Screen Printing, *Acta Graphica*, 2012, Vol. 23, No 1-2, pp. 1-12, ISSN 0353-4707, UDK: 655.227:655.332

Mladenović N., Karlović I., **Tomić I.**: Kontrast slike na oplemenjenim digitalnim otiscima, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, 2012, Vol. 27, No 16, ISSN 0350-428X

Stajić I., Karlović I., **Tomić I.**: Hromatske vrednosti fotografskih otisaka, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, 2012, Vol. 27, No 13, pp. 2699-2672, ISSN 0350-428X, UDK: 0350-428X

Jurič (Rilovski) I., Novaković D., Karlović I., **Tomić I.**: Influence of gloss and surface roughness of coated ink jet papers on print uniformity, *Acta Graphica*, 2013, Vol. 24, No 3-4, pp. 85-92, ISSN 0353-4707.

Karlović I., **Tomić I.**, Jurič (Rilovski) I.: Influence of types tone value of types on character formation and accuracy of optical character recognition, *Scientific papers of the University of Pardubice, Faculty of Chemical Technology, Seria A*, 2013, Vol. 13, pp. 215-226, ISSN 1211-5541

Vukojević J., Karlović I., **Tomić I.**: Procena odsjaja kod objektiva digitalnih fotoaparata i metode korekcije, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, 2013, Vol. 28, No 10, pp. 1737-1740, ISSN 0350-428X

Gebeješ A., Karlović I., **Tomić I.**: Višegaono merenje štampanih goniohromatskih uzoraka, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, 2013, Vol. 6, pp. 913-917, ISSN 0350-428X.

Veljković M., Karlović I., **Tomić I.**: Distorzija i kontrola perspektive kod ultra širokougaonih objektiva, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, 2013, Vol. 28, No 12, pp. 2199-2202, ISSN 0350-428X

Jurič (Rilovski) I., Randelović D., Karlović I., **Tomić I.**: Influence of the surface roughness of coated and uncoated papers on the digital print mottle, *JGED Journal of Graphic Engineering and Design*, 2014, Vol. 5, No 1, pp. 17-23, ISSN 2217-379X, UDK: 620.179.118 655.062

Marjanović M., Karlović I., **Tomić I.**: Procena kabine za posmatranje pomoću modela hromatske adaptacije, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2014, Vol. 29, No 2, pp. 213-216, ISSN 0350-428X

Tomić I., Karlović I., Jurič (Rilovski) I.: Practical Assessment of Veiling Glare in Camera Lens System, JGED Journal of Graphic Engineering and Design, 2014, Vol. 5, No 2, pp. 23-28, ISSN 2217-379X, UDK: 655.22778.18681.7.066

Medić I., Karlović I., **Tomić I.**: Estimating of the Influence of Screening Parameters to the Quality of Chromatic Images Through Usage of S-CIELAB , Zbornik radova FTN, 2015, Vol. 4, pp. 625-628, UDK: 655.2.027:778.8

Spisak rezultata M85 - Prototip, nova metoda, softver, standardizovan ili atestiran instrument (1)

Novaković D., Pavlović Ž., Zeljković Ž., Nedeljković U., Dedijer S., Kašiković N., Vladić G., Pál (Apro) M., Avramović D., Pinčjer I., Milić N., **Tomić I.**, Jurič (Rilovski) I., Đurđević S.: Softverski model za unapređenje znanja i proizvodnje u grafičkoj industriji, Tehničko rešenje, 2015.

