

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAFIČKI FAKULTET

KORMAN BOŽICA

**UTJECAJ KARAKTERIZACIJSKOG
MODELA NA TOČNOST ICC PROFILA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2015.



Sveučilište u Zagrebu
Grafički fakultet

KORMAN BOŽICA

**UTJECAJ KARAKTERIZACIJSKOG MODELA NA
TOČNOST ICC PROFILA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Diana Miličić

Student:

Božica Korman

Zagreb, 2015.

Rješenje o odobrenju teme

ZAHVALE

Od srca zahvaljujem svojem ocu Stjepanu, sestrama Katarini i Antoniji te njezinom muži Igoru na bezuvjetnoj ljubavi, financijskoj i moralnoj podršci, savjetima i pomoći bez kojih sve ovo ne bih uspjela postići. Također, zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr.sc. Diani Milčić i asistentu dr.sc. Davoru Donevskom na pomoći pri izradi ovog diplomskog rada.

SAŽETAK

ICC Specifikacija propisuje vrste ICC profila, obavezne i izborne podatkovne strukture i transformacijske modele. S druge strane, postupak izrade ICC profila je nedefiniran kako bi se otvorio prostor za poboljšanja i optimizaciju ovisno o namjeni ICC profila. Izbor karakterizacijskog modela koji će se koristiti za popunjavanje podatkovnih struktura profila, kao i način njihovog korištenja prepušten je razvojnim skupinama. Poznato je da na točnost profila utječu faktori koje možemo kontrolirati i oni koje ne možemo kontrolirati. Neki od faktora koje možemo kontrolirati su izbor karakterizacijskog modela, veličina transformacijske tablice i pravilna upotreba jednodimenzionalnih „A“ krivulja i „B“ krivulja. U ovome radu usporediti će se točnost profila izrađenih različitim karakterizacijskim modelima. Koristiti će se interpolacijske tablice, regresijski model i poliharmonijski splajn model. Istraživanjem će se utvrditi kvaliteta prilagodbe i moć predviđanja različitih modela na jednom procesu. Neka od ranijih istraživanja pokazuju ujednačene rezultate za regresijsku i splajn metodu. Pretpostavlja se da regresijska kao metoda prilagodbe može imati prednosti kod veće greške mjerenja ili varijabilnosti procesa, ali da je splajn kao interpolacijska metoda točnija.

KLJUČNE RIJEČI: sustav za upravljanje bojom, ICC profil, gamut, karakterizacijski modeli

SUMMARY

ICC specification prescribes the types of ICC profiles, mandatory and optional data structures and transformation models. On the other hand, the process of creating an ICC profile is undefined in order to open space for improvement and optimization, depending on the use of ICC profiles. Selection of characterization models that will be used for populating profile's data structures, as well as method of their use is left to the development team. It is known that the accuracy of the profile is affected by factors that we can control and those we can not control. Some of the factors that we can control are the choice of characterization models, the size of the transformation table and the correct use of one-dimensional "A" curves and "B" curves. In this work the accuracy of profiles made with different characterization models will be compared. Interpolation tables, regression model and polyharmonic spline model will be used.. The research will determine the quality of fit and predictive power of different models in one process. Some of the earlier studies showed similar performances of regression and spline method. It is assumed that the regression as fitting method can have the advantages when larger measurement error or variability of the process is present, but that the spline as interpolation method is more accurate.

KEY WORDS: color management system, ICC profile, gamut, characterization models

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Sustav za upravljanje bojom	2
2. Icc profili.....	5
3. Gamut.....	8
4. Kalibracija i karakterizacija	12
5. Karakterizacijski modeli	16
5.1. Fizički modeli.....	16
5.1.1. Gustoća	16
5.1.2. Modeli pokrivenosti površine.....	16
5.1.3. Modeli primara	18
5.2. Numerički modeli.....	20
5.2.1. Metode regresije	20
5.2.2. Trodimenzionalne interpolacijsketablice.....	22
5.2.3. Regresija ćelija	25
5.2.4. Neuronske mreže	25
5.2.5. Radijalne bazne funkcije	26
6. Eksperimentalni dio	28
6.1. Metodologija	28
6.2. Rezultati i rasprava.....	32
7. Zaključak	42
8. Literatura.....	44
9. Popis slika	47
10. Popis tablica.....	49

1. UVOD

U samim počecima reprodukcije korišten je samo zatvoreni radni tok s jednim ulaznim i jednim izlaznim uređajem. Pojava novih uređaja i njihovo korištenje dovelo je do reprodukcije kojani je bila jednaka na različitim izlaznim uređajima jer nam svaki novi uređaj daje drugačiju reprodukciju boje. Upravo ovaj problem doveo je do razvoja sustava za upravljanje bojom.

U teorijskom dijelu ovog rada ukratko su objašnjeni pojmovi sustava za upravljanje bojom, gamuta i njegove važnosti te ICC profila. Također će biti objašnjeni sustavi kalibracije i karakterizacije kao procesi sustava za upravljanje bojom. Zatim će biti dat pregled karakterizacijskih modela.

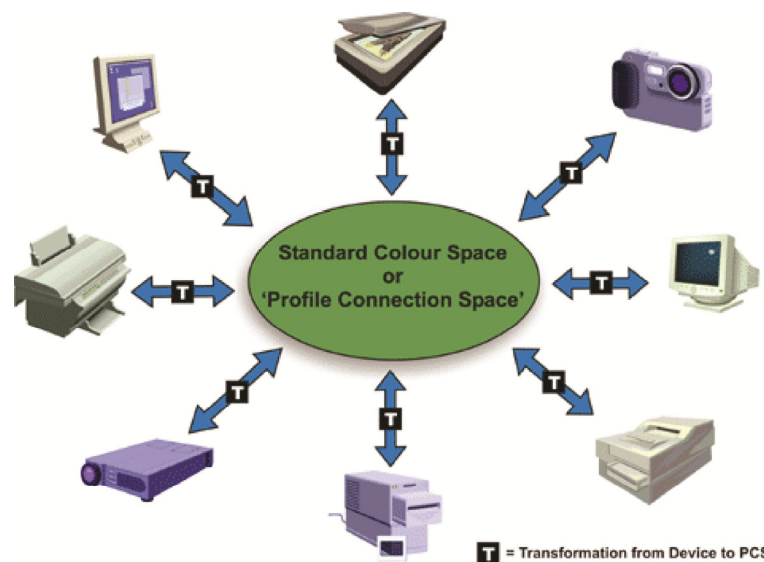
U eksperimentalnom dijelu ovog rada usporedit će se točnost profila izrađenih različitim karakterizacijskim modelima. Koristit će se interpolacijske tehnike, regresijski model i poliharmonijski splajn. Istraživanjem će se utvrditi kvaliteta prilagodbe i moć predviđanja različitih modela na jednom procesu. Iz ranijih istraživanja je poznato da interpolacijska tehnika daje najnetočnije rezultate jer je ova tehnika u osnovi linearna, a procesi su nelinearni. Kod usporedbe regresijskih i splajn modela, neka istraživanja pokazuju da im je točnost ujednačena, dok druga istraživanja pokazuju da je splajn metoda ipak točnija.

Istraživanje je provedeno na standardnim „FOGRA39L“ karakterizacijskim podacima. Modeli su iskorišteni za izračun vrijednosti u podatkovnim strukturama ICC profila jednakih veličina transformacijskih tablica i jednakih „A“ i „B“ krivulja. Profili su zatim korišteni za transformaciju vrijednosti kojima su modeli bili prilagođeni i za transformaciju nezavisnog skupa vrijednosti. Rezultati odstupanja predviđenih vrijednosti od izmjerenih pokazali su kvalitetu prilagodbe i moć predviđanja ispitanih modela.

Iz rezultata istraživanja vidljivo je kako su se najtočnijim metodama pokazale interpolacijske tablice s 10 i više točaka po osi transformacijske tablice, a nakon njih radialne bazne funkcije s Gausovim baznim funkcijama.

2. SUSTAV ZA UPRAVLJANJE BOJOM

Sustav za upravljanje bojom, odnosno Color Management System, u samim počecima reprodukcije boja nije bio potreban jer je korišten zatvoreni radni tok s jednim ulaznim uređajem i jednim izlaznim uređajem. No, u današnje vrijeme imamo ulazne uređaje kao što su različite vrste skenera i digitalne fotoaparate, dok kao izlazne uređaje imamo tiskarske strojeve koji otiskuju različitim vrstama i brojem boja, različite vrste pisača, kopirnih uređaja te monitore. Svaki od ovih uređaja nam daje drugačiju reprodukciju boja te nam isti otisak neće biti u potpunosti jednak na različitim izlaznim uređajima. Pojava i korištenje novih uređaja dovela je do velikog broja mogućih pretvorbi od ulaznog do izlaznog uređaja.



Slika 1. Osnovni način funkcioniranja sustava za upravljanje bojom [15]

Sustav za upravljanje bojama (Color Management System) je skup programskih alata za kalibraciju i karakterizaciju ulaznih i izlaznih uređaja unutar proizvodnog procesa tiska, odnosno procesa reprodukcije boja te za automatizaciju potrebnih pretvorbi boja među uređajima kako bi standardizacijom reprodukcijских procesa postigli željene rezultate neovisno o uređaju koji smo koristili.

Sustav za upravljanje bojama koristi profile kako bi pretvorio i uskladio boje u danom prostoru boja sa prostorom boja danog uređaja, što je prikazano na slici 1. Kada se boje sukladne s gamutom jednog uređaja moraju prikazivati na uređaju sa različitim

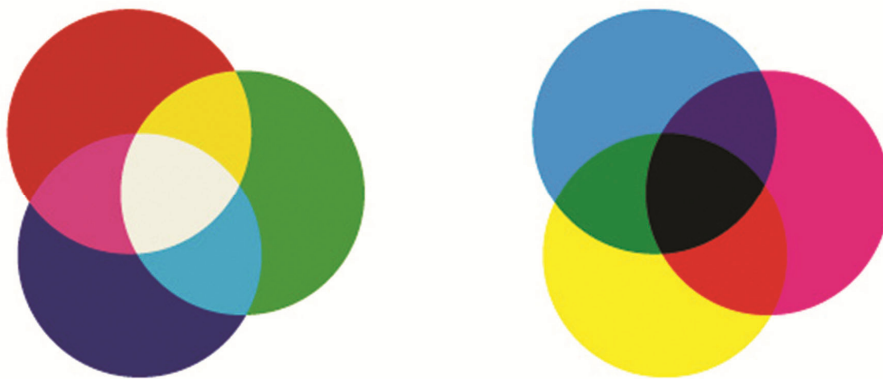
gamutom, tada ovaj sustav pokušava minimizirati percipirane razlike u prikazanim bojama između dva uređaja. Program za upravljanje bojama minimizira razlike na način da obavlja preslikavanje boja koje se nalaze izvan gamuta u raspon boja koje se mogu reproducirati na određenoj, tj. željenoj uređaju. [6]

Sustav upravljanja bojama se sastoji od nekoliko komponenti:

- referentnog prostora boja (Profile Connection Space – PCS);
- ICC profila;
- modula sa algoritmima za usklađivanje boja (Color Management Module – CMM);
- te načina za smještanje i usklađivanje boja (Rendering intents).

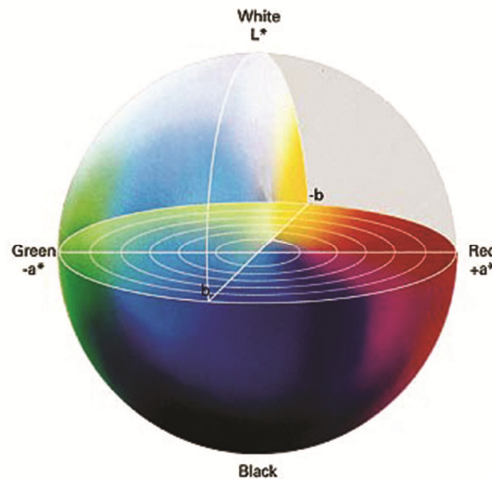
Referentni sustav boja je sučelje koje omogućuje nedvosmisleni povezanost između ulaznih i izlaznih uređaja. Referentni sustav omogućuje pretvorbu boja iz prostora ovisnog o uređaju u prostor boja koji je neovisan o uređaju.

Prostori boja koji su ovisni o uređaju na kojem se primjenjuju ovise o kromatskim karakteristikama skupa primarnih boja koji se koriste kod procesa bojanja. Prostori boja ovisni o uređaju dijele se na one koji su zasnovani na supraktivnom miješanju boja, CMY te CMYK, te na one koji su zasnovani na aditivnom miješanju boja, RGB i YCC. Supraktivni i aditivni način miješanja boja prikazan je na slici 2.



Slika 2. Aditivni (RGB) i supraktivni (CMYK) načini miješanja boja [16]

Prostori boja koji su neovisni o uređaju definiraju boju na bazi percepcije standardnog promatrača, a ne na mogućnostima uređaja. Prostori boja neovisni o uređaju su XYZ, CIELab te CIELUV. CIELab je prostor boja koji većina sustava za upravljanj bojom koristi kao referentni prostor boja te je prikazan na slici 3.



Slika 3. CIE Lab prostor boja [17]

Modul sa algoritmima za usklađivanje boja (CMM) je programski alat koji izvršava pretvorbu između prostora uređaja i referentnog prostora boja koristeći podatke o uređaju sadržane u profilu. CMM numeričke vrijednosti boja ulaznog uređaja preračunava u vrijednosti referentnog sustava boja, a zatim te vrijednosti preračunava u vrijednosti boja izlaznog uređaja. CMM radi na principu interpolacije, što znači da proračuna nepoznate međuvrijednosti boja pomoću nekoliko poznatih. Interpolacija će biti detaljnije opisana u nastavku ovog rada.

Načini preslikavanja (Rendering intents) je naziv parametra profila koji određuju način na koji će se boje smjestiti i uskladiti u sustavu upravljanja bojama. Naime, kod procesa reprodukcije opseg boja ulaznih jedinica koji koriste RGB prostor boja je veći od izlaznih uređaja koji koriste CMYK prostor boja, zbog čega je radi pravilne reprodukcije potrebno boje, koje se tokom pretvorbe nalaze izvan gamuta, smjestiti i uskladiti unutar granica gamuta. [1], [2]

2. ICC PROFILI

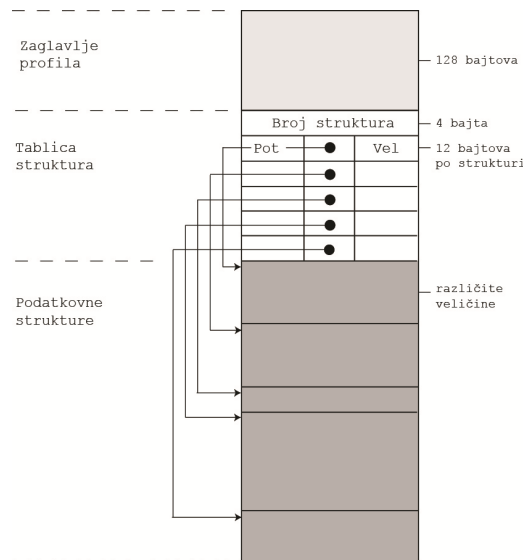
Ranih 1990-tih, u procesu prijelaza analognih postupaka grafičke reprodukcije u digitalne, proizvođači softvera i opreme razvijali su različite sustave upravljanja bojama koje nije bilo moguće međusobno povezati. Upravo zbog toga su 1993. godine vodeći proizvođači (Adobe, Agfa, Apple, Kodak, Microsoft, Silicon Graphics, Sun Microsystems, Fogra, Taligent) osnovali International Color Consortium (ICC). Glavna djelatnost konzorcija je stvaranje standarda za datoteke koje opisuju reprodukcijiska svojstva određenog uređaja. ICC konzorcij precizno definira format, ali ne definira način obrade i stvaranja podataka koje ICC profil sadrži te na taj način ostavlja prostor za različita rješenja programa i sustava koje koriste ICC profile. ICC konzorcij 2003. godine počinje surađivati s ISO tehničkim odborom za grafičku tehnologiju kako bi se mogao nastaviti daljni razvoj sustava za upravljanje bojom. [5]

ICC profil je datoteka koja povezuje vrijednosti boja uređaja sa odgovarajućim vrijednostima boja neovisnim o uređaju koji predstavljaju stvarnu boju koju promatrači vide. Vrijednosti uređaja su izražene kontrolnim signalima, obično RGB ili CMYK, koji se šalju na naš uređaj kako bi mogli reproducirati boje. Odgovarajuće neovisne vrijednosti koje predstavljaju boje za reprodukciju iskazane su u referentnom sustavu boja, CIEXYZ ili CIELAB.

Profil uređaja sadrži informacije o tri glavne varijable koje opisuju karakteristike uređaja:

- gamut – boja i svjetlina bojila,;
- dinamički raspon – boja i svjetlina bijele i crne točke;
- ton – reprodukcijiske karakteristike bojila.

Profili se sastoje od zaglavlja, tablica podatkovnih struktura i samih podatkovnih struktura, što je prikazano na slici 4. Zaglavlje profila su polja koja sadrže informacije na temelju kojih ga softver interpretira: klasa profila, prostor boja uređaja i prostor boja neovisan o uređaju, preferirani modul, informacije o vrsti medija i izvoru svjetla. Tablica podatkovnih struktura sadrži potpis, poziciju i veličinu svake od struktura. Podatkovne strukture sadrže neophodne i izborne podatke.



Slika 4. Struktura ICC profila [18]

Profili uređaja podijeljeni su u 3 kategorije:

1. ulazni profili – za uređaje poput skenera i digitalnih fotoaparata;
2. profili zaslona – za uređaje kao što su monitori i uređaji ravnih zaslona;
3. izlazni profili – za uređaje poput pisača, fotokopirnih uređaja, filmskih rekordera i tiskarskih strojeva. [4]

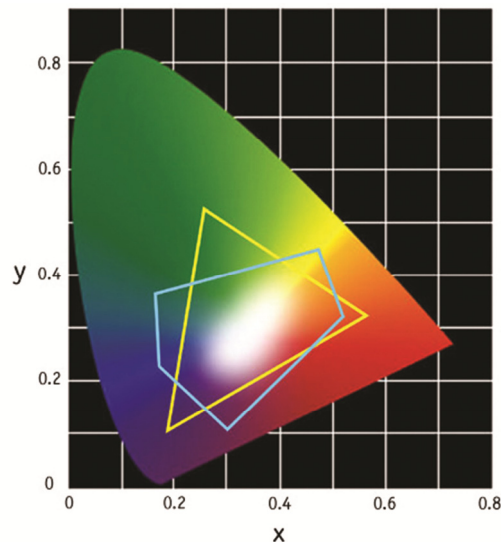
Ove tri vrste profila se razlikuju po tome jesu li jednosmjerni ili dvosmjerni, odnosno omogućuju li pretvorbu iz prostora uređaja u referentni prostor i iz referentnog prostora u prostor uređaja. Ulazni profili moraju definirati samo pretvorbu iz prostora boja ulaznih uređaja u referentni prostor boja i daju CMS-u informaciju kako ljudi vide boje koje je snimio skener ili fotoaparat. Stoga su oni jednosmjerni. Profili zaslona moraju biti dvosmjerni jer se zaslone mogu imati ulogu ulaznih i izlaznih uređaja. Ulogu ulaznog uređaja imaju kada se boja stvara ili uređuje na temelju izgleda na zaslonu jer tada CMS treba znati koju boju vidi promatrač kako bi ju mogao reproducirati na

izlaznom uređaju. Zaslone imaju ulogu izlaznih uređaja kada se na njima prikazuje. Izlazni profili su uvijek dvosmjerni profili. Koriste se za pretvaranje iz PCS-a u izlazni prostor boja za tisak te za prikazivanje datoteka koje smo već prebacili u izlazni prostor na zaslonu ili pretvaranje slika u CMYK-u u prostor boja nekog drugog izlaznog uređaja.

3. GAMUT

Svaki digitalni reproduksijski uređaj radi unutar određenog prostora boja koji može proizvesti određeni raspon boja. Upravo zbog toga izgled boja na originalu i na reprodukciji nije jednak.

Gamut boja nekog uređaja je naziv za puni raspon boja koje može reproducirati dani uređaj. Osnova svake reprodukcije je da ujednačimo doživljaj između gamuta originala i gamuta reprodukcije. Na slici 5. je prikazan gamut boja koje ljudsko oko vidi. Žuta linija prikazuje RGB prostor boja, dok plava linija prikazuje CMYK prostor boja.



Slika 5. Gamut boja ljudskog oka [15]

Način na koji se pojedine informacije o boji preslikavaju iz jednog gamuta u drugi naziva se preslikavanje (mapiranje)gamuta. Metode preslikavanja se dijele u tri skupine: komprimiranje, odrezivanje te ekspaniranje. Smjer mapiranja gamuta možemo odrediti s obzirom na doživljajne attribute, prema definiranoj točki, prema većem broju gravitacijskih točaka na osi karakteristike boje prema kojoj se provodi mapiranje te prema najbližoj boji istovjetnog tona.

Mapiranje metodom komprimiranja se dijeli na linearnu, nelinearnu te kombiniranu kompresiju. Linearna kompresija koristi način komprimiranja u kojem se boje linearno komprimiraju do granica gamuta reprodukcije. Kod ove metode može doći do velikog

odstupanja i poremećaja u odnosima različitih tonova. Nelinearna kompresija je tehnika komprimiranja gdje se djelovanje na boje izvan gamuta reprodukcije obavlja ovisno o prioritetima, a samim time je doživljaj reprodukcije bliži originalu. Kombinirana kompresija je metoda koja koristi različite metode kompresije.

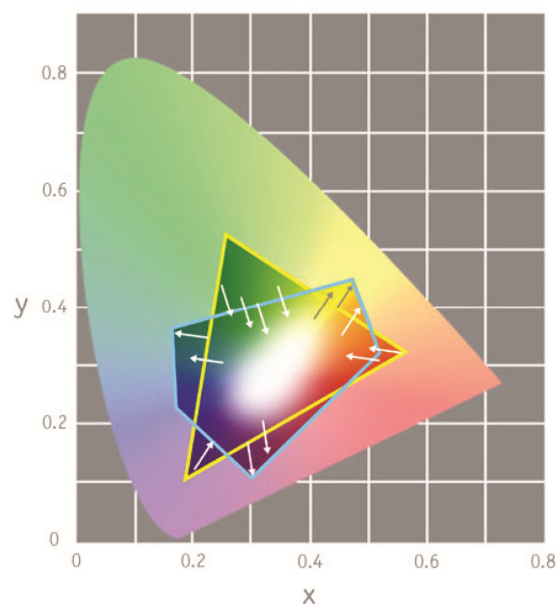
Metoda odrezivanja radi na način da boje originala koje se nalaze izvan gamuta reprodukcije smještaju na granicu gamuta reprodukcije. Reprodukcijska nastala ovom metodom može biti jako različita od originala te nema nekog određenog pravila. Jedino se možemo voditi time da što je odstupanje manje, to je reprodukcija točnija.

Ekspandiranje gamuta je linearna eksterpolacijska tehnika preslikavanja koja se koristi kada je gamut originala manji od gamuta reprodukcije. [7], [8], [9]

ICC Specifikacija profila definira 4 vrste preslikavanja s obzirom na namjenu:

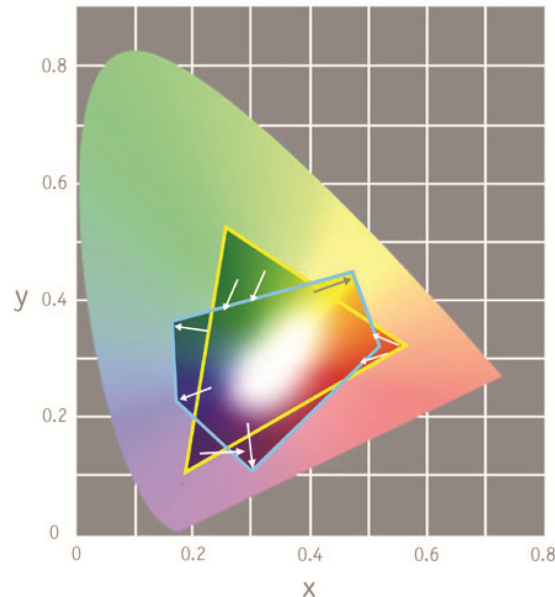
- perceptivno,
- saturacijsko,
- apsolutno kolorimetrijsko te
- relativno kolorimetrijsko renderiranje.

Perceptivno renderiranje se obično koristi za fotografske sadržaje. Ovdje se sve boje gamuta originala usklađuju sa bojama gamuta reprodukcije. Boje održavaju njihove relativne pozicije. Perceptivno usklađivanje obično daje bolje rezultate od kolorimetrijskih usklađivanja za realistične slike, kao što su skenirane fotografije te digitalno snimljene fotografije. Na slici 6. prikazano je perceptivno renderiranje.



Slika 6. Perceptivno renderiranje [15]

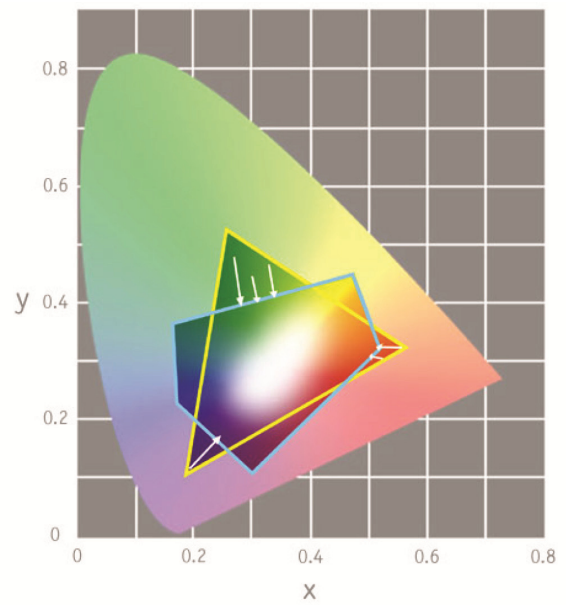
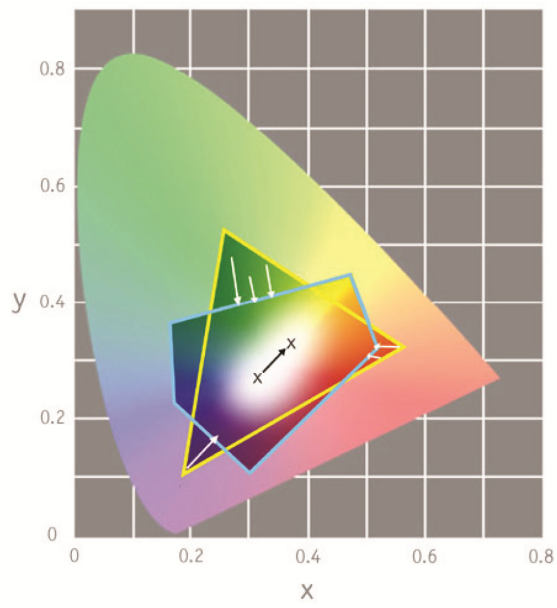
Saturacijsko renderiranje vrsta je preslikavanja kod kojeg se ne zadržavaju relativni odnosi među pojedinim bojama. Kod ove vrste renderiranja transformiraju se boje izvan gamuta reprodukcije na rub gamuta reprodukcije. Ova vrsta renderiranja se koristi za grafikone, općenite prikaze u poslovnim izvještajima i za reljefne zemljovide. Na slici 7. prikazano je saturacijsko renderiranje.



Slika 7. Saturacijsko renderiranje [15]

Apsolutno kolorimetrijsko renderiranje nastoji prikazati što više izvornih boja na način da se ne mijenjaju boje koje pripadaju gamutima originala i reprodukcije, dok se boje izvan gamuta reprodukcije preslikavaju u najbliže boje s različitim zasićenjima. Ova vrsta renderiranja čuva izvorne vrijednosti bijele točke originala. Koristi se kod probnih otiskivanja kada jedan uređaj pokušava simulirati reprodukciju drugog uređaja i medija.

Kod relativnog kolorimetrijskog renderiranja boje koje se preklapaju u gamutima originala i reprodukcije ostaju nepromijenjene. Nedostatak ovog renderiranja je što se više boja može preslikati u jednu boju što rezultira kompresijom tona. Boje koje se nalaze izvan gamuta obično se usklađuju na način da imaju istu svjetlinu, ali različitu zasićenost na rubu gamuta. Konačna slika gledajući ukupno može biti svjetlija ili tamnija od izvorne slike, ali se prazni prostori podudaraju. Na slici 8. prikazano je apsolutno i relativno kolorimetrijsko renderiranje. [6], [15]



Slika 8. Apolutno i relativno kolorimetrijsko renderiranje [15]

4. KALIBRACIJA I KARAKTERIZACIJA

Cijeli proces upravljanja bojama može se opisati kroz tri postupka: kalibracija, karakterizacija i pretvorba. Ova 3 postupka hijerarhijski se provode što znači da svaki proces ovisi o prethodnom koraku pa tako npr. karakterizacija vrijedi samo za određeni uvjet kalibracije.

Pretvorba je postupak gdje se slike pretvaraju iz jednog prostora boja u drugi koristeći pritom CMM. [10]

Pretvorba vrijednosti boja odvija se u 4 koraka i prikazana je na slici 9.:

1. Sustav upravljanja bojama očitava podatke u ulaznom profilu te izrađuje tablicu. Ta tablica, uz relativno kolorimetrijsko usklađivanje, povezuje originalne RGB vrijednosti sa odgovarajućim CIEL*a*b* vrijednostima boja iz referentnog prostora boja te na taj način RGB vrijednosti ulazne jedinice postaju neovisne o uređaju.
2. Sustav upravljanja bojama očitava podatke u izlaznom profilu te izrađuje tablice koje povezuju određene CMYK ili RGB vrijednosti s odgovarajućim CIEL*a*b* vrijednostima iz referentnog sustava boja pri čemu se koristi neki od načina usklađivanja boja.
3. Korištenjem interpolacijskog algoritma koji je definiran u sustavu upravljanja bojom, preko zajedničkih vrijednosti referentnog sustava boja, međusobno se spajaju dvije tablice u jednu koja direktno povezuje ulazne i izlazne uređaje.
4. Sustav upravljanja bojom provjerava svaki piksel ulazne slike pomoću ranije definirane tablice pritom prevodeći ulaznu vrijednost piksela u njegovu izlaznu.[2]



Slika 9. Prikaz pretvorbe boja: [2]

- *a* predstavlja RGB ulazne vrijednosti;
- *b* predstavlja PCS;
- *c* predstavlja CMYK izlazne vrijednosti.

Kalibracija uređaja je postupak postizanja ciljanih reproduksijskih karakteristika uređaja i održavanje uređaja na fiksnim poznatim karakterističnim odazivima boja. Kalibracija osigurava da se zadane kontrole uređaju održe na fiksnim nominalnim vrijednostima što je važno za naknadne procese. Postizanje ciljanih reproduksijskih karakteristika zahtijeva provedbu postupka mjerenja boja te izvođenje korekcije kako bismo osigurali da uređaj održava ciljanu reproduksijsku karakteristiku boja. U nekim slučajevima je ciljana karakteristika definirana za svaki signal uređaja pojedinačno. Nakon postupka kalibracije slijedi postupak karakterizacije. [10]

Sam postupak kalibracije obuhvaća slijedeće radnje:

1. snimanje, skeniranje ili ispis odgovarajuće ispitne karte;
2. procjena rezultata mjerenjem boja koje je uređaj reproducirao;
3. podešavanje uređaja prema dobivenim rezultatima.

Procjena rezultata dobivenih uređajem koji se kalibrira provodi se mjerenjem s kolorimetrom, spektrofotometrom ili denzitometrom. Polja prikazane ili ispisane ispitne karte boja mjere se kako bi se procijenila sposobnost izlazne jedinice da ispravno prikaže vrijednosti boja koje zadaje softver za kalibraciju. Zatim se dobiveni rezultati šalju natrag u softver te se vrše prilagodbe ulaza kojima su određene vrijednosti boja koje će se reproducirati na izlaznom uređaju. [2]

Proces karakterizacije proizlazi iz odnosa prostora boja ovisnog i neovisnog o uređaju za kalibrirane uređaje. Kalibracija i karakterizacija uređaja čine na neki način par jer u slučaju da nova kalibracija mijenja karakteristike uređaja, tada i karakterizacija mora biti ponovo provedena.

Funkcija karakterizacije se može definirati u dva smjera. Transformacija definira odaziv uređaja na poznati ulaz te se na taj način opisuju reproduksijske karakteristike tog uređaja. Inverzna transformacija određuje ulaz u uređaj koji je potreban kako bi dobili željeni odaziv. Inverzna funkcija se koristi za korekcije boja na slikama u završnoj obradi.

Izlaz kalibracije i karakterizacije procesa je niz preslikavanja između prostora boja ovisnih o uređaju i prostora boja neovisnih o uređaju. Obično se provodi

kombinacijom preslikavanja, pretvorbe, 3x3 matricama, normalizacijom bijele točke te jednodimenzionalnim i višedimenzionalnim transformacijskim tablicama. Ove informacije pohranjene su različitim formatima zapisa usvojenih od strane ICC konzorcija. [11]

Postoje tri osnovne vrste pristupa za stvaranje modela za uređaje: fizički modeli, numerički modeli te transformacijske tablice.

Fizički modeli uključuju pojmove različitih fizičkih osobina uređaja, kao što je apsorpcija, raspršenje te refleksija svjetlosti u interakciji s bojilom i podlogom. Kod numeričkih modela se definira niz koeficijenata, obično regresijom iz skupa poznatih uzoraka, bez prethodne pretpostavke o fizičkim karakteristikama uređaja. Transformacijske tablice definiraju pretvorbu između prostora boja uređaja i CIE prostora boja za skup koordinata unutar prostora boja, a vrijednosti za koordinate koje nisu sadržane u tablici određuju se interpolacijom iz poznatih vrijednosti. Podaci u transformacijskoj tablici mogu se odrediti izravnim mjerenjem ili pomoću fizičkih ili numeričkih modela. U praksi transformacije boja najčešće uključuju primjenu elemenata dvaju ili više pristupa.

Ciljevi postupka karakterizacije su:

- Preciznost

Model treba predvidjeti boje s minimalnim odstupanjima u svim dijelovima prostora boja.

- Vizualna prihvatljivost

Ne smiju postojati smetnje koje uzrokuju diskontinuiranost u modelu, a raspodjela pogrešaka ne smije dovesti do promjene u svojstvima boja koje se smatraju vizualno značajnima za promatrača.

- Računalna jednostavnost

Ovaj cilj je važan kada se modeli uređaja koriste za rad na stolnom računalu ili se često moraju preračunavati naknadne promjene.

- Najmanji broj mjerenja

Poželjno je na ovaj način pojednostaviti proces modeliranja, posebno kada numerički model mora biti redefiniran različitim uvjetima reprodukcije.

- Analitička inverzibilnost

Modeli uređaja trebaju opisivati transformaciju i inverznu transformaciju. [12]

5.KARAKTERIZACIJSKI MODELI

5.1. Fizički modeli

Fizički modeli uključuju one modele čiji je cilj predvidjeti odnos između reflektancije i pokrivenosti površine ili gustoće obojenja te one modele koji predviđaju boju dobivenu sa različitim kombinacijama bojila s obzirom na kolorimterijsku i spektralnu refleksiju. Parametri fizičkih modela moraju se, za određene procese i podloge, odrediti empirijski.

5.1.1. Gustoća

Gustoću je pogodno koristiti kao mjeru količine bojila jer je perceptivno ujednačenija od reflektancije i linearnije povezana s koncentracijom bojila. Optička gustoća D izračunava se iz formule koja uzima u obzir reflektanciju:

$$D = -\log_{10} R \quad (I)$$

Do vrijednosti R se dolazi vrednovanjem faktora refleksije na svakoj valnoj duljini prikladnim funkcijama.

5.1.2. Modeli pokrivenosti površine

Murray-Davies

Murray-Daviesova jednadžba prikazuje odnos između pokrivenosti površine i reflektancije ili gustoće obojenja. Jednadžba glasi:

$$R = R_w - A(R_w - R_s), \quad (II)$$

pri čemu je R_w reflektancija bijelog papira, a R_s je reflektancija bojila, A je udio pokrivenosti površine rasterskim elementima, a R je faktor refleksije rastera. [12]

Ova jednadžba češće se primjenjuje u slijedećem obliku:

$$A = \frac{1 - 10^{-D_t}}{1 - 10^{-D_s}}, \quad (\text{III})$$

pri čemu je D_t gustoća obojenja za koju se računa pokrivenost površine, a D_s gustoća obojenja na polju punog tona. Jednadžba prikazuje vezu između pokrivenosti površine i gustoće obojenja normaliziranim na bijelinu papira. [12]

Murray-Daviesova jednadžba ne uzima u obzir popratne pojave kao što su raspršenje svjetlosti, zbog čega dolazi do optičkog prirasta rasterskog elementa. [13]

Yule–Nielsen

Pokrivenost površine ovisi o veličini rasterskog elementa te o optičkim svojstvima podloge. Kod ove jednadžbe se uvodi eksponent n nad reflektancijom kao korekcija kako bi se mogla odrediti geometrijska te ciljana pokrivenost površina. Eksponent n obično dolazi u intervalu od 1, kada uopće nema raspršenja pa do 2, kada dolazi do potpunog raspršenja. Yule-Nielsen jednadžba glasi:

$$A = 1 - R^{1/n}. \quad (\text{IV})$$

Kada ova jednadžba treba prikazivati vezu sa gustoćom obojenja tada ona glasi:

$$A = \frac{1 - 10^{-D_t/n}}{1 - 10^{-D_s/n}}. \quad (\text{V})$$

Clapper-Yule

Izvor pogrešaka kod Murray-Davies i Yule-Nielsen jednadžbi su moguće unutarnje refleksije kod sjajnih otisaka. Model Clapper-Yule uvodi korekcije za ove

pogreške tako da nastoji obuhvatiti unutarnje raspršenje, transmitanciju kroz sloj bojila i reflektanciju s površine:

$$R = K_s + \frac{xIr(1 - A + At)^2}{1 - r(1 - x)(1 - A - At^2)}, \quad (\text{VI})$$

gdje je K_s površina refleksije na otisku, t je transmitancija boje, I je količina svjetla koja prodire u podlogu, a x je dio svjetlosti koji se reflektira iznutra. [12]

Neugebauer

U ovom modelu se pretpostavlja da se integriraju sve reflektancije s podloge te da su ukupne reflektancije kombinacija doprinosa svake boje. Ovaj oblik jednadžbe je poznat kao Neugabauerova jednadžba i glasi:

$$R = A_w R_w + A_c R_c + A_m R_m + A_y R_y + A_r R_r + A_g R_g + A_b R_b + A_k R_k \quad (\text{VII})$$

gdje je R ukupna reflektancija, A je pokrivenost površine, a indeksi w, c, m, y, r, g, b i k odnose se na bijeli papir, tri primarna bojila te njihova preklapanja.

Pogreške koje se javljaju kod ove jednadžbe su najmanje kod jednoboynih otisaka primarnih bojila te imaju tendenciju da budu najveće kod neutralnih jer su primarna bojila glavni ulazi u model. [12]

5.1.3. Modeli primara

Modeli primara predviđaju reflektanciju ili transmitanciju različitih debljina bojila na način da modeliraju supraktivne učinke bojila i podloge.

Jednadžbe maskiranja

Ove jednadžbe se koriste u sustavu reprodukcije boja za izračunavanje gustoća CMY bojila potrebnih za reprodukciju izvornih boja uzevši u obzir neželjene apsorpcije ta tri bojila.

$$\begin{bmatrix} D_r \\ D_g \\ D_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_r \\ C_g \\ C_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_r \\ M_g \\ M_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_r \\ Y_g \\ Y_b \end{bmatrix} \quad (\text{VIII})$$

Beer-Lambert

Beer-Lambertov zakon definira odnos između transmitancije svjetlosti i količine bojila u apsorpcijskom filterima. Transmitancija svjetlosti kroz medij je proporcionalna gustoći i apsorptivnosti medija:

$$A = \log\left(\frac{1}{T}\right), \quad (\text{IX})$$

gdje je A apsorbancija, a T transmitancija. ApSORbancija također daje:

$$A = \varepsilon c \omega, \quad (\text{X})$$

gdje je ε konstanta apsorptivnosti medija, c je njegoVA koncentracija i ω je debljina medija. [12]

Ova jednadžba ne uzima u obzir raspršenje svjetlosti, već samo njegoVu apsorpciju.

Kubelka-Munk

Ovaj model uzima u obzir apSORbanciju i raspršenje svjetlosti u sloju bojila te refleksiju svjetlosti podloge.

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R)^2}{2R}. \quad (\text{XI})$$

U jednadžbi Kubelka-Munk R predstavlja faktor refleksije na uzorku beskonačne debljine, K je koeficijent apSORpcije, dok je S koeficijent raspršenja. Konstante K i S mogu odrediti empirijski pojedinačno ili kao kvocijent K/S . [12]

5.2. Numerički modeli

Kod stvaranja numeričkog modela uređaja odabire se određeni skup boja koji predstavlja koordinate čitavog prostora boja uređaja, a dobivene vrijednosti se koriste za izvođenje numeričkog modela odnosa prostora boja uređaja i CIE prostora boja. 3x3 matricama se definira odnos između CIE mjerenja boja te koordinata odgovarajućeg uređaja:

$$C = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,2} \end{bmatrix} D \quad , \quad (\text{XII})$$

gdje je C vektor vrijednosti CIE prostora boja, D je vektor vrijednosti prostora boja uređaja, a a su koeficijenti 3x3 matrice.

Izrada numeričkog modela može se opisati kroz slijedeće korake:

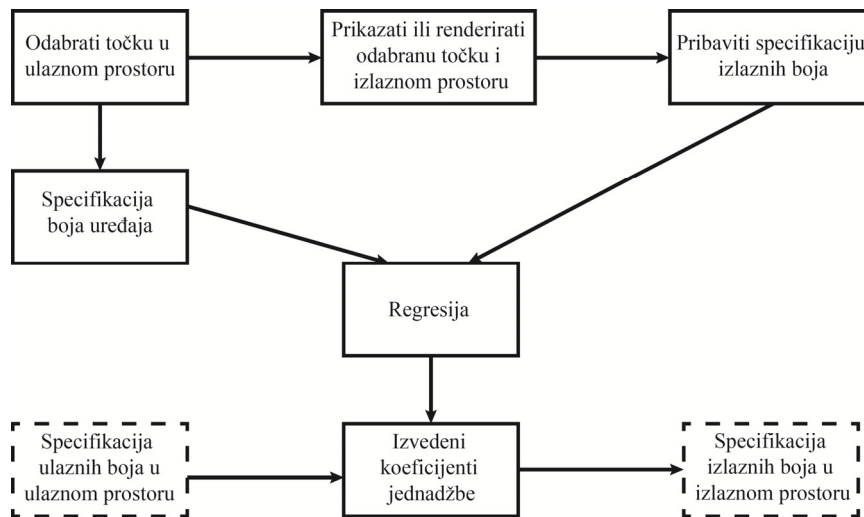
1. odabrati metodu regresije;
2. odabrati područje u kojem će se prikazati izvorni podaci i koordinate uređaja;
3. ako je potrebno odabrati model generiranja crne boje;
4. odabrati probni skup koordinata uređaja koji će biti cilj ispitivanja;
5. reproducirati cilj ispitivanja i izmjeriti rezultate;
6. formirati jednadžbu regresije s vektorom izmjernih podataka i koordinatama uređaja;
7. izračunati koeficijente modela;
8. procijeniti točnost modela te dodati korekcije, ako je potrebno. [12]

5.2.1. Metode regresije

Regresijska tehnika primjenjuje se za kalibraciju i karakterizaciju fotoaparata, skenera i pisača. Kod ove tehnike odabire se uzorak točaka u ulaznom prostoru boja te

se mjere njihove vrijednosti u izlaznom prostoru. Nakon toga se odabire jednačba koja povezuje ulaz s izlaznim vrijednostima boja.

Regresija se izvodi na odabranim točkama s poznatim vrijednostima boja u ulaznom i izlaznom prostoru kako bi se odredili koeficijenti polinoma. Kod ove tehnike mora biti zadovoljen uvjet da broj točaka bude veći od broja uvjeta polinoma. U protivnome, ne postoji jedinstveno rješenje sustava jednačbi jer ima više nepoznanica nego jednačbi. Nakon određivanja koeficijenata, oni se mogu primijeniti na ulazne vrijednosti te pomoću sustava jednačbi izračunati izlazne vrijednosti. Na slici 10. nalazi se shematski prikaz metode regresije.



Slika 10. Shematski prikaz metode regresije [14]

Adekvatnost ove metode ovisi o:

- odnosu ulaznog i izlaznog prostora,
- broju točaka i položaju točaka odabranih za regresiju,
- broju uvjeta u polinomima te
- mjernim greškama.

Ova tehnika je idealna za linearne transformacije. Za nelinearnu pretvorbu prostora boja ova metoda ne osigurava ravnomjernu preciznost kroz cijeli gamut. Točnost ove metode se povećava kada se broj uvjeta povećava.

Glavne prednosti ove metode su:

- jednostavna inverzna pretvorba,
- u obzir se uzimaju statističke fluktuacije mjerenja te
- uzorak točaka nemora biti ravnomjerno raspoređen.

Negativne strane ove metode su složenost računanja i duže vrijeme obrade. [14]

5.2.2. Trodimenzionalne interpolacijske tablice

Trodimensionalne transformacijske tablice

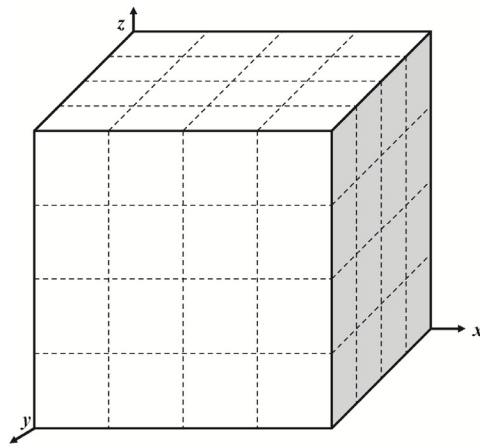
Transformacijske tablice su skup vrijednosti parova koordinata u različitim domenama. Ova metoda sastoji se od tri dijela:

- uzrokovanja ili particioniranja,
- ekstrakcije ili traženja i
- interpolacije ili računanja.

Uzrokovanje je proces koji dijeli domenu ulaznog prostora te ga popunjava s uzorkom točaka kojima se izgrađuje transformacijska tablica. Tablica je izgrađena s jednakim brojem koraka uzimanja uzoraka duž svake osi izvornog prostora za broj razina transformacijske tablice koji nam je određen. Prednost ovakvog rasporeda je što se tako implicitno isporučuje informacija o tome koja je ćelija uz koju zbog čega nam je dovoljno pohraniti vrijednosti početne točke i razmak za svaku os. Na slici 11. prikazano je ravnomjerno raspoređenih pet razina trodimenzionalnog uzrokovanja.

Ekstrakcija je proces u kojem se traže točke rešetke koje su nam potrebne za izračunavanje izlaznih vrijednosti za ulaznu točku. Neke interpolacijske tehnike koje se koriste za izračunavanje vrijednosti boja zahtijevaju i dodatna pretraživanja unutar kocke.

Interpolacija koristi ulazne vrijednosti i poznate izlazne vrijednosti tablice za izračun izlaznih vrijednosti koja za ulaznu točku. [14]



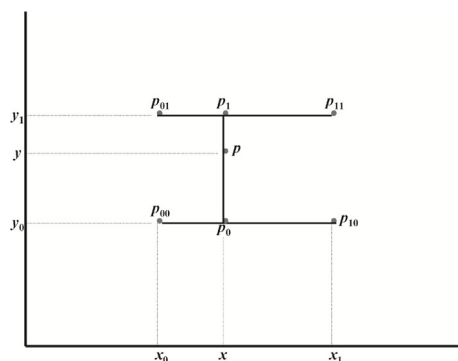
Slika 11. Trodimezionalno pakiranje [14]

Interpolacija

Svrha algoritma interpolacije je procjenjivanje izlaznih vrijednosti koordinata čije su ulazne vrijednosti poznate. Interpolacijske tehnike su matematički proračuni koji koriste geometrijske veze (kubična, prizmična, piramidna, tetraedarska interpolacija) ili regresiju ćelija.

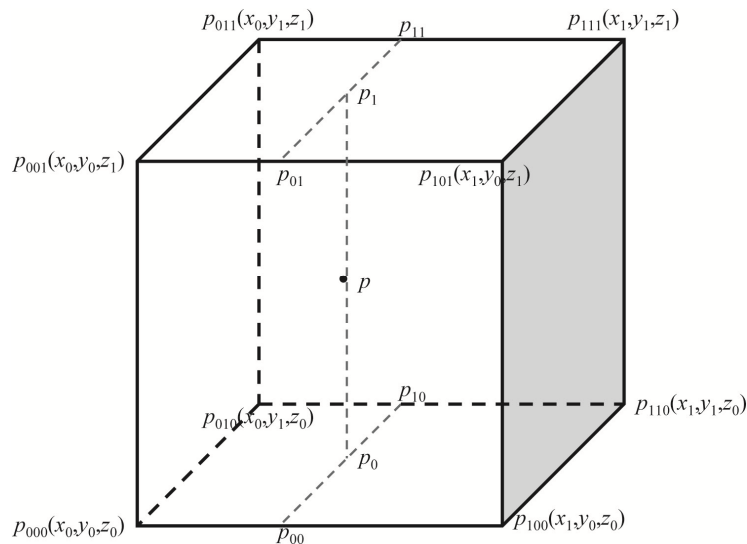
Linearnom interpolacijom u x, y ravnini određujemo vrijednost zavisne varijable y iz poznate vrijednosti nezavisne varijable x i poznatih koordinata dviju točaka, pri čemu se pretpostavlja da sve točke leže na istom pravcu.

Bilinearnom interpolacijom u x, y, z prostoru određujemo nepoznatu vrijednost varijable z iz poznatih vrijednosti x, y i koordinata četiri točke.



Slika 12. Bilinearna interpolacija [14]

Trilinearna interpolacija je najjednostavniji oblik interpolacije koji se primjenjuje na prostore boja. Ovaj oblik interpolacije zahtijeva proširenje jednostavne linearne interpolacije na bilinearnu, a zatim na trilinearnu. Za trilinearnu interpolaciju potrebno je znati koordinate 8 vrhova kocke u ulaznom prostoru boja i njihove pripadajuće vrijednosti u izlaznom prostoru boja, kao što se vidi na slici 13.



Slika 13. Trilinearna interpolacija [22]

Nadalje, imamo geometrijske interpolacije koje su nastale dijeljenjem kocke na više dijelova. Ove interpolacije zahtijevaju mehanizam pretraživanja kako bi pronašli podijeljenu strukturu u kocki u kojoj se nalazi tražena točka. Kod prizmične interpolacije kocku bismo dijagonalno podijelili na dva dijela te bismo tako dobili dvije prizme. Jednadžba ima šest uvjeta i koristi šest vrhova prizme za izračun. Do piramidne interpolacije dolazimo da kocku dijelimo na tri dijela. Jednadžba ima 5 uvjeta i koristi 5 vrhova zadane piramide za izračun. Kod tetraedarske interpolacije kocka se dijeli na 6 tetraedara, a baza svakog tetraedra je trokut. Jednadžba ima 4 uvjeta i koristi 4 vrha tetredra za izračun. Tetraedarska interpolacija računski je najjednostavnija. [22]

Spline interpolacija

Spline funkcija obuhvaća skup dijelova funkcija polinoma koje su definirane tijekom podjele segmenata u ulaznom prostoru. Jednodimenzionalne spline funkcije koriste se kod kalibracije, dok se višedimenzionalne primjenjuju kod karakterizacije

uređaja. Ponašanje spline funkcije određeno je kontrolnim točkama na granici segmenta. Parameteri polinoma se definiraju na način da funkcija prolazi kroz sve kontrolne točke, a pritom zadržava određeni stupanj kontinuiteta po granici segmenta.

5.2.3. Regresija ćelija

Trodimenzionalna interpolacija koja primjenjuje regresiju ćelija je kombinacija trodimenzionalnog uzrokovanja i regresije polinoma. Kod ove tehnike regresija se primjenjuje na manje ćelije umjesto na cijeli prostor boja te se tako povećava točnost interpolacije. Prednosti ove metode su:

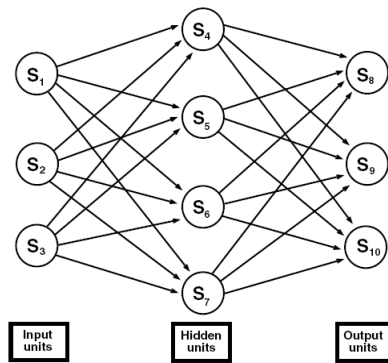
- nije potrebno interpolacijom pronalaziti položaj točke u kocki;
- nije potrebno ujednačeno uzorkovanje zbog čega se ova metoda može primijeniti na bilo koju trodimenzionalnu strukturu kao npr. iskrivljena kocka;
- broj uvjeta je jednak broju vrhova kocke.

Uzimanjem uzoraka u prostoru boja podijeljenim na sitnije dijelove od željenih razina možemo dobiti više uvjeta. No, ovakav pristup je zahtjevan i skup jer se uzimanje uzoraka i mjerenja radi mnogo puta. Uključivanjem susjednih kocki u jednadžbu možemo riješiti ovaj problem.

5.2.4. Neuronske mreže

Neuronske mreže su razvijene kako bi se simulirao način na koji ljudski mozak obrađuje informacije. Neuronska mreža je skup umjetnih neurona koji su međusobno povezani i interaktivni kroz operacije obrade signala. Glavno obilježje neuronskih mreža je svojstvo „učenja“, odnosno uvježbavanje kroz niz ponavljajućih postupaka analize. Neuroni u mreži su organizirani u slojeve. Postoje tri osnovna tipa slojeva: ulazni, skriveni i izlazni. Ulazni sloj prima ulazne podatke iz okoline te ih šalje u

skriveno slojeve. U skrivenim slojevima se informacije obrađuju i šalju u neurone izlaznog sloja. Proces se ponavlja dok se ne dobije izlaz najbliži željenom, tj. stvarnom izlazu. Sakrivene jedinice određuju se empirijski. Na slici 14. prikazana je neuronska mreža koja ima 3 ulazna sloja, 4 sakrivena sloja te 3 izlazna sloja. [19]



Slika 14. Neuronska mreža [22]

5.2.5. Radijalne bazne funkcije

Radijalne bazne funkcije su funkcije jedne varijable čijim linearnim kombinacijama aproksimiramo neku funkciju jedne ili više varijabli. Radijalna funkcija znači da vrijednost funkcije u nekoj točki ovisi o udaljenosti od središta u koje je postavljena, odnosno o normi, najčešće Euklidskoj.

Funkcije Φ norme $\|\dots\|$ zapisujemo $\Phi(\|x-y_j\|)$ gdje je x vektor, y_j centar funkcije te je $\|x-y_j\|$ udaljenost točke od centra, odnosno norma. Centri funkcije su podaci koje interpoliramo. Funkcije $\Phi(\|x-y_j\|) = \Phi(r)$ se biraju proizvoljno, a mogu se koristiti razne funkcije poput kubne parabole i Gaussove funkcije. [20, 21]

Interpolacijska tehnika je linearna kombinacija baznih funkcija kod kojih za m podataka imamo m funkcija, a svaka funkcija je centrirana u jednoj od m točaka.

$$s(x) = \sum_{j=1}^m \lambda_j \phi(\|x - y_j\|) \quad (\text{XIII})$$

Rješavanjem ovog sustava određujemo težinske vrijednosti funkcija (λ_j) za koje je sustav jednadžbi zadovoljen. Sustav zapisujemo kao:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & \cdots & A_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix}. \quad (\text{XIV})$$

U ovom sustavu je

$$A_{ij} = \phi(\|x_i - y_j\|), i, j = 1, 2, \dots, m. \quad (\text{XV})$$

Ako uzmemo da je

$$b = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix}, \quad (\text{XVI})$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & \cdots & A_{mm} \end{bmatrix}, \quad (\text{XVII})$$

$$x = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix}, \quad (\text{XVIII})$$

tada gornji sustav zapisujemo skraćeno kao:

$$b = Ax, \quad (\text{XIX})$$

a njegovo rješenje glasi:

$$x = A^{-1}b. \quad (\text{XX})$$

6.EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj istraživanja bilo je utvrđivanje i uspoređivanje točnosti različitih karakterizacijskih modela. Korištene su interpolacijske tablice, regresijski model te poliharmonijski splajn model. Istraživanjem je utvrđena kvaliteta prilagodbe i moć predviđanja različitih modela na jednom procesu.

U ovom istraživanju postavlja se hipoteza da je splajn metoda najtočnija ako su nekontrolirani faktori, kao što su greške mjerenja i varijabilnost procesa, dovoljno maleni.

Za potrebe ovog istraživanja korištene su standardni „FOGRA39L“ karakterizacijski podaci. Ovi podaci iskorišteni su za izradu interpolacijskog, regresijskog i splajn modela. Dobiveni modeli zatim su se primijenili kod izračuna vrijednosti u podatkovnim strukturama ICC profila jednakih transformacijskih tablica i jednakih „A“ i „B“ krivulja. Profili su korišteni za transformaciju vrijednosti kojima su modeli prilagođeni i za transformaciju nezavisnog skupa vrijednosti. Rezultati odstupanja vrijednosti dobivenih modelima od referentnih vrijednosti pokazuju nam kvalitetu prilagodbe i moć predviđanja ispitanih modela.

6.1. METODOLOGIJA

Za potrebe ovog istraživanja korištene su vrijednosti dobivene standardnim ICC profilom ISO coated V2. Ovaj profil je izrađen iz „FOGRA39L“ karakterizacijskih podataka koji su prikupljeni mjerenjem ISO 12642-2 karte. Ova karta koristi se za karakterizaciju različitih tiskarskih procesa. Karta se sastoji od 1617 permutacija CMYK-a. Za potrebe istraživanja, iz karte su izuzete permutacije koje se ponavljaju, te je od 1617 permutacija jedinstvenih 1588.

Kod izrade svih karakterizacijskih modela nezavisni skup CMYK vrijednosti transformiran je preko profila u CIE $L^*a^*b^*$ skup vrijednosti koji je uzet kao referentni

skup. Transformacija boja provedena je korištenjem AtoB1 podatkovne strukture. Za potrebe evaluacije točnosti karakterizacijskih modela, izračunate CMYK vrijednosti transformirane su preko profila u $L^* a^* b^*$ vrijednosti.

Za izradu praktičnog dijela korišten je program Matlab. On je korišten za izračun vrijednosti karakterizacijskim modelom, evaluaciju odstupanja izračunatih vrijednosti od referentnih te za obradu i prikaz rezultata.

Prije izrade i primjene različitih karakterizacijskih modela, utvrđen je iznos odstupanja koji nastaje pri „kružnoj“ transformaciji unutar profila.

Izgeneriran je nezavisni skup CMYK vrijednosti pri čemu se pazilo da CMYK vrijednosti budu podjednako raspoređene po cijelom prostoru. Izgenerirani nezavisni skup CMYK vrijednosti je primjenjivan kod evaluacije regresijskog modela i modela s radijalnim baznim funkcijama.

Zatim je provedena transformacija CMYK vrijednosti nezavisnog skupa preko ICC profila u $L^*a^*b^*$ vrijednosti. Transformacija boja provedena je korištenjem AtoB1 transformacijskih tablica iz prostora boja uređaja u prostor boja neovisan o uređaju za kolorimetrijsko preslikavanje gamuta, čime su dobivene $L^*a^*b^*$ koordinate unutar gamuta procesa. Dobivene $L^*a^*b^*$ vrijednosti su zatim opet transformirane u CMYK vrijednosti preko ICC profila. Transformacija boja provedena je korištenjem BtoA1 transformacijske tablice iz prostora boja neovisnog o uređaju u prostor boja uređaja za kolorimetrijsko preslikavanje gamuta.

Izrada interpolacijskog modela

Kako bi se ispitala točnost interpolacijskih tablica, izvršena je transformacija CIE $L^*a^*b^*$ vrijednosti u CMYK vrijednosti, ali preko transformacijskih tablica (CLUT-a). U ovom koraku već su vidljiva odstupanja u odnosu na karakterizacijsku kartu.

CLUT, odnosno transformacijska tablica standardnog profila podijeljena je na 33 točke po osi. Za potrebe ovog istraživanja izrađene su CLUT tablice različitih

veličina te im je točnost ocijenjena transformacijom osnovnog skupa CIE L*a*b* vrijednosti u CMYK vrijednosti.

Izrada regresijskog modela

Jednadžba regresije formirana je s vektorom vrijednosti CIE L*a*b* prostora boja i vektorom vrijednosti CMYK prostora boja kako bi se mogli izračunati koeficijenti matrice (A). Formirane su 3 jednadžbe:

a) jednadžbe polinoma prvog reda

$$[C \ M \ Y \ K] = [1 \ L \ a \ b] \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{4,1} & \cdots & a_{4,4} \end{bmatrix} \quad (\text{XXI})$$

b) jednadžba polinoma drugog reda

$$[C \ M \ Y \ K] = [1 \ L \ a \ b \ La \ Lb \ ab \ L^2 \ a^2 \ b^2] \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{10,1} & \cdots & a_{10,4} \end{bmatrix} \quad (\text{XXII})$$

c) jednadžba polinoma trećeg reda

$$[C \ M \ Y \ K] = [1 \ L \ a \ b \ La \ Lb \ ab \ L^2 \ a^2 \ b^2 \ Lab \ L^2a \ L^2b \ a^2b \ La^2 \ Lb^2 \ ab^2 \ L^3 \ a^3 \ b^3] \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{20,1} & \cdots & a_{20,4} \end{bmatrix} \quad (\text{XXIII})$$

Preko izračunatih koeficijenata matrice i vektora vrijednosti CIE prostora boja izračunati su vektori vrijednosti prostora boja uređaja.

Izrada modela s radijalnim baznim funkcijama

Za izradu modela korištene su dvije radijalne bazne funkcije:

a) Gaussova funkcija

$$\Phi(r) = e^{-r^2} \quad ; \quad (\text{XXIV})$$

b) poliharmonijska spline funkcija

$$\Phi(r) = r^k \ln(r), \text{ pri čemu je uzeto da je } k=4.$$

6.2. REZULTATI I RASPRAVA

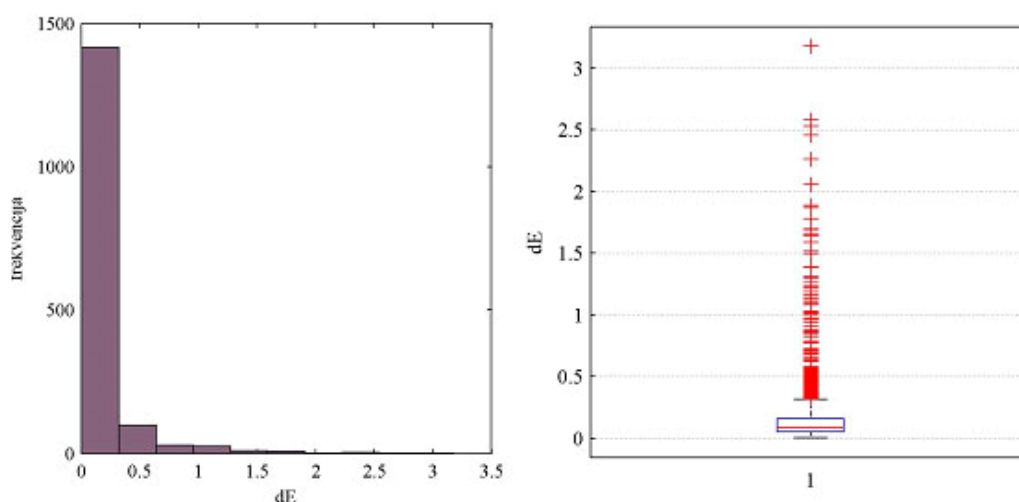
Evaluacija točnosti ICC profila

U tablici 1. prikazani su rezultati numeričke evaluacije odstupanja nastalih „kružnim“ transformacijama unutar ICC profila ISO coated V2.

Tablica 1. Numerička evaluacija točnosti ICC profila

	Min. ΔE	Medijan ΔE	Arit. sredina ΔE	Maks. ΔE
Kružne transformacije	0.0042	0.0846	0.1667	3.1781

Prilikom transformacije boja iz prostora boja ovisnog o uređaju u prostor boja neovisan o uređaju i obratno, u ovom slučaju transformacije CMYK vrijednosti u $L^* a^* b^*$ vrijednosti i obratno unutar samog profila, iz priložene tablice vidi se da profil nije apsolutno točan već radi određene greške. Maksimalno ΔE odstupanje iznosi 3.1781 te će se ono uzeti u obzir kod evaluacije ostalih modela. Na slici 15. prikazani su histogram i kutijasti dijagram razdiobe ΔE odstupanja. Iz njih je vidljivo da većina odstupanja ima niske vrijednosti, no one su značajne jer se radi o odstupanjima do kojih dolazi transformacijama unutar profila koji bi trebao biti čim točniji



Slika 15. Razdioba ΔE odstupanja kod evaluacije točnosti ICC profila

Evaluacija točnosti interpolacijskog modela

U tablici 2. su prikazni rezultati numeričke evaluacije točnosti interpolacijskog modela.

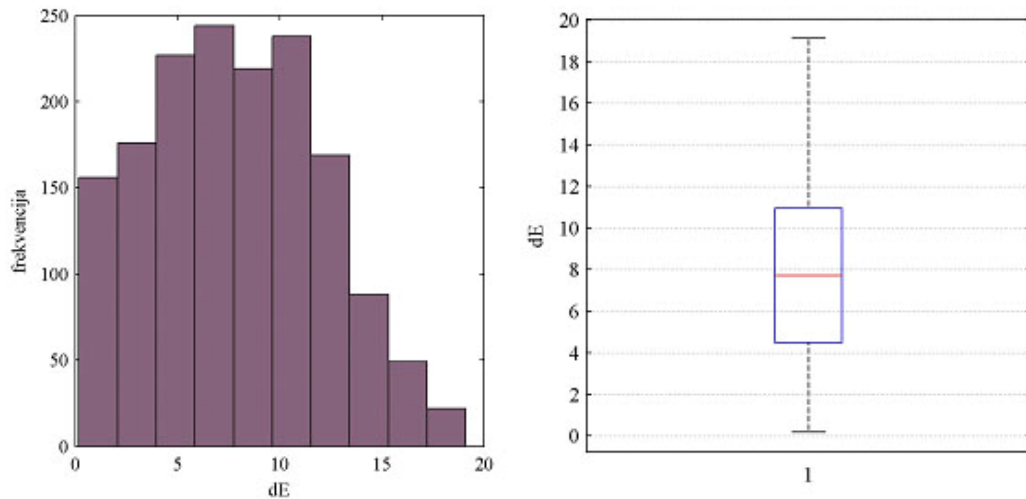
Tablica 2. Numerička evaluacija točnosti interpolacijskog modela

Veličina tablice	Min. ΔE	Medijan ΔE	Arit. sredina ΔE	Maks. ΔE
LUT 5	0.1890	7.7107	7.8460	19.226
LUT 10	0.0289	1.9243	2.4955	9.7353
LUT 15	0.0100	0.8361	1.3916	6.3280
LUT 20	0.0121	0.4095	0.9731	5.1666
LUT 25	0.0080	0.2755	0.7410	5.0746
LUT 30	0.0046	0.2182	0.6099	5.1970

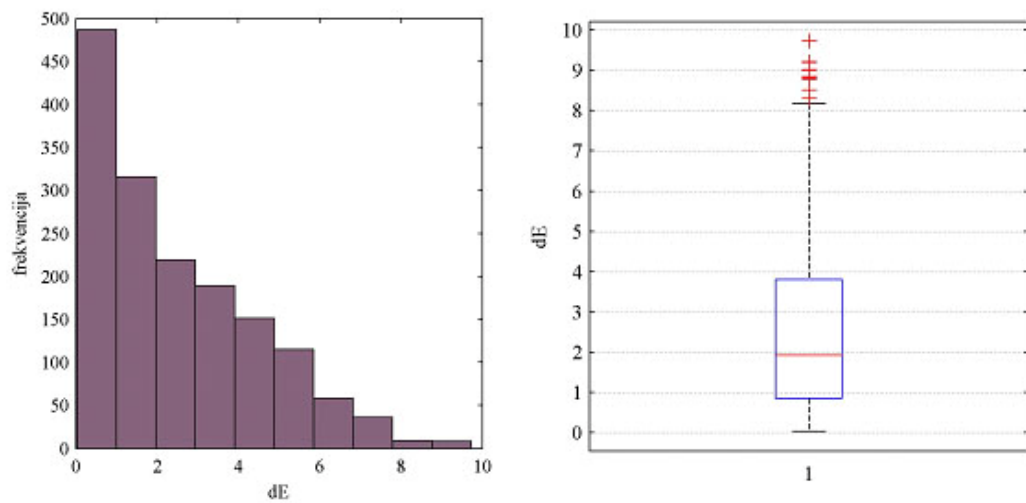
Iz tablice 2. je vidljivo da se za skup podataka od 1588 vrijednosti s povećanjem broja točaka po osi tablice smanjuju vrijednosti minimalnog odstupanja, medijana te aritmetičke sredine. Naglo smanjenje vrijednosti ΔE odstupanja vidi se između interpolacijske tablice s 5 točaka i interpolacijske tablice s 10 točaka. Kod interpolacijske tablice s 30 točaka maksimalno ΔE odstupanje je veće nego kod interpolacijskih tablica s 20 i 25 točaka. Razlog je vjerojatno taj što je točka koju interpoliramo kod tablice s 30 točaka po osi udaljenija od vrha kocke nego što je u interpolacijskim tablicama s manjim brojem točaka.

Na slikama 16. – 21. prikazani su histogrami razdiobe ΔE odstupanja. Iz njih je jasno vidljivo kako se s povećanjem broja točaka smanjuje ΔE odstupanje što je vidljivo po povećanju frekvencije ΔE odstupanja u prvim razredima te smanjenju maksimalnog odstupanja.

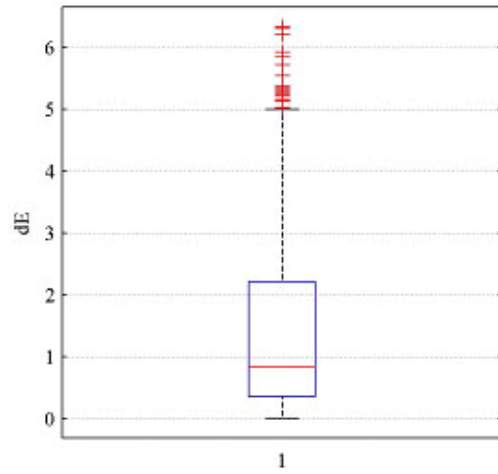
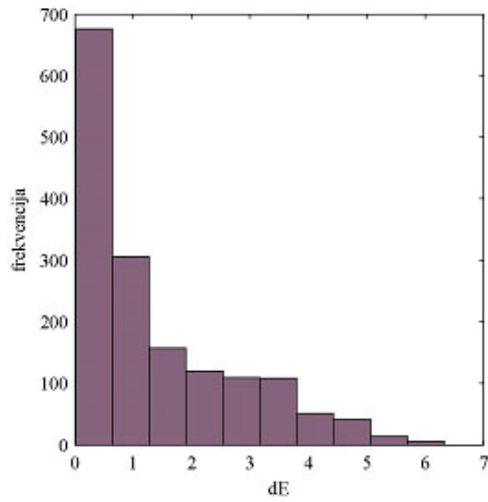
Odnos minimuma, donjeg kvartila, medijana, gornjeg kvartila i maksimuma prikazan je kutijastim dijagramom na slikama 16. – 21. Vidljivo je da se interkvartilni raspon i medijan smanjuju s povećanjem broja točaka. Veća odstupanja na kutijastom dijagramu su prikazana kao netipične vrijednosti jer je većina odstupanja mala.



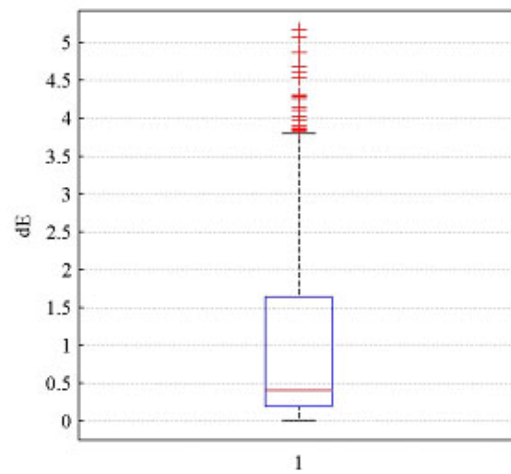
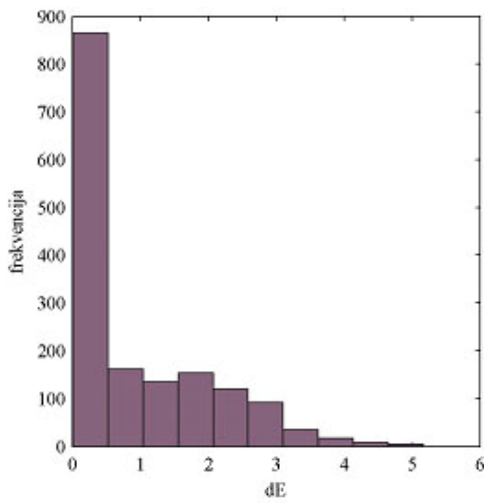
Slika 16. Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablica s 5 točaka



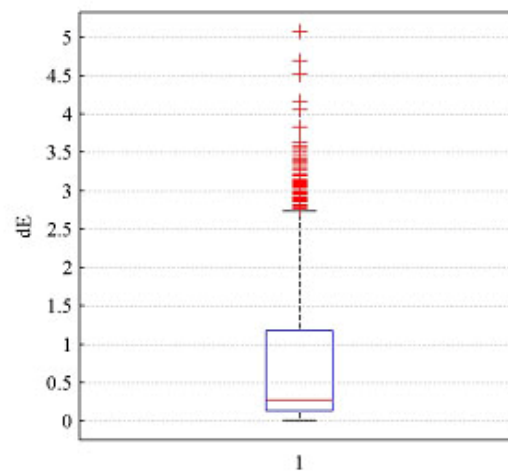
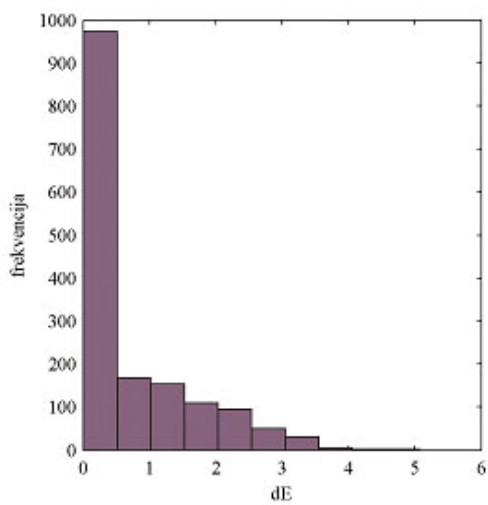
Slika 17 Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablice s 10 točaka



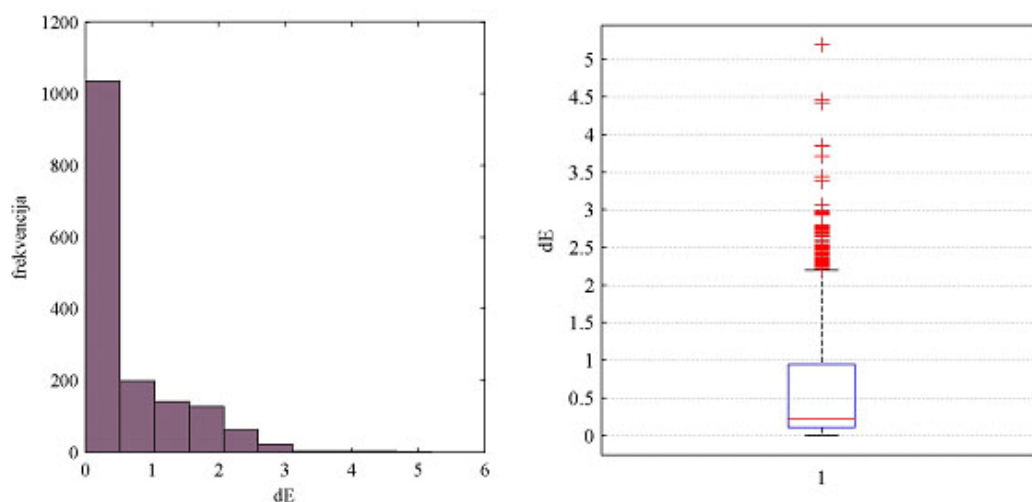
Slika 18. Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablice s 15 točkaka



Slika 19. Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablice s 20 točkaka



Slika 20. Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablice s 25 točkaka



Slika 21. Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablice s 30 točaka

Evaluacija točnosti regresijskog modela

U tablici 3. prikazani su numerički rezultati evaluacije sposobnosti prilagodbe regresijskog modela.

Tablica 3. Numerička evaluacija sposobnosti prilagodbe regresijskog modela

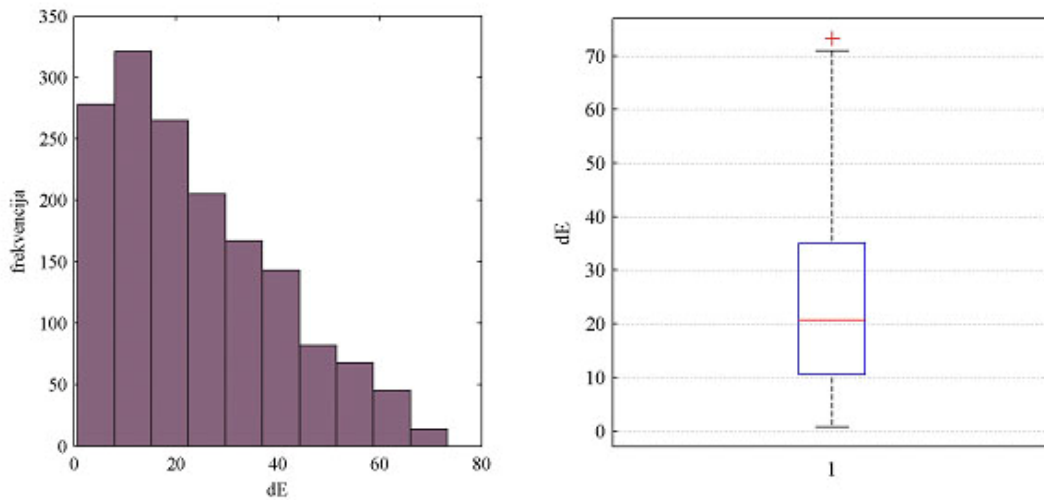
	Min. ΔE	Medijan ΔE	Arit. sredina ΔE	Maks. ΔE
Polinom 1. reda	0.7356	20.6649	23.9976	73.2927
Polinom 2. reda	0.2301	4.3969	5.0509	16.9778
Polinom 3. reda	0	3.0925	3.3493	14.4707

Iz tablice 3. vidljivo je da regresijski model izrađen korištenjem polinoma 1. reda daje izrazito velika ΔE odstupanja. Korištenjem polinoma 2. i 3. reda ΔE odstupanja su puno manja.

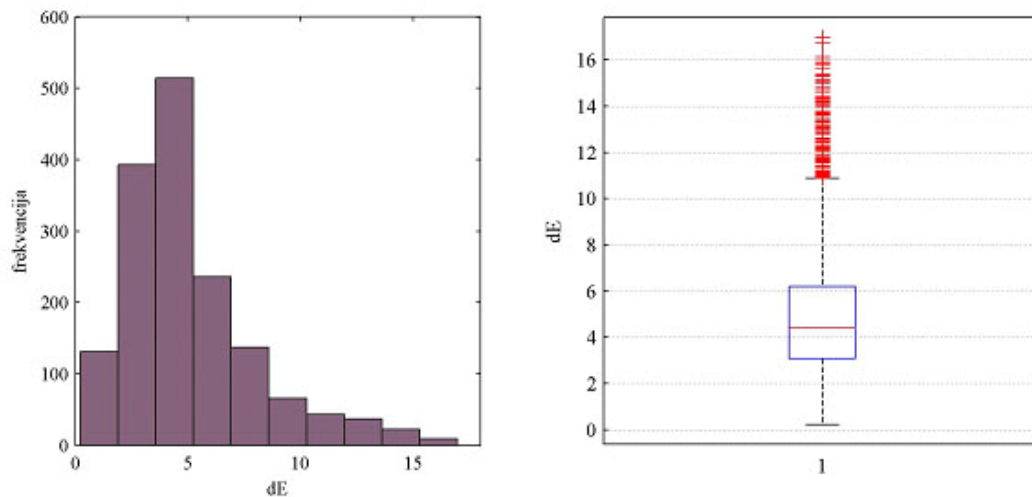
Razdioba ΔE odstupanja prikazana je na slikama 22. – 24. Iz histograma se vidi kako je frekvencija ΔE odstupanja najveća u rasponu vrijednosti 3.34 – 5.02 korištenjem polinoma 2. reda, odnosno 2.89 – 4.34 korištenjem polinoma 3. reda.

Izuzev histograma ΔE odstupanja regresijskog modela izrađenog korištenjem jednadžbe polinoma 1. reda, mali broj točaka t poprima najmanje iznose ΔE odstupanja.

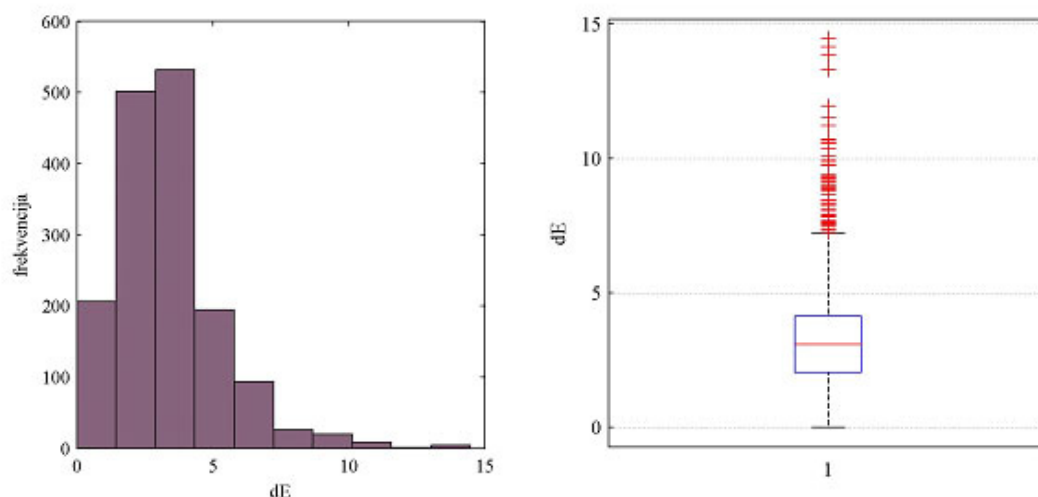
Kutijasti dijagrami prikazuju smanjenje interkvartilnog raspona i medijana s povećanjem reda polinoma u jednadžbi. S obzirom na to da je većina odstupanja mala, *veća* odstupanja na kutijastom dijagramu prikazuju se kao netipične vrijednosti.



Slika 22. Razdioba E odstupanja regresijskog modela korištenjem polinoma 1. reda



Slika 23. Razdioba E odstupanja regresijskog modela korištenjem polinoma 2. reda



Slika 24. Razdioba E odstupanja regresijskog modela korištenjem polinoma 3. reda

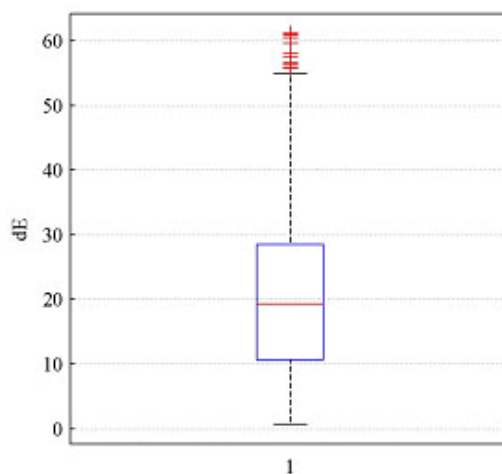
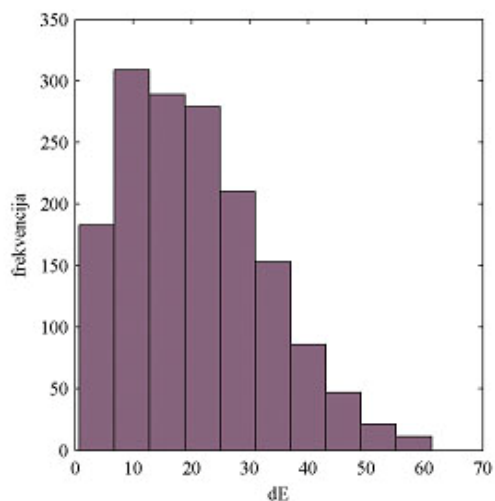
U tablici 4. prikazana je numerička evaluacija točnosti regresijskog modela na nezavisnom skupu podataka.

Tablica 4. Numerička evaluacija točnosti regresijskog modela na nezavisnom skupu podataka

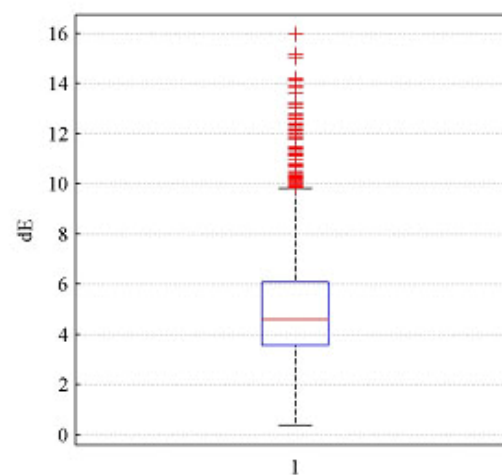
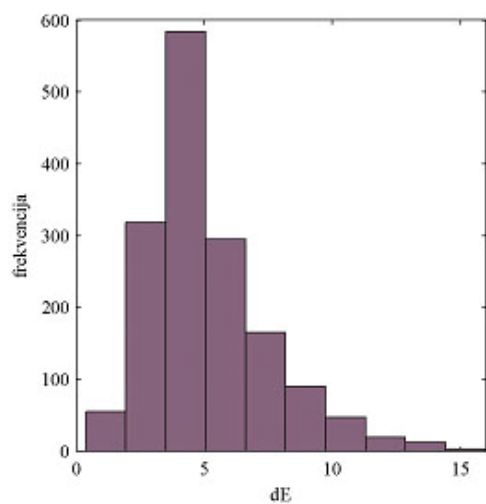
	Min. ΔE	Medijan ΔE	Arit. sredina ΔE	Maks. ΔE
Polinom 1. reda	0.7072	19.3251	20.6879	61.2128
Polinom 2. reda	0.3729	4.5863	5.0800	15.9731
Polinom 3. reda	0.4522	3.5278	3.7708	10.0292

Tablica 4. prikazuje kako se sa povećanjem reda polinoma smanjuje ΔE odstupanje. Kada se usporede tablica 3. i tablica 4. vidi se kako je kod ispitivanja regresijskog modela na nezavisnom skupu podataka maksimalno ΔE odstupanje manje. Razlog vjerojatno leži u tome što je broj točaka na granici gamuta u nezavisnom skupu podataka relativno mali, a regresijski model je najnetočniji kod vrijednosti koje se nalaze na granici gamuta.

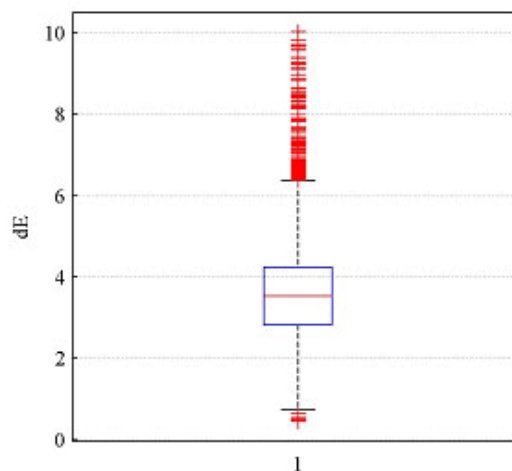
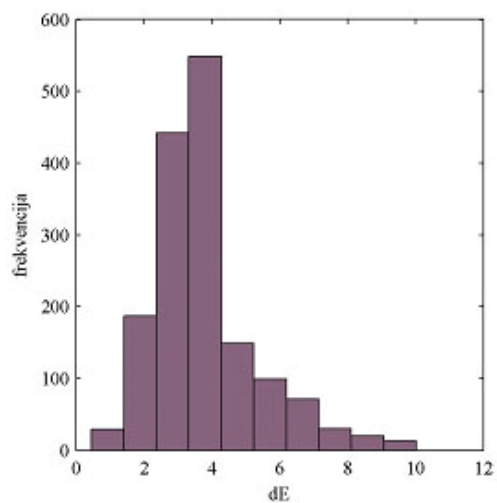
Razdioba ΔE odstupanja regresijskog modela na nezavisnom skupu podataka prikazana je na slikama 25. – 27



Slika 26. Razdioba ΔE odstupanja regresijskog modela na nezavisnom skupu podataka korištenjem polinoma 1. reda



Slika 27. Razdioba ΔE odstupanja regresijskog modela na nezavisnom skupu podataka korištenjem polinoma 2. reda



Slika 25. Razdioba ΔE odstupanja regresijskog modela na nezavisnom skupu podataka korištenjem polinoma 3. reda

Evaluacija točnosti modela s radijalnim baznim funkcijama

U tablici 5. prikazani su rezultati numeričke evaluacije točnosti modela s radijalnim baznim funkcijama.

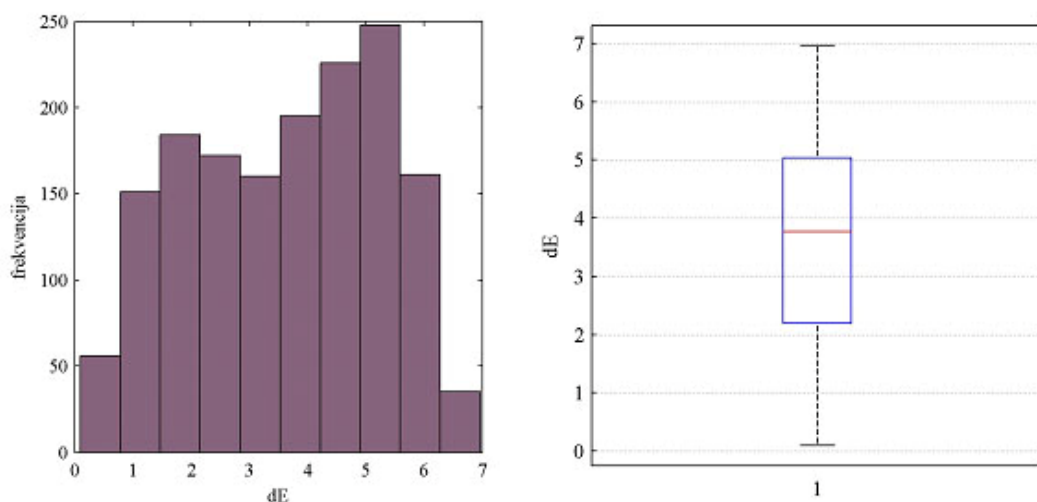
Tablica 5. Numerička evaluacija točnosti modela s radijalnim baznim funkcijama

	Min. ΔE	Medijan ΔE	Arit. sredina ΔE	Maks. ΔE
Gaussova funk..	0.0973	3.7667	3.6196	6.9676
Polihar. spline	0.1097	5.3915	3.7114	48.2070

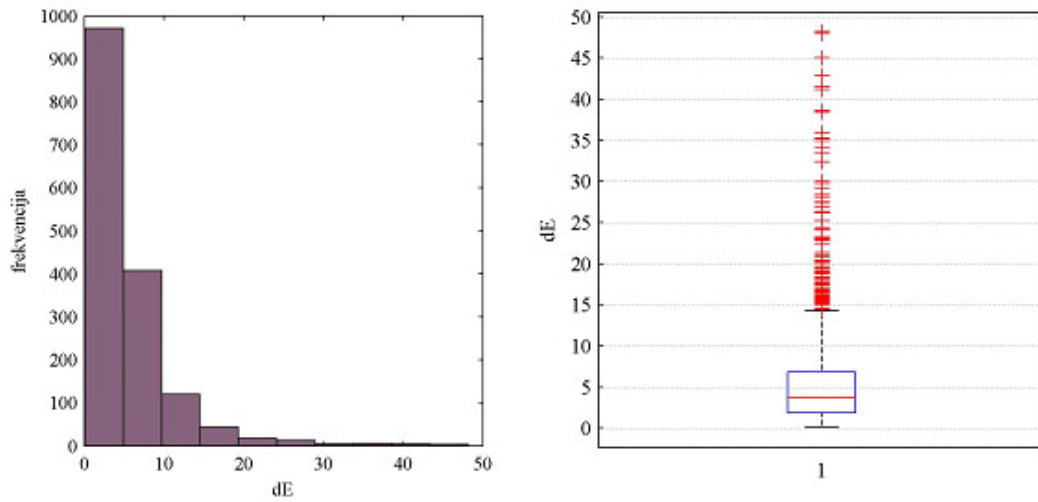
Iz tablice 5. vidi se da je model kod kojeg je primijenjena Gaussova funkcija točniji. Poliharmonijska spline funkcija dala je jako veliko maksimalno ΔE odstupanje.

Histogram odstupanja modela s Gaussovom funkcijom od podataka prikazan je na slici 28. i vidljivo je kako je razdioba ΔE odstupanja približno uniformna u cijelom rasponu histograma te je najmanje ΔE odstupanja oko minimalnih i maksimalnih vrijednosti.

Kod histograma ΔE odstupanja modela poliharmonijskog splajna, slika 29., vidljivo je kako se većina ΔE odstupanja kreće u rasponu od 0,1097 – 9,619. Zbog toga je na kutijastom dijagramu interkvartilni raspon malen zbog čega su točke s većim iznosom odstupanja prikazane netipičnim.



Slika 28. Razdioba ΔE odstupanja RBF modela izrađenog korištenjem Gaussove funkcije



Slika 29. Razdioba ΔE odstupanja RBF modela izrađenog korištenjem poliharmonijske spline funkcije

7. ZAKLJUČAK

Cilj istraživanja bio je usporediti točnosti različitih karakterizacijskih modela i utvrditi koja metoda daje najbolje rezultate na podacima iz jednog procesa.

Postavljena hipoteza na početku istraživanja bila je da će splajn metoda biti najtočnija ako su nekontrolirani faktori, kao greške mjerenja i varijabilnost procesa, dovoljno maleni.

U radu su korišteni standardni „FOGRA39L“ karakterizacijski podaci. Korištenjem tih podataka izrađene su 3 vrste modela: interpolacijski, regresijski te modeli s radijalnim baznim funkcijama.

Iz rezultata istraživanja vidljivo je kako se model s poliharmonijskom spline funkcijom pokazao najnetočnijim, tj. dao je najveća odstupanja. Najbolje rezultate dao je interpolacijski model s 30 točaka po osi transformacijske tablice. Model s Gaussovom funkcijom je drugi najtočniji model. Regresijska metoda dala je osrednje rezultate.

Maksimalna ΔE odstupanja poprimaju velike vrijednosti za sve izrađene regresijske modele, odnosno vrijednosti im se ne spuštaju ispod 10. Kod interpolacijskih modela maksimalna ΔE odstupanja su relativno niska. Izuzev interpolacijske tablice gdje je korišteno 5 točaka osi transformacijske tablice, vrijednosti maksimalnog ΔE odstupanja kreću se od 9,73 – 5,19. RBF model koji je izrađen korištenjem Gaussove funkcije ima maksimalno ΔE odstupanje ispod vrijednosti 10, dok je RBF model izrađen korištenjem poliharmonijskog spline-a dao velike vrijednost maksimalnog ΔE odstupanja

Što se tiče mjera centralne tendencije, najmanje vrijednosti opet pokazuju interpolacijski modeli. Vrijednosti mjera centralne tendencije padaju s povećanjem broja korištenih točaka osi transformacijske tablice na vrijednosti ispod 1 što znači da se većina ΔE odstupanja približavaju 0. Kod regresijskih modela mjere centralne tendencije naglo padaju s povećanjem reda polinoma, no ne padaju ispod vrijednosti 3. Kod RBF modela izrađenog korištenjem poliharmonijske spline funkcije, mjere centralne tendencije su 5,39 za medijan i 3,71 za aritmetičku sredinu što govori da je većina ΔE odstupanja niska, unatoč visokoj vrijednosti maksimalnog odstupanja. Kod

RBF modela izrađenog korištenjem Gaussove funkcije, mjere centralne tendencije imaju dosta visoke vrijedosti u odnosu na maksimalno ΔE odstupanje ovog modela. Razlog tome je što su sva ΔE odstupanja ravnomjerno raspoređena unutar raspona ΔE odstupanja ovog modela.

Rezultati istraživanja doveli su do zaključka kako su se najtočnijom metodom pokazale interpolacijske tablice s 10 i više točaka po osi transformacijske tablice, a nakon njih radijalne bazne funkcije s Gausovim baznim funkcijama. No, kako je za izradu transformacijskih tablica iz CMYK prostora boja u $L^*a^*b^*$ prostor boja s 10 točaka po osi potrebno 10^4 točaka, dok su regresijski modeli i modeli s radijalnim baznim funkcijama izrađeni sa samo 1588 jedinstvenih točaka ISO 12642-2 karte, točnost regresijskih modela i modela s radijalnim baznim funkcijama je relativno visoka s obzirom na broj podataka.

8. LITERATURA

1. Kumar Ganesh(2012), *Profile connection space (PCS) – Part 2 off ICC profile series*, dostupno na:
<http://printcolormanagement.wordpress.com/2012/09/24/profile-connection-space-pcs-part-2-of-icc-profile-series/>, datum pristupa: 03.06.2015.
2. Maja Strgar Kurečić (2008.), *Uloga sustava za upravljanje bojom*, dostupno na:
repro.grf.unizg.hr/media/download_gallery/Color%20Management.pdf, datum pristupa: 03.06.2015.
3. Adobe(2001.), *Color Managment System*, dostupno na:
http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe_tg/manage/devprofile.html, datum pristupa: 31.05.2015.
4. International Color Consortium (2001.), *Introduction to the ICC profile format*, dostupno na: <http://www.color.org/iccprofile.xalter>, datum pristupa: 30.05.2015.
5. Apple Computer (2005.), *Color Management Overview*, dostupno na:
<https://developer.apple.com/library/mac/documentation/GraphicsImaging/Conceptual/csintro/csintro.pdf>, datum pristupa: 20.05.2015.
6. Zjakić I. (2002.), *Upravljanje kvalitetom offsetnog tiska*, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb
7. FOTomag (2010.), *Color Management*, dostupno na:
http://fotomag.net/?page_id=112, datum pristupa: 10.06.2015.
8. Pećanec D. (2012.), *Reprodukcija gamuta u tehnikama digitalnog tiska*, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, dostupno na:
http://eprints.grf.unizg.hr/1843/1/DB76_Pećanec_Darko.pdf, datum pristupa: 03.06.2015.
9. Lukac R., Plataniotis N. K. (2006.), *Color Image Proccesing: Methods and Applications*, CRC Press, New York, USA, dostupno na:
<https://www.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=oD8qBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=L+Color+Image+Processing:+Methods+and+Applications&ots=05QOdOPDcF&sig=QZyz2bgB2JX71EHgfmRVgNU->

- D_Y&redir_esc=y#v=onpage&q=L%20Color%20Image%20Processing%3A%20Methods%20and%20Applications&f=false, datum pristupa: 15.06.2015.
10. Bala R., Sharma G., (2002). *Digital Color Imaging Handbook*, CRC Press, New York, USA
 11. Green P, Macdonald L.,(2002.), *Colour Engineering: Achieving Device Independent Color*, John Wiley&Sons, West Sussex, England
 12. Džimbeg – Malčić V., (2005.), *Primjena Kubelka-Munk teorije i Yule-Nielsenovog efekta na tiskovnim podloga*, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, dostupno na:
<http://eprints.grf.unizg.hr/1411/1/Doktorski%20rad%20Dzimbeg%20Malcic%20Vesna.pdf>, datum pristupa: 10.06. 2015.
 13. R. Kang H. (2006), *Computational Color Technology*, SPIE Press, Washington, USA
 14. JISC Digital Media, *Colour Management for Digitisation Projects*, dostupno na:
<http://www.jiscdigitalmedia.ac.uk/infokit/colour-management/traditional-colour-management>, datum pristupa: 15.06.2015.
 15. Imulus LLC, *Additive color vs. subtractive color*, dostupno na:
<http://blog.imulus.com/kat-menze/additive-color-vs-subtractive-color>, datum pristupa: 15.06.2015.
 16. Andy Williams, (2002.), *Graybalance: A key element in color reproduction*, dostupno na:http://www.newsandtecharchives.com/issues/2002/02-02/ifra/02-02_greybalance.htm, datum pristupa: 18.06.2015.
 17. Donevski D.,(2010.), *Optimizacija modela izlaznih uređaja u grafičkoj reprodukciji*, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, dostupno na:<http://eprints.grf.unizg.hr/1431/1/Doktorski%20rad%20Donevski%20Davor.pdf>
 18. Topuzović S., (2011.), *Neuronske mreže za predviđanje cijena nekretnina*, diplomski rad, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Odjel za matematiku, dostupno na: <http://informatika.efos.hr/wp-content/uploads/2011/07/Diplomski-rad---Topuzovic-Sanja-Neuronske-mreze-za-predvidanje-cijena-nekretnina.pdf>, datum pristupa: 21.06.2015.

19. Donevski D., (2015.), Modeliranje procesa radijalnim baznim funkcijama, predavanje, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet
20. Ban D., (2012.), *Analitičko opisivanje brodske geometrije globalnom interpolacijom radijalnim osnovnim funkcijama*, doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, dostupno na:
http://www.riteh.uniri.hr/media/filer_public/c6/d2/c6d26be7-1c58-4340-b1a3-72aaa95ef674/dario_ban_analiticko_opisivanje_brodske_geometrije_globalnom_interpolacijom_radijalnim_osnovnim_funkcijama.pdf, datum pristupa: 21.06.2015.
21. R. Kang H. (1997.), *Color technology for electronic imaging devices*, SPIE Press, Washington, USA, dostupno na:
https://books.google.hr/books?id=vzQH3qA_RKkC&printsec=frontcover&dq=kang+color&hl=hr&sa=X&ei=jNSQVcTcEIbg7Ab444OgBw&ved=0CBsQ6AEwAA#v=onepage&q=kang%20color&f=false, datum pristupa 15.06.2015.

9. POPIS SLIKA

Slika 1. Osnovni način funkcioniranja sustava za upravljanje bojom [15]	2
Slika 2. Aditivni (RGB) i supraktivni (CMYK) načini mješanja boja [16].....	3
Slika 3. CIE Lab prostor boja [17].....	4
Slika 4. Struktura ICC profila [18]	6
Slika 5. Gamut boja ljudskog oka [15]	8
Slika 6. Perceptivno renderiranje [15]	9
Slika 7. Saturacijsko renderiranje [15]	10
Slika 8. Apolutno i relativno kolorimetrijsko renderiranje [15].....	11
Slika 9. Prikaz pretvorbe boja: [2].....	12
Slika 10. Shematski prikaz metode regresije [14]	21
Slika 11. Trodimezionalno pakiranje [14]	23
Slika 12. Bilinearna interpolacija [14].....	23
Slika 13. Trilinearna interpolacija [22].....	24
Slika 14. Neuronska mreža [22]	26
Slika 15. Razdioba ΔE odstupanja kod evaluacije točnosti ICC profila.....	32
Slika 16. Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablice s 5 točaka.....	34
Slika 17 Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablice s 10 točaka.....	34
Slika 18. Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablice s 15 točaka.....	35
Slika 19. Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablice s 20 točaka.....	35
Slika 20. Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablice s 25 točaka.....	35
Slika 21. Razdioba ΔE odstupanja interpolacijske tablice s 30 točaka.....	36
Slika 22. Razdioba E odstupanja regresijskog modela korištenjem polinoma 1. reda ...	37
Slika 23. Razdioba E odstupanja regresijskog modela korištenjem polinoma 2. reda ...	37
Slika 24. azdioba E odstupanja regresijskog modela korištenjem polinoma 3. reda.....	38
Slika 27. Razdioba ΔE odstupanja regresijskog modela na nezavisnom skupu podataka korištenjem polinoma 2. reda.....	39
Slika 25. Razdioba ΔE odstupanja regresijskog modela na nezavisnom skupu podataka korištenjem polinoma 3. reda.....	39
Slika 26. Razdioba ΔE odstupanja regresijskog modela na nezavisnom skupu podataka korištenjem polinoma 1. reda.....	39

Slika 28. Razdioba ΔE odstupanja RBF modela izrađenog korištenjem Gaussove funkcije	40
Slika 29. Razdioba ΔE odstupanja RBF modela izrađenog korištenjem poliharmonijske spline funkcije.....	41

10. POPIS TABLICA

Tablica 1. Numerička evaluacija točnosti ICC profila	32
Tablica 2. Numerička evaluacija točnosti interpolacijskog modela	33
Tablica 3. Numerička evaluacija sposobnosti prilagodbe regresijskog modela	36
Tablica 4. Numerička evaluacija točnosti regresijskog modela na nezavisnom skupu podataka	38
Tablica 5. Numerička evaluacija točnosti modela s radijalnim baznim funkcijama	40