



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централa: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndean@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАџМЕНТА
СЕРТИФИКОВАН ОД:



Branislav Batinić

**RAZVOJ REFLEKSIONE
OPTOELEKTRONSKE METODE ZA
ODREĐIVANJE KOLORIMETRIJSKIH
VREDNOSTI BOJE ŠTAMPANIH
UZORAKA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2022.

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Бранислав Батинић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција):	др Јован Бајић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду.
Наслов рада:	Развој рефлексивне оптоелектронске методе за одређивање колориметријских вредности боје штампаних узорака
Језик публикације (писмо):	Српски (латиница)
Физички опис рада:	Унети број: Страница <u>149</u> Поглавља <u>11</u> Референци <u>140</u> Табела <u>27</u> Слика <u>130</u> Графикона <u>74</u> Прилога <u>0</u>
Научна област:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Електроника, оптоелектроника
Кључне речи / предметна одредница:	Оптоелектронски сензорски систем, рефлексивна мерна метода, спектрална расподела, колориметријска сонда, полимерна оптичка влакна, ЛЕД извори.
Резиме на језику рада:	У оквиру ове докторске дисертације је развијена рефлексивна оптоелектронска метода за одређивање колориметријских вредности боје штампаних узорака. Предложена метода базирана је на естимацији рефлектованог спектра електромагнетног зрачења у видљивом опсегу таласних дужина. На бази методе дизајниран је сензорски систем који се састоји од светлосних ЛЕД извора на предајној и широкопојасног силицијумског фотодетектора на пријемној страни. Резолуција А/Д конвертора при мерењу интензитета рефлектованих сигнала одређена је са 12 бита, док је покривеност спектра ЛЕД изворима ограничена на 6 тачака, између којих се врши интерполација. Поновљивост система је $\pm 0.27\%$. Разлике у боји ΔE_{00} које представљају грешку мерења, рачунате су у односу на референтну спектрофотометријску методу и налазе се унутар граница толеранције (0-5) за све тестиране узорке. У тези је такође дата и корекциона метода базирана на машинском учењу, која је знатно редуковала ову грешку ΔE_{00} на вредност 3.
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	28. децембар, 2017.
Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: др Владимир Рајс, ванредни професор Члан: др Сандра Дедијер, ванредни професор Члан: др Милан Ковачевић, редовни професор Члан: др Миодраг Бркић, доцент
Напомена:	

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истовестности штампане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штампаном и електронском облику и не кориче се са тезом.

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Branislav Batinić
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Jovan Bajić, Ph.D., associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Thesis title:	Development of a reflective optoelectronic method for determining the colorimetric values of the color of printed samples
Language of text (script):	Serbian language (latin script)
Physical description:	Number of: Pages <u>149</u> Chapters <u>11</u> References <u>140</u> Tables <u>27</u> Illustrations <u>130</u> Graphs <u>74</u> Appendices <u>0</u>
Scientific field:	Electrical and Computer Engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Electronics, Optoelectronics
Subject, Key words:	Optoelectronic sensor system, reflection measurement method, spectral distribution, colorimetric probe, polymer optical fibers, LED sources
Abstract in English language:	As part of this doctoral thesis a reflection-based optoelectronic method for determining colorimetric values of the color of printed samples was developed. The proposed method is based on the estimation of the reflected spectrum of electromagnetic radiation in the visible spectrum (of wavelengths). On the basis of this method a sensing system was designed, consisting of LED sources on the emitting side and a wide range silicon photodetector on the receiving side. Resolution of the spectral sensitivity of the sensing system is defined with 11 bits, while the coverage of the spectrum by the LED sources is limited to 6 points, between which interpolation was performed. The repeatability of the system is $\pm 27\%$. Differences in color ΔE_{00} , which represent the measurement error, were calculated with the respect to the referent spectrophotometric method and are within the boundary of tolerance (0-5) for all tested samples. Furthermore in the thesis a corrective method, based on ANN, was presented, which significantly reduced the error to 3.
Accepted on Scientific Board on:	December 28 th , 2017.
Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	President: Vladimir Rajs, Ph.D., associate professor Member: Sandra Dedijer, Ph.D., associate professor Member: Milan Kovačević, Ph.D., full professor Member: Miodrag Brkić, Ph.D., assistant professor
Note:	

² The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

SAŽETAK

U okviru ove doktorske disertacije najpre je izložen presek stanja u oblasti postojećih metoda za određivanje boje, a zatim je predložena nova metoda za određivanje kolorimetrijskih vrednosti boje štampanih uzoraka. Predložena metoda bazirana je na estimaciji reflektovanog spektra elektromagnetnog zračenja u vidljivom opsegu.

Za potrebe eksperimentalne postavke nad čijim rezultatima je metoda testirana, realizovan je uređaj koji omogućava prikupljanje difuzno reflektovane svetlosti nad merenim uzorcima. Hardverska implementacija uređaja može se grubo podeliti u tri bloka, i to predajni, prijemni i upravljački blok. U sklopu predajnog bloka nalaze se svetlosni LED izvori, a kodovanje predajnih signala je izvršeno kombinacijom vremenskog i frekvencijskog multipleksiranja u upravljačkom bloku. U prijemnom bloku nalazi se konvertor svetlosti u napon koji se sastoji od integrisanog širokopojasnog fotodetektora i transimpedansnog pojačavača. Ovako predstavljen naponski signal vodi se na pojačavački stepen, ali i na filter propusnik opsega, čija je uloga da eliminiše kako neželjenu DC komponentu, tako i neželjenu visokofrekventnu komponentu. Dekodovanje prijemnog signala (prikupljene difuzno reflektovane svetlosti koja je zatim konvertovana u električni napon i pojačana) vrši se uz pomoć mikrokontrolera, u okviru upravljačkog bloka, pomoću digitalnih IIR filtara. Takođe, u svrhu povećanja stabilnosti sistema implementiran je i Kalmanov filter, a dobijene diskretne vrednosti reflektovanih intenziteta predstavljaju izlazne parametre realizovanog uređaja. Nad dobijenim parametrima vršene su estimacije radi rekonstrukcije nepoznatih delova spektra, najpre u okviru originalno osmišljene, a potom i u okviru korekzione metode, kao što je izloženo u disertaciji.

Ponovljivost uređaja ispitana nad deset uzastopnih merenja istog uzorka iznosi $\pm 0.27\%$.

Prvobitna, originalno osmišljena metoda sastoji se u estimaciji nepoznatih delova spektra primenom Cubic-Hermite Spline interpolatora nad diskretnim reflektovanim intenzitetima. Ova metoda, iako je dala sasvim zadovoljavajuće rezultate sa greškom ΔE_{00} koja se kreće u opsegu 0-5 za sve testirane uzorke, ipak je pokazala neke nedostatke. Prvi i glavni nedostatak uočen je prilikom merenja reflektovanih intenziteta nad tamnim uzorcima, gde male promene/fluktuacije u intenzitetima LED izvora mogu da prouzrokuju značajna odstupanja u estimiranim spektrima. Drugi nedostatak ove metode ogleđa se u odstupanju reflektovanih intenziteta na talasnim dužinama ~ 400 nm, koje nastaje kao posledica korišćenja Silicijumskog fotodetektora.

U svrhu prevazilaženja pomenutih nedostataka, a u skladu sa sve većom zastupljenosti mašinskog učenja u sensorici, predložena je dodatna korekcija dobijenih rezultata na bazi neuronske mreže. Za ulazne parametre, kao i u prethodnom slučaju, korišćeno je šest izmerenih vrednosti na poznatim talasnim dužinama koje se dobijaju kao rezultat merenja pomoću realizovanog uređaja. Međutim, karta boja je sada pažljivo podeljena u dva seta, gde je prvi set iskorišćen za treniranje mreže, dok drugi set obuhvata uzorke koji su iskorišćeni za testiranje rezultata predloženog algoritma. Kao izlazni parametar neuronske mreže generisano je trideset i šest tačaka koje nad opsegom talasnih dužina 380 - 730 nm opisuju estimirani spektar rezolucijom od 10 nm, što odgovara rezoluciji komercijalnog spektrofotometra. Nakon korekzione metode maksimalna greška ΔE_{00} je redukovana na vrednost 3.

U eksperimentalnoj postavci ovog doktorata korišćena je karta boja EC12002 (*VisualLayoutCMYK1485*). Na ovoj karti se nalazi ukupno 1485 uzoraka boja koji su raspoređeni u 33 reda sa po 45 kolona. Veličina svakog uzorka je 9x9 mm bez granica između susednih uzoraka. Štampanje uzoraka je izvedeno na kalibrisanoj digitalnoj štamparskoj mašini Xerox Versant 80 Press (elektrofotografija) na belom mat i sjajnom papiru sa premazima prema ISO Fogra Coated 39 profile. Merenje difuzne komponente uz eliminaciju tačkaste refleksije omogućeno je pomoću kolorimetrijske sonde koja ima implementiranu geometriju $0^\circ/45^\circ$, čiji dizajn je detaljno opisan u disertaciji.

Referentna spektralna merenja sa kojima su upoređivani rezultati predložene metode su izvedena pomoću kalibrisanog spektrofotometra XRite i1 Publish Pro 2 sa geometrijom merenja $45^\circ/0^\circ$, u ručnom režimu, uzorak po uzorak. Uslovi merenja su bili sledeći: standardno osvetljenje D50, standardni posmatač CIE 1931, 2° , režim merenja M1, sa primenjenom crnom podlogom ispod uzoraka. Pre merenja je izvršena ručna kalibracija prema spoljnoj keramičkoj belo referentnoj tački. Spektralni podaci sa referentnog uređaja su obrađeni softverom za merenje i analizu boje BabelColor CT&A.

Ključne reči: Optoelektronski senzorski sistem, refleksiona merna metoda, spektralna raspodela, kolorimetrijska sonda, polimerna optička vlakna, LED izvori.

ABSTRACT

In this doctoral thesis, an overview of existing methods for determining color is firstly given, and then a new method for determining colorimetric values of printed samples is proposed. The proposed measurement method is based on estimation of the reflected electromagnetic spectrum in the visible range.

In order to experimentally verify the proposed method, a device which enables collecting diffusely reflected light from measured color samples is implemented. The hardware implementation of the device can be roughly divided into three blocks, a transmitting block, a receiving block and signal processing block with microcontroller unit. The transmitting block consists of LED sources configured to operate with combination of time and frequency multiplexing. At the receiving side there is a light to voltage converter consisting of integrated broadband photodetector with a transimpedance amplifier. The voltage signal presented in this way is fed to the amplifier, but also to a bandpass filter, which has a role to remove DC component, as well as unwanted high-frequency component. Decoding of received signal (collected diffusely reflected light, which is later converted to voltage and amplified) is done inside microcontroller within control block, by using digital IIR filters. Also, in order to increase system stability, the Kalman filter is implemented, and obtained discrete values of reflected intensities represent output parameters of implemented device. On the obtained parameters the estimates were performed in order to reconstruct unknown parts of the spectrum, first within the originally proposed, and then within the correction method, as presented in the thesis.

The repeatability of measurement using proposed device is tested for ten consecutive measurements of the same sample, and high repeatability of $\pm 0.27\%$ is achieved.

The first, originally proposed method involves estimating unknown parts of the spectrum using a Cubic Hermite Spline interpolator over the intensities of reflected light at specific wavelengths. Although it gave quite satisfactory results with an error ΔE_{00} ranging from 0-5 for all tested samples, this method has shown some drawbacks. The major drawback was observed in the estimation of the reflected spectrum of darker samples, where small variations/fluctuations in the intensity of the LED sources can cause significant deviations in the estimated spectra. The second drawback of this method is the deviation of the reflected intensities at wavelengths ~ 400 nm, which occurs as a consequence of using silicon photodetector.

In order to overcome the aforementioned drawbacks, and in line with the increasing application of machine learning in sensor technology, the additional correction of obtained results based on machine learning is proposed. The input parameters, as in a previous case, consist of six measured values which represent the intensities of reflected light at specific wavelengths, which are obtained as a result of measurement using implemented device. However, the color set is now carefully divided into two groups, where the first group has been used to train the ANN, while the second group comprises color patches that have been used to test the results of the proposed algorithm. The output of the ANN is formed of thirty-six points which are used to predict the shape of the spectral curve in the range of 380-730 nm with a resolution of 10 nm, which corresponds to the resolution of a commercial spectrophotometer. This correction reduced error to value of $3 \Delta E_{00}$.

In the experimental setup described in this thesis, ECI2002 test chart (VisualLayoutCMYK1485) consisting of rectangular arrays with 1485 patches constructed by 33 rows and 45 columns, was used. Each patch size is equal to 9 mm with no borders between the patches. The printing was performed by calibrated digital printing machine Xerox Versant 80 Press (electrophotography) on matte and gloss coated white papers, according to the ISO Fogra Coated 39 profile. The measurement of diffuse reflection with the eliminating specular reflection is enabled by using a colorimetric probe which has an implemented geometry $0^\circ/45^\circ$, and whose design is described in detail in this thesis.

The reference spectral measurements, with which the results obtained using proposed method were compared, were performed using a calibrated XRite i1 Publish Pro 2 spectrophotometer with measurement geometry of $45^\circ/0^\circ$, in manual mode, sample by sample. The measurement conditions were as follows: standard illuminator D50, standard observer CIE 1931, 2° , measurement mode M1, with applied black background below the samples. Before the measurement, manual calibration in relation to the external ceramic white reference point was performed. Spectral data from the reference device were processed by Babel Color CT&A software for measurement and analysis of color.

Key words: Optoelectronic sensor system, reflection measurement method, spectral distribution, colorimetric probe, polymer optical fibers, LED sources.

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
1.1.	PREDMET, PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA	1
1.2.	OGRANIZACIJA DISERTACIJE	2
2.	PRIRODA BOJE (SVETLOSTI), PERCEPCIJA I PERCEPTIVNI ATRIBUTI.....	4
2.1.	DOŽIVLJAJ BOJE U LJUDSKOM OKU	5
2.1.1.	ROŽNJACA	5
2.1.2.	OČNA VODICA I STAKLASTO TELO.....	5
2.1.3.	SOČIVO	5
2.1.4.	ŽUTA MRLJA	6
2.1.5.	MREŽNJACA.....	6
2.1.5.1.	VIZUELNI DETEKTORI U MREŽNJACI.....	6
2.1.6.	SLEPA MRLJA.....	7
2.1.7.	IRIS I ZENICA	7
2.2.	PERCEPCIJA BOJE: PRENOS PRIKUPLJENE INFORMACIJE O SVETLOSTI OD RECEPTORA DO MOZGA.....	8
2.3.	PERCEPTIVNI ATRIBUTI BOJE	9
2.3.1.	SJAJNOST	9
2.3.2.	OSVETLJENOST	9
2.3.3.	SVETLINA.....	9
2.3.4.	ZASIĆENJE	9
2.3.5.	OBOJENOST	10
2.3.6.	TON.....	10
2.3.7.	HROMATIČNOST	10
3.	IZVORI SVETLOSTI I SVETLOSNE INTERAKCIJE	11
3.1.	SPEKTRALNA SNAGA ZRAČENJA I PLANKOV RADIJATOR	11
3.2.	STANDARDNA OSVETLJENJA	12
3.2.1.	CIE A OSVETLJENJE	12
3.2.2.	CIE D OSVETLJENJE.....	12
3.3.	STANDARDNI IZVORI SVETLA.....	12
3.3.1.	IZVOR A.....	12
3.3.2.	LED IZVORI	13
3.3.2.1.	PREDNOSTI LED IZVORA NAD OSTALIM SVETLOSNIH IZVORIMA	14
3.4.	INTERAKCIJA SVETLOSTI SA OBJEKTOM	14
3.4.1.	PRELAMANJE SVETLOSTI.....	15
3.4.2.	ODBIJANJE SVETLOSTI.....	15

3.4.2.1.	TAČKASTO ODBIJANJE	15
3.4.2.2.	DIFUZNO ODBIJANJE	16
3.4.2.3.	ODBIJANJE OD PROIZVOLJNE POVRŠI.....	16
4.	UNIVERZALNI OPIS BOJE, PROSTORI BOJA.....	18
4.1.	FUNKCIJE ODZIVA STANDARDNOG POSMATRAČA	18
4.2.	PROSTORI (MODELI) BOJA.....	19
4.2.1.	CIE XYZ PROSTOR BOJA	19
4.2.1.1.	CIE x,y HROMATSKI DIJAGRAM	20
4.2.2.	RGB, CMY/CMYK PROSTORI BOJA.....	22
4.2.2.1.	LINEARNI I NELINEARNI RGB MODEL	23
4.2.3.	HSI PROSTOR BOJA	23
4.2.4.	CIE LAB PROSTOR BOJA.....	25
4.3.	HROMATSKA ADAPTACIJA.....	25
4.4.	MERENJE RAZLIKE U BOJI.....	25
5.	PREGLED STANDARDNIH METODA ODREĐIVANJA BOJE	29
5.1.	DENZIOMETRI.....	29
5.1.1.	EFEKAT FILTRIRANJA SVETLOSTI KOD DENZIOMETRA	31
5.2.	TRISTIMULUSNI KOLORIMETAR	32
5.3.	SPEKTROFOTOMETAR	34
5.4.	SPEKTORADIOMETAR	34
6.	PREGLED NAUČNIH RADOVA U OBLASTI KOLORIMETRIJSKIH METODA.....	35
6.1.	KOLORIMETRIJSKA I SPEKTROFOTOMETRIJSKA REŠENJA NA BAZI TEČNIH KRISTALA... 35	
6.2.	KOLORIMETRI BAZIRANI NA FOSTRUIJAMA LED SVETLOSNIH IZVORA	38
6.3.	KOLORIMETAR SA INTEGRIRAJUĆOM SFEROM.....	38
6.4.	PRENOSIVI SPEKTROFOTOMETAR	39
6.5.	REŠENJA SA PRIMENJENIM KOMERCIJALNIM SENZORIMA BOJE.....	40
6.6.	TRISTIMULUSNI KOLORIMETAR SA SPECIJALNO DIZAJNIRANIM FOTODETEKTORIMA ... 41	
6.7.	SPEKTROFOTOMETAR NA BAZI VIŠE LED IZVORA.....	43
6.7.1.	KARAKTERIZACIJA PARAMETARA ZASNOVANIH NA TALASNOJ DUŽINI LED IZVORA 45	
6.8.	SPEKTROFOTOMETAR SA 18 EKVIDISTANTNO RASPOREĐENIH LED IZVORA	46
6.9.	METODA MERENJA REFLEKTOVANOG INTENZITETA POMOĆU TROBOJNOG (RGB) LED IZVORA.....	48
6.10.	KALIBRACIONA METODA PRIMENJIVA NA KOMERCIJALNE TRISTIMULUSNE KOLORIMETRE.....	51
7.	UPOREDNA ANALIZA METODA ZA ODREĐIVANJE BOJE PREDLOŽENIH U NAUČNIM RADOVIMA 54	
8.	REFLEKSIONA OPTOELEKTRONSKA METODA RAZVIJENA U OVOJ DISERTACIJI	57

8.1.	OPTIČKI SKLOP	57
8.1.1.	OPTIČKE KARAKTERISTIKE PREDLOŽENE METODE	58
8.1.2.	KOLORIMETRIJSKA SONDA PRILAGOĐENA MERENJU SJAJNIH UZORAKA	59
8.1.3.	OPTIČKA VLAKNA	60
8.1.3.1.	PROSTIRANJE SVETLOSTI UNUTAR OPTIČKOG VLAKNA, TIPOVI VLAKANA	60
8.1.3.2.	INDEKS PRELAMANJA.....	61
8.1.3.3.	MODOVI UNUTAR MULTIMODNOG OPTIČKOG VLAKNA	62
8.1.3.4.	MATERIJALI OD KOJIH SE PRAVE OPTIČKA VLAKNA	62
8.1.3.5.	STAKLENA OPTIČKA VLAKNA	62
8.1.3.6.	POLIMERNA OPTIČKA VLAKNA	62
8.1.3.7.	MULTIMODNO POLIMERNO OPTIČKO VLAKNO OZNAKE: MH4001	63
8.1.3.8.	SLABLJENJE U OPTIČKOM VLAKNU.....	63
8.1.4.	ODABIR LED SVETLOSNIH IZVORA	65
8.1.5.	SPEKTRALNA REFLEKSIJA FOTODETEKTORA TSL14SM	69
8.2.	ELEKTRONSKI SKLOP.....	70
8.2.1.	NAPAJANJE.....	71
8.2.2.	PREDAJNI BLOK.....	72
8.2.2.1.	STRUJNI DRAJVERI ZA UPRAVLJANJE INTENZITETOM LED IZVORA.....	74
8.2.2.2.	MULTIPLEKSIRANJE PREDAJNIH SIGNALA	77
8.2.3.	PRIJEMNI BLOK	79
8.2.3.1.	DEMUTIPLEKSIRANJE SIGNALA	81
8.2.3.2.	OSNOVNI ELEMENTI FILTARA	81
8.2.3.3.	FIR FILTAR.....	83
8.2.3.4.	IIR FILTAR.....	84
8.2.3.5.	REALIZACIJA DIGITALNIH IIR FILTARA	86
8.2.3.6.	POBOLJŠANJE STABILNOSTI SISTEMA	94
8.2.3.7.	KALMANOV FILTAR.....	94
8.2.3.8.	IMPLEMENTIRANJE KALMANOVOG FILTRA U OVOJ DISERTACIJI.....	96
8.2.3.9.	REZULTATI TESTIRANJA VREMENSKE STABILNOSTI ODZIVA SISTEMA PRE I POSLE PRIMENE KALMANOVOG FILTRA	98
8.2.4.	ORGANIZACIJA FIRMVERA MIKROKONTROLERA U UPRAVLJAČKOM BLOKU	99
8.2.4.1.	ALGORITAM RADA MIKROKONTROLERA DSPIC30F4013 (UPRAVLJAČKI PROGRAM)99	
8.2.4.2.	ALGORITAM RADA MIKROKONTROLERA DSPIC33FJ128MC802 (KORISNIČKI INTERFEJS)	101
9.	REZULTATI I DISKUSIJA	104
9.1.	NUMERIČKA APROKSIMACIJA	106
9.1.1.	CUBIC-HERMITE SPLINE INTERPOLATOR.....	107

9.2.	PONOVLJIVOST REALIZOVANOG UREĐAJA	108
9.3.	POREĐENJE REZULTATA PREDLOŽENE I REFERENTNE METODE	109
9.3.1.	PRIKAZ REZULTATA DOBIJENIH MERENJEM NA MAT PAPIRU	110
9.3.1.1.	TESTIRANJE METODE NA UZORCIMA ZASIĆENIH BOJA	112
9.3.1.2.	TESTIRANJE METODE NA UZORCIMA MANJE ZASIĆENIH BOJA	114
9.3.1.3.	TESTIRANJE METODE NA UZORCIMA TAMNIH BOJA.....	118
9.3.1.4.	TESTIRANJE METODE NA SIVOJ SKALI.....	121
9.3.1.5.	VIZUELNO POREĐENJE REZULTATA TESTIRANIH UZORAKA U SRGB MODELU BOJA 122	
9.3.2.	PRIKAZ REZULTATA DOBIJENIH MERENJEM NA SJAJNOM PAPIRU.....	123
9.3.2.1.	KRATAK OPIS KOREKCIONE METODE BAZIRANE NA MAŠINSKOM UČENJU ...	124
9.3.2.2.	SELEKCIJA BOJA ZA TRENING SET I TEST SET.....	124
9.3.2.3.	TESTIRANJE PREDLOŽENE I KOREKCIONE METODE NA SETU PRIMARNIH I SEKUNDARNIH BOJA	125
9.3.2.4.	UTICAJ LJUDSKOG FAKTORA NA GREŠKU MERENJA	127
9.3.2.5.	TESTIRANJE REZULTATA PREDLOŽENE I KOREKCIONE METODE NA SETOVIMA ZASIĆENIH, SVETLIH I TAMNIH UZORAKA.....	128
9.3.2.6.	UPOREDNE TABELE ODSTUPANJA OD REFERENTNE METODE PRE I NAKON KOREKCIONE METODE	136
9.3.2.7.	MAPA GREŠKE SVIH UZORAKA KARTI BOJA ECI2002	137
10.	ZAKLJUČAK I DALJI PRAVCI ISTRAŽIVANJA	139
11.	LITERATURA	141

SPISAK PUBLIKACIJA

Radovi u međunarodnim časopisima

1. **Batinić, B.**, Arbanas, M., Bajic, J., Dedijer, S., Rajs, V., Lakovic, N., & Kulundzic, N. (2021). Using machine learning for improvement of reflected spectrum estimations of colorimetric probe. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1–1. doi:10.1109/tim.2020.3011763.
2. **Batinić, B.**, Bajić, J., Dedijer, S., Kulundžić, N., Joža, A., Laković, N., Rajs, V., (2020). Colorimetric fiber-optic sensor based on reflectance spectrum estimation for determining color of printed samples. *Optical and Quantum Electronics* ISSN: 0306-8919, vol. 52, 1-11, doi: 10.1007/s11082-020-02458-7.
3. Bajić, J. S., Manojlović, L., **Batinić, B.**, Joža, A., Laković, N., & Živanov, M. B. (2018). Monitoring of the laser wavelength in modern fiber-optic communication systems using dual photodetectors. *Optical and Quantum Electronics*, 48(6). doi:10.1007/s11082-016-0606-y.
4. Joža, A. V., Bajić, J. S., Manojlović, L. M., Milosavljević, V. A., **Batinić, B. D.**, Laković, N. M., & Živanov, M. B. (2017). Design considerations and performance analysis of dual photodetector system for reliable laser wavelength and power monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 261, 14–23. doi:10.1016/j.sna.2017.04.042
5. Obrovski, B., Bajić, J., Mihajlović, I., Vojinović Miloradov, M., **Batinić, B.**, & Živanov, M. (2016). Colorimetric fiber optic probe for measurement of chemical parameters in surface water. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 228, 168–173. doi:10.1016/j.snb.2016.01.016.

Saopštenja na međunarodnim konferencijama

1. Rodic, Dragan; Gostimirovic, Marin; Sekulic, Milenko; **Batinic, Branislav**; Lakovic, Nikola (2020). [IEEE 2020 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC) - Novi Sad, Serbia (2020.5.26-2020.5.27)] 2020 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC) - Optimization of EDM process using grey-fuzzy approach. , (), 307–312. doi:10.1109/ZINC50678.2020.9161443
2. Joza, Ana V.; Lakovic, Nikola M.; Korcok, Natasa; Kokotovic, Vesna; **Batinic, Branislav**; Bajic, Jovan S. (2019). [IEEE 2019 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC) - Novi Sad, Serbia (2019.5.29-2019.5.30)] 2019 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC) - Modelling and Characterization of FBG Sensors. , (), 92–97. doi:10.1109/ZINC.2019.8769416.
3. Rodic, Dragan; Gostimirovic, Marin; Lakovic, Nikola; **Batinic, Branislav**; Kulundzic, Nenad (2019). [IEEE 2019 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC) - Novi Sad, Serbia (2019.5.29-2019.5.30)] 2019 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC) - Fuzzy analysis of surface roughness in electrical discharge machining. , (), 118–121. doi:10.1109/ZINC.2019.8769355.
4. **Batinic, Branislav**; Bajic, Jovan; Rajs, Vladimir; Lakovic, Nikola; Kulundzic, Nenad; Rodic, Dragan; Joza, Ana (2019). [IEEE 2019 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC) - Novi Sad, Serbia (2019.5.29-2019.5.30)] 2019 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC) - Implementation and signal processing of colorimetric probe. , (), 58–63. doi:10.1109/ZINC.2019.8769468.

5. Lakovic, Nikola; Brkic, Miodrag; **Batinic, Branislav**; Bajic, Jovan; Rajs, Vladimir; Kulundzic, Nenad (2019). [IEEE 2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH) - East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina (2019.3.20-2019.3.22)] 2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH) - Application of low-cost VL53L0X ToF sensor for robot environment detection. 1–4. doi:10.1109/INFOTEH.2019.8717779.
6. **Batinic, Branislav**; Rodic, Dragan; Lakovic, Nikola; Gostimirovic, Marin; Kulundzic, Nenad (2017). [IEEE 2017 Zooming Innovation in Consumer Electronics International Conference (ZINC) - Novi Sad, Serbia (2017.5.31-2017.6.1)] 2017 Zooming Innovation in Consumer Electronics International Conference (ZINC) - Acquisition of current impulses in electrical discharge machining. , (), 37–40. doi:10.1109/ZINC.2017.7968657.
7. Joza, Ana.; Bajic, Jovan; Lakovic, Nikola; **Batinic, Branislav**; Milosavljevic, Vladimir A.; Mihajlovic, Zivorad; Rajs, Vladimir (2017). [IEEE 2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR) - Belgrade (2017.11.21-2017.11.22)] 2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR) - Simultaneous characterization of bidirectional coupler and semiconductor photodetectors spectral properties. , (), 1–4. doi:10.1109/TELFOR.2017.8249491.
8. Obrovski, B., Bajić, J., Mihajlović, I., Vojinović-Miloradov, M., **Batinić, B.**, Živancev, N., Rajs, V.: Monitoring of orthophosphate in river Danube, The 8th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2017), Novi Sad, Serbia: University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, 8-10 June, 2017, pp. 1-3, ISBN 987-86-7892- 934-2.
9. Obrovski, B., Bajić, J., Mihajlović, I., Vojinović-Miloradov, M., **Batinić, B.**, Živanov, M.: Determination of total chlorine in water bodies by fiber optic sensor, XI Conference of Chemists, Technologists and Environmentalists of Republic of Srpska, Teslić, 18-19 November, 2016, pp. 588-593, ISBN 978-99938-54-67-8
10. Obrovski, B., Mihajlović, I., Bajić, J., Vojinović-Miloradov, M., **Batinić, B.**, Živanov, M.: Innovative fiber optic sensor method for monitoring of surface water quality, XI International Symposium on Recycling Technologies and Sustainable Development, Bor, 2-4 Novembra, 2016, 48-54, ISBN 978-86-6305-051-8.
11. Obrovski, B., Mihajlović, I., Bajić, J., Vojinović-Miloradov, M., Adamović, D., **Batinić, B.**, Živanov, M.: Measurement of free chlorine in swimming pool water by fiber optic sensor, 5. International Conference „Ecology of Urban Area 2016“, Zrenjanin: 30 Septembar, 2016, 133-138, ISBN 978-86-7672-291-4.
12. Obrovski, B., Bajić, J., Vojinović Miloradov, M., Živanov, M., Mihajlović, I., **Batinić, B.**: Implementation of the new possibilities of optical fibre sensor for determination of key physico-chemical parameters of surface water quality, 19, International conference Environmental protection of urban and suburban settlements"– Eco-conference, Ecological Movement of Novi Sad, Novi Sad, Srbija, 23-25 September, 2015, pp. 107-114, ISBN 978-86-83177-49-3.

SPISAK SLIKA

Slika 2-1. Vidljivi spektar zračenja elektromagnetnih talasa [10]	4
Slika 2-2. Poprečni presek ljudskog oka sa prikazanim najvažnijim delovima [14,15]	5
Slika 2-3. Optička gustina sočiva ljudskog oka u funkciji starenja [14,19]	6
Slika 2-4. Spektralna apsorpcija ćelija čepića [26].....	7
Slika 2-5. Uprošćeni i hipotetički dijagram mogućih konekcija između receptora i nervnih vlakana [10]	8
Slika 3-1. Spektralna raspodela snage u zavisnosti od zagrevanja [8]	11
Slika 3-2. Beli LED izvor formiran uz pomoć plavog, zelenog i crvenog LED izvora [10]...	13
Slika 3-3. Bela LED koja se zasniva na kombinaciji plave LED i fosfora [10]	13
Slika 3-4. Prelamanje svetlosnog zraka pri prelasku između sredina sa različitim indeksima prelamanja.....	15
Slika 3-5. Odbijanje svetlosti	16
Slika 3-6. Odbijanje svetlosti na proizvoljnoj površi [135].....	16
Slika 3-7. Komponente odbijanja svetlosti prema modelu predloženom u radu [47,135]	17
Slika 4-1. CIE funkcije $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, definisane za standardnog posmatrača [10]	18
Slika 4-2. CIE funkcije odziva standardnog posmatrača $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ [58]	19
Slika 4-3. Hromatski dijagram na kome su prikazani tipični opsezi boja za RGB monitor i štampač [29].....	21
Slika 4-4. RGB prostor boja predstavljen u dekartovom koordinatnom sistemu (levo) [29], aditivni princip mešanja boja (desno) [61]	22
Slika 4-5. CMY prostor boja [61]	22
Slika 4-6. HSI prostor boja [28].....	24
Slika 4-7. LAB prostor boja [62]	25
Slika 5-1. Klasifikacija instrumenata za određivanje boje prema principu rada	29
Slika 5-2. Princip određivanja optičke gustine	30
Slika 5-3. Princip rada refleksionog denziometra [142]	31
Slika 5-4. Grafički prikaz rezultata dobijenih pomoću denziometra	32
Slika 5-5. Princip rada kolorimetra.....	33
Slika 5-6. Krive spektralne refleksije metamernog para boja [8]	33
Slika 6-1. Kolorimetar na bazi tečnih kristala [87].....	35
Slika 6-2. Ćelija tečnog kristala [87]	36
Slika 6-3. Prenosna funkcija [87].....	36
Slika 6-4. Prenosna funkcija gde je korišćeno 5 ćelija različite debljine vezanih serijski [87]	37
Slika 6-5. Furijeov interferometar [87].....	37
Slika 6-6. Uporedni spektri snimljeni komercijalnim spektrofotometrom i Furijeovim interferometrom [87].....	37
Slika 6-7. SPD ksenonske lampe [93].....	38
Slika 6-8. Merna struktura (levo) i raspored LED svetlosnih izvora (desno) [93]	39
Slika 6-9. Optička šema predloženog spektrofotometra u radu [86]	40
Slika 6-10. Struktura refleksionog optičkog senzora boje TCS230 [95].....	40
Slika 6-11. [102]	42
Slika 6-12. Spektri fotostruja tri organske fotodiode u poređenju sa CIE1931 $z(\lambda)$, $y(\lambda)$ i $x(\lambda)$ CMF funkcijama [102].....	42
Slika 6-13. Spektralna snaga korišćenih LED izvora / spektralni odziv korišćene fotodiode pri osvetljaju belog svetla (ksenonske lampe u kombinaciji sa monohromatorom) [109].....	43
Slika 6-14. Geometrijska postavka $45^\circ/0^\circ$ za merenje reflektovanih intenziteta [109].....	44

Slika 6-15.....	44
Slika 6-16. Refleksiona kriva narandžastog uzorka nakon primene korekcionne metode [109]	45
Slika 6-17. Tipičan spektar svetleće diode sa vršnom talasnom dužinom od 645 nm[110]....	46
Slika 6-18. Izmereni spektri korišćenih LED izvora. Spektri su skalirani u svrhu postizanja jednakih integralnih površina [110].....	47
Slika 6-19. ColorChecker uzorci čiji su podaci dostupni na linku [111].....	47
Slika 6-20. Geometrija prilikom merne postavke u radu [112]	48
Slika 6-21. [112]	49
Slika 6-22. Uporedni rezultati referentne i predložene metode nakon izvršene kalibracije u tri tačke [112].....	50
Slika 8-1. Blok šema optičkog sklopa.....	57
Slika 8-2. Prototip kolorimetrijske sonde za merenje refleksije nad štampanim uzorcima.....	58
Slika 8-3. Geometrijske postavke za merenje refleksije, a) 45°/0°, b)0°/45° [8].....	58
Slika 8-4. Sastavni delovi kolorimetrijske sonde i merna postavka za merenje boje sjajnih uzoraka.....	59
Slika 8-5. Različiti tipovi optičkih vlakana i različit način prostiranja kroz njih, redom: multimodno step-indeks vlakno, multimodno gradijentno vlakno i monomodno vlakno [118]	61
Slika 8-6. Slabljenje polimernog optičkog vlakna mh-4001 u opsegu talasnih dužina: 400-800 nm	64
Slika 8-7. Merenje slabljenja metodom zamene	65
Slika 8-8. Spektri korišćenih LED izvora	66
Slika 8-9. Uporedne vrednosti vršne, centralne, centroidne i dominantne talasne dužine za sve korišćene LED izvore	67
Slika 8-10. CIE 1931 Hromatski dijagram sa obeleženim LED izvorima.....	67
Slika 8-11. Pozicije LED izvora u hromatskom dijagramu CIE 1931, i njihove dominantne talasne dužine.....	69
Slika 8-12. Testiranje odziva fotodetektora na referentnoj belojoj podlozi	69
Slika 8-13. Hardverska organizacija uređaja	71
Slika 8-14.....	72
Slika 8-15. Snimanje strujno – naponskih karakteristika LED izvora.....	73
Slika 8-16. Strujni drajver za upravljanje intenzitetom LED izvora	75
Slika 8-17. Snimanje karakteristika implementiranih strujnih drajvera	76
Slika 8-18. Ilustrativan primer upravljanja LED izvorima pomoću TDM-a	77
Slika 8-19. Ilustrativan primer upravljanja LED izvorima pomoću FDM-a	78
Slika 8-20. Kombinovano vremensko i frekvencijsko multipleksiranje.....	78
Slika 8-21. Linijski spektar signala četvrtke [124]	79
Slika 8-22. Električna šema prijemnog bloka	80
Slika 8-23. Unutrašnji sklop fotodetektora TSL-14SM.....	80
Slika 8-24. Filtar propusnik opsega učestanosti pomoću pasivnih RC i CR filtara.....	81
Slika 8-25. Osnovni element: sabirač	81
Slika 8-26. Osnovni element: množač	82
Slika 8-27. Primer filtra (FIR) sa koeficijetima množača 0.5 i -0.5	82
Slika 8-28. Element za kašnjenje, D	83
Slika 8-29. Primer FIR filtra [125]	83
Slika 8-30. Opšta struktura filtra sa konačnim odzivom – FIR [125].....	84
Slika 8-31. Filtar sa povratnom spregom (IIR filtar) [125]	85
Slika 8-32. Opšti oblik filtra sa beskonačnim odzivom [125]	86
Slika 8-33. Parametri filtra.....	87

Slika 8-34. Parametri realizovanog IIR digitalnog filtra propusnika učestanosti na 2.5 kHz	87
Slika 8-35. IIR filtar propusnik opsega na 2.5 kHz, generisan programskim alatom dsPICFD Lite	88
Slika 8-36. Pobudni signal – četvrtka amplitude 1.5 V i učestanosti 2.5 kHz	88
Slika 8-37. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 2.5 kHz	89
Slika 8-38. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 5 kHz	89
Slika 8-39. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 10 kHz	89
Slika 8-40. IIR filtar propusnik opsega na 5 kHz, generisan programskim alatom dsPICFD Lite	90
Slika 8-41. Pobudni signal – četvrtka amplitude 1.5 V i učestanosti 5 kHz	90
Slika 8-42. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 5 kHz	91
Slika 8-43. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 2.5 kHz	91
Slika 8-44. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 10 kHz	91
Slika 8-45. IIR filtar propusnik opsega na 10 kHz, generisan programskim alatom dsPICFD Lite	92
Slika 8-46. Pobudni signal – četvrtka amplitude 1.5 V i učestanosti 10 kHz	93
Slika 8-47. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 10 kHz	93
Slika 8-48. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 2.5 kHz	93
Slika 8-49. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.8 V i učestanosti 5 kHz	93
Slika 8-50. Iteracije	95
Slika 8-51. Testiranje implementiranog algoritma za Kalmanov filtar	98
Slika 8-52. Stabilnost sistema pre i nakon prolaska kroz algoritam Kalmanovog filtra	98
Slika 8-53. Algoritam rada implementiran na mikrokontroleru dsPIC30F4013	100
Slika 8-54. Algoritam rada implementiran na mikrokontroleru dsPIC33FJ128MC802	102
Slika 8-55. Fotografija implementiranog senzorskog sistema	103
Slika 9-1. Merna postavka	104
Slika 9-2. Normalizovane vrednosti izlaznih signala senzorskog sistema V_1 - V_6 u zavisnosti od rastojanja od belog kalibracionog objekta	105
Slika 9-3. Odziv senzorskog sistema u zavisnosti od rastojanja sonde od belog objekta nakon kalibracije	106
Slika 9-4. Aproksimacija linearnom interpolacijom	107
Slika 9-5. Cubic-Hermite Spline interpolacija	108
Slika 9-6. Ponovljivost realizovanog uređaja	109
Slika 9-7. Karta boja ECI2002 (VisualLayoutCMYK1485)	110
Slika 9-8. Uporedne krive dobijene predloženom i referentnom metodom za devet odabranih boja sa što različitim spektralnim raspodelama	111
Slika 9-9. Uporedne spektralne krive dobijene predloženom i referentnom metodom za uzorke zasićenih boja	112
Slika 9-10. Uzorci zasićenih boja prikazani na hromatskom dijagramu	113
Slika 9-11. Uporedne spektralne krive dobijene predloženom i referentnom metodom za uzorke manje zasićenih boja	115
Slika 9-12. Uzorci manje zasićenih boja prikazani na hromatskom dijagramu	116
Slika 9-13. Uporedne spektralne krive dobijene predloženom i referentnom metodom za uzorke tamnih boja	118
Slika 9-14. Uzorci svetlih boja prikazani na hromatskom dijagramu	120
Slika 9-15. Uporedne spektralne krive dobijene predloženom i referentnom metodom za uzorke različitih nijansi sive	121
Slika 9-16. Organizacija karte boja na set za treniranje i set za testiranje rezultata	125
Slika 9-17. Poređenje estimiranih spektara osnovnih boja RGB modela	126
Slika 9-18. Poređenje estimiranih spektara osnovnih komponenti CMYK modela	126

Slika 9-19. Poređenje estimiranih spektara tamnog, sivog i svetlog uzorka	127
Slika 9-20. Dva uzorka magente od kojih prvi pokazuje veće odstupanje izazvano ljudskim faktorom.....	128
Slika 9-21. Uporedne spektralne krive zasićenih uzoraka.....	130
Slika 9-22. Uporedne spektralne krive svetlih uzoraka	131
Slika 9-23. Uporedne spektralne krive tamnih uzoraka.....	132
Slika 9-24. Uporedni prikaz odstupanja ΔE_{00} za zasićene uzorke pre i nakon primene korekcionne metode	135
Slika 9-25. Uporedni prikaz odstupanja ΔE_{00} za svetle uzorke pre i nakon primene korekcionne metode	135
Slika 9-26. Uporedni prikaz odstupanja ΔE_{00} za tamne uzorke pre i nakon primene korekcionne metode	135
Slika 9-27. Mapa greške ΔE_{00} svih uzoraka boja na karti ECI2002	137
Slika 9-28. Mapa greške ΔE_{00} nakon korekcionne metode, za sve uzorke iz seta za testiranje	138

SPISAK TABELA

Tabela 6-1. Parametri LED izvora zasnovani na talasnoj dužini	45
Tabela 6-2. Karakteristike korišćenih LED svetlosnih izvora	48
Tabela 7-1. Pregled osnovnih karakteristika postojećih rešenja za određivanje boje.....	56
Tabela 8-1. Tehničke karakteristike polimernog vlakna MH4001 [119]	63
Tabela 8-2. Jačina svetlosti odabranih LED izvora	65
Tabela 8-3. Odabir LED svetlosnih izvora.....	66
Tabela 8-4. Hromatske koordinate odabranih LED izvora	67
Tabela 8-5. Parametri za kreiranje filtra propusnika učestanosti na 5kHz	89
Tabela 8-6. Parametri za kreiranje filtra propusnika učestanosti na 10kHz	92
Tabela 8-7. Izrazi za predviđanje i korekciju u algoritmu Kalmanovog filtra.....	95
Tabela 8-8. Izmerene vrednosti za prvih 10 iteracija Kalmanovog filtra.....	96
Tabela 8-9. Detaljan prikaz proračuna za realizovani Kalmanov filter	97
Tabela 9-1. Koeficijenti nagiba kontrolnih tačaka za Cubic-Hermite interpolator.....	108
Tabela 9-2. Tristimulusne vrednosti i normalizovane hromatske koordinate za uzorke zasićenih boja.....	113
Tabela 9-3. Tristimulusne vrednosti i normalizovane hromatske koordinate za uzorke manje zasićenih boja.....	116
Tabela 9-4. Tristimulusne vrednosti i normalizovane hromatske koordinate za uzorke tamnih boja.....	119
Tabela 9-5. Tristimulusne vrednosti i normalizovane hromatske koordinate za sive uzorke	122
Tabela 9-6. Raspored testiranih mat uzoraka boja prema poziciji na karti boja ECI2002.....	122
Tabela 9-7. sRGB model boja: vizuelni prikaz i numeričko poređenje referentne metode i predložene metode nad razmatranim mat uzorcima zasićenih, svetlih, tamnih i sivih boja..	123
Tabela 9-8. Arhitektura sa više slojeva korekcionne metode bazirane na mašinskom učenju.	124
Tabela 9-9. numerička poređenja sRGB parametara i vizuelni prikaz istih za dva slična uzorka magente	128
Tabela 9-10. Raspored testiranih sjajnih uzoraka boja prema poziciji na karti boja ECI2002	133
Tabela 9-11. sRGB model boja: vizuelni prikaz i numeričko poređenje referentne metode i Cubic-Hermite metode nad razmatranim sjajnim uzorcima zasićenih, svetlih i tamnih boja	133
Tabela 9-12. sRGB model boja: vizuelni prikaz i numeričko poređenje referentne metode i korekcionne metode nad razmatranim sjajnim uzorcima zasićenih, svetlih i tamnih boja.....	134
Tabela 9-13. min., maks., prosečne vrednosti ΔE_{00} i standardne devijacije za zasićene boje	136
Tabela 9-14. min., maks., prosečne vrednosti ΔE_{00} i standardne devijacije za manje zasićene (svetle) boje.....	136
Tabela 9-15. min., maks., prosečne vrednosti ΔE_{00} i standardne devijacije za tamne boje...	137

SPISAK SKRAĆENICA

A/D - analogno digitalna konverzija (eng. *Analog to Digital conversion*)

ANN - veštačka neuronska mreža (eng. *Artificial Neural Network*)

CIE - međunarodna komisija za osvetljenje (fra. *Commission internationale de l'éclairage*)

CMF - funkcije odziva standardnog posmatrača ili funkcije usaglašenog stimulusa boja (eng. *Color Matching Functions*)

CMY / CMYK - cijan, magenta, žuta / cijan, magenta, žuta, crna (eng. *Cyan, Magenta, Yellow / Cyan, Magenta, Yellow, Black*)

DC - jednosmerna struja (eng. *Direct Current*)

EEPROM - elektronski izbrisiva programabilna ROM memorija (eng. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*)

FDM - frekvencijsko multipleksiranje (eng. *Frequency Division Multiplexing*)

FET - tranzistor sa efektom polja (eng. *Field Effect Transistor*)

FIR - filter sa konačnim impulsnim odzivom (eng. *Finite Impulse Response*)

FWHM - puna širina na polovini maksimuma (eng. *Full Width at Half Maximum*)

HSI, HSV, HSB, HSL - ton, zasićenje, intenzitet/vrednost/svetlina/osvetljenost (eng. *Hue, Saturation, Intensity/Value/Brightness/Lightness*)

IEEE - Institut inženjera elektrotehnike i elektronike (eng. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

IIR - filter sa beskonačnim impulsnim odzivom (eng. *Infinite Impulse Response*)

IR - infracrveno (eng. *Infrared*)

ITO - indijum oksid (eng. *Indium-Tin-Oxide*)

LCD - ekran sa tečnim kristalima (eng. *Liquid Crystal Display*)

LDR - svetlosno zavisni otpornik (eng. *Light Dependent Resistor*)

LED - svetleća dioda (eng. *Light-Emitting Diode*)

LER - svetlosna efikasnost zračenja (eng. *Luminous Efficiency of Radiation*)

MMF - vlakno sa više modova (eng. *Multi-Mode Fiber*)

MOSFET - metal-oksid-poluprovodnik tranzistor sa efektom polja (eng. *Metall Oxide Field Effect Transistor*)

NPN - negativno, pozitivno, negativno (eng. *Negative, Positive, Negative*)

OLED - organska svetleća dioda (eng. *Organic Light-Emitting Diode*)

PC - personalni računar (eng. *Personal Computer*)

PD - fotodioda (eng. *Photodiode*)

PDA - niz fotodioda (eng. *Photodiode Arrays*)

PHD - fotodioda (eng. *Photodiode*)

PMMA - poli metil metakrilat (eng. *Poly methyl methacrylate*)

PN - pozitivno negativni spoj (eng. *Positive Negative junction*)

PNP - pozitivno - negativno - pozitivno (eng. *Positive, Negative, Positive*)

POF - polimerno optičko vlakno (eng. *Polymer Optical Fiber*)

RGB - crvena, zelena, plava (eng. *Red, Green, Blue*)

SMF - vlakno sa jednim modom (eng. *Single-Mode fiber*)

SPD - spektralna raspodela snage (eng. *Spectral Power Distribution*)

TDM - vremensko multipleksiranje (eng. *Time Division Multiplexing*)

TDM+FDM kombinovano vremensko-frekvencijsko multipleksiranje (eng. *combined Time and Frequency Division Multiplexing*)

TFT - tranzistor sa tankim filmom (eng. *Thin Film Transistor*)

UART - Univerzalni asinhroni primopredajnik (eng. *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*)

USB - univerzalna serijska magistrala (eng. *Universal Serial Bus*)

UV - ultraljubičasto (eng. *Ultraviolet*)

1. UVOD

Sve brži napredak računarske tehnologije, multimedijalnih uređaja i mrežnih komunikacija dovodi do sve veće potrebe za reprodukcijom boje. Međutim, zbog ograničenja u sposobnosti analiziranja opaženih boja i nedostatka tačnosti prilikom vizuelnog opažanja, instrumenti za određivanje boje igraju značajnu ulogu u prikupljanju informacija o boji. Ovakvi uređaji mogu biti različitog nivoa kompleksnosti, u zavisnosti od toga koliko precizno mogu da odrede boju. Koriste se u raznim primenama, npr. u prehrambenoj industriji pri procenjivanju zrelosti plodova kao i klasifikaciji vrste voća i povrća, u tekstilnoj industriji za određivanje boje tkanine, na montažnim linijama za otkrivanje nepravilnosti pri pakovanju proizvoda, u automobilske industriji za određivanje nijanse na karoseriji vozila itd. Pored toga, sve veći broj publikacija u međunarodnim časopisima na temu kolorimetrijskih merenja ukazuje na atraktivnost i važnost odabrane teme. Senzor boje se pokazao kao ključni element u specijalizovanim medicinskim primenama koje uključuju određivanje pH vrednosti tečnosti [1,2], glukoze u krvi [3] ili pak kliničku procenu povreda nastalih usled opekotina.

Kolorimetrija kao naučno merna disciplina bavi se opisom fizičkih korelata percepcije boje, zamenjujući subjektivne doživljaje objektivnim numeričkim sistemom [4, 5].

Termin "boja" može da asocira kako na svojstva svetlosnog izvora tako i na svojstva površine objekta pri datom svetlu. Budući da percepcija boje predstavlja psihofizički fenomen, a kao takva čini veoma važnu komponentu vizuelnog opažanja, rezultati instrumentalnog merenja boje treba da budu u skladu sa psihofizičkim nadražajem posmatrača [6]. Pionirske korake u izučavanju kolorimetrije postavili su *Thomas Young*, *Herman von Helmholtz* i *James Clerk Maxwell* u devetnaestom veku, kada su prepoznali principe aditivnog i supstraktivnog mešanja boja i predstavili trihromatsku prirodu ljudskog opažanja boje [5].

Iskustva o boji nastaju nakon obrade električnih signala u mozgu [7,8], stečenih kao rezultat interakcije svetlosne energije sa tri vrste retinalnih konusnih ćelja u očima.

Budući da ljudsko oko može razlikovati približno deset miliona boja [9], često nismo u mogućnosti da običnim vizuelnim upoređivanjem objekata sa sigurnošću utvrdimo da li su dve nijanse boje identične. Neretko se događa da u svakodnevnom životu prilikom kupovine određene tkanine (ukrasne, odevne itd.) sa sobom ponese uzorak sa čijom bojom želimo da je uklopimo. Takođe smo svesni da nije dovoljno ispitati da li se boje uparenih tkanina podudaraju pri samo jednom izvoru svetla koji je prisutan u prodajnom objektu, jer se nijanse mogu razlikovati na dnevnom svetlu i pri veštačkim svetlima koja potiču od različitih tipova svetlosnih izvora. Čak i pri istom svetlu različiti posmatrači mogu da imaju različito viđenje istih nijansi boje. Svi ovi faktori mogli bi se klasifikovati u tri osnovne komponente koje imaju uticaj na ispitivanu boju: izvor svetlosti, objekat koji je osvetljen tim izvorom i posmatrač [10]. Kolorimetrija formalno biva uvrštena u nauku 1931. god., kada je međunarodna komisija za osvetljenje CIE (fra. *Commision Internationale de l'Eclairage*) definisala sistem za specifikaciju boje baziran na tristimulusnim vrednostima X, Y i Z [11] koje će u okviru ove disertacije biti detaljnije predočene.

1.1. PREDMET, PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja u ovoj disertaciji biće instrumentalno određivanje kolorimetrijskih vrednosti boje i razvoj senzorskog sistema za testiranje uzoraka koji su dobijeni primenom digitalne štampe.

Senzorski sistem na čijem radu se zasniva predložena metoda bazira se na primeni komercijalno dostupnih diskretnih optoelektronskih komponenti, svetlećih dioda - LED (eng.

Light Emitting Diode) i širokopojasnog silicijumskog fotodetektora - PHD (eng. *Photodetector*) niske cene. LED izvori imaju veoma široku primenu na raznim poljima, u arhitektonskom i dekorativnom svetlu, svetlosnim reklamama, signalnim svetlima na automobilima i semaforima, ali i u ulozi pozadinskog svetla na ekranima sa tečnim kristalima. Tehnologija izrade ovih svetlosnih izvora iz dana u dan napreduje i njihova cena postaje sve niža.

Najčešći problemi dostupnih rešenja za određivanje boje su to što ili zahtevaju veoma skupe i osetljive optičke komponente, a pri tome imaju spor odziv, ili predstavljaju jeftina rešenja koja zbog male tačnosti uglavnom imaju usku oblast primene. Predloženo rešenje u ovoj disertaciji se ogleda prvenstveno u jednostavnosti u pogledu konstrukcije, a odlikuje se robustnošću, niskom cenom i visokom tačnošću. Shodno tome, disertacija se zasniva na hipotezi da je moguće realizovati novo optoelektronsko rešenje za određivanje boje koji će u datoj oblasti primene moći u potpunosti da zameni skupe i osetljive laboratorijske uređaje, a da bude konkurentno aktuelnim rešenjima. Potrebno je da se na jedinstven način objedine složeni zahtevi u svrhu uklanjanja nedostataka postojećih komercijalnih uređaja. Senzor boje treba da bude pouzdan i da ima dovoljnu brzinu očitavanja. Budući da je prilikom određivanja boje potrebno voditi računa o obliku predmeta, teksturi, sjajnosti podloge, prozirnosti itd, zadatak ove disertacije je da se realizuje kolorimetrijska metoda niske cene a visokih performansi, koja će biti upotrebljena za ispitivanje štampanih uzoraka boje dobijenih primenom digitalne štampe.

Metodologija istraživanja obuhvata nekoliko faza u skladu sa kojima će biti koncipiran sadržaj ove doktorske teze:

- Pregled aktuelnog stanja u oblasti istraživanja kroz proučavanje naučne i stručne literature
- Pregled konvencionalnih metoda za određivanje boje i metoda predloženih u naučnim radovima
- Uporedna analiza postojećih metoda za određivanje boje
- Definisane teorijskih osnova disertacije
- Eksperimentalna verifikacija koja uključuje projektovanje eksperimentalnog modela i demonstraciju predložene merne metode
- Analiza i obrada rezultata dobijenih eksperimentalnim merenjima.

1.2. OGRANIZACIJA DISERTACIJE

Disertacija je organizovana u 11 poglavlja. Prvo poglavlje čine uvodna razmatranja, pri čemu su definisani predmet, problem i cilj istraživanja, postavljena je hipoteza i izneta je metodologija istraživanja.

U drugom poglavlju predstavljena je priroda boje, opisan je doživljaj boje u ljudskom oku i način prenosa prikupljenih informacija o boji od receptora do mozga. Takođe, u ovom poglavlju su predstavljeni i perceptivni atributi boje.

Treće poglavlje opisuje standardna osvetljenja kao i standardizovane svetlosne izvore koji se koriste prilikom instrumentalnog određivanja boje. Takođe je predstavljena i interakcija svetlosti sa materijom u vidu prelamanja i odbijanja upadnog svetlosnog zraka. Predočen je problem tačkaste refleksije prilikom odbijanja svetlosnih zraka od sjajnog objekta.

U četvrtom poglavlju opisane su funkcije odziva standardnog posmatrača i izloženi su najčešće korišćeni prostori boja. Pored toga, opisana je i mera za izračunavanje razlike u boji koja se podudara sa ljudskom percepcijom u pogledu parametara svetline, tona i zasićenja testiranih boja. Na ovaj način određen je prag razlike u boji koji će definisati prihvatljivost dobijenih rezultata u ovoj disertaciji.

Peto poglavlje daje pregled standardnih metoda određivanja boja. Klasifikacija mernih instrumenata prema složenosti, a samim tim i tačnosti, izvršena je na denziometre, kolorimetre i spektrofotometre.

U šestom poglavlju napravljen je pregled naučnih radova u oblasti metoda za određivanje boje. Analizirana su interesantna kolorimetrijska i spektrofotometrijska rešenja na bazi tečnih kristala, kolorimetrijsko rešenje bazirano na fotostrujama svetlosnih LED izvora. Pored toga analiziran je i kolorimetar sa integrirajućom sferom, tristimulusni kolorimetar sa specijalno dizajiranim fotodetektorima, spektrofotometar na bazi više LED izvora, ali su razmatrana i rešenja sa komercijalno dostupnim sensorima boje.

U sedmom poglavlju data je uporedna analiza metoda razmatranih u naučnim radovima, uz prikaz prednosti i mana u odnosu na konvencionalna rešenja.

U osmom poglavlju izložen je naučni doprinos ove disertacije. Predloženi fiber-optički senzorski sistem zasnovan na proceni spektra refleksije u svrhu određivanja kolorimetrijskih vrednosti boje štampanih uzoraka se uopšteno govoreći može podeliti na optički i elektronski sklop. Optički sklop čini kolorimetrijska sonda sa optičkim vlaknima, koja usmerava svetlost sa šest LED izvora i osvetljava uzorak, a zatim prenosi reflektovanu svetlost od uzorka do širokopojasnog fotodetektora. Optička vlakna omogućavaju spregu optoelektronskih komponenti (LED izvora i fotodetektora) sa kolorimetrijskom sondom koja čini neizostavni deo merne postavke. Elektronski sklop obezbeđuje pobudu LED izvorima i vrši obradu signala dobijenih sa fotodetektora. Sastoji se od predajnog, prijemnog i upravljačkog modula. Algoritam koji upravlja radom predajnog i prijemnog modula je implementiran u sklopu upravljačkog bloka.

Deveto poglavlje obuhvata rezultate i diskusiju. Nad dobijenim izlaznim signalima sa realizovanog senzorskog sistema koji predstavljaju podatke o relativnim intenzitetima centralnih talasnih dužina svetlosnih LED izvora potrebno je dodatno vršiti estimacije radi što bolje rekonstrukcije spektra. Ovo je ostvareno Cubic-Hermite Spline interpolacijom, a rezultati su upoređeni sa referentnim spektrofotometrijskim krivama za ispitivane štampane uzorke boja. Detaljno izvedena diskusija dobijenih rezultata ima veliki značaj za dalji istraživački rad u ovoj oblasti.

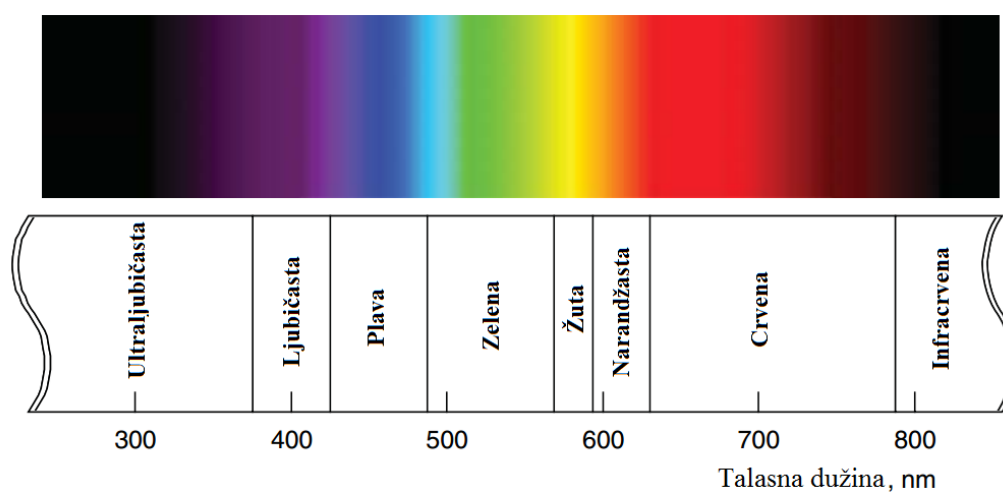
U desetom poglavlju su izvedeni zaključci o postignutim rezultatima u ovoj disertaciji. Ovi zaključci predstavljaju koncizan skup činjenica do kojih se došlo eksperimentalnim putem. Takođe su naznačeni dalji mogući pravci istraživanja.

Jedanaesto poglavlje daje pregled korišćene literature.

2. PRIRODA BOJE (SVETLOSTI), PERCEPCIJA I PERCEPTIVNI ATRIBUTI

Elektromagnetni talasi različitih talasnih dužina i frekvencija se prostiru duž elektromagnetnog spektra. Međutim, vidljiva svetlost koju ljudsko oko može da detektuje obuhvata samo uzak opseg ovog zračenja, i to ~380-730 nm. Talasne dužine ispod 380 nm pripadaju oblasti ultraljubičastog zračenja, dok talasne dužine iznad 730 nm prelaze u infracrveno zračenje. Različite talasne dužine iz vidljivog opsega u ljudskom mozgu izazivaju različite percepcije boja. Najduže manifestuju se kao crvena boja, dok najkraće odgovaraju ljubičastoj boji. Sve ostale nijanse se nalaze unutar ovog opsega, kao što je predstavljeno na slici 2-1.

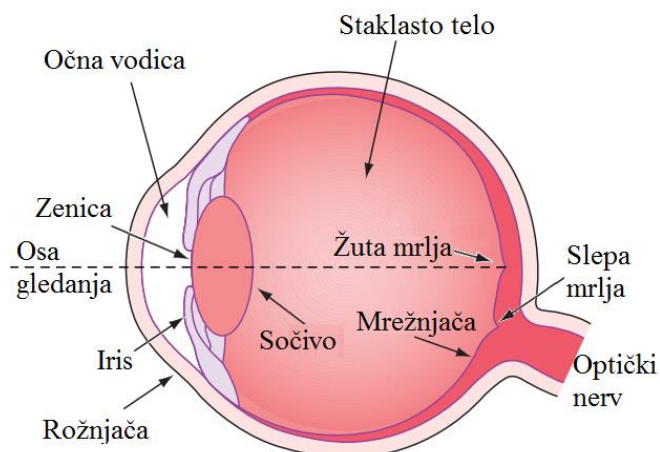
Kada se odgovarajuća bela svetlost propusti kroz idealnu optičku prizmu ili difrakcionu rešetku, razloženi spektar formira spektralno čiste ili monohromatske boje. Za ovakve boje je karakteristično da se mogu predstaviti samo jednom talasnom dužinom. Na primer, narandžasta boja je povezana sa talasnom dužinom ~ 600 nm. Međutim, ista boja se može dobiti i kombinacijom dva svetlosna snopa, od kojih je prvi crvene boje sa talasnom dužinom od 700 nm, a drugi žute boje sa talasnom dužinom ~ 580 nm. Treba primetiti da u ovom slučaju nema direktno prisutne komponente sa talasnom dužinom ~ 600 nm. Ljudsko oko nije u stanju da identifikuje da li je u formiranju boje učestvovalo više svetlosnih snopova, ili je ona formirana kao spektralno čista boja. Iz ovog razloga možemo zaključiti da se oko ponaša kao sintisajzer. Za razliku od ovoga, kada uho sluša orkestar, mogu se prepoznati pojedinačni instrumenti koji proizvode specifične zvukove. Zbog toga možemo reći da se uho, nasuprot oku, ponaša kao analizator [12,15].



Slika 2-1. Vidljivi spektar zračenja elektromagnetnih talasa [10]

2.1. DOŽIVLJAJ BOJE U LJUDSKOM OKU

Upadna optička snaga koja pada na oko prikuplja se preko zakrivljene površine rožnjače. Poprečni presek ljudskog oka [13] koji prikazuje sastavne delove bitne u ovoj diskusiji prikazan je na slici 2-2.



Slika 2-2. Poprečni presek ljudskog oka sa prikazanim najvažnijim delovima [14,15]

2.1.1. ROŽNJAČA

Širom vidljivog spektra, rožnjača u velikoj meri propušta svetlost, apsorbujući manje od 10% upadne svetlosti pri 800 nm i manje od 20% upadne svetlosti pri 400 nm. Međutim, u domenu ultraljubičaste svetlosti na talasnim dužinama manjim od 300 nm, apsorpcija rožnjače se povećava na više od 99%. Budući da sočivo i makularni pigment upijaju kratke talasne dužine još efikasnije, ova apsorpcija mrežnjače ima mali uticaj na vid. Njena glavna svrha je zaštita sočiva od prekomerne izloženosti kratkim talasima [14].

2.1.2. OČNA VODICA I STAKLASTO TELO

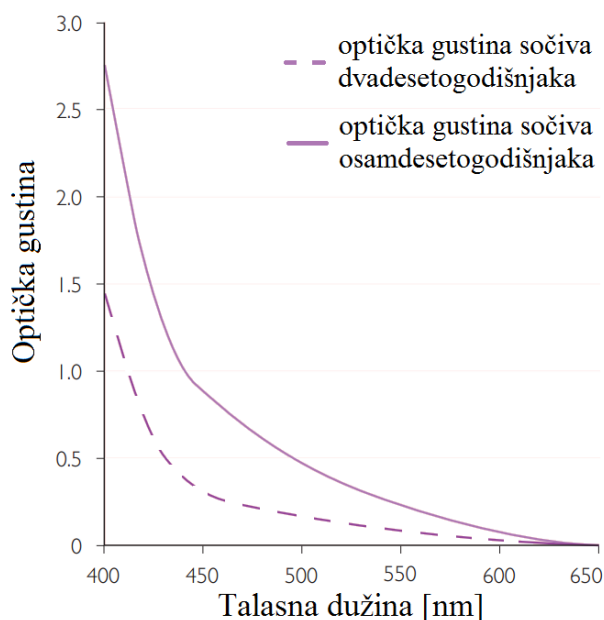
Očna vodica je tečnost između zadnjeg dela rožnjače i sočiva [15]. Staklasto telo čini tečnost koja ispunjava veći deo očne sfere, u prostoru između sočiva i mrežnjače. Ponekad, naročito kod osoba sa kratkovidnošću, male čestice plutaju u ovom medijumu, proizvodeći male mrlje koje izgledaju kao da lebde u prostoru [16]. Indeks prelamanja očne vodice iznosi 1.336, dok indeks prelamanja staklastog tela iznosi 1.337 [15]. Očna vodica i staklasto telo apsorbuju manje od 10% upadnog svetla na svim talasnim dužinama između 400 nm i 800 nm [14], i ovde predstavljaju najtransparentnije optičke medijume.

2.1.3. SOČIVO

Pigmenti sočiva veoma jako apsorbuju kratke talasne dužine. Smatra se da je ova apsorpcija veoma dominantna u pogledu ukupne apsorpcije očnog medijuma. U mlađem dobu, ona je veoma visoka za talasne dužine manje od 390 nm, ali je manja od 10% u opsegu 450-900 nm. Ipak, za razliku od ostalih očnih filtera, njegova funkcija se menja prilikom starenja. Koncentracija apsorbujućeg pigmenta za kratke talasne dužine u sočivu ljudskog oka opada u prvih pet godina života [17]. Nakon tridesete godine života dolazi do povećanja količine

rasejane svetlosti unutar sočiva što dovodi do smanjenja propuštajućeg svetla na svim talasnim dužinama. Pored toga, dolazi do zadržavanja svetla.

Iako postoje odgovarajuće individualne varijabilnosti u vezi gustine sočiva u ljudskom oku [18], na slici 2-3 su prikazane prosečne optičke gustine sočiva ljudskog oka u funkciji starenja. Donja kriva predstavlja gustinu sočiva za prosečnog dvadesetogodišnjaka, dok gornja kriva predstavlja gustinu sočiva za prosečnog osamdesetogodišnjaka [14,19]. Sa dobijenih krivih se može primetiti da je efekat starenja dosta izraženiji na kraćim talasnim dužinama.



Slika 2-3. Optička gustina sočiva ljudskog oka u funkciji starenja [14,19]

2.1.4. ŽUTA MRLJA

Žuta mrlja ili makula lutea ima veoma važnu funkciju kada je u pitanju precizan vid. Ovalnog je oblika i nalazi se u samom centru mrežnjače. Ona je veoma mala, prečnika je oko 5 mm i izuzetno je osetljiva, a zadužena je za centralni vid. U centru žute mrlje se nalaze fovea i foveola sa visokom koncentracijom fotoreceptora čija je aktivnost velika tokom upijanja svetlosti [15].

2.1.5. MREŽNJAČA

Mrežnjača obuhvata veći deo unutrašnjosti očne jabučice, koja je približno sferičnog oblika, a to oku obezbeđuje vrlo široko vidno polje [14]. Ona čini svetlosno osetljivi deo oka [15]. Sastoji se iz nekoliko slojeva, među kojima su ćelije, nervna vlakna, ali i vizuelni detektori [20].

2.1.5.1. VIZUELNI DETEKTORI U MREŽNJAČI

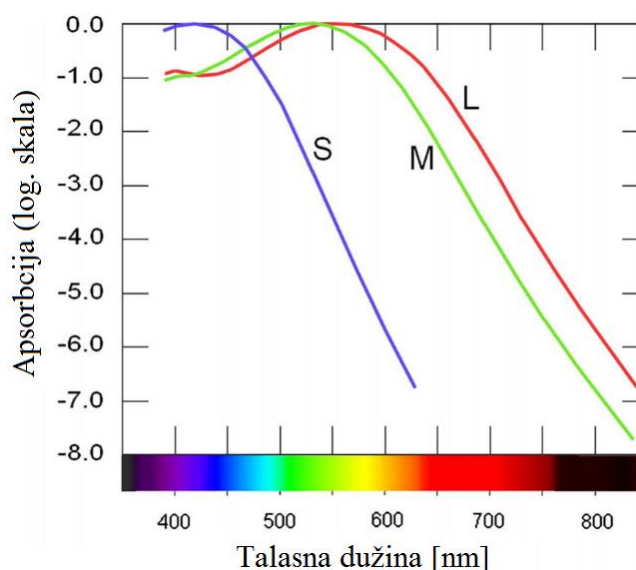
Svetlosno osetljivi elementi mrežnjače sastoje se iz dva tipa ćelija: štapića i čepića. Ćelije štapića su odgovorne za noćni vid niskog nivoa sjajnosti (skotopski vid), dok su čepići odgovorni za raspoznavanje boja pri visokom nivou sjajnosti (fotopskom vidu) [21,22]. Čepići

se mogu podeliti u tri kategorije prema talasnoj dužini svetlosti na koju reaguju: L-čepići, M-čepići i S-čepići za crvenu, zelenu i plavu svetlost.

Plavi, S-čepići imaju neka svojstva po kojima se razlikuju od L-čepića i M-čepića:

- Retko su raspoređeni u mrežnjači (ima ih primetno manje od M-čepića i L-čepića) i gotovo da ih nema u središtu mrežnjače,
- Ne doprinose sposobnosti razlikovanja kontrasta, pa stoga nisu u stanju da otkriju granice slike [23],
- Mnogo su osetljiviji od M-čepića i L-čepića [24-25].

Na slici 2-4 su prikazane spektralne osetljivosti ćelija čepića (S, M i L) prema talasnim dužinama. Skala spektralne osetljivosti je prikazana u logaritamskom obliku.



Slika 2-4. Spektralna apsorbcija ćelija čepića [26]

Čepići i štapići su povezani sa mozgom pomoću nervnih vlakana, na veoma mnogo različitih načina, zavisno od njihovih pozicija. U foveoli je približno izjednačen broj čepića i nervnih vlakana, ali kako se ugao ose gledanja povećava, broj nervnih vlakana opada, toliko mnogo da na kraju stotine čepića i štapića može opsluživati jedno nervno vlakno [8,10,15].

2.1.6. SLEPA MRLJA

Slepa mrlja je mesto gde nervna vlakna koja povezuju mrežnjaču sa mozgom prolaze kroz površinu očne jabučice, i ovo područje uopšte nema osetljivost na svetlost [10].

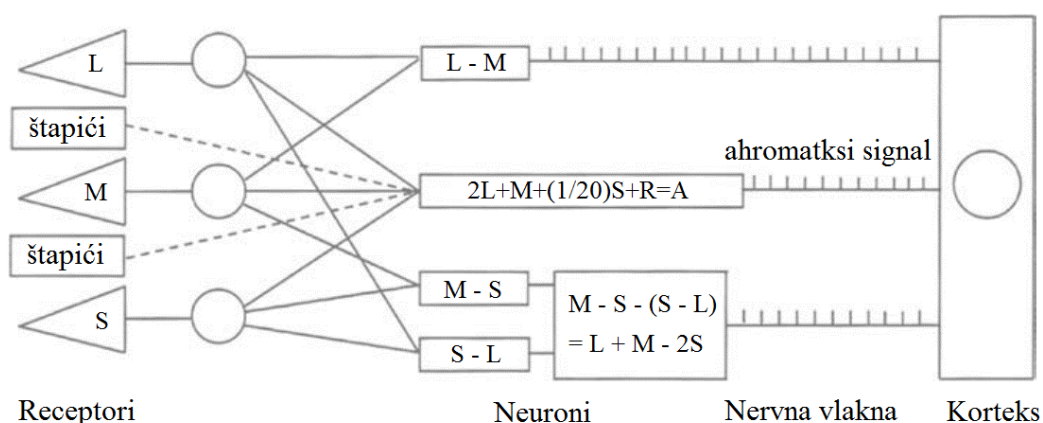
2.1.7. IRIS I ZENICA

Iris je prstenasti, obojeni deo oka koji vidimo sa spoljne strane, a koji ima sposobnost da menja svoju veličinu, imajući središnji otvor (zenicu) prečnika oko 2 mm pri jakom svetlu, dok se pri slabom svetlu zenica povećava do maksimalno oko 8 mm [15]. Zenica predstavlja područje kroz koje prolazi svetlost. Promenom prečnika se obezbeđuje kompenzacija nivoa svetline pod čijim uticajem se vide predmeti [10]. Međutim, faktor ove kompenzacije je 8:1, umesto 16:1, što bi se očekivalo od odnosa kvadrata prečnika, jer su zraci koji prolaze kroz ivicu zenice manje efikasni u stimulanju mrežnjače od onih koji prolaze kroz centar, a ovo svojstvo je poznato kao Stiles-Kravfordov efekat (eng. *Stiles-Crawford*) [15].

2.2. PERCEPCIJA BOJE: PRENOS PRIKUPLJENE INFORMACIJE O SVETLOSTI OD RECEPTORA DO MOZGA

Nakon apsorpcije svetlosti u receptoru koji se nalazi u mrežnjači, pobuđuju se molekuli njegovog fotoosetljivog pigmenta, što rezultira promenom električnog potencijala. Ovaj električni potencijal zatim putuje kroz niz posebnih ćelija da bi se na kraju formirala serija naponskih impulsa koji se prenose duž nervnog vlakna u mozak. Brzine pri kojima se ovi impulsi proizvode određuju modulaciju signala. Veća brzina ukazuje na jači signal, dok manja brzina karakteriše slabiji signal. Svi impulsi su iste amplitude i ona nema ključan uticaj na prenos informacije, već samo njihove frekvencije prenose informacije u mozak. Ove frekvencije su obično reda veličine od nekoliko Hz do $400 Hz$ [10].

Budući da postoje četiri različite vrste receptora, koje čine štapići i tri vrste čepića, bilo bi za očekivati da postoje i četiri vrste signala koji se prenose duž četiri različite vrste nervnih vlakana i da svaki od njih ukazuje na odgovor iz jednog od četiri tipa receptora. Međutim, naučne studije [27] pokazale su da štapići i čepići bivaju povezani u tri, umesto četiri različita signala u nervnim vlaknima. Iako danas još uvek ostaje dosta neistraženo o načinu na koji su signali kodovani za prenos, pojednostavljena šema na slici 2-5 se može smatrati verovatnim okvirom nekih istaknutih karakteristika onoga za šta se veruje da se odvija [10, 27].



Slika 2-5. Uprošćeni i hipotetički dijagram mogućih konekcija između receptora i nervnih vlakana [10]

Jedan od ovih signala se obično naziva ahromatski signal, i njegovi neuroni prikupljaju informacije kako od štapića tako i od sve tri vrste čepića. Zbog različite količine čepića koji su označeni sa L , M i S , deo ovog signala kome doprinose čepići može se predstaviti kao:

$$2L + M + \frac{1}{20}S \quad (2-1)$$

pri čemu faktor $\frac{1}{20}$ predstavlja veoma mali doprinos S čepića ahromatskom signalu. Ako se doprinos štapića označi sa R , i doda izrazu (2-1), ukupni ahromatski signal [10] se određuje na sledeći način:

$$2L + M + \frac{1}{20}S + R = A \quad (2-2)$$

Preostala dva signala u nervnim vlaknima predstavljaju signale koji određuju razliku u bojama. Moguća je pojava tri različita signala [10]:

$$\begin{aligned}L - M &= C_1 \\M - S &= C_2 \\S - L &= C_3\end{aligned}\tag{2-3}$$

Prenos sve tri razlike ovih signala prikazanih pomoću izraza (2-3) bilo bi suvišno, jer ako su poznata dva, o trećem se može zaključiti iz činjenice da je $C_1 + C_2 + C_3 = 0$. Postoje različiti dokazi [10] koji ukazuju na to da prenošeni signali liče na signale:

$$\begin{aligned}C_1 &= L - M \\C_2 - C_3 &= M - S - (S - L) = L + M - 2S\end{aligned}\tag{2-4}$$

2.3. PERCEPTIVNI ATRIBUTI BOJE

U kontekstu prethodno prikazanih vizuelnih signala, mogli bi se definisati perceptivni atributi boje [10, 28, 29], u koje se ubrajaju sjajnost, osvetljenost, svetlina, zasićenje, ton.

2.3.1. SJAJNOST

Sjajnost (eng. *Brightness*) predstavlja atribut vizuelne percepcije prema kome se određuje da li neka oblast emituje više ili manje svetlosti [28]. Ona reprezentuje ahromatski pojam intenziteta i jedan je od tri ključna faktora u opisivanju osećaja boje [29].

2.3.2. OSVETLJENOST

Budući da je percepcija sjajnosti (*Brightness*) vrlo složena, CIE je definisala novu veličinu, osvetljenost (eng. *Luminance*), koja predstavlja snagu zračenja ponderisanu funkcijom spektralne osetljivosti koja je karakteristična za ljudski vid [28].

2.3.3. SVETLINA

Ljudski vid ima nelinearni perceptivni odgovor na osvetljenost, koji se naziva svetlina (eng. *Lightness*). Ova nelinearnost je približno logaritamska [28].

2.3.4. ZASIĆENJE

Zasićenje (eng. *Saturation*) predstavlja atribut boje prema kome se prepoznaje da li se radi o pretežno crvenoj, plavoj, žutoj, ljubičastoj ili nekoj drugoj boji [8]. Ona daje meru stepena do kojeg je čista boja razblažena belim svetlom [29]. Drugim rečima, zasićenje se odnosi na relativnu čistoću ili količinu belog svetla pomešanog sa datim tonom. Monohromatske boje su potpuno zasićene i ne sadrže belo svetlo. Polihromatske boje su manje zasićene, pri čemu je stepen zasićenja obrnuto proporcionalan količini dodatog belog svetla [29]. Shodno tome, boji se može smanjivati zasićenje dodavanjem belog svetla koje emituje jednako zračenje na svim talasnim dužinama unutar vidljivog spektra.

2.3.5. OBOJENOST

Obojenost (eng. *Colorfulness*) je atribut vizuelne percepcije prema kome se čini da neka površina koja se posmatra percipira kao manje ili više hromatična [10].

2.3.6. TON

Ton (eng. *Hue*) je atribut boje povezan sa dominantnom talasnom dužinom u mešavini svetlosnih talasa. Prema tome, ton predstavlja dominantnu boju koju posmatrač opaža [30].

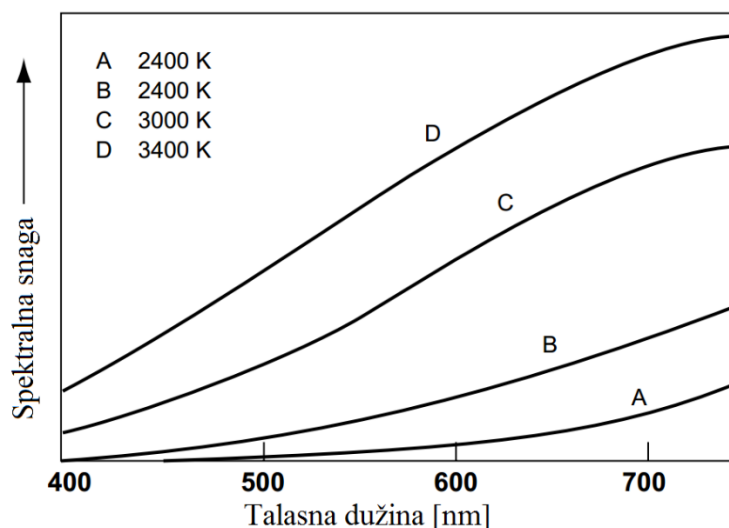
2.3.7. HROMATIČNOST

Ton i zasićenje zajedno opisuju parametar koji se naziva hromatičnost (eng. *Chrominance*).

3. IZVORI SVETLOSTI I SVETLOSNE INTERAKCIJE

3.1. SPEKTRALNA SNAGA ZRAČENJA I PLANKOV RADIJATOR

Gradativno povećanje temperature na nekom telu praćeno je promenom boje koja isijava sa tog tela. Na plamenu koji se pojavljuje sa zapaljenog uglja, najpre isijava tamno crvena boja, zatim narandžasto-crvena, pa žuta boja. Sa daljim povećanjem temperature, boja će postati bela. U isto vreme raste ukupna količina emitovane energije, budući da vatra vrši stalno zagrevanje. Ovu snagu zračenja koju emituje zagrejano telo najbolje opisuje grafik koji prikazuje varijaciju elektromagnetnog spektra emisije (W/m^2) po jedinici talasne dužine. Takve krive su poznate kao krive spektralne raspodele snage SPD (eng. *Spectral Power Distribution*). Slika 3-1 prikazuje način na koji se ove krive menjaju u vidljivom spektru sa povećanjem temperature zagrejanog tela.



Slika 3-1. Spektralna raspodela snage u zavisnosti od zagrevanja [8]

Plankov radijator je idealizovani izvor zračenja sastavljen od zagrejanog kućišta iz kojeg zraćenje izlazi kroz otvor čija je površina mala u poređenju sa unutrašnjom površinom kućišta [8].

Nemački fizičar *Max Planck* je 1900. godine razvio teorijski model koji je predvideo oblik krivih raspodele spektralne snage za različite temperature. On je pretpostavio da se zraćenje ne emituje kontinualno, već u kvantima, pri čemu je energija kvanta direktno proporcionalna frekvenciji zračenja [8]. Plankovo zraćenje [31] može se predstaviti kao:

$$M_e = \frac{c_1}{\lambda^5 [e^{(c_2/\lambda T)} - 1]} \quad (3-1)$$

pri čemu je M_e emisija po intervalu talasne dužine izražena u $\frac{W}{m^2 \cdot m}$, T apsolutna temperatura izvora izražena u K , λ razmatrana talasna dužina opsega zračenja izražena u m .

Konstante c_1 i c_2 su opisane kao:

$$c_1 = 2\pi c^2 h = 3.741 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2 \quad (3-2)$$

$$c_2 = \frac{hc}{k_B} = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ mK} \quad (3-3)$$

gde je h Plankova konstanta $6.62 \cdot 10^{-34}$ Js, a k_B Bolcmanova konstanta $1.38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$.

3.2. STANDARDNA OSVETLJENJA

Uprkos sposobnosti vizuelnog sistema da se adaptira odgovarajućem svetlu, različito obojeni objekti podležu značajnim promenama u izgledu boje nakon promene svetlosnog izvora. Takođe, parovi boja koji se podudaraju pod jednim svetlosnim izvorom, neće se nužno podudarati pod drugim. Da bi se smanjila složenost suočavanja sa ovakvim situacijama, međunarodna komisija za osvetljenje, CIE, definiše odgovarajućim standardima razliku između standardnog osvetljenja i svetlosnog izvora. Standardna osvetljenja se definišu numerički, u pogledu spektralne raspodele snage SPD, a standardni izvori se fizički realizuju kao emiteri zračenja i imaju spektralnu raspodelu snage koja je samo aproksimacija onoj koja odgovara standardnom osvetljenju [21].

3.2.1. CIE A OSVETLJENJE

Njačešće veštačko osvetljenje u domaćinstvima kroz istoriju je sijalica od volframove niti. Ove sijalice su pronašle široku primenu zbog toga što su jeftine i kompaktne. Stoga, jedan od standardnih osvetljenja koje je CIE usvojila predstavlja upravo svetlost volframovih sijalica. Takođe je pogodna jer je njena spektralna raspodela snage zračenja gotovo u potpunosti zavisna samo od temperature zračenja. Standardno osvetljenje A je definisano kao osvetljenje koje ima istu relativnu spektralnu raspodelu snage zračenja kao Plankov radijator pri temperaturi od 2856 K.

3.2.2. CIE D OSVETLJENJE

Glavna potreba za uvođenjem D osvetljenja bila je potreba da standardno osvetljenje bude reprezentativnije za dnevnu svetlost u bliskom ultraljubičastom opsegu. Stoga je 1963 godine CIE predstavila novo standardno osvetljenje D65, koje predstavlja prosečnu dnevnu svetlost kroz čitav vidljivi spektar i u ultraljubičastom području do 300 nm (CIE 2006) [10]. Standardno osvetljenje D65 ima korelisanu temperaturu boje od oko 6504 K, i jedan je od niza CIE D osvetljenja koje predstavljaju dnevna svetla različitih koreliranih temperatura boje. Neki od njih su označeni sa D50, D55, za dnevna svetla koja imaju korelisanu temperaturu od oko 5000 K, 5500 K.

3.3. STANDARDNI IZVORI SVETLA

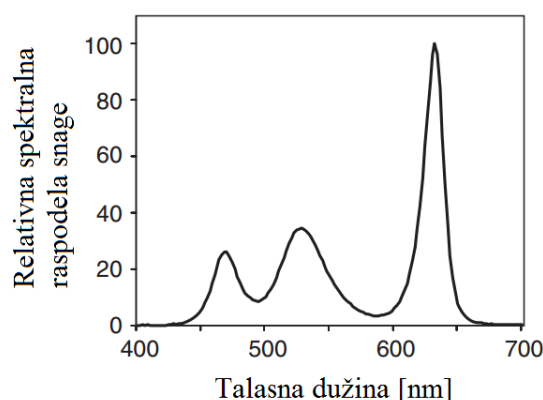
Standardizovani izvori svetla predstavljaju aproksimacije uobičajenih uslova osvetljenja.

3.3.1. IZVOR A

Zračenje standardnog osvetljenja A može se reprodukovati pomoću CIE izvora A, koji predstavlja gasom ispunjenu volframovu sijalicu koja radi na koreliranoj temperaturi boje od 2856 K. Ako se želi postići tačnija spektralna raspodela snage ultraljubičastog zračenja standardnog osvetljenja A, koristi se sijalica sa kvarcnim omotačem ili prozorom od topljenog kvarca.

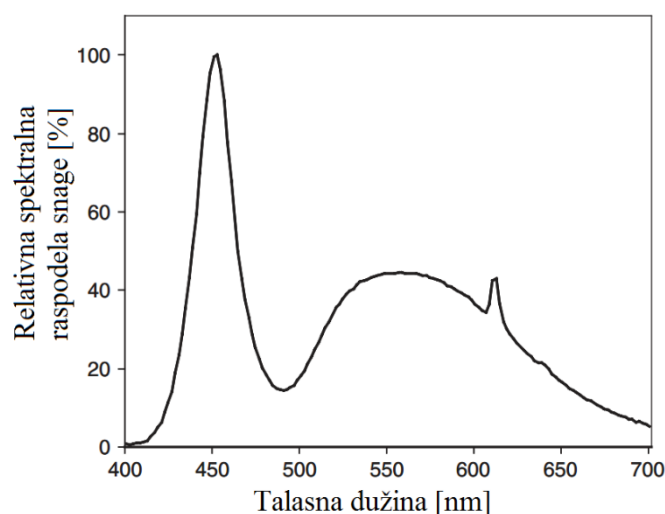
3.3.2. LED IZVORI

Svetleća dioda, LED (*eng. Light Emitting Diode*) je poluprovodnički element koji pri direktnoj polarizaciji konvertuje električni signal u svetlost [32-33]. Ona u osnovi predstavlja neorganski poluprovodnik koji emituje uskopojasno nekoherentno zračenje [10]. Boja emitovanog zračenja je funkcija sastava poluprovodnog materijala koji se koristi prilikom izrade LED, a može biti u infracrvenom, vidljivom ili bliskom ultraljubičastom području spektra. Budući da većina LED izvora emituje zračenje uskog opsega talasnih dužina, tipična širina emitovanog spektra uglavnom iznosi ~30-40 nm. LED izvor koji emituje belo svetlo se može napraviti kombinacijom crvene, zelene i plave LED, u istom pakovanju. Na slici 3-2 je prikazana spektralna raspodela snage na ovaj način koncipirane bele LED. Korelisana temperatura boje u ovom slučaju je približno 3700 K [10].



Slika 3-2. Beli LED izvor formiran uz pomoć plavog, zelenog i crvenog LED izvora [10]

Mnogi beli LED izvori ustvari emituju plavu svetlost talasnih dužina usredsređenih na talasne dužine između 450-470 nm, a unutrašnjost kućišta LED izvora je pri tome presvučena fosforom koji emituje žutu svetlost, te ovakav izvor formira izgled bele svetlosti. Variranje debljine ili sastava fosfora omogućava podešavanje korelisane temperature boje emitovanog zračenja. Na slici 3-3 je prikazana spektralna raspodela snage bele LED koja se zasniva na kombinaciji plave LED i fosfora. Korelisana temperatura boje u ovom slučaju je ~6500 K.



Slika 3-3. Bela LED koja se zasniva na kombinaciji plave LED i fosfora [10]

Alternativni metod za dobijanje belog LED izvora je upotreba ultraljubičastih LED sa crvenim i plavim fosforima i određenim primesama. U ovim slučajevima može se postići bolji prikaz boja nego kod izvora zasnovanih na plavim LED.

LED izvori igraju sve istaknutiju ulogu kada je reč o optičkim sensorima, o čemu svedoče brojni naučni članci [34-40].

3.3.2.1. PREDNOSTI LED IZVORA NAD OSTALIM SVETLOSNI IZVORIMA

LED izvori se odlikuju veoma dobrom svetlosnom efikasnošću zračenja - LER (eng. *Luminous Efficiency of Radiation*), čija optička snaga može biti veća i od 100 lm/W. Fluorescentna lampa proizvodi između 60 i 95 lm/W, a halogena sijalica sa vlaknom volframa oko 20 lm/W. Većina energije koja se isporučuje izvorima sa užarenom niti volframa zrači u infracrvenom – IR (eng. *Infrared*) opsegu talasnih dužina. Za razliku od ovoga, kod LED izvora većina isporučene energije pretvara se u svetlost.

Kada je reč o boji, sledeća velika prednost LED izvora je ta što se mogu proizvesti tako da emituju gotovo bilo koju željenu boju unutar vidljivog opsega zračenja sa relativno uskim spektrom. Zbog boljeg prikaza boja, proizvode se polihromatske LED sa više integrisanih LED izvora. Takođe, LED izvori mogu biti veoma malih dimenzija, a dostupni su i u različitim oblicima.

Pored toga, ovi izvori se mogu uključiti, isključiti ili pulsirati vrlo brzo impulsima visokih frekvencija. Takođe, imaju široke mogućnosti uparivanja (npr. pomoću talasovoda ili optičkih vlakana [41-45]) sa raznim tipovima fotodetektora kao što su fotodiodni nizovi PDA (eng. *Photodiode-Arrays*), svetlosno zavisni otpornici LDR (eng. *Light Dependent Resistors*) ili fotodiode PD (eng. *Photodiodes*). Ova karakteristika posebno je korisna za prenos informacija u impulsno kodovanom svetlosnom snopu, što će biti od velikog značaja u ovoj disertaciji. Životni vek ovakvih izvora je čak do 50000 h.

Cena LED izvora postaje sve niža, a kvalitet sve bolji. Istina je da LED izvori imaju dosta nižu toleranciju na fluktuacije napona i struje, te stoga zahtevaju pažnju u projektovanju sklopa za napajanje.

Od nedavno, postoji i nova klasa ovih izvora, tzv. OLED izvori (eng. *Organic Light Emitting Diode*). Ovi izvori napravljeni su od organskih molekula umesto od poluprovodnika.

3.4. INTERAKCIJA SVETLOSTI SA OBJEKTOM

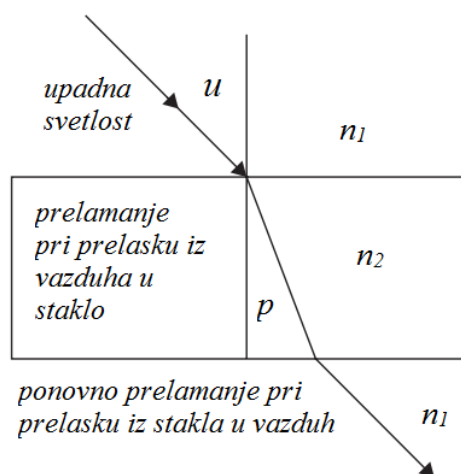
Kada snop svetla padne na neku površinu, deo snopa se podvrgava prelamanju, a deo svetlosti se reflektuje. Prelomljeni zrak koji ulazi u sloj objekta tada se apsorbira i/ili rasipa. Da bi se procenili optički faktori koji osvetljenoj površini daju konačan izgled, uključujući boju i sjaj ili teksturu, moramo razmotriti zakone koji utiču na interakcije svetlosnog snopa sa površinom. Shodno tome, moramo uočiti da snop bele svetlosti, koji se može posmatrati kao skup talasa čije talasne dužine pokrivaju opseg od 400-700 nm, možemo takođe smatrati i skupom talasa kod koga talasi imaju komponente koje vibriraju u međusobno normalnim (upravnim) ravnima duž pravca transmisije. Ako su talasne vibracije ograničene na jednu ravan, zračenje opisujemo kao linearno polarizovano [8]. Efekti polarizacije su važni kada se uzimaju u obzir odsjaji sa sjajnih površina i ogledala.

3.4.1. PRELAMANJE SVETLOSTI

Prelamanje u unutrašnjost objekta odvija se prema Snellovom zakonu koji kaže da kada svetlost koja putuje kroz medijum sa indeksom prelamanja n_1 naiđe i uđe u medijum sa indeksom prelamanja n_2 , tada se snop svetlosti prelama za ugao p koji se definiše na sledeći način [46]:

$$n_1 \sin u = n_2 \sin p \quad (3-4)$$

pri čemu je u upadni ugao, a p prelomni ugao svetlosti (slika 3-4). n_1 predstavlja indeks prelamanja sredine upadnog zraka, dok n_2 predstavlja indeks prelamanja sredine prelomnog zraka. Prelomni ugao zavisi i od talasne dužine.



Slika 3-4. Prelamanje svetlosnog zraka pri prelasku između sredina sa različitim indeksima prelamanja

Osobina stakla da prelama plavo zračenje više od crvenog vidi se prilikom razlaganja vidljivog spektra kada se bela svetlost propusti kroz optičku prizmu. Indeksi prelamanja se zbog toga često daju za zračenja standardne talasne dužine žuto-narandžaste svetlosti ~ 589.3 nm.

3.4.2. ODBIJANJE SVETLOSTI

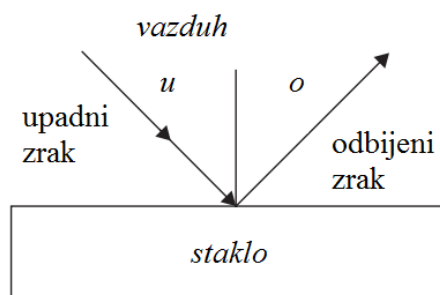
U zavisnosti od glatkoće površi od koje se odbija, može se definisati tačkasto i difuzno odbijanje svetlosti.

3.4.2.1. TAČKASTO ODBIJANJE

Tačkasto odbijanje svetlosti se odnosi na najjednostavniji slučaj odbijanja od glatke površi koja razdvaja dve homogene sredine. Ova vrsta refleksije naziva se i spekularna, od latinske reči *speculum*, što znači ogledalo [11]. Prema zakonu odbijanja odbojni ugao θ_o jednak je upadnom uglu svetlosti θ_u :

$$\theta_u = \theta_o \quad (3-5)$$

Na slici 3-5 je prikazan primer odbijanja svetlosnog zraka od granične površi dve sredine sa različitim indeksom prelamanja, pri čemu su upadni i odbojni ugao identični.



Slika 3-5. Odbijanje svetlosti

3.4.2.2. DIFUZNO ODBIJANJE

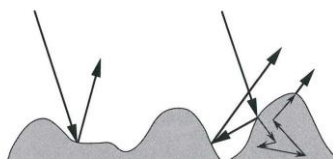
Budući da merenja tačkaste refleksije nisu od velike važnosti za kolorimetriju, često materijali na koje nailazimo u kolorimetriji imaju površine koje su hrapave ili zbog optičkih nehomogenosti unutar njih rasipaju reflektovanu svetlost u svim pravcima. Ovakvo odbijanje se naziva difuzno odbijanje [11].

Svetlosni zraci koji padaju na razdvojnu površ dve sredine prodiru kroz samu površ, gde nailaze na mikroskopske nehomogenosti sredine usled čega se višestruko odbijaju i prelamaju na granicama mikroskopskih oblasti [47,135]. Deo ovih zraka napušta površ pod različitim uglovima u odnosu na upadno zračenje, rezultujući difuznim odbijanjem svetlosti [47].

Reflektujuća površina koja je savršeno difuzna podjednako je sjajna za sve smerove gledanja, bez obzira na način osvetljavanja. Sa druge strane, savršeno ogledalo osvetljeno jednim izvorom svetlosti deluje svetlo samo u jednom smeru gledanja. Nijedna od ove dve idealne površine se ne može u potpunosti ostvariti u praktičnom pogledu. Sve realne površine imaju karakteristike koje se nalaze između ove dve krajnosti. Za površinu koja se blisko približava uslovima spekularne refleksije obično se kaže da je sjajna, dok se za površinu koja se približava uslovima difuzne refleksije kaže da je matirana ili mat. Svaka specifikacija boje treba da bude praćena podacima o geometriji svetlosnog snopa i geometriji onog dela odbijenog (ili propuštenog) snopa koji se procenjuje pri merenju [47-50].

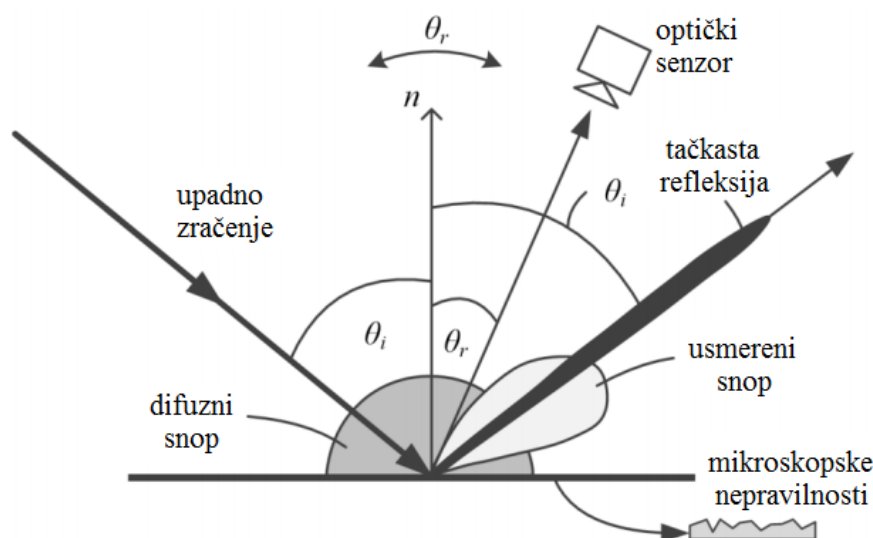
3.4.2.3. ODBIJANJE OD PROIZVOLJNE POVRŠI

Na slici 3-6 je ilustrovan svetlosni zrak koji dolazi na proizvoljnu graničnu površ gde se može reflektovati jednom ili više puta, ali može doći i do višestrukog odbijanja na mikroskopskim nehomogenostima unutar sredine ispod površi [48]. Što je površ više glatka, odbijanje će biti više usmereno i bliže tačkastom odbijanju, i obrnuto, što je površ grublja i poseduje više mikroskopskih nepravilnosti, odbijanje će biti više difuzno i bliže idealnom difuznom odbijanju [48]. Takođe, talasna dužina svetlosti može značajno uticati na proces odbijanja svetlosti na graničnoj površi [47,135].



Slika 3-6. Odbijanje svetlosti na proizvoljnoj površi [135]

Autori u radu [47] su predložili model odbijanja svetlosti pri čemu su izdvojili tri komponente odbijanja: difuzni snop, usmereni snop i tačkasta refleksija. Ove komponente su prikazane na slici 3-7 i one zavise od položaja optičkog senzora, dok je izvor svetlosti u fiksnom položaju.



Slika 3-7. Komponente odbijanja svetlosti prema modelu predloženom u radu [47,135]

Iradijansa u radu [47] u smeru senzora data je kao:

$$E = C_{dl} + \frac{C_{sl}}{\cos\theta_r} \cdot e^{-\frac{\alpha^2}{2 \cdot \sigma_h^2}} + C_{ss} \cdot \delta(\theta_i - \theta_r) \cdot \delta(\varphi_r) \quad (3-6)$$

pri čemu je C_{dl} koeficijent difuznog snopa, C_{sl} koeficijent usmerenog snopa, a C_{ss} koeficijent tačkaste refleksije. Prvi član sume u izrazu (3-6) predstavlja difuzno odbijanje svetlosti, drugi član opisuje usmereni snop pomoću normalne raspodele, dok treći član modeluje tačkastu refleksiju uz pomoć dvostruke delta funkcije. Eksperimentalno je utvrđeno da samo za mali opseg mikroskopskih nepravilnosti oba člana C_{sl} i C_{ss} imaju značajnu vrednost [47]. U većini slučajeva dominantan je ili usmereni snop ili tačkasta refleksija [47,135]. Takođe je eksperimentalno utvrđeno da važi:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_h}{\lambda} < 0.0025, & C_{sl} = 0 \\ \frac{\sigma_h}{\lambda} > 1.5, & C_{ss} = 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

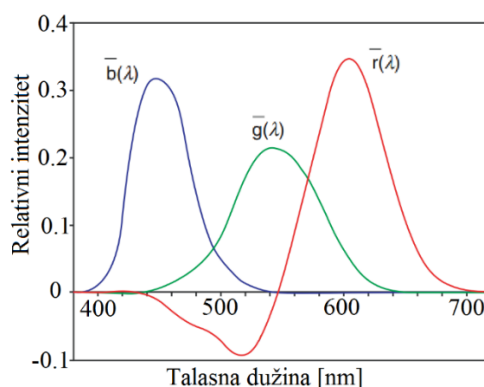
pri čemu je λ talasna dužina, dok σ_h modeluje mikroskopske nepravilnosti na površi [47,135].

4. UNIVERZALNI OPIS BOJE, PROSTORI BOJA

Sve do razvoja spektrofotometrije nije postojala jednoznačna osnova na kojoj bi se mogao predstaviti univerzalni opis boje. Postavljanje referentnih uzoraka boja na osnovu etalonski obojenih materijala nije predstavljalo zadovoljavajuće rešenje jer su uzorci ograničenog trajanja i teško ih je reprodukovati i distribuirati. Sa druge strane, spektrofotometrija zavisi samo od merenja talasne dužine svetlosti i merenja refleksije ili propusnosti, a oba parametra se mogu odrediti sa visokom tačnošću [11]. Nasuprot spektrofotometrijskim krivama, tristimulusne vrednosti, iako ne pružaju toliko informacija koliko spektrofotometrijski podaci, predstavljaju zadovoljavajuće rešenje u slučaju ispitivanja podudaranja boja [51,52]. Takođe, tristimulusne vrednosti se mogu dobiti iz spektrofotometrijskih podataka jednostavnim postupkom izračunavanja.

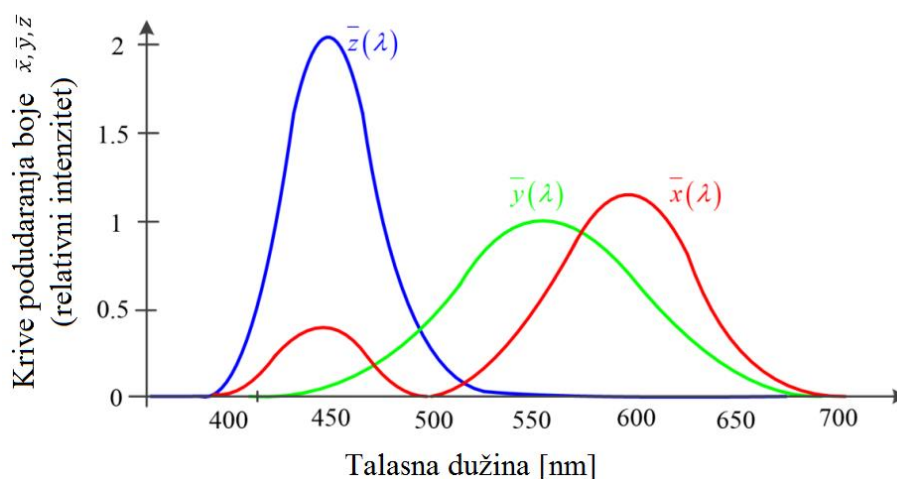
4.1. FUNKCIJE ODZIVA STANDARDNOG POSMATRAČA

Budući da su direktna merenja spektralnih odziva čepića izvedena tek nedavno [53], usvojeni pristup kvantifikacije boje ustanovljen je upotrebom funkcije odziva standardnog posmatrača [10]. Takođe, suočavajući se sa problemom da svi posmatrači boju vide blago drugačije, CIE je razvila koncept “standardnog posmatrača” [54]. Standardni posmatrač predstavlja prosečnu osetljivost ljudskog vizuelnog sistema na svetlost, a okarakterisan je pomoću seta od tri funkcije odziva na vizuelni stimulus [55]. Ideja ovakvog pristupa je da se efekat pobude (tj. nečega što izaziva odgovor, odziv) na čepiće može predstaviti količinama tri svetlosti (shodno tome da postoje tri vrste čepića) koje, kada se dodaju, odgovaraju tom stimulusu. Čelije čepića se mogu stimulisati odgovarajućim mešanjem tri snopa svetlosti, od kojih svaki idealno stimuliše samo jedan tip čepića. Talasne dužine tih svetlosnih snopova od kojih svaki ima energiju u uskom intervalu su: 700 nm za crvenu, 546.1 nm za zelenu i 435.8 nm za plavu boju. U skladu sa ovim talasnim dužinama, slika 4-1 prikazuje količinu svake od njih koja je potrebna za usklađivanje stimulusa koji ima energiju samo u određenom intervalu talasne dužine vidljivog spektra. Na primer, svetlost sa energijom na oko 600 nm može se uskladiti dodavanjem po 0.3 jedinice za crvenu i 0.1 jedinica za zelenu svetlost. Ove količine RGB svetlosti (*eng. Red, Green, Blue*), potrebne za podudaranje nadražaja širom vidljivog spektra, nazivaju se funkcijama odziva standardnog posmatrača CMF (*eng. Color Matching Functions*). Ovakav naziv je dat jer je više posmatrača učestvovalo u eksperimentima procene da li se dve pobude podudaraju. Rezultati koji su prikupljeni na osnovu određenog broja posmatrača koji su formirali takve krive [56, 57] su zatim kombinovani u jedan skup funkcija, koje je međunarodna komisija za osvetljenje CIE proglasila standardnim kolorimetrijskim posmatračem 1931. godine.



Slika 4-1. CIE funkcije $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, definisane za standardnog posmatrača [10]

Transformacijom $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ funkcija odziva u linearnu kombinaciju koja nema negativnih delova, CIE je definisala novi set funkcija odziva standardnog posmatrača, $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ (slika 4-2), koji je postao univerzalni način kolorimetrijske kvantifikacije.



Slika 4-2. CIE funkcije odziva standardnog posmatrača $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ [58]

Kada su jednom određene, ove funkcije su omogućile da se merenje boje izvodi iz čisto fizičkih podataka, a da se u potpunosti zasniva na instrumentalnom merenju, bez naknadnih interakcija sa posmatračima.

4.2. PROSTORI (MODELI) BOJA

Svrha formiranja prostora boja je da omogući specifikaciju boja na neki standardizovan način [29]. Budući da su, kao što je već objašnjeno, tri numeričke komponente neophodne i dovoljne za opis boje, ista se može specificirati trokomponentnim vektorom [28]. Skup svih boja tada čini vektorski prostor koji se naziva model ili prostor boja [59, 28]. Budući da se tri komponente koje opisuju boju mogu definisati na različite načine, to dovodi do pojave različitih prostora boja [59]. Često se u literaturi ovakvi prostori klasifikuju u četiri osnovne familije: kolorimetrijski, psihofizički, fiziološki i oponentni prostori boja. Kolorimetrijski prostori se zasnivaju na fizičkim merenjima spektralne refleksije, i ovakvi prostori su od ključne važnosti u ovoj disertaciji. Sa druge strane, psihofizički modeli su nastali prema potrebama za opis boja terminima koji su praktični za ljudsko tumačenje [28]. Fiziološki nadahnuti modeli boja se zasnivaju na aditivnom mešanju tri primarne komponente boje, po uzoru na tri vrste receptora u retini ljudskog oka. Modeli oponentnih boja su zasnovani na eksperimentima percepcije, i koriste uglavnom primarne boje u parovima, kao što su žuto-plava i crveno-zelena.

4.2.1. CIE XYZ PROSTOR BOJA

CIE XYZ prostor boja pripada kolorimetrijskom tipu prostora, a koristi se u primenama gde je bitno dosledno predstavljanje boje na uređajima različitih karakteristika. U CIE prostorima boja, X, Y i Z su polazni parametri za sve specifikacije boja, i dobijaju se množenjem tri spektralna skupa podataka na sledeći način:

$$X = k \sum_{i=0}^{N-1} \bar{x}(\lambda_i) l(\lambda_i) r(\lambda_i) \quad (4-1)$$

$$Y = k \sum_{i=0}^{N-1} \bar{y}(\lambda_i) l(\lambda_i) r(\lambda_i) \quad (4-2)$$

$$Z = k \sum_{i=0}^{N-1} \bar{z}(\lambda_i) l(\lambda_i) r(\lambda_i) \quad (4-3)$$

pri čemu $l(\lambda_i)$ reprezentuje svetlosni izvor, $r(\lambda_i)$ predstavlja spektralni set uzorka (u ovom slučaju refleksija), dok su $\bar{x}(\lambda_i)$, $\bar{y}(\lambda_i)$ i $\bar{z}(\lambda_i)$ spektralne funkcije odziva standardnog posmatrača boja *CMF*.

Ravnomerno raspoređene talasne dužine $(\lambda_i)_{i=0}^{N-1}$ treba da pokrivaju ceo vidljivi opseg spektra u intervalima od po 1 nm. Međutim, za praktične svrhe, suma se može aproksimirati grubljim intervalima talasnih dužina, sa $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$ ili $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$.

Na ovaj način dobijeni parametri XYZ su poznati kao tristimulusne vrednosti, i one su osnovne mere boje. Svakodnevno se koriste u brojnim primenama gde se vrši upravljanje bojom, na primer u profilima monitora, gde postoji direktna veza između vrednosti piksela i tristimulusnih vrednosti [54].

Podaci o spektralnoj refleksiji ili transmisiji nezavisni su od osvetljenja, ali se tristimulusne vrednosti iz takvih podataka mogu dobiti samo za određeno osvetljenje. CIE preporučuje kada god je to moguće da se koriste standardno osvetljenje A ili standardno osvetljenje D65. Standardno osvetljenje A je zgodno zbog toga što je dostupno kao svetlosni izvor sa užarenim vlaknom. Standardno osvetljenje D65 veoma dobro reprezentuje prosečnu dnevnu svetlost, ali njegova mana je to što nije rasprostranjen kao svetlosni izvor.

Treba napomenuti da tristimulusne vrednosti ne daju očigledan prikaz boje na korisničkom nivou, već se ove vrednosti dalje transformišu u druge prikaze opisane u narednim odeljcima.

4.2.1.1. CIE x,y HROMATSKI DIJAGRAM

Normalizacijom tristimulusnih vrednosti X, Y, Z, dobijaju se vrednosti x, y, z koje se nazivaju hromatskim koordinatama [8, 11, 28, 60]:

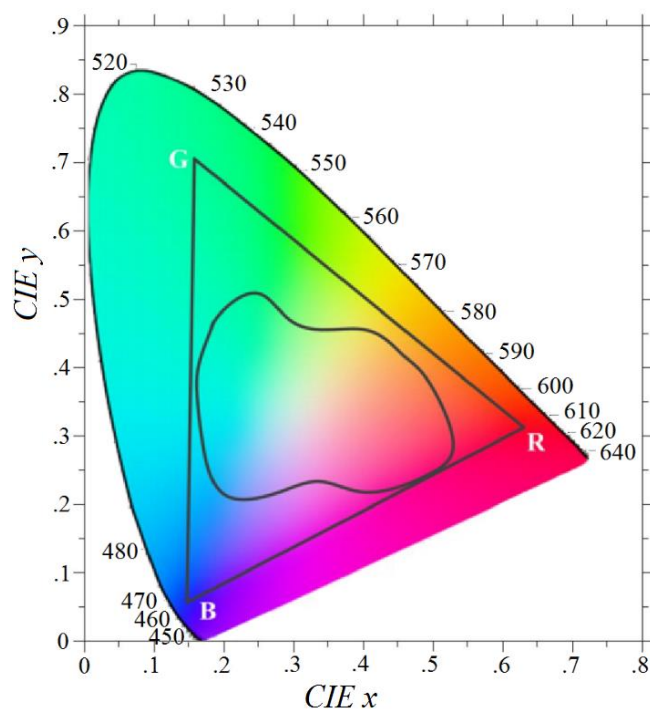
$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4-4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (4-5)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (4-6)$$

Budući da za hromatske koordinate važi $x + y + z = 1$, dovoljno je odrediti vrednost dva od ova tri parametra da bi se opisala boja uzorka. Najčešće se u ovu svrhu odabiraju parametri x i y i prema njima se formira dvodimenzionalni grafički prikaz koji se naziva hromatski dijagram

(slika 4-3). Takođe, iz ovih izraza se može uočiti da se X i Z mogu izračunati kada je poznato x, y i Y , te se ove tri vrednosti smatraju dovoljnom specifikacijom. Vrednosti x, y na hromatskom dijagramu određuju položaj boje u CIE XYZ prostoru boja.



Slika 4-3. Hromatski dijagram na kome su prikazani tipični opsezi boja za RGB monitor i štampač [29]

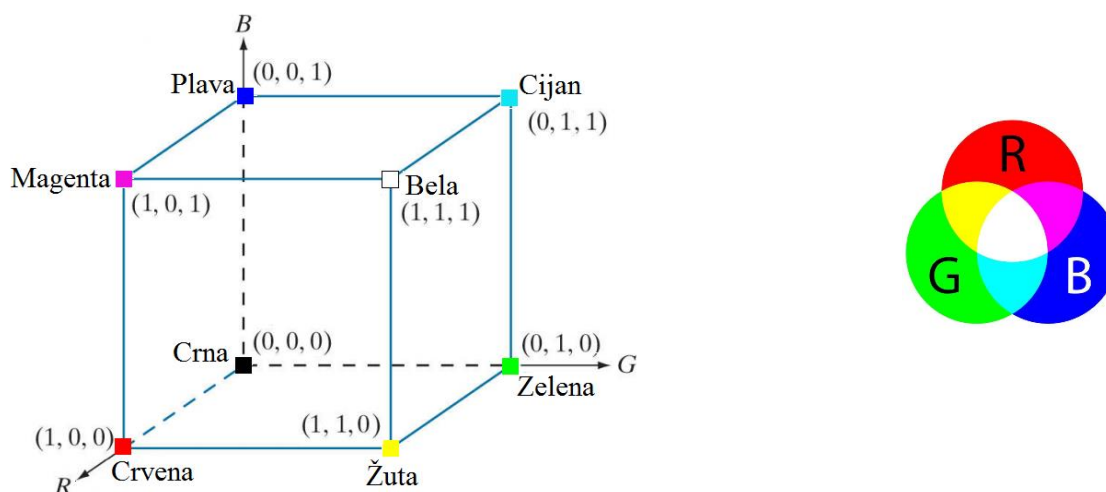
Jasno definisane granice na hromatskom dijagramu formirane su hromatskim koordinatama koje pripadaju čistim monohromatskim izvorima svetlosti. Bela boja (ili tačka) je locirana u centru hromatskog dijagrama. Boje koje su zasićenije nalaze se dalje od centra [29]. Bilo koja fizički ostvariva boja nalazi se unutar hromatskog dijagrama i on predstavlja opseg boja koje raspoznaje čovek sa zdravim vidom.

Boja dobijena superpozicijom (aditivnim mešanjem) svetlosti koja se sastoji od dva različita izvora uvek će ležati na pravoj čiji pravac je određen sa te dve tačke koje predstavljaju komponente date polihromatske boje na dijagramu [29]. Isto tako, ako je boja dobijena aditivnim mešanjem tri boje, tada se nakon povlačenja duži između svake dve susedne tačke formira trougao unutar koga se nalaze sve boje koje se mogu dobiti aditivnim mešanjem tri date boje [28, 29, 54]. Ovaj skup se još naziva i gamut (*eng. gamut*) ili opseg boja. Na slici 4-3 se može uočiti trougao koji predstavlja tipičan gamut RGB monitora, formiran od crvene (R), zelene (G) i plave (B) nijanse boje koju monitor može da prikaže. Nešto manji opseg boja, prikazan nepravilnim oblikom na slici 4-3 pripada štampaču, a razlog ovog odstupanja od trouglastog oblika je posledica kombinacije aditivnog i supstraktivnog mešanja boja prilikom štampanja [29].

Ako se pak povuče linija od referentne bele boje kroz neku tačku (boju) na hromatskom dijagramu, na mestu preseka sa granicom hromatskog dijagrama nalazi se dominantna talasna dužina date boje [29].

4.2.2. RGB, CMY/CMYK PROSTORI BOJA

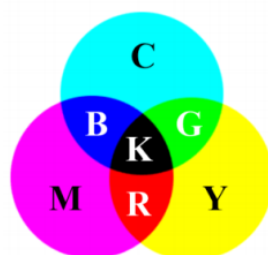
RGB (*eng. Red, Green, Blue*) prostor boja je zasnovan na fiziološkom modelu, inspirisan osobinom ljudskog oka, koje reguluje na nadražaje crvene, zelene i plave boje [29]. Ovaj prostor predstavljen je dekartovim koordinatnim sistemom, gde se svaka moguća boja formira mešanjem pomenutih primarnih komponenti. Princip RGB prostora je poznat kao aditivno mešanje boja [53]. Iz praktičnih razloga, komponentama RGB prostora na slici 4-4 (levo) dodeljene su normalizovane vrednosti u opsegu $[0, 1]$. Slika 4-4 (desno) prikazuje aditivni način mešanja boja.



Slika 4-4. RGB prostor boja predstavljen u dekartovom koordinatnom sistemu (levo) [29], aditivni princip mešanja boja (desno) [61]

U tri temena kocke, na osama dekartovog koordinatnog sistema, označeno vektorima $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$ i $(0, 0, 1)$ nalaze se tri primarne boje, crvena, zelena i plava. Preostala temena koja su označena vektorima $(0, 1, 1)$, $(1, 0, 1)$ i $(1, 1, 0)$ reprezentuju cijan, magentu i žutu boju. U koordinatnom početku se nalazi crna boja $(0, 0, 0)$, dok se idući dijagonalom kocke gradativno formira siva skala (od tamnijih nijansi ka svetlijim), da bi se na kraju ostvarila bela boja, gde sve tri primarne komponente imaju maksimalne normalizovane vrednosti $(1, 1, 1)$.

Cijan, magenta i žuta boja se alternativno nazivaju primarne boje pigmentata ili sekundarne boje svetlosti [29]. Ako posmatramo površinu obloženu magenta pigmentom koja je osvetljena belom svetlošću, zeleno svetlo se ne reflektuje od površine. Na taj način magenta oduzima zelenu svetlost od odbijene bele svetlosti, koja se sastoji od jednakih količina crvene, zelene i plave svetlosti. Ovakav vid mešanja boja koji se naziva subtraktivno mešanje boja, predstavlja CMY (*eng. Cyan, Magenta, Yellow*) prostor boja, a princip je prikazan na slici 4-5.



Slika 4-5. CMY prostor boja [61]

Uređaji poput štampača u boji i fotokopir mašina koriste ovakve prostore boja [29], a transformacija iz RGB prostora u CMY prostor izvodi se veoma jednostavno oduzimanjem pojedinačnih RGB od 1:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

pri čemu su RGB i CMY vrednosti u ovom izrazu normalizovane u opsegu [0-1]. Budući da u praktičnim uređajima klasičnim subtraktivnim mešanjem komponenti u CMY prostoru boja nije moguće postići potpuno crnu boju, CMY prostoru se dodaje crna boja u svrhu poboljšanja kvaliteta štampanog prikaza, i na taj način se dobija nadograđena verzija ovog prostora, koja se naziva CMYK (*eng. Cyan, Magenta, Yellow, Black*) [29].

Budući da normalizovane RGB i CMY vrednosti u opsegu [0-1] ne predstavljaju optimalno rešenje za računarsku tehnologiju, ove vrednosti se predstavljaju brojem bita koji se koristi za opis pojedinačnog piksela. To funkcioniše tako što se za crvenu, zelenu i plavu boju rezervišu po osam bita, što omogućava predstavljanje RGB u novom opsegu [0-255]. Na taj način postiže se ukupan broj boja $(2^8)^3=16,777,216$, i to se naziva „*true color*“ [29].

4.2.2.1. LINEARNI I NELINEARNI RGB MODEL

Veoma važno je napraviti razliku između linearnog (usvojena notacija: RGB) i nelinearnog (usvojena notacija: R'G'B') modela, koja se ogleda u nelinearnosti reprodukcije intenziteta. Linearne RGB vrednosti su fizička reprezentacija hromatske svetlosti koja zrači iz nekog objekta [28]. Međutim, perceptivni odgovor čovečijeg vizuelnog sistema je nelinearan i veoma složen. Stoga, linearni RGB prostor nije pogodan za numeričku analizu perceptivnih atributa [28]. U obradi slike i digitalnoj fotografiji koriste se nelinearne R'G'B' vrednosti. Transformacija linearnih RGB vrednosti opsega [0-1] u nelinearne R'G'B' vrednosti opsega [0-1] naziva se gama korekcija, i izražava se transformacionim matricama [28]:

$$R' = \begin{cases} 4.5R, & R \leq 0.018 \\ 1.099R^{\frac{1}{\gamma}} - 0.099, & R > 0.018 \end{cases} \quad (4-8)$$

$$G' = \begin{cases} 4.5G, & G \leq 0.018 \\ 1.099G^{\frac{1}{\gamma}} - 0.099, & G > 0.018 \end{cases} \quad (4-9)$$

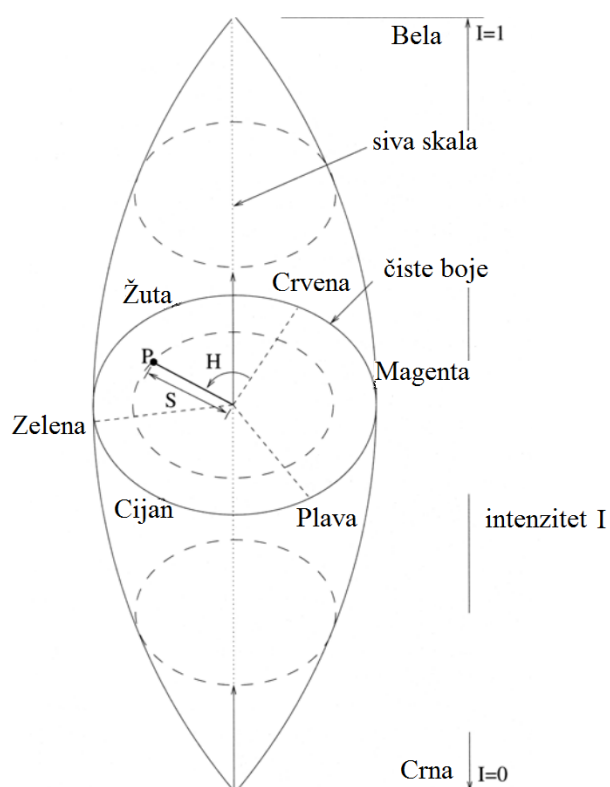
$$B' = \begin{cases} 4.5B, & B \leq 0.018 \\ 1.099B^{\frac{1}{\gamma}} - 0.099, & B > 0.018 \end{cases} \quad (4-10)$$

4.2.3. HSI PROSTOR BOJA

Modeli boja poput RGB, CMY (CMYK) su veoma pogodni za hardverske implementacije, a RGB sistem se takođe veoma lepo podudara sa činjenicom da ljudsko oko snažno reaguje na primarne boje (crvenu, zelenu i plavu). Međutim, ovakvi modeli ipak nisu pogodni za opis boja terminima koji su praktični za ljudsko tumačenje [29]. Čovek opaža boju objekta opisujući je pomoću njenog tona, zasićenja i sjajnosti. (Ovi termini objašnjeni su u poglavlju 2.3). Familije prostora boja koji se nazivaju HSI (*eng. Hue, Saturation, Intensity*), upravo se odnose na

pomenuta tri parametra i razdvajaju komponentu intenziteta (ili sjajnosti) od informacija o prenošenju boja (tona i zasićenja) [29]. Samim tim, ovakvi prostori boja pripadaju fiziološkom tipu modela. Za opis ovih modela, koriste se cilindrične koordinate, a dobijaju se iz RGB modela transformisanjem koordinatnog sistema. Parametar zasićenja S (eng. *Saturation*) je proporcionalan radijalnoj udaljenosti, ton H (eng. *Hue*) je funkcija ugla polarnog koordinatnog sistema, dok je intenzitet I (eng. *Intensity*) rastojanje duž ose upravno na polarnu koordinatnu ravan.

HSI prostor boja je razvijen kako bi numerički specificirao vrednosti nijanse, zasićenja i intenziteta boje [28], odnosno da se korisnicima omogući da opišu boju na intuitivan način [29]. Ovaj model je predstavljen na slici 4-6. Parametar H (ton) određuje se rotiranjem ugla oko vertikalne ose i može imati vrednost između 0° i 359° , pri čemu ugao 0° odgovara crvenoj boji. Na taj način se definiše mera spektralnog sastava boje [29]. Zasićenje S je srazmera koja se kreće od vrednosti 0 protežući se radijalno prema spolja do maksimalne vrednosti 1 na površini konusa. Ova komponenta se odnosi na proporciju čiste svetlosti dominantne talasne dužine i pokazuje koliko je boja udaljena od sive boje jednake svetline. Parametar intenziteta I se takođe kreće u granicama 0-1 a predstavlja meru relativne svetline. Na dnu i vrhu konusa, gde vrednosti I iznose 0 i 1, parametri H i S su nedefinisani.

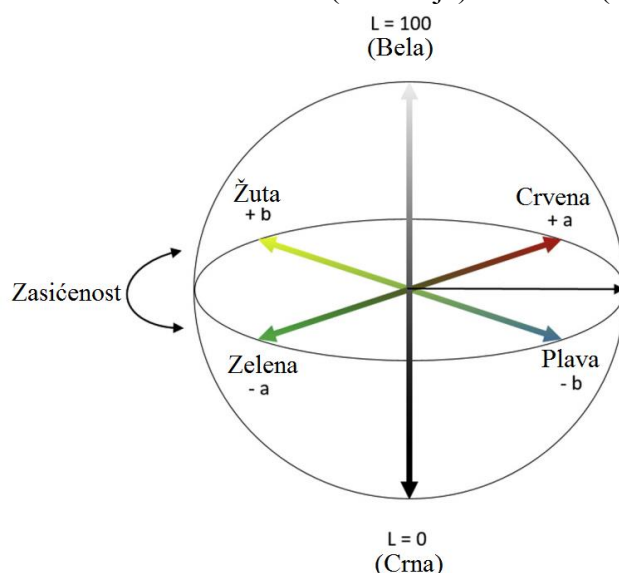


Slika 4-6. HSI prostor boja [28]

Dominantni faktor pri odabiru određenog HSI modela je upravo intenzitet, a on određuje oblik geometrijskog tela kojim se predstavlja model. Neke od čestih implementacija su šestougaoni konusni prostor boja HSV gde je parametar intenziteta reprezentovan sa V (eng. *Hue, Saturation, Value*) i dvostruki šestougaoni konusni prostor boja HSL (eng. *Hue, Saturation, Lightness*). Detaljniji prikazi ovih prostora, kao i transformacije RGB parametara u parametre ovih prostora mogu se pronaći u literaturi [28] i ovde neće biti posebno razmatrani.

4.2.4. CIE LAB PROSTOR BOJA

CIE LAB prostor boja se svrstava u oponentni tip modela boja. LAB dijagram koji se koristi za predstavljanje ovog modela je trodimenzionalni dijagram i opisuje kvantitativni odnos boja na tri ose. L^* osa označava svetlinu, dok su a^* i b^* ose koje nose informaciju o boji [54]. Na dijagramu prostora boja ovog sistema, koji je dat na slici 4-7, parametar L^* se nalazi na vertikalnoj osi i može da ima vrednosti od 0% (crna boja) do 100% (bela boja).



Slika 4-7. LAB prostor boja [62]

Parametar a reprezentuje crveno-zelenu komponentu boje, pri čemu $+a$ označava crvenu boju, dok $-a$ označava zelenu boju. Plavo-žuta komponenta je određena b osom, pri čemu $+b$ označava žutu boju, dok $-b$ označava plavu boju.

4.3. HROMATSKA ADAPTACIJA

Pored toga što se prilagođava nivou svetla, vizuelni sistem se takođe prilagođava boji, tačnije hromatičnosti svetla, i to se naziva hromatskom adaptacijom [7]. Kao rezultat takve adaptacije, koja je posledica uglavnom nezavisnih adaptacija tri tipa vizuelnih receptora boje, izgled objekata je manje-više očuvan pod izvorima svetlosti različitih boja. Iako sijalice sa volframovim vlaknima emituju vrlo malo svetlosti u opsegu kratkih talasnih dužina, a znatno više svetlosti u opsegu dugih talasnih dužina vidljivog spektra [8, 10], predmeti pod takvim svetlom ne pokazuju jaku crvenu boju koja bi se inače videla da nema hromatske adaptacije [7]. Hromatska adaptacija nema trenutno dejstvo, već se stabilizuje nakon vremenskog intervala od približno jednog minuta (kada nije praćena promenom nivoa osvetljenosti) [7].

4.4. MERENJE RAZLIKE U BOJI

CIE 2000 (ΔE_{00}) predstavlja meru za izračunavanje razlike u boji koja se podudara sa ljudskom percepcijom u pogledu parametara svetline, tona i zasićenja testiranih boja [63-65]. To su takozvane napredne formule sa uvedenim faktorima ponderisanja, čiji je cilj da prilagode numeričku razliku prema razlikama u opažanjima prosečnog posmatrača zavisno od intenziteta boje i njenog položaja u prostoru boja [63,64,66-68].

Prag razlike u boji, koji će definisati prihvatljivost rezultata, može se posmatrati sa različitih gledišta. Vizuelno, manje razlike u boji obično su prirodnije da se detektuju u neutralnim bojama i svetlim, nezasićenim bojama, u poređenju sa tamnijim tonovima boje [70,71]. U grafičkoj industriji, merenja boja se oslanjaju na metodologiju instrumentalne analize gde se razlika u boji često koristi kao mera tačnosti i preciznosti reprodukcije. Odluka o nivou tačnosti se obično donosi na osnovu utvrđenog praga razlike u boji. Za proračun razlike u boji mogu se koristiti različite formule za izračunavanje boja, a obično je zasnovana u skladu sa oblašću primene i tehnikom štampe.

Za primenu u grafičkoj industriji najčešće se koriste formule CIELAB (ΔE_{76}) i CIE2000 (ΔE_{00}). U digitalnoj štampi, za bilo koji proračun razlike u boji preporučuje se upotreba napredne, „ponderisane“ formule, ΔE_{00} koja obezbeđuje bolju korelaciju između izmerenih i vizuelno uočenih razlika u boji [140]. Vrednost praga razlike u boji zavisiće i u od korišćenih formula za razliku u boji. U ofset štampi, standard ISO 12647-2:2013 [138] preporučuje tolerancije od $5 \Delta E_{76}$ za procesne boje cijan, magentu, žutu i crnu. Za perceptualne procene gornja granica je postavljena na $3.5 \Delta E_{00}$ za cijan, magentu, žutu i 5 za crnu [138]. U digitalnoj štampi, ink jet i elektrofotografiji ne postoji međunarodni standard koji je široko uspostavljen, ali prema *IDEAlliance Digital Press Certification Program-u*, predlaže se da maksimalna razlika u boji za svaku testiranu boju u odnosu na referentni uzorak treba da bude jednaka ili niža od $\Delta E_{00} = 5$ [139]. Imajući u vidu sve ovo gore navedeno, izračunate razlike u boji u ovoj disertaciji će se smatrati prihvatljivim ako nisu veće od $\Delta E_{00} = 5$.

CIE (ΔE_{00}) formula za predstavljanje razlike u boji zasnovana je na CIELAB prostoru boja. S obzirom na par boja označen sa L_1^*, a_1^*, b_1^* i L_2^*, a_2^*, b_2^* , razlika između njih obeležava se na sledeći način:

$$\Delta E_{00}(L_1^*, a_1^*, b_1^*; L_2^*, a_2^*, b_2^*) = \Delta E_{00} \quad (4-11)$$

Uzimajući u obzir dve CIELAB vrednosti boje i parametarske faktore kL, kC i kH, proces izračunavanja razlike u boji [72] je sažet u izrazima (4-12 – 4-32), grupisanim u tri glavna koraka.

1: Računanje parametara C_i', h_i' :

$$C_{i,ab}^* = \sqrt{(a_i^*)^2 + (b_i^*)^2}, \quad i = 1, 2 \quad (4-12)$$

$$\bar{C}_{ab}^* = \frac{C_{1,ab}^* + C_{2,ab}^*}{2} \quad (4-13)$$

$$G = 0.5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + 25}} \right) \quad (4-14)$$

$$a_i' = (1 + G)a_i^*, \quad i = 1, 2 \quad (4-15)$$

$$C_i' = \sqrt{(a_i')^2 + (b_i^*)^2}, \quad i = 1, 2 \quad (4-16)$$

$$h_i' = \begin{cases} 0 & b_i^* = a_i' = 0 \\ \tan^{-1}(b_i^*, a_i') & \text{u suprotnom} \end{cases}, \quad i = 1, 2 \quad (4-17)$$

2: Računanje parametara $\Delta L'$, $\Delta C'$, $\Delta H'$:

$$\Delta L' = L_2^* - L_1^* \quad (4-18)$$

$$\Delta C = C_2^* - C_1^* \quad (4-19)$$

$$\Delta h'_i = \begin{cases} 0 & C_1' C_2' = 0 \\ h'_2 - h'_1 & C_1' C_2' \neq 0; |h'_2 - h'_1| \leq 180^\circ \\ (h'_2 - h'_1) - 360 & C_1' C_2' \neq 0; (h'_2 - h'_1) > 180^\circ \\ (h'_2 - h'_1) + 360 & C_1' C_2' \neq 0; (h'_2 - h'_1) < -180^\circ \end{cases} \quad (4-20)$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right) \quad (4-21)$$

3: Računanje CIE 2000 razlika u boji (ΔE_{00}):

$$\bar{L}' = \frac{L_1^* + L_2^*}{2} \quad (4-22)$$

$$\bar{C}' = \frac{C_1^* + C_2^*}{2} \quad (4-23)$$

$$\bar{h}' = \begin{cases} \frac{h'_1 + h'_2}{2} & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ; C_1' C_2' \neq 0 \\ \frac{h'_1 + h'_2 + 360^\circ}{2} & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ; (h'_1 + h'_2) < 360^\circ; C_1' C_2' \neq 0 \\ \frac{h'_1 + h'_2 - 360^\circ}{2} & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ; (h'_1 + h'_2) \geq 360^\circ; C_1' C_2' \neq 0 \\ (h'_1 + h'_2) & C_1' C_2' = 0 \end{cases} \quad (4-24)$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{h}') + 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ) \quad (4-25)$$

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\frac{\bar{h}' - 275^\circ}{25}\right]^2\right\} \quad (4-26)$$

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25}} \quad (4-27)$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}} \quad (4-28)$$

$$S_C = 1 + 0.045\bar{C}' \quad (4-29)$$

$$S_H = 1 + 0.015C'T \quad (4-30)$$

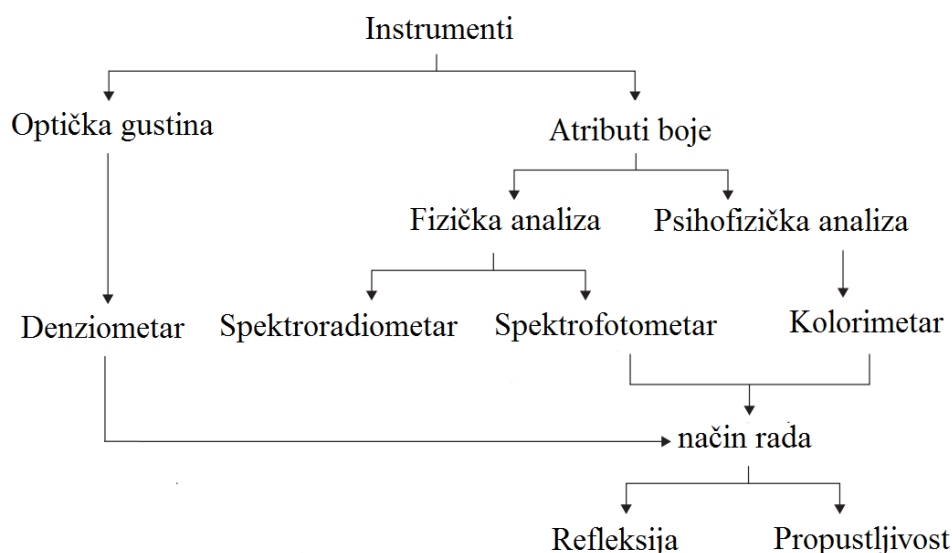
$$R_T = -\sin(2\Delta\theta) R_C \quad (4-31)$$

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2} + R_T + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right). \quad (4-32)$$

5. PREGLED STANDARDNIH METODA ODREĐIVANJA BOJE

Za razliku od subjektivnog opažanja koje nam govori da li je nešto svetlo plavo, tirkizno ili tamno zeleno, uređaji za određivanje boje treba da nam obezbede objektivne rezultate mereći relevantna optička svojstva uzoraka. U drugom poglavlju predložen je princip prema kome posmatrač opaža boju predmeta detektujući reflektovanu svetlost na mrežnjači oka. Percepcija boje zavisi od spektralnih karakteristika svetlosnog izvora, koja se potom modifikuju refleksijom od objekta. Rezultujuće svetlo stimuliše oko da generiše električne signale koji zatim putuju do mozga. Stoga se može zaključiti da opažena boja zavisi od spektralne raspodele snage svetlosnog izvora SPD, refleksije od objekta i spektralnog odziva oka.

Instrumenti za određivanje boje u ovoj disertaciji biće uopšteno klasifikovani u dve grupe. Prvoj grupi pripadaju denziometri, koji mere optičku gustinu, dok drugoj grupi pripadaju instrumenti dizajnirani za merenje fizičkih atributa kao što su intenzitet izvora svetlosti ili refleksije/propustljivosti objekta u zavisnosti od talasne dužine, ali i direktno psihofizičkih atributa, tj. korelata vizuelne percepcije. Kompletna podela ilustrovana je na slici 5-1.

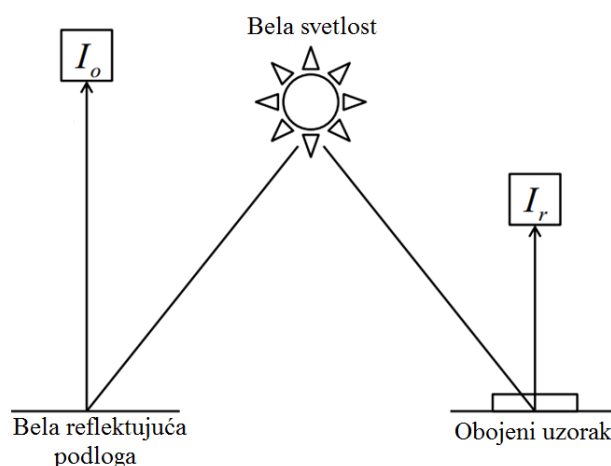


Slika 5-1. Klasifikacija instrumenata za određivanje boje prema principu rada

5.1. DENZIOMETRI

Denziometri se koriste pri proveri kvaliteta u štampi, za ispitivanje varijacija u tonu i optičkoj gustini štampanih uzoraka [141]. U zavisnosti od načina konstrukcije uređaja, denziometar može da meri faktor refleksije ili transmisije [142], upoređujući ga sa datim standardom kalibracije.

Princip određivanja optičke gustine dat je na slici 5-2. Intenzitet I_o predstavlja odbijenu svetlost od apsolutno bele podloge, dok I_r predstavlja intenzitet svetlosti reflektovane od ispitivanog uzorka.



Slika 5-2. Princip određivanja optičke gustine

Optička gustina štampanog uzorka D (eng. *Density*) određuje se kao logaritamska vrednost neprozirnosti O (eng. *Opacity*) [142]:

$$D = \log(O) \quad (5-1)$$

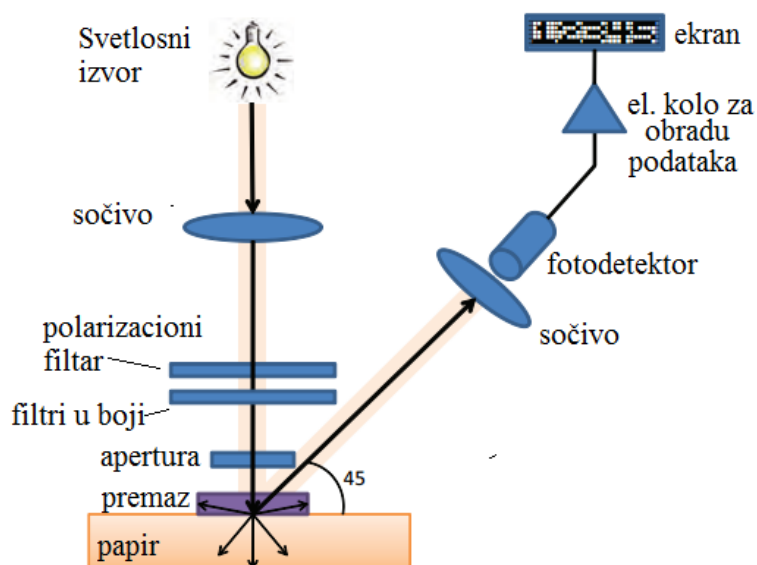
pri čemu je neprozirnost definisana kao recipročna vrednost reflektovane svetlosti R :

$$O = \frac{1}{R} \quad (5-2)$$

Reflektovana svetlost se dalje izračunava kao količnik pomenutih reflektovanih intenziteta:

$$R = \frac{I_r}{I_o} \quad (5-3)$$

Refleksioni denziometar dodeljuje precizne numeričke vrednosti varijacijama optičke gustine procesnih boja u digitalnoj štampi kvantifikujući količinu svetlosti koja se reflektuje od površine štampanog uzorka. Ovaj parametar se izražava kao logaritamski broj [142]. Denziometar se ne može koristiti za merenje razlike u boji. Merenja se odnose na procenu kvaliteta u štampi, prvenstveno cijan, magente, žute i crne boje. Za razliku od ostalih instrumenata, denziometri nemaju standardni izvor svetla. Bela svetlost denziometra sastoji se od tri osnovne komponente svetlosti, crvene, zelene i plave (realizovano najčešće LED izvorom), čije su proporcije približno jednake. Princip rada denziometra prikazan je na slici 5-3.



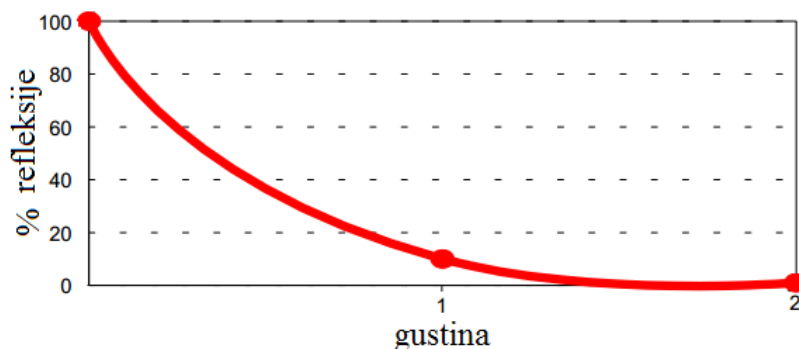
Slika 5-3. Princip rada refleksionog denziometra [142]

Bela svetlost prolazi najpre kroz sočivo, odakle se usmerava na filter u boji koji će detaljnije biti opisan u nastavku, a zatim pada na površinu štampanog uzorka. U zavisnosti od debljine filma i boje, deo svetlosti se apsorbuje. Ostatak svetlosti odbija se od površine uzorka i pada na sočivo koje usmerava reflektovanu svetlost ka svetlosnom prijemniku - fotodiodi. Količina svetlosti koju primi fotodioda konvertuje se u električni signal, koji se zatim upoređuje referentnom vrednošću dobijenom refleksijom na beloj podlozi [142]. Rezultat merenja predstavlja osnovu za izračunavanje količine nanosa boje u digitalnoj štampi.

5.1.1. EFEKAT FILTRIRANJA SVETLOSTI KOD DENZIOMETRA

Odštampana boja koja se podvrgava ispitivanju (npr. cijan boja) utiče na svetlost na sličan način kao i filter u boji. Filtri u boji imaju svojstvo da propuštaju sopstvenu boju i apsorbuju ili blokiraju svetlost drugih boja. Mešavina plave i zelene svetlosti proizvodiće cijan boju, i te svetlosti mogu nesmetano da prođu kroz film boje i dospeju do površine belog papira pre nego što se u većoj meri odbiju. Sa druge strane, crvenu svetlost apsorbuje film cijan boje u većoj meri. Shodno tome, u zavisnosti od pigmenta i debljine filma boje, reflektuje se samo relativno mali udeo crvenog svetla. Ovo reflektovano svetlo ljudsko oko opaža kao cijan boju, koja se sastoji većinski od plave i zelene komponente.

Međutim, ukoliko se meri gustina boje, značajan je samo ovaj manji reflektovani deo crvene svetlosti, na koji veoma utiče debljina filma boje. Iz tog razloga, crveni filter koji zadržava sadržaj plave i zelene svetlosti se umeće na putanju svetlosti i to omogućava da samo sadržaj crvene svetlosti relevantan za merenje cijan uzorka dopre do fotodiode. Zbog toga se ostale boje svetlosti moraju filtrirati da bi se postiglo tačno merenje na uzorku. Izbor filtera koji se koriste mora biti tačno poznat prilikom saopštavanja rezultata denziometra, jer u suprotnom će doći do greške u očitanim numeričkim vrednostima. Vrednosti gustine boje koje prikazuju denziometri uvek su izraženi kao logaritamski brojevi. Sa povećanjem logaritamske vrednosti gustine, količina reflektovane svetlosti se smanjuje. Na primer, gustina od 0.00 na ekranu denziometra ukazuje da se reflektovalo 100% svetlosti koja je pala na uzorak. Međutim, gustina od 1.00 ukazuje da se samo 10% upadne svetlosti reflektovalo. Ovo je grafički ilustrovano na slici 5-4.

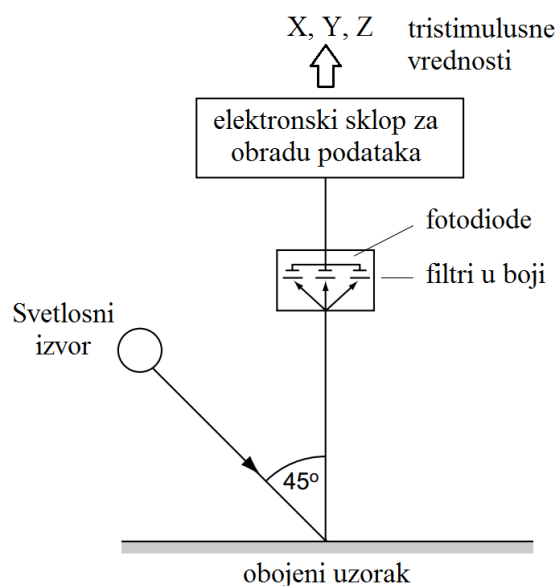


Slika 5-4. Grafički prikaz rezultata dobijenih pomoću denziometra

Ovakav način za adaptaciju merenja gustine je odabran da bi se uređaj približio percepciji ljudskog vida, budući da oko detektuje optičke nadražaje na logaritamskoj skali. Na primer, ako posmatrač gleda u predmet koji je osvetljen jednom fluorescentnom sijalicom, on zapaža svetlost određenog intenziteta. Međutim, ako se pored postojećeg svetlosnog izvora doda još jedna fluorescentna sijalica iste snage zračenja, iako sada dvostruka količina svetlosne energije pada na predmet, posmatrač neće imati utisak da se nivo energije udvostručio. Dodavanjem još jednog identičnog izvora svetlosti, posmatrač će to da opazi još u manjem stepenu. Ove logaritamske razlike su veoma važne i za razumevanje prilikom mešanja boje u digitalnoj štampi. Količina boje takođe mora da se povećava prema logaritamskoj skali u svrhu postizanja veće gustine.

5.2. TRISTIMULUSNI KOLORIMETAR

Na sličan način kao što ljudsko oko detektuje različite talasne dužine pomoću receptora čepića, kolorimetar poseduje fotodetektore na osnovu kojih se formiraju tristimulusne vrednosti. Ovi fotodetektori su prekriveni pažljivo dizajniranim filtrima u boji tako da rezultujuća spektralna osetljivost (u kombinaciji sa SPD svetlosnog izvora instrumenta) blisko odgovara funkcijama odziva standardnog posmatrača u kombinaciji sa SPD specificiranog osvetljenja [73-75]. Uzorci koji se mere, kao i odgovarajući kalibracioni standardni uzorak, osvetljavaju se definisanim standardnim izvorom svetlosti, a odbijena ili propuštena svetlost (u zavisnosti da li se radi o refleksionom ili transmissionom tipu kolorimetra) pada na filtrirane fotodetektore koji odgovaraju CIE funkcijama usaglašenog stimulusa definisanim za standardnog posmatrača. Srazmere uzorka i kalibracionih podataka koriste se za računanje tristimulusnih vrednosti X, Y i Z. Osnovni princip rada kolorimetra ilustrovan je na slici 5-5.

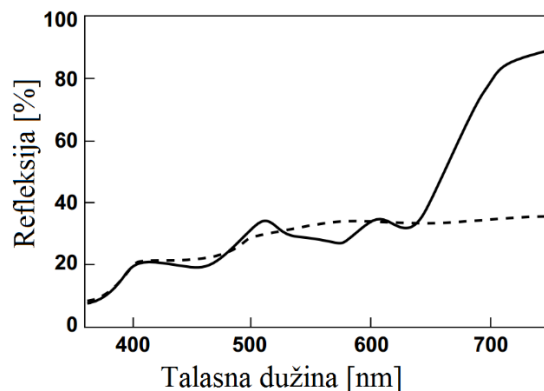


Slika 5-5. Princip rada kolorimetra

Iako nudi jeftino rešenje za određivanje boje, opisana metoda tristimulusnog kolorimetra ima ograničenu tačnost, zbog toga što je teško fabrikovati filtre koji tačno odgovaraju CIE funkcijama odziva standardnog posmatrača [10]. Obično ova spektralna neusklađenost daje dominantnu mernu nesigurnost u tristimulusnom merenju boje [76]. Pored toga, njihovu apsolutnu tačnost ograničava i praktična realizacija izvora svetlosti. Dalje, izmerene kolorimetrijske vrednosti važe samo za dato standardno osvetljenje, koje predstavlja svetlosni izvor instrumenta (najčešće izvor A, D50 ili D65), ali je često poželjno znati tristimulusne vrednosti ili razliku u boji za nekoliko osvetljenja [8]. Ovaj nedostatak kolorimetra će biti ilustrovan u sledećem primeru:

Pretpostavimo da imamo dva uzorka boje, sa različitim SPD, kao što je prikazano na slici 5-6. Za većinu posmatrača ova dva uzorka mogu izgledati gotovo identično pri veštačkom dnevnom svetlu. Međutim, ako se uzorci osvetle volframovom sijalicom, može se desiti da uzorak čija je refleksija označena punom linijom na slici 5-6, sada poprimi braon boju, a da boja čija je refleksija označena isprekidanom linijom i dalje ostane nepromenjena. Braon boja će se pojaviti zbog preovlađujućeg narandžastog i crvenog svetla u osvetljenju i visoke reflektivnosti osvetljenog uzorka u ovom delu spektra. Ovaj problem podudaranja boja među parovima uzoraka na promenljivom svetlu poznat je kao metamerizam [8].

Drugim rečima, ova pojava se javlja kada se dva uzorka približno, mada ne i potpuno spektralno podudaraju, dok njihove tristimulusne vrednosti dosta odstupaju jedne od drugih pod različitim svetlosnim izvorima.



Slika 5-6. Krive spektralne refleksije metamernog para boja [8]

Stoga, kolorimetri ne mogu proveriti da li se nijanse dva različito obojena uzorka vizuelno poklapaju pod različitim svetlosnim izvorima, i ovo ograničava klasu tačnosti kolorimetra. Metamerizam je uzrokovan različitim SPD krivama dvaju izvora koji povećavaju ili smanjuju razlike u refleksiji.

U primenama kontrole kvaliteta boje uzoraka gde prednost ima jednostavnost instrumenta, za utvrđivanje da li su uzorci u okvirima određene tolerancije, tristimulusni kolorimetar može da predstavlja zadovoljavajuće rešenje.

5.3. SPEKTROFOTOMETAR

Spektrofotometar je uređaj koji se koristi za precizno određivanje boje, a mogao bi se podeliti na dva bloka. Prvom bloku pripadaju standardizovani izvor svetlosti i monohromator. Ulogu monohromatora najčešće ima difrakciona rešetka koja se postavlja na izvor svetlosti i ona omogućava merenje reflektujuće (ili propuštajuće) monohromatske svetlosti. Drugi sklop čine fotodetektor i prateće elektronsko kolo za merenje intenziteta svetlosti na diskretnim talasnim dužinama [61]. Tačnost ovih instrumenata zavisi najviše od spektralnog propusnog opsega (talasne dužine u pojedinačnim tačkama spektra na kojima se vrši merenje). Strmi nagibi na spektrofotometrijskim krivama zahtevaju spektrofotometre sa užim propusnim opsegom – tipično oko 5 nm. Jednostavniji instrumenti mogu imati propusni opseg 10-20 nm, a složeniji 1 nm. Rezultati koje daje spektrofotometar se odnose na boju objekta, a obično se predstavljaju kao krive u kojima se procenat refleksije (ili propusnosti) izražava u odnosu na talasnu dužinu u pravilnim intervalima ograničenim propusnim opsegom [8,61]. Dakle, opažena boja ispitivanog objekta u ovom slučaju određena je relativnim količinama svetlosti koje se reflektuju u vidljivom opsegu, tipično 400-700 nm.

Spektralna refleksija definiše se kao [61]:

$$\rho(\lambda) = \frac{P_{\lambda}}{P_{0\lambda}} \quad (5-4)$$

pri čemu je P_{λ} spektralna koncentracija snage zračenja koju reflektuje medijum, a $P_{0\lambda}$ je spektralna koncentracija snage zračenja koja pada na medijum.

Budući da je apsolutna refleksija manje pouzdana za merenje, CIE je definisala pojam spektralne refleksije R_{λ} kao odnos svetlosnog fluksa koji se reflektuje od uzorka i svetlosnog fluksa koji se reflektuje od savršenog izotropnog reflektujućeg difuzora identično osvetljenog i posmatranog pomoću instrumenta na datoj talasnoj dužini [61].

5.4. SPEKTRORADIOMETAR

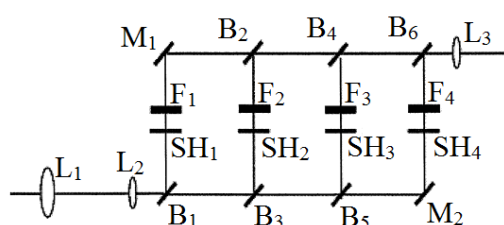
Za emitujuće (svetleće) boje, kao što su izvori svetlosti ili televizijski i video prikazi, merenje spektralne snage vrši se spektroradiometrom. Za razliku od spektrofotometra, gde je izvor svetlosti ugrađen u instrument i zaštićen od spoljnih uticaja, kod spektroradiometra se mogu prihvatati svetlosti iz spoljnih izvora. Ovakav uređaj je u stanju da meri radiometrijske količine izvora svetlosti u zavisnosti od talasne dužine. Merenje uključuje poređenje test izvora sa referentnim izvorom poznate SPD. Preporučeni referentni izvori ovakvih uređaja su standardizovane sijalice sa volframovim vlaknima.

6. PREGLED NAUČNIH RADOVA U OBLASTI KOLORIMETRIJSKIH METODA

Kolorimetrija ima važnu ulogu u raznim granama industrije, što se ogleda kroz razne primene, kao što su primena za identifikaciju ključnih parametara u farmaceutskim procesima [77-79], primena za robotsku viziju [80], primena za detekciju podudaranja boja u tekstilu [81], primena za kalibraciju štampača u boji [82] itd. Shodno tome, istraživanje na polju kolorimetrijskih metoda postaje sve aktuelnije. U naučnoj literaturi se mogu pronaći različite metode koje pokrivaju širok spektar primene, od rutinskih merenja kontrole kvaliteta [83-85] do preciznih refleksionih metoda [86,94].

6.1. KOLORIMETRIJSKA I SPEKTROFOTOMETRIJSKA REŠENJA NA BAZI TEČNIH KRISTALA

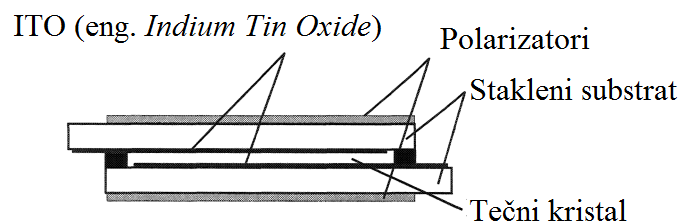
Interesantne merne metode predstavljene su u radu [87]. Jedno od rešenja bio je kolorimetar na bazi tečnih kristala. Ovaj uređaj je veoma sličan konvencionalnom tristimulusnom kolorimetru sa tri filtra [88], s tom razlikom što su ovde korišćena četiri specijalno dizajnirana filtra. Pored toga, korišćena je samo jedna fotodioda te je izbegnuta potreba za usklađivanjem spektralnih svojstava koja bi bila potrebna u slučaju pojedinačnih fotodetektora. Kao izvor svetlosti uređaj koristi halogenu volfram sijalicu sa poznatim spektralnim zračenjem. Postavka ovog kolorimetra ilustrovana je na slici 6-1. Upadna svetlost prikuplja se sistemom sočiva koje čine L_1 i L_2 , dok su razdvajajući snopova svetlosti B_1 - B_6 i ogledala M_1 , M_2 iskorišćeni da razdvoje i usmere svetlost na četiri putanje, na kojima su postavljeni prekidači od ćelija tečnog kristala (SH_1 - SH_4) i filteri (F_1 - F_4).



Slika 6-1. Kolorimetar na bazi tečnih kristala [87]

Računarski kontrolisana elektronska oprema upravlja prekidačima i obezbeđuje da u određenom trenutku bude aktivan samo jedan filtrirani snop svetlosti, kada se vrše očitavanja i konverzije električnih signala u koordinate boje. Sistem radi u realnom vremenu i za jedan ciklus očitavanja potrebno je 300 ms.

Drugo rešenje u radu [87] prikazuje interferometar zasnovan na tečnim kristalima. Ćelija sadrži sloj tečnog kristala debljine nekoliko mikrona koji je utisnut u stakleni substrat. Na tečni kristal koji ima dva različita indeksa prelamanja se deluje primenom električnog polja generisanim prozirnim ITO (eng. *Indium-Tin-Oxide*) presvlakama (slika 6-2), a sama ćelija se nalazi između dva polarizatora.



Slika 6-2. Čelija tečnog kristala [87]

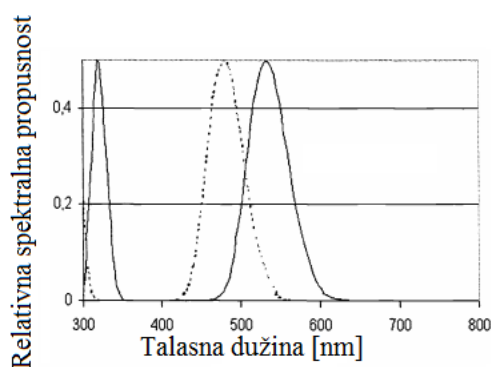
Kada nema prisustva napona, sloj tečnog kristala deluje kao usporivač faze na upadnu monohromatsku svetlost talasne dužine λ , čije je usporavanje uslovljeno debljinom ćelije d i parametrom dvostrukog prelamanja Δn [87]:

$$R = 2\pi \cdot d\Delta n/\lambda \quad (6-1)$$

Prenosna funkcija ovog sistema nepolarizovane monohromatske svetlosti [87] data je sa:

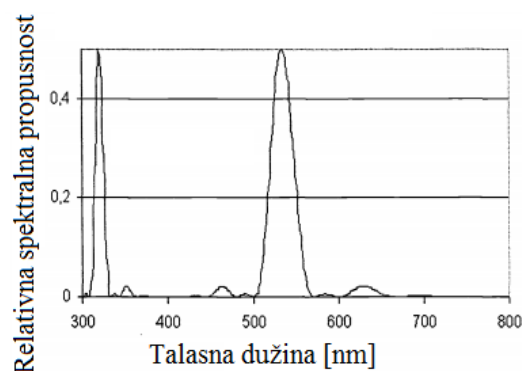
$$T = 0.5\sin^2 R \quad (6-2)$$

Prenosna funkcija će imati nultu vrednost za vrednosti R jednake umnošku π , a maksimalne vrednosti kada je $R=m+0.5$, pri čemu je m celobrojna vrednost. Zahvaljujući ovome sistem deluje kao monohromator. Za korišćeni tečni kristal MLC6080 [87] za ćeliju debljine $d=2 \mu\text{m}$ pojavljuju se pikovi (vršne vrednosti talasnih dužina) na 325 nm i 533 nm. Međutim, sa ovakvom konfiguracijom ovi pikovi su veoma široki, pa je primena opisanog sistema veoma ograničena. Efekat dvostrukog prelamanja bilo kog tečnog kristala može se lako podešavati malim naizmeničnim naponima, jer primenjeno električno polje ometa orijentaciju tečnog kristala u ćeliji. Obično se u tu svrhu koriste četvrtke frekvencije od nekoliko kHz. Primena električnog napona četvrtke sa amplitudom 0.8 V dovodi do pomeranja vršne vrednosti talasne dužine sa 533 nm na 470 nm, kao što je prikazano na slici 6-3.



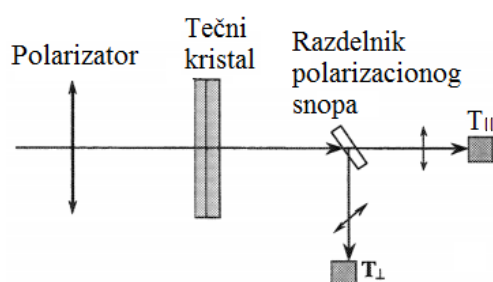
Slika 6-3. Prenosna funkcija [87]

Ipak, efikasno rešenje ovog problema može se postići serijskim vezivanjem više ćelija sa različitom debljinom, kao što je prikazano na slici 6-4. U ovakvoj postavci deblje ćelije su odgovorne za uže pikove, dok tanje ćelije gotovo potpuno odstranjuju neželjene pikove uzrokovane debljim ćelijama.



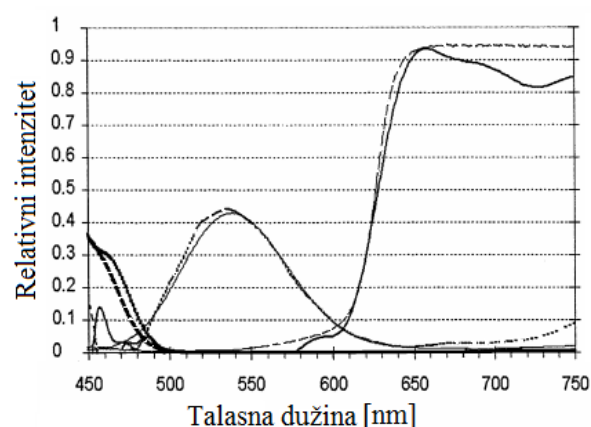
Slika 6-4. Prenosna funkcija gde je korišćeno 5 ćelija različite debljine vezanih serijski [87]

Detalji oko podešavanja monohromatora duž vidljivog spektra mogu se pronaći u radu [87]. Treće rešenje u istraživanju [87] predstavlja Furijeov interferometar baziran na tečnim kristalima. Merna postavka interferometra ilustrovana je na slici 6-5. Dobra osobina ovako koncipirane spektrofotometrijske metode jeste to što ne zahteva serijsko vezivanje više ćelija tečnog kristala.



Slika 6-5. Furijeov interferometar [87]

Na slici 6-6 dato je poređenje spektra za crvenu, zelenu i plavu boju, snimljenog komercijalnim spektrofotometrom visoke rezolucije (1 nm) i spektra rekonstruisanog Furijeovim interferometrom u radu [87].



Slika 6-6. Uporedni spektri snimljeni komercijalnim spektrofotometrom i Furijeovim interferometrom [87]

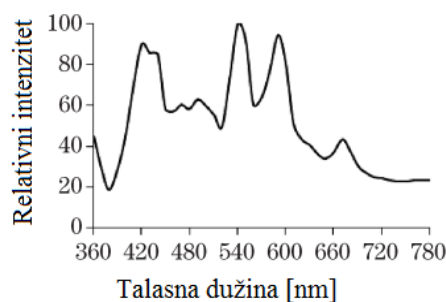
Punom linijom na slici 6-6 su predstavljeni spektri koji su snimljeni komercijalnim spektrofotometrom, dok su isprekidanom linijom predstavljeni spektri zabeleženi mernom postavkom Furijeovog interferometra. Zabeležena su veoma dobra poklapanja rezultata.

6.2. KOLORIMETRI BAZIRANI NA FOTOSTRUJAMA LED SVETLOSNIH IZVORA

Nova optička platforma za kolorimetrijsku analizu bazirana na LED izvorima kao detektorima razvijena je u [89]. Sistem se sastoji od dva LED izvora, od kojih je jedan u ulozi izvora, a drugi u ulozi detektora. LED koja emituje svetlost je polarisana direktno, dok je LED detektor polarisan inverzno. Umesto direktnog merenja fotostruje koje su predstavljene u [90,91], ovde su autori koristili jednostavno tajmersko kolo za merenje vremena potrebnog fotostruji koju generiše direktno polarisani LED izvor, da bi se inverzno polarisani LED ispraznio sa 5 V (log. 1) na 1.7 V (log. 0). Na ovaj način ostvareno je direktno očitavanje izlaznog signala bez upotrebe A/D konvertora ili operacionog pojačavača. U radu [92] predstavljen je kolorimetar niske cene, realizovan pomoću LED izvora, a koristi veštačke neuronske mreže ANN (eng. *Artificial Neural Network*) za određivanje kolorimetrijskih vrednosti boja. Bela svetlost iskorišćena je za osvetljavanje uzorka, a reflektujuća svetlost odbijena od ispitivanog uzorka osvetljava tri LED izvora čije talasne dužine odgovaraju monohromatskoj crvenoj, zelenoj i plavoj svetlosti. Na osnovu ovih reflektovanih svetlosnih snopova generišu se fotostruje. Autori su predložili različite zanimljive tehnike za konvertovanje ovih fotostruja u stvarne tristimulusne vrednosti boja.

6.3. KOLORIMETAR SA INTEGRIRAJUĆOM SFEROM

Kolorimetar sa integrirajućom sferom realizovan pomoću složenog svetlosnog LED izvora umesto rešenja sa tradicionalnom sijalicom volframove niti dizajniran je u radu [93]. Budući da su silicijumski detektori najčešće korišćeni senzori kolorimetara, treba imati na umu da oni imaju loš spektralni odziv na kratkim talasnim dužinama. Kada se kao svetlosni izvor koriste volfram-halogene sijalice, koje imaju nizak spektralni odziv u opsegu kratkih talasnih dužina, tristimulusna vrednost Z može biti značajno promenjena uticajem šuma. Ovo takođe loše utiče i na ponovljivost kolorimetra. Ksenonske lampe imaju dovoljan intenzitet spektralne snage zračenja duž čitavog vidljivog spektra, kao što je prikazano na slici 6-7.



Slika 6-7. SPD ksenonske lampe [93]

Međutim, kriva ima naglih prevoja, što znači da je dizajniranje obojenih filtara veoma komplikovano, i odrazilo bi se na tačnost ovako dizajniranog kolorimetra. Kako bi se postiglo tačnije merenje, prvenstveno na niskim talasnim dužinama, ali i kako bi izvor uređaja imao ujednačeniju spektralnu raspodelu snage zračenja, u radu [93] je predloženo rešenje sa integrirajućom sferom u kome se meri osvetljenje i koriguje spektralni odziv instrumenta modifikovanjem zračećeg spektra složenog LED izvora. Obojeni filtri nisu korišćeni u predstavljenom rešenju, već samo širokopojasni silicijumski fotodetektor.

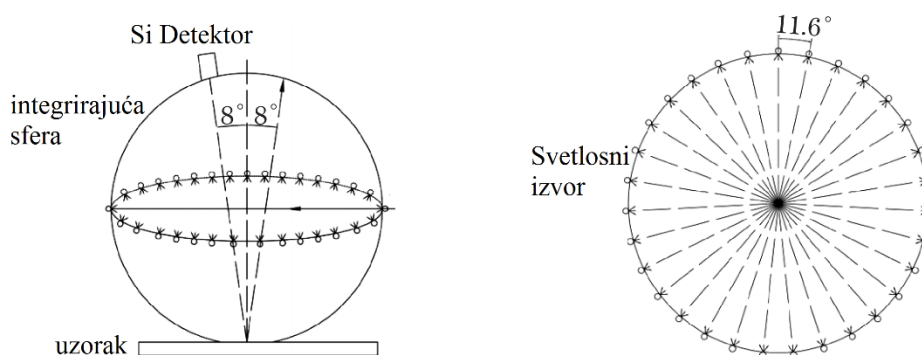
Implementirani složeni LED svetlosni izvor sastoji se od 31 LED izvora. Odgovarajućom strujnom pobudom, dizajnirana su tri različita složena svetlosna izvora. Više različitih LED

izvora omogućava veću pokrivenost spektra, a samim tim povećava tačnost instrumenta. Međutim, zbog povećanja troškova izrade i složenosti upravljačkog kola, kao i smanjenja brzine odziva, u radu [93] pokrivenost spektra vršnim talasnim dužinama je u okviru 10-15 nm rastojanja između dve susedne LED. Baziran na principu superpozicije, odgovarajući spektralni model složenog LED svetlosnog izvora opisan je kao [93]:

$$L_i(\lambda) = \sum_{j=1}^n S_j(\lambda) \times K_{ij} \quad (6-3)$$

pri čemu i označava tip LED izvora, X,Y, Z; K_{ij} je strujni koeficijent j-tog LED izvora; $S_j(\lambda)$ je SPD j-te LED; n je ukupan broj LED izvora.

Na osnovu pripremljenog složenog LED svetlosnog izvora, naknadno je projektovan integrirajući kolorimetar, koji je ilustrovan na slici 6-8.

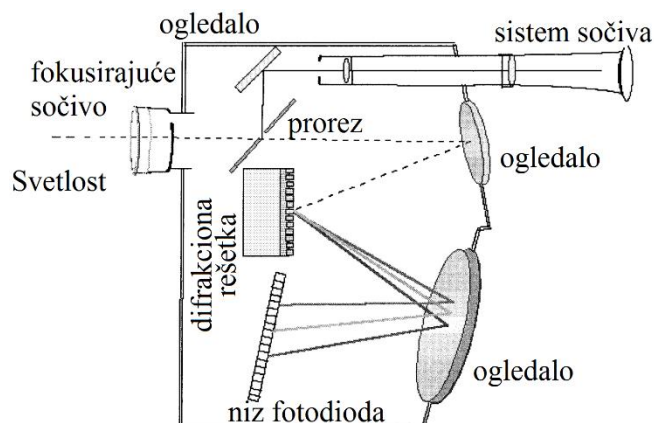


Slika 6-8. Merna struktura (levo) i raspored LED svetlosnih izvora (desno) [93]

Na površini integrirajuće sfere je ravnomerno izbušen 31 prorez, kroz koji ulazi svetlost sa pojedinačnih LED izvora. Senzor se nalazi na 8° od normale uzorka, na unutrašnjoj površini sfere. Svetlost ovako koncipiranog izvora najpre osvetljava unutrašnju površinu integrirajuće sfere i pruža difuzno svetlo uzorku, a zatim senzor prikuplja svetlosni signal i prosleđuje ga na računar radi dalje obrade u svrhu izračunavanja tristimulusnih vrednosti. Tristimulusne vrednosti izmerenih uzoraka dobijene ovakvim uređajem poređene su sa referentnim tristimulusnim vrednostima dobijenim pomoću standardnog *Konica Minolta* spektrofotometra oznake *CM-700D*. Ovaj referentni spektrofotometar meri reflektujući spektar i obezbeđuje tristimulusne vrednosti uzoraka za standardom definisano osvetljenje. Štampani uzorci su dobijeni digitalnom štampom i predstavljaju *224 Pantone-C* kartu boja. Rezultati koji su postignuti zadovoljavaju standarde kolorimetra prve klase.

6.4. PRENOSIVI SPEKTROFOTOMETAR

U radu [86] predstavljen je prenosivi spektrofotometar. Optički mehanizam koji je prikazan na slici 6-9 sastoji se od difrakcione rešetke koja razlaže upadnu svetlost sa izvora na njene monohromatske komponente na predajnoj strani uređaja i niza fotodetektora na prijemnoj strani uređaja. Fotodetektor generiše serije signala u funkciji očitog svetlosnog intenziteta koje se dalje transformišu u digitalne vrednosti. Ugrađeni elektronski sklop unutar uređaja vrši proračune nad ovim podacima i obezbeđuje podatke o spektralnom odzivu i tristimulusnim vrednostima boje. Predloženi spektrofotometar obezbeđuje merenje intenziteta na talasnim dužinama u pravilnim intervalima od po 10 nm u opsegu 380 - 760 nm.

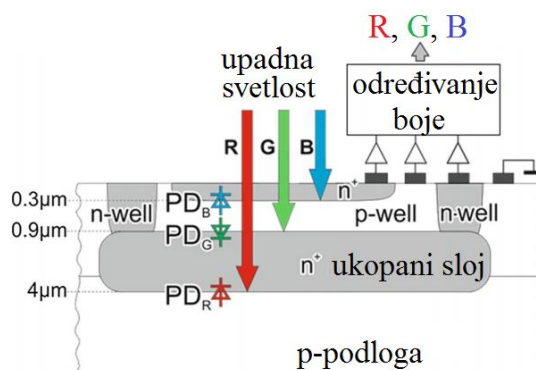


Slika 6-9. Optička šema predloženog spektrofotometra u radu [86]

Emitujući, reflektujući ili transmisioni svetlosni snop mernog objekta se kroz sistem sočiva i ogledalo fokusira na rupičasti prorez, a zatim se usmerava na konkavno ogledalo. Nakon prolaska kroz ogledalo, svetlost dospeva na difrakcionu rešetku, koja razlaže upadni snop na zrake u funkciji talasne dužine. Ovako razloženi zraci nakon prolaska kroz još jedno konkavno ogledalo padaju na niz fotodioda (HAMAMATSU S3924- 512Q) [86]. Dobijeni rezultati upoređivani su sa sličnim komercijalnim uređajem, i veoma dobro slaganje rezultata je postignuto.

6.5. REŠENJA SA PRIMENJENIM KOMERCIJALNIM SENZORIMA BOJE

U radu [95] predstavljena je metoda određivanja boje korišćenjem jeftinog refleksionog komercijalno dostupnog senzora boje TCS230. Na digitalnim izlazima ovog senzora generišu se impulsi čije su frekvencije proporcionalne intenzitetima upadne svetlosti. Senzor poseduje tri nezavisna izlazna signala sa optimizovanim spektralnim odzivom koji omogućavaju razlikovanje crvene, zelene i plave komponente svetlosti. Na slici 6-10 je ilustrovana struktura frekvencijski modulisanog refleksionog senzora boje TCS230.



Slika 6-10. Struktura refleksionog optičkog senzora boje TCS230 [95]

TCS230 senzor sastoji se od fotodioda sa visokim odzivom koje prihvataju upadnu svetlost, a ispred kojih se nalaze filtri sa odgovarajućom propusnošću [95,96]. U ovakvoj konfiguraciji

senzor ima konstantnu osetljivost na svetlost u širokom delu vidljivog spektra, dok osetljivost boje diktiraju filtri postavljeni na vrhu senzora.

Dubina do koje svetlost različitih talasnih dužina prodire unutar poluprovodničke strukture senzora zavisi od koeficijenta apsorpcije. Plava svetlost talasne dužine oko 400 nm apsorbuje se u tankom sloju na 0.3 μm od površine poluprovodnika, dok crvena svetlost talasne dužine oko 650 nm prodire do 4 μm [97], što se može videti na slici 6-10.

Određivanje boje pomoću ovog senzora podrazumeva određivanje količine svetlosnog fluksa koji odgovara svakoj od tri primarne boje. Budući da se boja svetlosti može smatrati linearnom kombinacijom crvene, zelene i plave komponente, ovde se odziv dobija merenjem fotostruja primarnog monohromatskog intenziteta svetlosti [95-96].

Ukupna fotostruja generisana refleksijom od predmeta čija se boja određuje može se izraziti kao [95]:

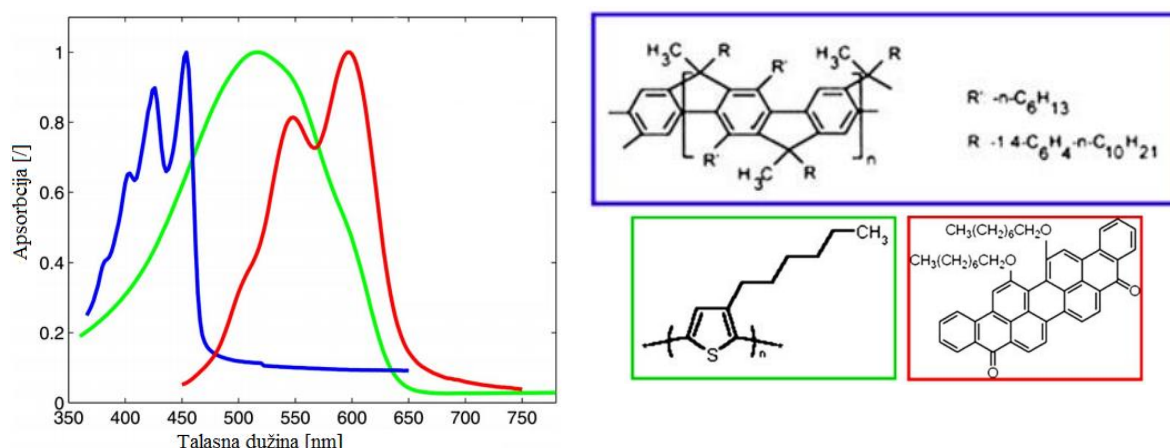
$$I_F = Rc_R + Gc_G + Bc_B \quad (6-4)$$

pri čemu koeficijenti c_R , c_G i c_B predstavljaju optičku snagu tri primarne boje koje sačinjavaju upadnu svetlost. Stoga su u radu [95] predloženi koeficijenti koji najbolje odgovaraju izlaznim frekvencijama izmerenih podataka. Autori su u okviru svojih eksperimenata razvili algoritam za optimizaciju procene i pretvaranje očitanih podataka u tristimulusne vrednosti CIE XYZ prostora boja.

Međutim, s obzirom na to da mogu postojati različite SPD koje se opisuju istim hromatskim koordinatama, ovakav senzor, kao i slični senzori na bazi komercijalno dostupnih jeftinih optičkih senzora predstavljenih u radovima [98-101] imaju limitiranu primenu zbog ograničene tačnosti korišćene metode.

6.6. TRISTIMULUSNI KOLORIMETAR SA SPECIJALNO DIZAJNIRANIM FOTODETEKTORIMA

U radu [102] razvijen je specifičan tristimulusni kolorimetar na bazi organskih fotodetektora. Ovakvi fotodetektori sastoje se od fotodioda zasnovanih na tri različita organska poluprovodnika, pažljivo odabranih da obezbede spektre koji su veoma nalik funkcijama CMF definisanih za standardnog posmatrača CIE1931. Ovakva prilagodljivost je karakteristična za organske poluprovodnike. Na ovaj način izbegnuta je potreba za korišćenjem bilo kakvih filtriranja ispred fotodetektora, a efikasnost svake diode je optimizovana. U svrhu adaptiranja fotodetektora, odabrana su sledeća tri materijala [102]: *methylsubstituted ladder-type parapolyphenylene*, *violanthrone 16,17-bis (octyloxy) anthra[9,1,2-cde-] benzo [rst]pentaphene-5,10-dione*, i *regioregular poly (3-hexylthiophene-2,5-diyl)* za $z(\lambda)$, $y(\lambda)$ i $x(\lambda)$ CMF krive. Na slici 6-11 prikazani su apsorpcioni spektri (levo) i hemijske strukture (desno) za tri selektovana materijala od kojih je sačinjen fotodetektor [102].



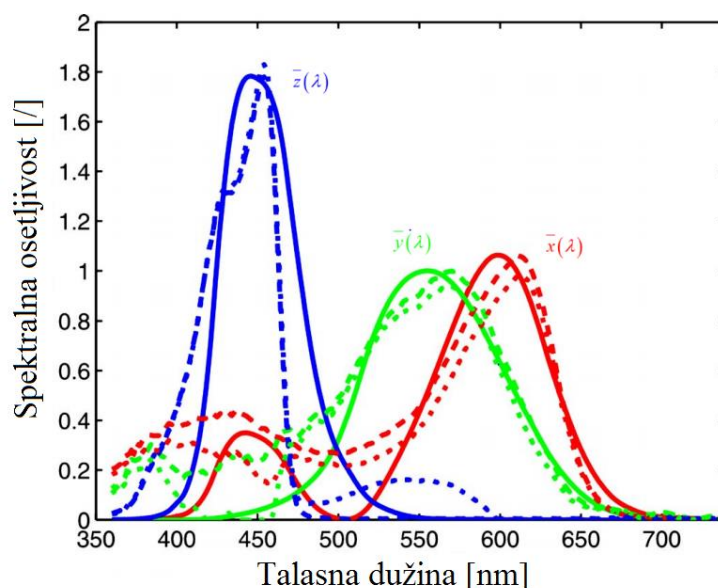
Slika 6-11. [102]

a) ApSORBcioni spektri tri selektovana materijala

b) njihova hemijska struktura

Selektovani materijali su: *Methyl-substituted Ladder-type Para-PolyPhenylene* (MeLPPP) za kratke talasne dužine označene plavom krivom, *regioregular poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)* za srednje talasne dužine označene zelenom krivom i *violanthrone 16,17-bis(octyloxy)anthra[9,1,2-cde-] benzo[rst]pentaphene-5,10-dione* za visoke talasne dužine označene crvenom krivom.

Na slici 6-12 prikazani su uporedno spektralni odzivi koje su snimili autori u radu [102] i funkcije odziva standardnog posmatrača $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ i $\bar{x}(\lambda)$ definisanih prema CIE1931.



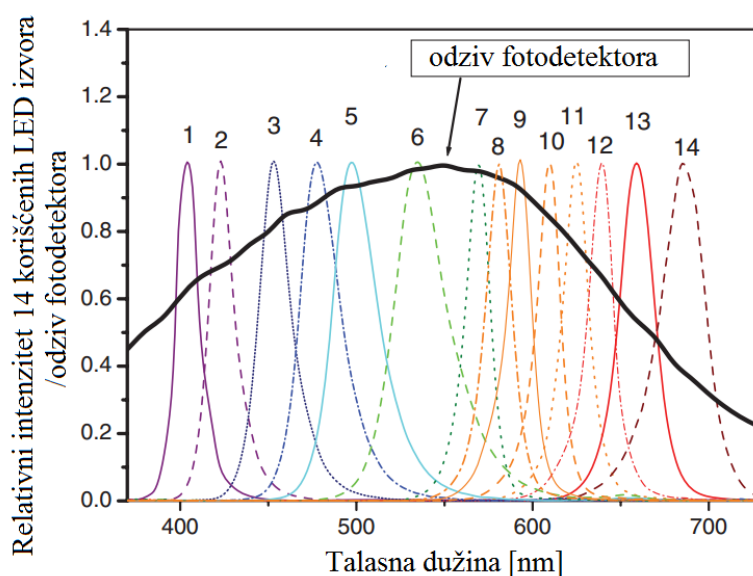
Slika 6-12. Spektri fotostruja tri organske fotodiode u poređenju sa CIE1931 $\bar{z}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ i $\bar{x}(\lambda)$ CMF funkcijama [102]

Može se primetiti dobro podudaranje kako vršnih vrednosti tako i širine spektralnih linija. Takođe, autori su uspeali da u određenoj meri reprodukuju i sekundarni maksimum za odziva standardnog posmatrača $\bar{x}(\lambda)$, i na ovaj način opravdali metodu bez korišćenja optičkih filtara. Metodom najmanjih kvadrata određeni su koeficijenti matrice koja omogućava prelazak sa eksperimentalnih krivih spektralne osetljivosti na skup krivih sa minimalnim odstupanjem od CMF krivih.

6.7. SPEKTROFOTOMETAR NA BAZI VIŠE LED IZVORA

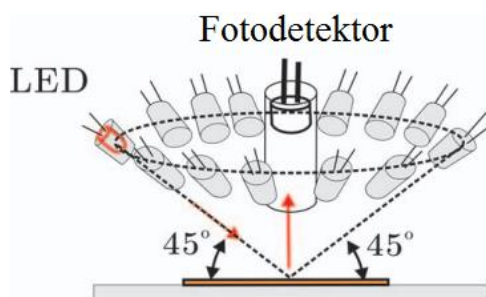
Daleko najčešći tip detektora koji se koristi u senzorskim sistemima zasnovanim na LED izvorima je fotodioda [103-108]. U radu [109] predstavljen je algoritam za rekonstrukciju spektralne refleksije prilikom korišćenja više različitih LED izvora. Reflektovani spektar sačinjavaju diskretne vrednosti refleksija izmerenih fotodiodom, nad kojima je primenjen algoritam u svrhu estimacije nepoznatog dela spektra. Predloženi algoritam estimira spektralnu refleksiju linearnom kombinacijom funkcija proizvoda odziva detektora i spektralnih krivih zračenja LED izvora. Nakon uvođenja odgovarajuće korekcije, postignuto je dobro poklapanje spektralnih krivih sa referentnim izmerenim spektrom.

Na slici 6.13 su prikazani relativni intenziteti spektralne snage zračenja 14 korišćenih LED izvora, kao i odziv širokopojasnog fotodetektora [109]. U cilju usmeravanja što više svetlosti na ispitivanu površinu, preferirani su LED izvori sa malim uglovima divergencije. Vršne vrednosti u spektrima svih LED izvora su normalizovane na vrednost 1. Za merenje odziva silicijumske fotodiode *BPW21P* korišćen je izvor belog svetla (ksenonska lampa) u kombinaciji sa monohromatorom. Odziv fotodiode na odgovarajućim talasnim dužinama dobijen je deljenjem vrednosti izmerenog reflektovanog signala sa vrednošću upadne svetlosti odgovarajuće talasne dužine. Izmereni spektralni odziv fotodetektora naznačen je podebljanim linijom na slici 6-13.



Slika 6-13. Spektralna snaga korišćenih LED izvora / spektralni odziv korišćene fotodiode pri osvetljaju belog svetla (ksenonske lampe u kombinaciji sa monohromatorom) [109]

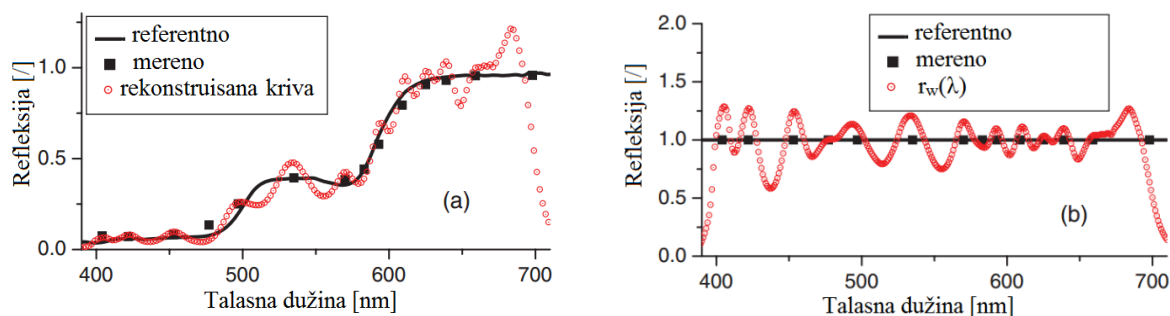
Budući da se refleksija kod većine objekata sastoji od mešavine difuzne i tačkaste refleksije, prilikom merenja je bilo potrebno izbeći komponentu tačkaste refleksije. U ovu svrhu autori su primenili geometrijsku postavku $45^\circ/0^\circ$, koja je prikazana na slici 6-14. Svetlost sa LED izvora pada pod uglom 45° u odnosu na normalnu površinu, dok fotodioda detektuje normalno reflektovanu svetlost.



Slika 6-14. Geometrijska postavka 45°/0° za merenje reflektovanih intenziteta [109]

Odgovarajuće tehnike modulacije/demodulacije su iskorišćene za razlikovanje intenziteta pojedinačnih LED izvora i potiskivanje pozadinskog šuma, a izvršena je i optimizacija potrošnje i prevencija pojave visoke radne temperature na PN spojevima dioda.

Na slici 6-15a su prikazani rezultati merenja jednog uzorka čiji reflektovani spektar odgovara narandžastoj boji. Punom linijom je označena referentna kriva dobijena spektrofotometrom, dok kvadratići označavaju izmerene podatke o refleksiji u odnosu na vršne talasne dužine korišćenih LED svetlosnih izvora. Rekonstruisana kriva $r(\lambda)$, dobijena predloženim algoritmom, na kojoj se mogu uočiti oscilacije, označena je otvorenim kružićima crvenom bojom. Takođe, i na belom uzorku (slika 6-15b) gde svi reflektovani intenziteti imaju približno iste izmerene relativne intenzitete, nakon primene predloženog algoritma nastaju oscilacije.



Slika 6-15.

a) Reflektovani spektar narandžastog uzorka [109]

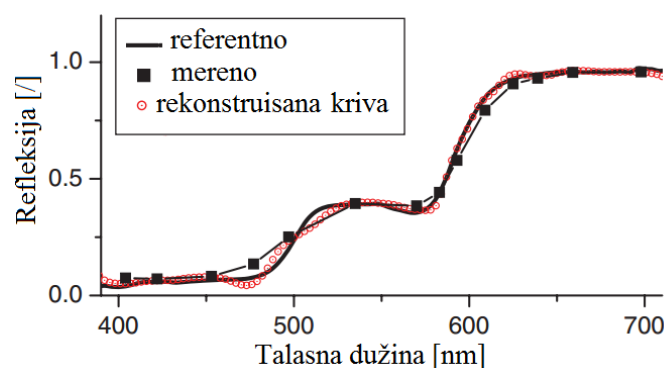
b) Refleksija na belom uzorku [109]

U svrhu eliminacije ovog oscilatornog ponašanja, autori su predložili sledeću korekcionu funkciju [109]:

$$r_{corr.}(\lambda) = \frac{r(\lambda)}{r_w(\lambda)} \quad (6-5)$$

pri čemu je $r(\lambda)$ rekonstruisana kriva datog uzorka sa slike 6-15a, a $r_w(\lambda)$ rekonstruisana oscilujuća kriva idealno belog uzorka sa slike 6-15b.

Na slici 6-16 je prikazana rekonstruisana kriva merenog uzorka nakon primene korekcionne funkcije. Može se primetiti da više nema prisustva neželjenih oscilacija.



Slika 6-16. Refleksiona kriva narandžastog uzorka nakon primene korekcionne metode [109]

Prevoji korektovane krive spektralne refleksije na talasnim dužinama oko 600 nm bolje odgovaraju izmerenoj krivoj u odnosu na prevoje talasnih dužina oko 500 nm. Ovo se može pripisati gušćoj koncentraciji LED izvora sa užim spektralnim zračenjem u okolini 600 nm. Spektralna rezolucija je ograničena brojem LED izvora koji se koriste pri uzorkovanju spektra. U spektralnom području sa sporo promenljivom refleksijom samo nekoliko LED izvora može dobro da rekonstruiše spektralnu refleksiju, dok je u spektralnom regionu sa oštom, brzo promenljivom refleksijom poželjno koristiti više LED izvora radi pouzdane rekonstrukcije čitavog spektra.

6.7.1. KARAKTERIZACIJA PARAMETARA ZASNOVANIH NA TALASNOJ DUŽINI LED IZVORA

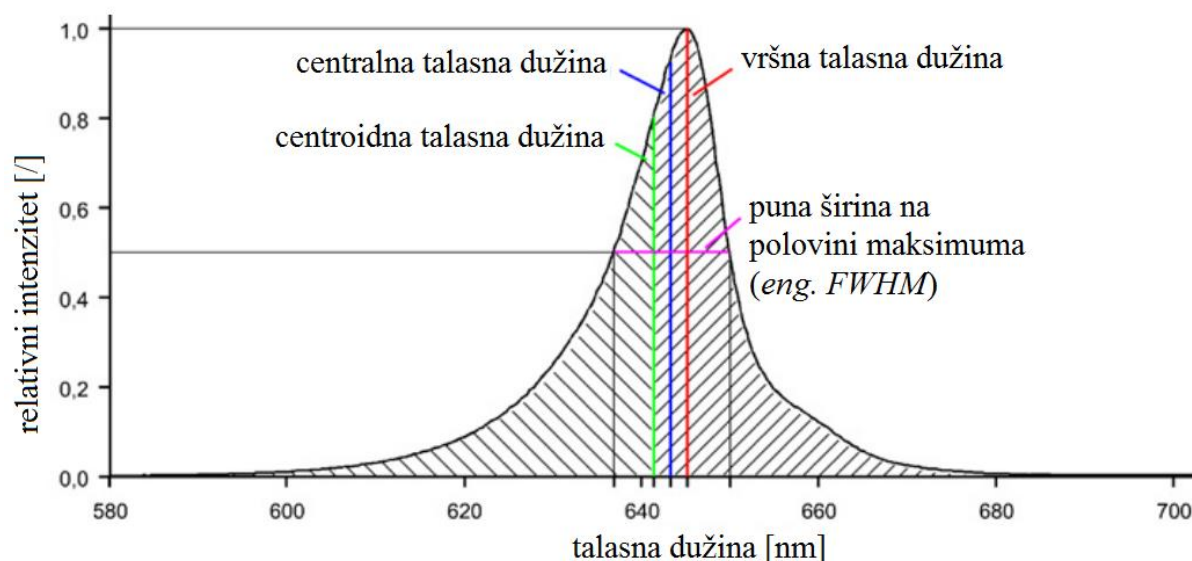
Prilikom karakterizacije boje LED izvora, najčešće se definiše nekoliko značajnih parametara, koji su opisani u tabeli 6-1 [110].

Tabela 6-1. Parametri LED izvora zasnovani na talasnoj dužini

Parametar	Definicija
Vršna talasna dužina (eng. <i>Peak wavelength</i>)	Definiše talasnu dužinu gde intenzitet ima maksimalnu vrednost
Puna širina na polovini maksimuma (eng. <i>Full width half maximum - FWHM</i>)	Definiše razliku talasnih dužina za koje intenzitet opadne na 50% svog maksimuma
Centralna talasna dužina	Definiše srednju talasnu dužinu za FWHM
Centroidna talasna dužina	Definiše talasnu dužinu koja predstavlja polovinu integralne ³ snage zračenja
CIE <i>xy</i>	Pozicija boje na hromatskom dijagramu
Dominantna talasna dužina	Definiše odgovarajuću talasnu dužinu koju opaža ljudsko oko. Dominantna talasna dužina se određuje na osnovu pozicije u CIE <i>xy</i> hromatskom dijagramu

Vršna talasna dužina je poželjan parametar za karakterizaciju emitovane talasne dužine LED izvora i obično se navodi u tehničkoj dokumentaciji. Ilustrativni primer parametara zasnovanih na talasnoj dužini dat je na slici 6-17, gde je prikazan tipičan spektar LED izvora vršne talasne dužine 645 nm.

³ Površina nad kojom se vrši integraljenje u opsegu talasnih dužina na kojima zrači LED izvor.



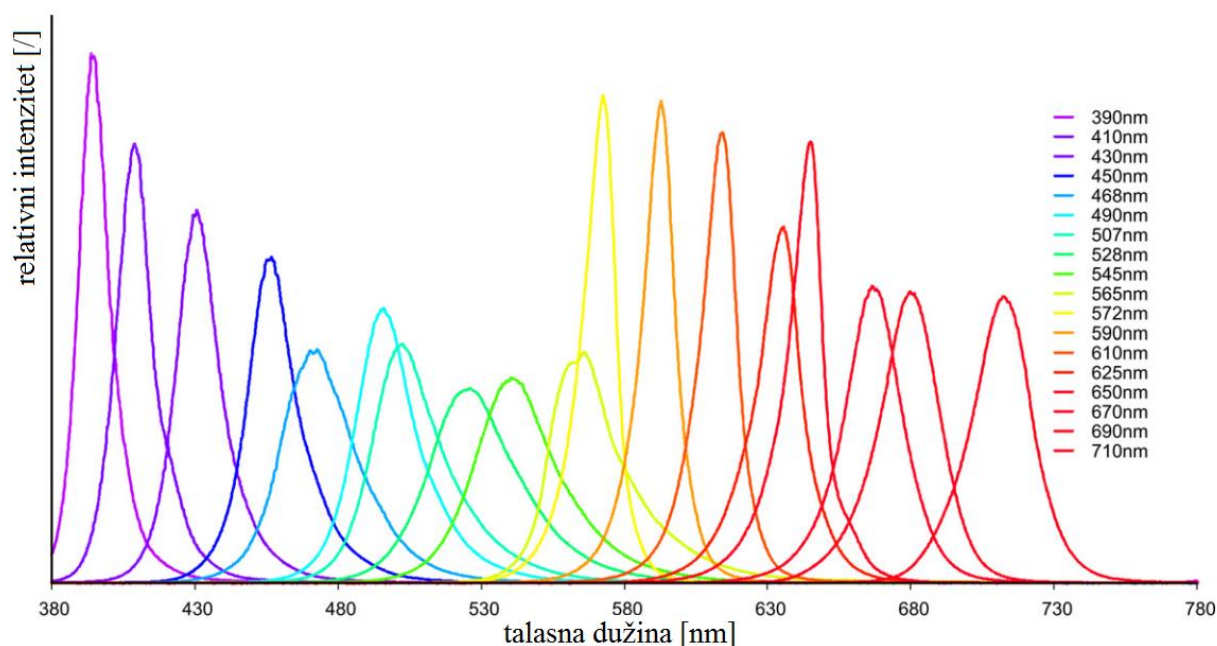
Slika 6-17. Tipičan spektar svetleće diode sa vršnom talasnom dužinom od 645 nm[110]

Prikazana relativna raspodela snage izmerena je pomoću komercijalnog spektrofotometra TRISTAN (mut AG, Wedel, Germany). Prilikom merenja, LED izvor je pobuđen strujnim izvorom konstantne struje $I_f = 20 \text{ mA}$, pri konstantnoj temperaturi 22°C .

Izmerena vršna talasna dužina može neznatno da odstupa od vršne talasne dužine date u tehničkom listu LED izvora. Ovo nastaje zbog tolerancije od strane proizvođača. Međutim, zanimljiv podatak je da dominantna talasna dužina u nekim slučajevima može značajnije da odstupa od date vršne talasne dužine. To znači da boja takve LED opažana ljudskim okom biva značajno drugačija u poređenju sa bojom koja se opaža posmatranjem date vršne talasne dužine. Mera opsega zračenja LED izvora data je parametrom *FWHM*. LED izvori sa parametrom *FWHM* većim od $\sim 10 \text{ nm}$ se ne mogu smatrati uskopojasnim izvorima. Centralna i centroidna talasna dužina su dodatni parametri talasne dužine za karakterizaciju LED izvora, a njihove vrednosti zavise od oblika spektralne krive.

6.8. SPEKTROFOTOMETAR SA 18 EKVIDISTANTNO RASPOREĐENIH LED IZVORA

U radu [110] je prikazan refleksijski spektrofotometar zasnovan na širokopojasnom fotodetektoru i 18 ekvidistantno raspoređenih LED izvora različitih talasnih dužina u opsegu 390-710 nm koji se koriste za osvetljavanje mernog uzorka. Spektri korišćenih izvora prikazani su na slici 6-18. Ovi spektri su skalirani tako da bi se dobile jednake integralne površine za sve LED izvore, što objašnjava zašto uskopojasne LED imaju maksimume višeg, a širokopojasne LED maksimume nižeg intenziteta. Može se videti da u ovakvoj konfiguraciji izvora postoje preklapanja spektara koja su posledica korišćenja većeg broja LED svetlosnih izvora.



Slika 6-18. Izmereni spektri korišćenih LED izvora. Spektri su skalirani u svrhu postizanja jednakih integralnih površina [110]

Autori su u radu [110] koristili *x-rite colorchecker* uzorke boja sa 24 test uzorka za testiranje predložene metode, od kojih su šest uzoraka ahromatski (slika 6-19). Podaci o refleksionim krivama su dobijeni nad talasnim dužinama 380-730 nm sa intervalom od 10 nm između susednih tačaka.



Slika 6-19. ColorChecker uzorci čiji su podaci dostupni na linku [111]

Iako LED izvori imaju konačan spektar zračenja, koji se proteže nad ograničenim opsegom talasnih dužina, reflektovanim intenzitetima nad mernim uzorkom u predloženoj metodi moraju se dodeliti jedinstvene vrednosti talasnih dužina u postupku estimacije spektra.

U radu [110] razmotreno je nekoliko slučajeva gde su reflektovanim intenzitetima dodeljivani različiti parametri (zadata vršna, merena vršna, centralna, dominantna i centroidna talasna dužina) na osnovu kojih su postavljene talasne dužine prilikom estimacije spektra.

Pokazalo se da se odabirom centroidne talasne dužine postižu najmanja odstupanja, jer je tako spektar najekvidistantnije pokriven izvorima. Srednje odstupanje izraženo u ΔE_{ab} iznosilo je 2.97. Nakon primene linearne korekcionne matrice nad dobjenim spektralnim podacima, autori su smanjili ovo odstupanje ΔE_{ab} na vrednost 0.24.

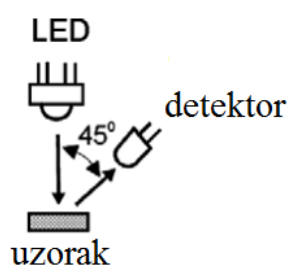
6.9. METODA MERENJA REFLEKTOVANOG INTENZITETA POMOĆU TROBOJNOG (RGB) LED IZVORA

U radu [112] predstavljena je metoda merenja boje koja se bazira na merenju reflektovanog intenziteta sa trobojnog LED izvora koji emituje crvenu, zelenu i plavu svetlost. Karakteristike korišćenih LED izvora su prikazane u tabeli 6-2 [112].

Tabela 6-2. Karakteristike korišćenih LED svetlosnih izvora

LED izvor	Vršna talasna dužina [nm]	CIE hromatske koordinate	FWHM $\Delta\lambda$ [nm]	Ugao gledanja (°)	Modulisana frekvencija [Hz]
Crveni	638	(0.700, 0.300)	22	40	640
Zeleni	514	(0.127, 0.709)	30	40	2800
Plavi	463	(0.135, 0.057)	24	40	1500

Tehnike modulacije/demodulacije korišćene su za upravljanje/razvrstavanje reflektovanih intenziteta. Silicijumska fotodioda BRW20R proizvođača *Vishay Semiconductor* sa transimpedansnim pojačavačem korišćena je za detektovanje reflektovane svetlosti. Geometrija merenja postavljena je na konfiguraciju $0^\circ/45^\circ$, kao što je prikazano na slici 6-20.



Slika 6-20. Geometrija prilikom merne postavke u radu [112]

Nakon demodulacije i procesiranja računarskom obradom nad reflektovanim signalima na osnovu predloženog algoritma izračunavaju se x i y koordinate na hromatskom dijagramu. Budući da se merenja vrše u samo tri tačke, ovakva metoda u pogledu tačnosti znatno odstupa od precizne spektrofotometrijske metode. Međutim, prednosti ovakve metode ogledaju se u jednostavnosti konstrukcije, niskoj ceni izrade, velikoj brzini odziva, robustnosti.

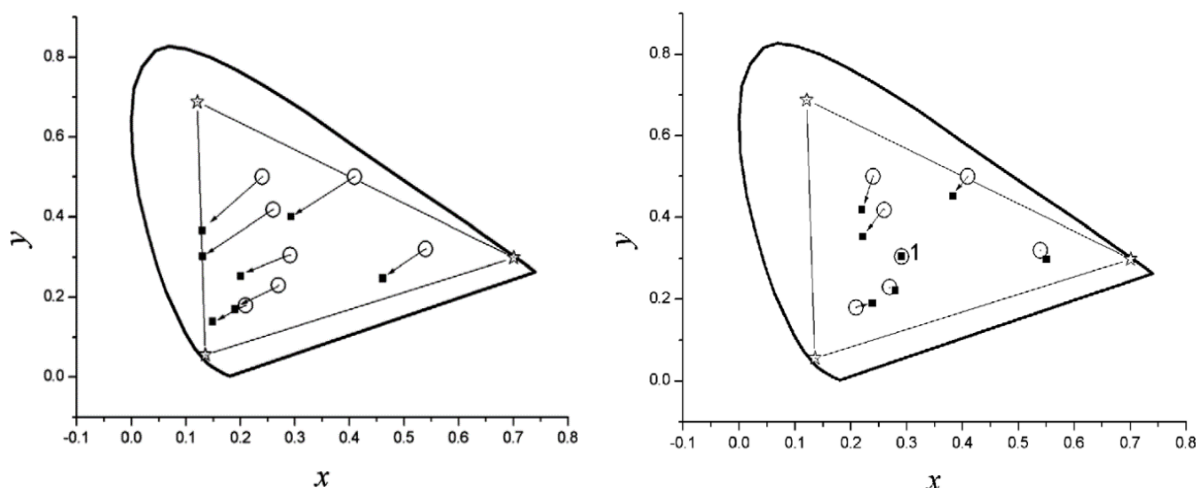
Umesto povećanja broja LED izvora u svrhu bolje procene spektra refleksije, autori su razvili dve procedure za kalibraciju hromatskih koordinata boje, koje su opisane u nastavku.

Na slici 6-21a su prikazani rezultati hromatskih koordinata za sedam test uzoraka dobijenih predloženom metodom bez kalibracije uporedo sa rezultatima dobijenim merenjem referentnom spektrofotometrijskom metodom. Može se primetiti da sve vrednosti dobijene refleksionom metodom sa tri izvora izgledaju kao „plavo pomaknute“ u odnosu na one dobijene spektrofotometrom. Odstupanje se može ispraviti pomeranjem svih izmerenih koordinata konstantnim vektorom koji je dat sa [112]:

$$\begin{aligned} x^{(1)} &= x + \Delta x^{(1)} \\ y^{(1)} &= y + \Delta y^{(1)} \end{aligned} \quad (6-6)$$

pri čemu se vektor pomeranja može odrediti iz jedne tačke dobijene referentnom spektrofotometrijskom metodom kao [112]:

$$\begin{pmatrix} \Delta x^{(1)} \\ \Delta y^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{1,ref.} - x_1 \\ y_{1,ref.} - y_1 \end{pmatrix} \quad (6-7)$$



Slika 6-21. [112]

a) Rezultati pre kalibracione metode

b) Rezultati posle kalibracije u jednoj tački

Na slikama 6-21 a i b otvoreni kružići označavaju hromatske koordinate za sedam uzoraka izmerenih referentnom spektrofotometrijskom metodom, dok puni kvadratići označavaju koordinate istih uzoraka dobijenih pomoću predložene metode u radu [112] sa tri reflektovana signala. Strelice oslikavaju razliku dobijenu između referentne i predložene metode. Zvezdicama su označene hromatske koordinate korišćenih LED izvora.

Tačka odabrana za kalibraciju predstavlja koordinate prvog uzorka, označenog sa 1 na slici 6-21b. Može se primetiti da se nakon izvršene kalibracije u jednoj tački odstupanje znatno smanjilo.

Međutim, tačke u okolini zelene boje i dalje imaju veću razliku u boji u odnosu na tačke u drugim oblastima nakon kalibracije u jednoj tački. Da bi se ovo ispravilo, kalibracija zahteva više od jedne tačke iz referentne metode. Autori su predložili novu kalibraciju u ukupno tri tačke. Preostale dve tačke određene su prema [112]:

$$\begin{aligned} x^{(2)} &= x^{(1)} + \Delta x^{(2)} \\ y^{(2)} &= y^{(1)} + \Delta y^{(2)} \end{aligned} \quad (6-8)$$

Druga korekcija $\Delta x^{(2)}$ i $\Delta y^{(2)}$ može se proširiti sa $x^{(1)} - x_1^{(1)}$ i $y^{(1)} - y_1^{(1)}$. Zadržavajući samo izraz prvog reda, može se napisati relacija u matricnoj formi [112]:

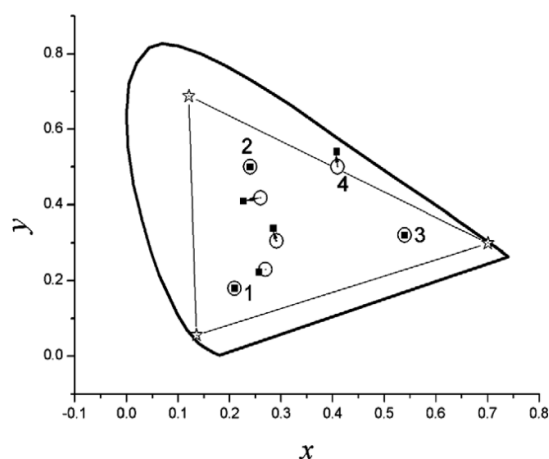
$$\begin{pmatrix} \Delta x^{(2)} \\ \Delta y^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^{(1)} - x_1^{(1)} \\ y^{(1)} - y_1^{(1)} \end{pmatrix} \quad (6-9)$$

Tada su $(x_{2,ref.}, y_{2,ref.})$ i $(x_{3,ref.}, y_{3,ref.})$ korišćeni za pronalaženje četiri koeficijenta a_{ij} , rešavanjem [112]:

$$\begin{pmatrix} x_2, ref. - x_1^{(1)} \\ y_2, ref. - y_1^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2^{(1)} - x_1^{(1)} \\ y_2^{(1)} - y_1^{(1)} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_3, ref. - x_1^{(1)} \\ y_3, ref. - y_1^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_3^{(1)} - x_1^{(1)} \\ y_3^{(1)} - y_1^{(1)} \end{pmatrix} \quad (6-10)$$

Uporedni rezultati sa referentnom metodom nakon kalibracije u tri tačke su prikazani na slici 6-22.



Slika 6-22. Uporedni rezultati referentne i predložene metode nakon izvršene kalibracije u tri tačke [112]

Kao i u prethodnom slučaju označavanja, otvoreni kružići predstavljaju hromatske koordinate za sedam uzoraka izmerenih referentnom spektrofotometrijskom metodom, dok puni kvadratići označavaju koordinate istih uzoraka dobijenih pomoću predložene metode sa tri reflektovana signala. Može se primetiti da su u ovom slučaju strelice koje oslikavaju dobijenu razliku između predložene kalibrisane i referentne metode znatno kraće. Zvezdicama su označene hromatske koordinate korišćenih LED izvora, dok su brojevima 1, 2 i 3 obeležene tri tačke koje su korišćene u kalibraciji. Ova kalibraciona metoda doprinela je da se i koordinate kalibracionih tačaka (x_2, y_2) i (x_3, y_3) preklope sa referentnim tačkama bez promene uslova podudaranja za (x_1, y_1) .

Tačka označena brojem 4 na slici 6-22 se nalazi na granici trougla konstruisanog povezivanjem hromatskih koordinata tri LED izvora. Eksperimentalni podaci pokazuju da reflektovana plava svetlost približava nultoj vrednosti za uzorak koji odgovara ovoj tački. To znači da ako se boja koja se meri nalazi na granici trougla, jedna od tri refleksije bi trebala imati nultu vrednost. U opštem slučaju, za tačku izvan trougla, refleksija bi trebala postati negativna. Budući da to u praksi nije moguće, refleksija se može precizno odrediti samo za tačke unutar trougla. LED izvori sa uskim spektralnim propusnim opsegom poseduju visoko zasićenje i grade veću površinu trougla od svetlosnih izvora kao što su fluorescentne lampe. Shodno tome, sa slike 6-22 se vidi da su hromatske koordinate plave i crvene LED locirane na ivicama CIE hromatskog dijagrama, dok se koordinate zelenog LED izvora pojavljuju unutar ovog dijagrama (obratiti pažnju na parametar FWHM zelenog LED u tabeli 6.2). Izborom druge zelene LED, sa užim spektralnim propusnim opsegom, mogla bi se povećati površina trougla a samim tim i opseg detekcije boja unutar hromatskog dijagrama.

6.10. KALIBRACIONA METODA PRIMENJIVA NA KOMERCIJALNE TRISTIMULUSNE KOLORIMETRE

U radu [76] je predložena kalibraciona metoda detektora koja se može primeniti na postojeće komercijalne tristimulusne kolorimetre realizovane pomoću standardizovanog izvora i detektora sa filtrima u boji. Budući da su detektori ovakvih uređaja realizovani najčešće silicijumskim fotodiodama sa dodatim odgovarajućim filtrima u boji [113], loša osetljivost detektora na niskim talasnim dužinama i spektralna odstupanja od CIE funkcija odziva standardnog posmatrača, zbog nesavršenosti filtera unose dominantnu mernu nesigurnost. U nastavku je opisana metoda koja smanjuje mernu nesigurnost.

U postupku određivanja x i y hromatskih koordinata svetlosnog izvora, potrebno je da se izračunaju CIE tristimulusne vrednosti izvora [76]:

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (6-11)$$

pri čemu je $S(\lambda)$ spektralna raspodela snage merenog izvora, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ i $\bar{z}(\lambda)$ su CIE1931 funkcije odziva standardnog posmatrača, a k je faktor normalizacije. U praksi, $\bar{x}(\lambda)$ se realizuje iz dva dela, $\bar{x}_L(\lambda)$ i $\bar{x}_S(\lambda)$ [76]:

$$\begin{aligned} \bar{x}_S(\lambda) = 0 \quad i \quad \bar{x}_L(\lambda) = \bar{x}(\lambda) & \quad \text{za talasne dužine veće od 504 nm} \\ \bar{x}_L(\lambda) = 0 \quad i \quad \bar{x}_S(\lambda) = \bar{x}(\lambda) & \quad \text{za talasne dužine manje od 504 nm} \end{aligned} \quad (6-12)$$

Indeksi S i L (*eng. Short i Long*) označavaju kratke i duge talasne dužine. Tada tristimulusna vrednost X može da se zapiše kao [76]:

$$X = X_1 + X_2 \quad (6-13)$$

gde je:

$$X_1 = k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}_L(\lambda) d\lambda \quad (6-14)$$

$$X_2 = k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}_S(\lambda) d\lambda \quad (6-15)$$

Y (iz 6.10) izražava apsolutnu fotometrijsku veličinu [114] kada je $k = K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$. Merene struje sa četiri odvojene fotodiode predstavljene su kao:

$$I_{X1} = \int_{\lambda} S(\lambda) s_{XL}(\lambda) d\lambda \quad (6-16)$$

$$I_{X2} = \int_{\lambda} S(\lambda) s_{XS}(\lambda) d\lambda \quad (6-17)$$

$$I_Y = \int_{\lambda} S(\lambda) s_Y(\lambda) d\lambda \quad (6-18)$$

$$I_Z = \int_{\lambda} S(\lambda) s_Z(\lambda) d\lambda \quad (6-19)$$

pri čemu s_{XL} , s_{XS} , s_Y i s_Z predstavljaju apsolutne spektralne odzive detektora. Kada se meri svetlosni izvor poznate spektralne raspodele $S(\lambda)$, kalibracioni faktori detektora mogu se izračunati na sledeći način [76]:

$$k_{X1} = \frac{X_1}{I_{X1}} = \frac{K_m \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}_L(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S(\lambda) s_{XL}(\lambda) d\lambda}$$

$$k_{X2} = \frac{X_2}{I_{X2}} = \frac{K_m \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}_S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S(\lambda) s_{XS}(\lambda) d\lambda}$$

$$k_Y = \frac{Y}{I_Y} = \frac{K_m \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S(\lambda) s_Y(\lambda) d\lambda}$$

$$k_Z = \frac{Y}{I_Z} = \frac{K_m \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S(\lambda) s_Z(\lambda) d\lambda}$$
(6-20)

Normalizacijom funkcija odziva standardnog posmatrača na njihove vršne vrednosti, kalibracioni faktori detektora mogu se zapisati kao [76]:

$$k_{X1} = \frac{1.06291 K_m F_{X1}}{s_{XL}(599)}$$

$$k_{X2} = \frac{0.3501 K_m F_{X2}}{s_{XS}(422)}$$

$$k_Y = \frac{K_m F_Y}{s_Y(555)}$$

$$k_Z = \frac{1.78297 K_m F_Z}{s_Z(446)}$$
(6-21)

gde su $s_{XL}(599)$, $s_{XS}(422)$, s_Y i $s_Z(446)$ apsolutni odzivi korišćenih fotodetektora na vršnim talasnim dužinama funkcija odziva standardnog posmatrača. Faktori korekcije boja u radu [76] predstavljani su kao:

$$\begin{aligned}
 F_{X1} &= \frac{\int_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}_{Ln}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S(\lambda) s_{XLn}(\lambda) d\lambda} \\
 F_{X2} &= \frac{\int_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}_{Sn}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S(\lambda) s_{XSn}(\lambda) d\lambda} \\
 F_Y &= \frac{\int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}_n(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S(\lambda) s_{Yn}(\lambda) d\lambda} \\
 F_Z &= \frac{\int_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}_n(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S(\lambda) s_{Zn}(\lambda) d\lambda}
 \end{aligned} \tag{6-22}$$

gde su $s_{XLn}(\lambda)$, $s_{XSn}(\lambda)$, $s_{Yn}(\lambda)$ i $s_{Zn}(\lambda)$ relativni odzivi detektora normalizovani na vršne vrednosti talasnih dužina funkcija odziva standardnog posmatrača. Vršne talasne dužine realizovanih detektora nisu nužno jednake vršnim talasnim dužinama funkcija odziva standardnog posmatrača. Faktor korekcije boje imaće jediničnu vrednost ako je normalizovani odziv detektora jednak normalizovanoj CIE funkciji.

Kada je tristimulusni kolorimetar kalibrisan za k_{X1} , k_{X2} , k_Y i k_Z , tristimulusne vrednosti pod testiranim svetlosnim izvorom mogu se izraziti kao [76]:

$$\begin{aligned}
 X' &= X'_1 + X'_2 = k_{X1} I'_{X1} + k_{X2} I'_{X2} \\
 Y' &= k_Y I'_Y \\
 Z' &= k_Z I'_Z
 \end{aligned} \tag{6-23}$$

gde su I'_{X1} , I'_{X2} , I'_Y i I'_Z izmerene struje detektora.

7. UPOREDNA ANALIZA METODA ZA ODREĐIVANJE BOJE PREDLOŽENIH U NAUČNIM RADOVIMA

U prethodnom poglavlju su izložene kako komercijalne metode određivanja boje, tako i interesantna jedinstvena rešenja objavljena u naučnim radovima tokom proteklih godina. Izbor uređaja za određivanje boje najčešće predstavlja kompromis između tačnosti koja se postiže u datoj primeni i cene uređaja. Kada je potrebno precizno određivanje spektralne krive uzorka boje, tada se koristi spektrofotometrijska metoda koja najčešće služi kao referentna metoda. Međutim, kada je dovoljna klasifikacija na osnovu izračunatih tristimulusnih vrednosti, tada je moguće koristiti manje preciznu, kolorimetrijsku metodu.

Sa rapidnim razvojem LED tehnologije, ovi svetlosni izvori postaju najzastupljeniji tip osvetljenja na tržištu i stalna su tema naučnih radova. Napredak na polju optičkih izvora i detektora rezultovao je mnoštvom senzora koji neprestano dovode do povećanja performansi i tačnosti kolorimetrijske metode.

U radu [95] predstavljena je metoda koja se bazira na jeftinom refleksionom komercijalno dostupnom senzoru boje TCS230, koji ne zahteva poznati standardizovani izvor svetla, već kao upadnu svetlost koristi beli LED izvor. Ovakav senzor se mora svaki put kalibrisati za date uslove korišćenja, jer svaka promena u ambijentalnom svetlu može uzrokovati promenu u očitavanjima sa senzora. Izlaz senzora daje RGB vrednosti na osnovu strujno frekvencijskog konvertora koje se računaju kao [95]:

$$R, G, B|_{boja} = \frac{255 \times (f_{R,G,B}|_{boja} - f_{R,G,B}|_{crna})}{f_{R,G,B}|_{bela} - f_{R,G,B}|_{crna}} \quad (7-1)$$

pri čemu su $f_{R,G,B}|_{bela}$ i $f_{R,G,B}|_{crna}$ kalibracioni parametri izmereni na čisto beloj i čisto crnoj podlozi. Treba primetiti da prema principu funkcionisanja, odnosno prema podacima koje obezbeđuje na izlazu, ovakav tip senzora pripada klasi denziometara. Samim tim, ovakva metoda je najmanje tačna, i ne može se primeniti za precizno određivanje boje, već samo za grubu klasifikaciju u dobro definisanom okruženju, gde će se koristiti uvek pod istim uslovima ambijentalnog svetla.

Tristimulusna kolorimetrijska metoda kakva je opisana u radu [87], ograničena je nesavršenošću filtera u boji koji prave odstupanja od funkcija definisanih za standardnog posmatrača CIE1931. Slična metoda izložena je i u radu [102], ali su autori pokušali da smanje ova odstupanja samostalnom izradom fotodetektora na bazi nove tehnologije organskih fotodioda, čiji se spektralni odzivi dobro podudaraju sa CIE krivama. Na ovaj način eliminisali su potrebu za korišćenjem standardnih filtera u boji ispred fotodetektora. Organske fotodiode pružaju odgovor na boju koji je veoma sličan ljudskom opažanju, mogu da rade sa nultom polarizacijom i imaju smanjenu disipaciju u odnosu na konvencionalni tip fotodioda. Pored toga, one mogu biti potpuno fleksibilne, lako prilagodljive u pogledu geometrijskih zahteva i kompatibilne sa biološkim okruženjem [115]. Dodatno, u radu [87] je omogućeno korišćenje samo jednog (umesto tri) fotodetektora, implementiranjem sistema ogledala i ćelija tečnog kristala za usmeravanje i propuštanje svetlosti, ali je time znatno usložnjena konstrukcija.

Ipak, tačnost ovakvih metoda nije uporediva sa spektrofotometrijskom metodom jer se na osnovu izmerenih tristimulusnih vrednosti ne može doći do podataka o spektralnoj raspodeli. Takođe, mana ove metode je i to što mora postojati definisani standardni izvor svetla.

Budući da se pored spektralne refleksije $r(\lambda)$ i CIE funkcija odziva standardnog posmatrača $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ i $\bar{z}(\lambda)$, pri određivanju tristimulusnih vrednosti X, Y i Z kako sa krive dobijene spektrofotometrom, tako i tradicionalnim (filtarskim) kolorimetrom ne može zanemariti uticaj spektralne raspodele snage osvetljenja $P(\lambda)$. U ovim metodama se meri proizvod $P(\lambda)r(\lambda)$, a izmereni spektar zavisi od korišćenog svetlosnog izvora, što se može predstaviti sa [116,117]:

$$\begin{aligned} X &= \int r(\lambda)P(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y &= \int r(\lambda)P(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z &= \int r(\lambda)P(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (7-2)$$

Autori u radu [112] su predložili refleksionu metodu gde su tri LED izvora modulirana različitim frekvencijama korišćena za osvetljavanje uzorka. U ovom slučaju merena refleksija na samo tri talasne dužine daje grubu procenu, čiju su grešku autori smanjivali kalibracijom hromatskih koordinata na hromatskom dijagramu u tri tačke koristeći poznate vrednosti istih tačaka dobijenih referentnom spektrofotometrijskom metodom. Budući da ni u ovom slučaju nema direktne procene reflektovanog spektra, ni ova metoda ne daje dovoljno precizne rezultate.

Algoritam za rekonstrukciju spektralne refleksije realizovan linearnom kombinacijom funkcija proizvoda odziva detektora i spektralnih krivih zračenja LED izvora prilikom korišćenja četrnaest LED izvora različitih talasnih dužina dat je u radu [109]. Takođe, slična metoda je izložena u radu [110], gde je korišćeno osamnaest ekvidistantno raspoređenih LED izvora. Nakon poređenja rezultata ovih refleksionih metoda sa referentnom spektrofotometrijskom, utvrđeno je dobro poklapanje spektara. Međutim, usled korišćenja velikog broja LED izvora, odziv ovakvih uređaja je spor. Pored toga, merna postavka prilikom korišćenja velikog broja diskretnih LED izvora zahteva složenu geometriju kako bi se eliminisao uticaj tačkaste refleksije. Ovo dodatno poskupljuje izradu takvog uređaja i čini ga manje praktičnim.

U ovoj doktorskoj disertaciji biće predložena optoelektronska refleksiona metoda koja će, kao i metode [109,110] koristiti LED izvore, ali će u cilju pojednostavljenja konstrukcije i postizanja bržeg odziva uređaja spektar biti estimiran nad znatno manjim brojem svetlosnih izvora. Predložena metoda biće upotrebljena za ispitivanje štampanih uzoraka boje dobijenih primenom digitalne štampe. Metoda će se temeljiti na proceni spektra elektromagnetnog zračenja (u vidljivom opsegu) interpolacijom nad unapred poznatim vrednostima na određenim talasnim dužinama. Takođe, u okviru doktorske disertacije razvijen je fiber-optički senzorski sistem na bazi sprovedenog istraživanja. Prednosti ovakvog uređaja u odnosu na komercijalno dostupne senzorske uređaje ogleda se u jednostavnosti konstrukcije, niskoj ceni izrade, robustnosti. Budući da je prilikom određivanja boje na sjajnim površinama veoma važan pravilan izbor geometrije, nastojaće se da predložena metoda omogući jednostavnu adaptaciju geometrije merenja $0^\circ/45^\circ$ u cilju eliminisanja usmerene refleksije.

Prednost ovako koncipiranih refleksionih metoda (radovi [109,110], kao i metode predložene u ovoj disertaciji) je to što se koriste bez standardizovanog izvora svetla, a meri se samo refleksija $r(\lambda)$ na unapred definisanim talasnim dužinama, nakon čega se vrše estimacije u svrhu rekonstrukcije nepoznatog dela spektra. Sa rekonstruisanim podacima o refleksiji na ovaj način može se odrediti boja uzorka pod bilo kojim standardnim osvetljenjem čiji je spektar snage poznat. Klasični kolorimetri moraju imati specifičan izvor svetla koji koriste pri merenju, a da bi se videlo kako uzorak izgleda pri drugačijim tipovima svetla potrebno je izvršiti hromatsku adaptaciju.

U tabeli 7-1 dat je pregled osnovnih karakteristika komercijalnih metoda kao i metoda predloženih u naučnim radovima na osnovu nekoliko ključnih parametara.

Tabela 7-1. Pregled osnovnih karakteristika postojećih rešenja za određivanje boje

Metoda	Rezolucija	Brzina odziva	Mogućnost procene spektra	Cena	Ograničenost na jednog standardnog osvetljenja	Mogućnost primene	Glavni nedostatak
Spektrofotometrijska	Visoka	Niska (opada sa porastom rezolucije)	Da	Visoka	Da	Visoka (Referentna metoda)	Zahteva skupe i osetljive optičke elemente
Komercijalna kolorimetrijska (bazirana na filtrima u boji koji odgovaraju CIE krivama)	Niska	Visoka	Ne	Niska	Da	Srednja (uglavnom namenjena za specifične primene)	Nema mogućnost procene spektra
Denziometarska – (Komercijalni senzori boje)	Veoma niska	Visoka	Ne	Veoma niska	----- Koristi samo izvor bele svetlosti	Niska (veoma ograničena)	Nema mogućnost procene spektra
Kolorimetrijska bazirana na LED izvorima i širokopojasnom detektoru	Srednja (raste sa korišćenjem većeg broja LED izvora)	Srednja (opada sa porastom rezolucije)	Da	Niska	Ne (ima mogućnost procene spektra pod bilo kojim poznatim osvetljenjem)	Visoka (u porastu)	Zahteva kompromis između brzine odziva i rezolucije

8. REFLEKSIONA OPTOELEKTRONSKA METODA RAZVIJENA U OVOJ DISERTACIJI

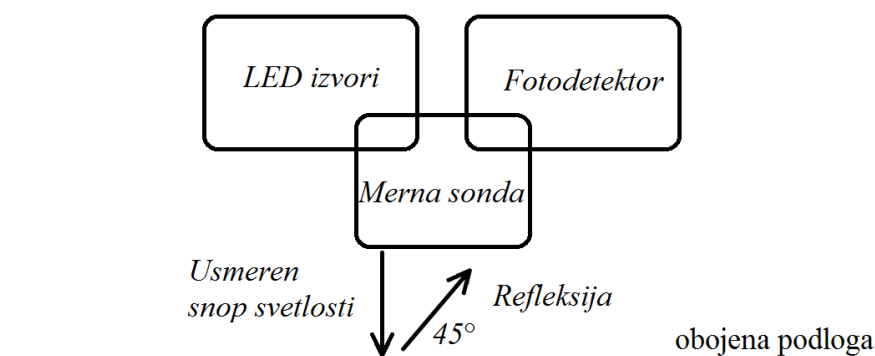
U ovoj doktorskoj disertaciji će kao rezultat istraživanja biti predstavljena nova refleksiona metoda za određivanje kolorimetrijskih vrednosti boje štampanih uzoraka. Razvijena metoda će omogućiti realizaciju jednostavnog, fleksibilnog i jeftinog kolorimetrijskog mernog instrumenta. Predloženo rešenje treba da predstavlja kompromis između merne nesigurnosti i rezolucije merenja sa jedne strane, a jednostavne konstrukcije i niske cene mernog uređaja sa druge strane. Drugim rečima, ova metoda ima za cilj da poveća tačnost u odnosu na kolorimetar, a da pojednostavi sistem u odnosu na spektrofotometar. Baziraće se na estimaciji spektra elektromagnetnog zračenja u vidljivom opsegu talasnih dužina, na taj način što će biti vršena interpolacija nad merenim vrednostima spektralne snage zračenja predloženih LED izvora.

Na predajnoj strani biće korišćeno šest LED izvora sa pažljivo odabranim, približno ekvidistantno raspoređenim talasnim dužinama, dok će se na prijemnoj strani nalaziti širokopojasni silicijumski fotodetektor koji će snimati optičku snagu na diskretnim talasnim dužinama. Kolorimetrijske mogućnosti predložene metode biće analizirane i upoređene sa rezultatima dobijenim pomoću komercijalnog spektrofotometra.

Novi fiber-optički senzorski sistem zasnovan na proceni spektra refleksije u svrhu određivanja kolorimetrijskih vrednosti boje štampanih uzoraka se uopšteno govoreći može podeliti na optički i elektronski sklop. Optički sklop čini kolorimetrijska sonda sa optičkim vlaknima, koja usmerava svetlost sa šest LED izvora i osvetljava uzorak, a zatim prenosi reflektovanu svetlost od uzorka do širokopojasnog fotodetektora. Optička vlakna omogućavaju spregu optoelektronskih komponenti (LED izvora i fotodetektora) sa kolorimetrijskom sondom. Elektronski sklop obezbeđuje pobudu LED izvorima i vrši obradu signala dobijenih sa fotodetektora. Sastoji se od predajnog, prijemnog i upravljačkog modula. Algoritam koji upravlja radom predajnog i prijemnog modula je implementiran u sklopu upravljačkog bloka.

8.1. OPTIČKI SKLOP

Pojednostavljena blok šema optičkog sklopa koji se sastoji od LED svetlosnih izvora, širokopojasnog fotodetektora i merne sonde sa optičkim vlaknima prikazana je na slici 8-1.



Slika 8-1. Blok šema optičkog sklopa

Promena intenziteta svetlosti koja se prenosi od LED izvora do merne tačke, nakon njene refleksije od uzorka beleži se na fotodetektoru. Izgled prototipa merne sonde dat je na slici 8-2.



- ① - Plastična optička vlakna, tip mh4001
- ② - Plastično kućište za sprezanje vlakna
- ③ - Limiter sa navojem
- ④ - Odstojnik za fokusiranje snopa i kalibraciju

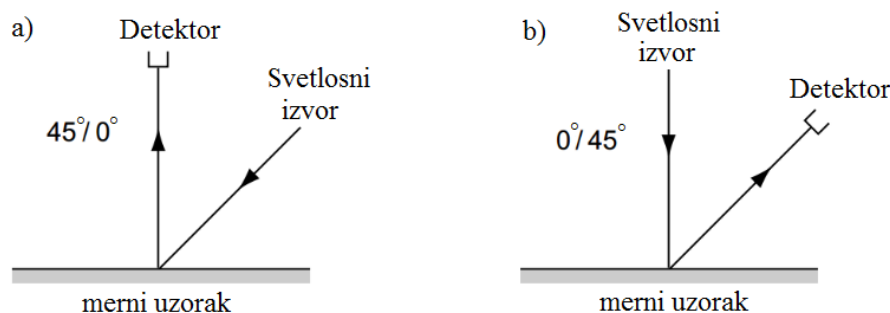
Slika 8-2. Prototip kolorimetrijske sonde za merenje refleksije nad štampanim uzorcima

Šest polimernih optičkih vlakana koji su kružno raspoređeni u osnovi sonde predstavljaju predajna vlakna i ona usmeravaju svetlost sa LED izvora na uzorak. Sedmo optičko vlakno koje se nalazi u centru osnove služi da prikupi svetlost koja se reflektuje od mernog uzorka i sprovede je do fotodetektora. U cilju podešavanja udaljenosti osnove sonde od podloge čija se boja određuje, realizovan je odstožnik sa navojem koji je obeležen brojem 4 na slici 8-2.

8.1.1. OPTIČKE KARAKTERISTIKE PREDLOŽENE METODE

S obzirom na to da način na koji se svetlost reflektuje zavisi od teksture i sjajnosti površine uzorka, kao što je pomenuto u odeljku 3.4.2, refleksija se u opštem slučaju može klasifikovati na dva tipa: tačkastu i difuznu refleksiju. Prvi tip predstavlja refleksiju od glatkih površina pod određenim uglom, a drugi tip refleksiju od hrapavih površina koje imaju tendenciju da reflektuju svetlost u mnoštvo pravaca. Tokom difuzne refleksije upadni ugao se menja kako snopovi upadne svetlosti padaju na grubu površinu pod različitim uglovima. Tačkasta refleksija može imati neželjeni uticaj u slučaju merenja sjajnih uzoraka, budući da tada svetlost odbijena od sjajne površine gradi isti ugao kao i upadna svetlost u odnosu na normalu i formira efekat ogledala.

Prilikom određivanja boje želi se izbeći tačkasta, a izmeriti samo difuzna refleksija. U slučaju merenja sjajnih uzoraka potrebno je prilagoditi mernu geometriju. Kolorimetrijska sonda najčešće se postavlja u položaj geometrije $45^\circ/0^\circ$ ili u položaj geometrije $0^\circ/45^\circ$ u zavisnosti od ugla između LED izvora i fotodetektora. Ovi primeri su ilustrovani na slici 8-3a) i b).

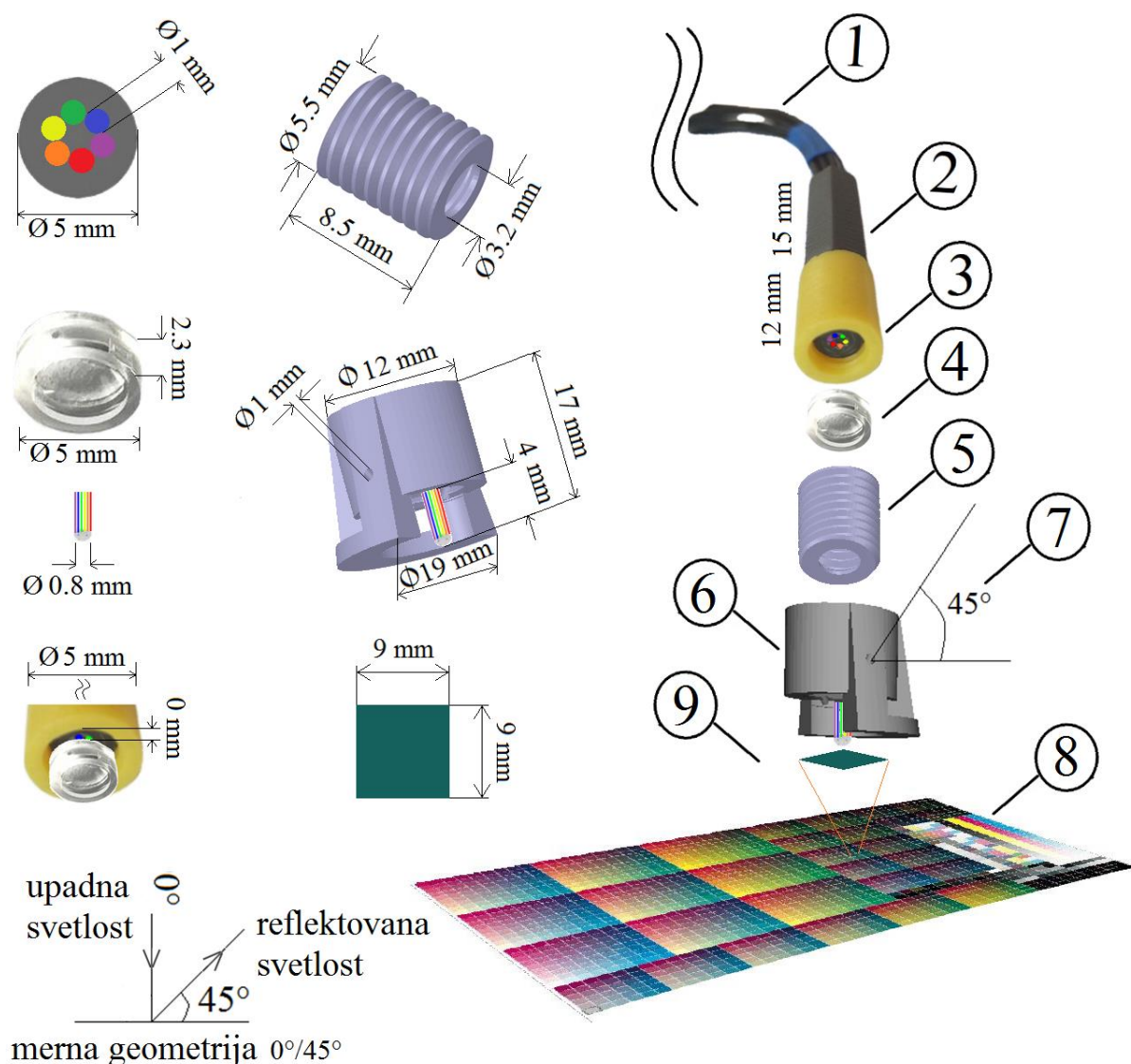


Slika 8-3. Geometrijske postavke za merenje refleksije, a) $45^\circ/0^\circ$, b) $0^\circ/45^\circ$ [8]

Budući da kolorimetrijska sonda koja je prikazana na slici 8-2 ne eliminiše tačkastu refleksiju, ona je primenjena samo kao prototip za određivanje boje uzoraka koji su štampani na mat podlozi, uz pretpostavku da je površina dovoljno hrapava i da je shodno tome efekat tačkaste refleksije minimizovan.

8.1.2. KOLORIMETRIJSKA SONDA PRILAGOĐENA MERENJU SJAJNIH UZORAKA

Na slici 8-4 prikazana je modifikovana merna postavka sa kolorimetrijskom sondom koja je prilagođena za merenje visoko sjajnih uzoraka. Merna geometrija sonde je $0^\circ/45^\circ$, što omogućava efikasno uklanjanje uticaja tačkaste refleksije.



Slika 8-4. Sastavni delovi kolorimetrijske sonde i merna postavka za merenje boje sjajnih uzoraka

Kako bi kolorimetrijska sonda bila što manjih dimenzija, svih šest predajnih optičkih vlakana (oznaka br. 1) su provučeni paralelno kroz osnovu sonde (oznaka br. 2) na taj način da svetlost pada pod uglom 0° u odnosu na površinu normale. Sva predajna vlakna su poređana u krug

(oznaka br. 3) i usmerena prema fokusirajućem sočivu SPJ50F6.0-R (oznaka br. 4). Deo označen brojem 5 omogućava pozicioniranje sočiva na osnovu sonde gde su pozicionirana optička vlakna. Prečnik sočiva iznosi 5 mm, dok unutrašnji prečnik osnove sonde iznosi 5.5mm. Sočivo je fiksirano neposredno uz osnovu, a žižna daljina na kojoj se prikazuje usmereni snop (sastavljen od diskretnih LED izvora) je 4 mm. Ova žižna daljina određuje razdaljinu na kojoj će se meriti refleksija štampanih uzoraka boja, što je u osnovi rastojanje na kojem će sonda biti kalibrisana. Na ovu fiksnu osnovu sa dodatim sočivom zavrće se nastavak označen brojem 6. Ovaj nastavak ima dvojaku funkciju, prvo da predstavlja podesivi odstožnik žižne daljine sočiva, a drugo da poveže optičko vlakno koje će se koristiti kao prijemnik reflektovane svetlosti od uzorka. Ovo vlakno se fiksira pod uglom od 45° u odnosu na normalnu površinu. Prerez na sondi koji omogućava postavljanje prijemnog optičkog vlakna označen je brojem 7. Svi plastični delovi sonde (izuzev polimernih optičkih vlakana i sočiva za fokusiranje) projektovani su u softverskom alatu OpenSCAD i izrađeni 3D štampom na uređaju *Ender Pro v3*. Dimenzije projektovanih nastavaka, kao i fokusirajućeg sočiva i prečnika optičkih vlakana date su na slici 8-4 sa leve strane. Karta boja *ECI2002 (VisualLayoutCMYK1485)* označena je brojem 8, dok je merni uzorak prikazan brojem 9.

8.1.3. OPTIČKA VLAKNA

Optičko vlakno je tanko, fleksibilno i prozirno vlakno koje se ponaša kao talasovod ili „svetlosna cev“ za prenos svetlosti između dva kraja vlakna. Oblast primenjene nauke i inženjeringa koja se bavi dizajnom i primenom optičkih vlakana je poznata pod nazivom fiber-optika. Optička vlakna su široko rasprostranjena u fiber-optičkim komunikacijama, što obezbeđuje prenos informacija na veće udaljenosti i sa većim propusnim opsegom u odnosu na konvencionalne vidove komunikacija. Vlakna se koriste umesto metalnih žica, jer svetlosni (izolatorski) signali koji putuju kroz njih imaju manje gubitke, a uz to su imuni i na elektromagnetsku interferenciju.

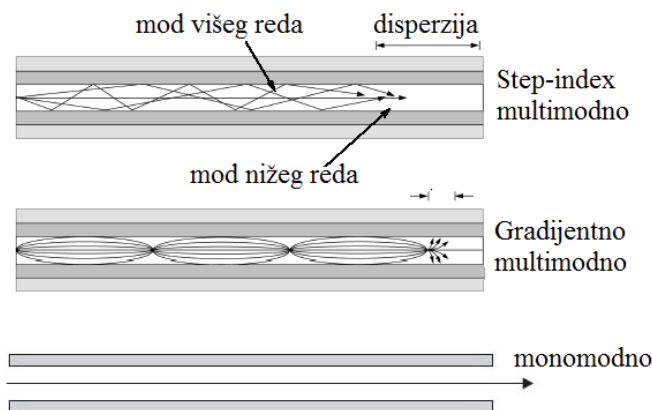
Specijalno dizajnirana optička vlakna mogu biti korišćena za razne primene, uključujući senzore i fiber-optičke lasere. Optičko vlakno se tipično sastoji od prozirnog jezgra okruženog takođe prozirnim omotačem, koji je načinjen od materijala sa nešto nižim indeksom prelamanja. Svetlost se zadržava u jezgru po principu totalne unutrašnje refleksije. Ovo prouzrokuje da se vlakno ponaša kao talasovod. Vlakna koja dopuštaju više putanja prostiranja ili transverzalnih (podužnih) modova nazivaju se multimodna vlakna (*eng. Multi-Mode Fibers - MMF*), dok se ona koja dopuštaju samo jedan mod nazivaju monomodna vlakna (*eng. Single-Mode Fibers - SMF*). Multimodna vlakna najčešće imaju veći prečnik jezgra i koriste se za komunikacione veze na kraćim distancama kao i za primene gde se mora prenositi velika snaga. Nasuprot tome, monomodna vlakna su pogodnija za prenos na veće udaljenosti budući da im je slabljenje manje.

Povezivanje dva optička kabla je mnogo složeniji proces od spajanja električnih žica ili kablova, što predstavlja komplikaciju u optičkim sistemima. Krajevi vlakana moraju biti pažljivo isečeni, a zatim „splajsovani“ (*eng. Splice*) odnosno spojeni mehaničkim putem ili stapanjem toplotnim procesom. Specijalni fiber-optički konektori mogu da se koriste za privremene konekcije.

8.1.3.1. PROSTIRANJE SVETLOSTI UNUTAR OPTIČKOG VLAKNA, TIPOVI VLAKANA

Optičko vlakno kao cilindrični dielektrični (izolatorski, strujno neprovodni) talasovod prenosi svetlost duž svoje ose, pojavom zvanom totalna unutrašnja refleksija. Kao što je ranije napomenuto, vlakno se sastoji od jezgra okruženog omotačkim slojem i oba dela se izrađuju

od dielektričnih materijala. Da bi se optički signal zadržao u jezgru, indeks prelamanja jezgra mora biti veći od indeksa prelamanja omotača. Prelaz između jezgra i omotača može biti nagli (skokovit), kao što je slučaj kod „step-indeks“ vlakana, ili postepen, kao kod „graded-index“ tipova vlakana [118]. Osnovni tipovi su prikazani na slici 8-5.



Slika 8-5. Različiti tipovi optičkih vlakana i različit način prostiranja kroz njih, redom: multimodno step-indeks vlakno, multimodno gradijentno vlakno i monomodno vlakno [118]

Step-indeks vlakna se koriste u sistemima sa malim rastojanjima i ne previše zahtevnim propusnim opsegom, što ga čini pogodnim za primenu u kolorimetrijskom senzorskom sistemu razvijenom u ovoj disertaciji.

8.1.3.2. INDEKS PRELAMANJA

Indeks prelamanja je mera brzine prostiranja svetlosti u nekom medijumu. Budući da svetlost najbrže putuje kroz vakuum, limitirajuća vrednost brzine svetlosti u vakuumu iznosi približno $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$. Ovu brzinu obeležavamo sa c i ona odgovara brzini prostiranja svetlosnih elektromagnetnih talasa u vakuumu i atmosferi [118]. U čvrstom materijalu, ova brzina se razlikuje i zavisi od materijala i geometrije vodeće strukture. Talasna dužina svetlosnog snopa je data kao:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (8-1)$$

gde je v brzina snopa, a f njegova učestanost. Indeks prelamanja, kao bezdimenziona veličina se računa kao odnos brzine svetlosti u vakuumu i brzine svetlosti u datom medijumu. U vakuumu je ova vrednost 1. Budući da je u vazduhu i gasovima brzina svetlosnog snopa takođe približno $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$, indeks prelamanja u vazduhu se može smatrati identičnim kao u vakuumu. Tipična vrednost za indeks prelamanja omotača optičkog vlakna je 1.46, dok za jezgro ova vrednost tipično iznosi 1.48. Što je veći indeks prelamanja, svetlost sporije putuje kroz medijum. Takođe, u praksi postoje i kašnjenja prouzrokovana komunikacionom opremom i procesom kodiranja i dekodiranja informacija, pa su praktične brzine komunikacija dodatno ograničene pomenutim faktorima.

8.1.3.3. MODOVI UNUTAR MULTIMODNOG OPTIČKOG VLAKNA

Vrednost indeksa prelamanja ima skokovit prelaz prilikom prelaska svetlosnog snopa iz jednog materijala u drugi, a kao posledica toga svetlost se duž jezgra prostire po više putanja tj. modova. Odavde i potiče naziv multimodna vlakna. Mod najnižeg reda je onaj koji se prostire duž ose jezgra, time prelazi najkraći put i stiže prvi na kraj vlakna. Mod najvišeg reda prelazi najdužu izlomljenu putanju od početka do kraja vlakna i stiže sa najvećim vremenskim zaostatom na kraj vlakna. Vreme propagacije ostalih modova je između ova dva ekstremna slučaja [118]. Kada se modovi na izlazu vlakna superponiraju, efektivna širina impulsa postaje mnogo veća od one na ulazu, dok je amplituda optičkog impulsa na izlazu oslabljena. Multimodni prenos kroz vlakno sa skokovitim indeksom prelamanja predstavlja najjeftiniji vid prenosa optičkih signala.

Da bi se izbeglo nepoželjno širenje impulsa na izlazu vlakna sa skokovitim indeksom prelamanja, koristi se vlakno koje je našlo mnogo veću primenu u telekomunikacijama, a to je vlakno sa gradijentnim indeksom prelamanja. Ovakvo vlakno nije od interesa za ovu disertaciju i ovde neće biti dalje razmatrano.

8.1.3.4. MATERIJALI OD KOJIH SE PRAVE OPTIČKA VLAKNA

Shodno primeni, optička vlakna mogu se pronaći u polimer ili staklenoj izvedbi. Za potrebe ove disertacije korišćena su polimerna optička vlakna koja su dosta robustnija i fleksibilnija i imaju mogućnost primene u vidljivom opsegu, za razliku od staklenih optičkih vlakana.

8.1.3.5. STAKLENA OPTIČKA VLAKNA

Staklena optička vlakna se najčešće prave od silicijum-dioksida, ali se koriste i drugi materijali, kao što su fluorocirkonati, fluoroaluminati, halkogenidna stakla kao i kristalni materijali (npr. safir) za specijalizovane primene na višim talasnim dužinama. Silicijum-dioksidna i fluoridna vlakna obično imaju vrednosti indeksa prelamanja od oko 1.5, dok neki materijali poput halkogenida mogu imati vrednosti približno 2. Tipična razlika u indeksima prelamanja između jezgra i omotača ovakvih vlakana je manja od jednog procenta.

8.1.3.6. POLIMERNA OPTIČKA VLAKNA

Polimerna optička vlakna (*eng. Plastic or Polymer Optical Fiber - POF*) predstavljaju optička vlakna koja se izrađuju od polimera. Uobičajeno su zastupljena „step-index“ multimodna, ali i monomodna vlakna ovakvog tipa, prečnika od 125 μm do preko 2 mm. Polimerna vlakna tipično imaju veća slabljenja od staklenih, (0.1 dB/m pa naviše) i ovo im je glavni ograničavajući faktor. Numerička apertura koja se postiže kod ovakvih vlakana tipično iznosi 0.1-0.4. Maksimalna temperatura okoline kod ovih vlakana danas dostiže čak ~ 60 °C, što je određeno temperaturom topljenja vlakna.

Kod vlakana sa većim prečnikom (~ 1 mm), 96-98% poprečnog preseka vlakna predstavlja jezgro (tipičan primer je vlakno prečnika jezgra od 980 μm i ukupnog prečnika vlakna sa omotačem ~ 1000 μm). Slično kao i uobičajeno stakleno vlakno, polimerno vlakno prenosi informaciju kroz jezgro vlakna s tom razlikom da u pogledu dimenzija, debljina jezgra kod ovih vlakana u nekim slučajevima dostiže 100 puta veću vrednost nego kod staklenog vlakna. Klasična PMMA (*eng. Poly methyl methacrylate*) vlakna se obično koriste za primene sa malim brzinama prenosa i kratkim rastojanjima (do 100 metara) kod digitalnih kućnih uređaja, senzorskih sistema, industrijskih i automobilskih mreža. U oblasti telekomunikacija stakleno

vlakno je mnogo zastupljenije. Kod polimernih vlakana zastupljena je velika razlika u indeksu prelamanja između jezgra i omotača, te je samim tim i velika numerička apertura. Odlika polimernih vlakana da poseduju veliku mehaničku fleksibilnost i robustnost stvara prednost u senzorskim primenama, a moguće je i urezati Bragove rešetke u monomodno ili multimodno polimerno optičko vlakno čime se potiču prednosti u odnosu na isti postupak ako bi se koristila staklena vlakna (jer se polimerna vlakna mogu više rastezati bez pucanja).

Treba spomenuti i da se polimerna vlakna koriste na nižim talasnim dužinama od staklenih. Dok je za staklena vlakna najzastupljeniji infracrveni deo spektra, kod polimernih vlakana se najefikasnije koriste talasne dužine u vidljivom i bliskom infracrvenom delu spektra. Ova karakteristika polimernih vlakana je od posebne važnosti u ovoj disertaciji.

Međutim, polimerna vlakna imaju manje propusne opsege i niže brzine prenosa od staklenih (kraće vlakno omogućava veće brzine prenosa), ali u realizaciji predložene metode optička vlakna svakako nisu limitirajući faktor u pogledu brzine rada implementiranog uređaja, pa to ovde neće predstavljati problem.

8.1.3.7. MULTIMODNO POLIMERNO OPTIČKO VLAJKO OZNAKE: MH4001

U okviru predložene metode u ovoj disertaciji, emitujuća svetlost svih korišćenih LED izvora, kao i reflektovana svetlost koja se od ispitivanog uzorka vodi ka fotodetektoru, biva vođena kroz multimodna polimerna optička vlakna mh4001, dužine ~1 m, čije su tehničke karakteristike date u tabeli 8-1.

Tabela 8-1. Tehničke karakteristike polimernog vlakna MH4001 [119]

Materijal jezgra	Polymethyl-Methacrylate Resin
Materijal omotača	Fluorinated Polymer
Indeks prelamanja jezgra	1.49
Profil vlakna	Step-indeks
Numerička apertura	0.3
Prečnik jezgra	920-1040 μm
Prečnik omotača	940-1060 μm
Spolješnji prečnik zaštitnog sloja	2.2 \pm 0.7 mm

8.1.3.8. SLABLJENJE U OPTIČKOM VLAJKU

Veoma važan proces koji nastaje prilikom propagacije svetlosti kroz optičko vlakno jeste slabljenje svetlosti, i on definiše gubitke u optičkom vlaknu. Snaga svetlosti opada eksponencijalnom zavisnošću od rastojanja prilikom propagacije unutar optičkog vlakna [118]:

$$P_D = P_0 \cdot e^{-\alpha' D} \quad (8-2)$$

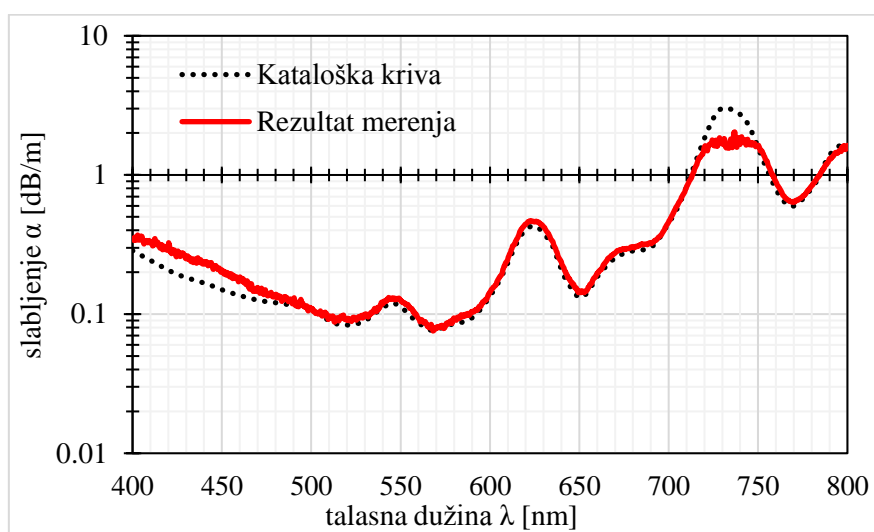
pri čemu je P_0 snaga na ulazu optičkog vlakna, P_D snaga na rastojanju D , dok je α' koeficijent slabljenja, koji je ovde izražen u km^{-1} .

Budući da se gubici u optičkom vlaknu nastali usled slabljenja izražavaju u $\frac{\text{dB}}{\text{km}}$, može se postaviti relacija [120,128]:

$$\alpha = \frac{10}{D} \log(P_0 / P_D) \quad (8-3)$$

pri čemu je α podužno slabljenje izraženo u $\frac{dB}{km}$. Logaritamski zapis se uvodi iz praktičnih razloga, jer obezbeđuje da se ukupno slabljenje duž transmisionne linije koja se sastoji od više deonica izrazi kao suma pojedinih deonica. Merenje slabljenja u optičkim vlaknima predstavlja određivanje odnosa svetlosti na ulazu i izlazu optičkog vlakna. Merenje slabljenja se može vršiti na pojedinačnim talasnim dužinama, ali i na širem spektralnom opsegu.

Na slici 8-6 prikazana je kriva koja opisuje slabljenje optičkog vlakna oznake *mh4001* u opsegu talasnih dužina 400-800 nm. Isprekidanom crnom linijom označena je kataloška kriva, dok je crvenom punom linijom označena izmerena vrednost slabljenja u optičkom vlaknu. Merenje je izvršeno uz pomoć spektrofotometra CCS200/M kompanije Thorlabs, metodom zamene optičkih vlakana.

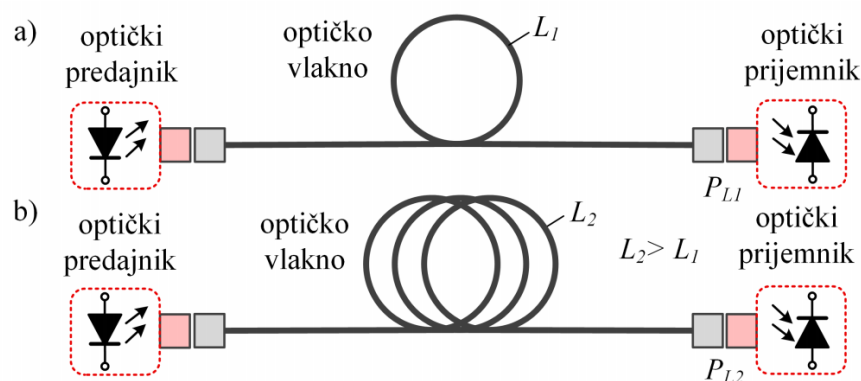


Slika 8-6. Slabljenje polimernog optičkog vlakna *mh-4001* u opsegu talasnih dužina: 400-800 nm

Može se primetiti da vlakno unosi različita slabljenja na različitim talasnim dužinama, ali ovaj nedostatak će biti kompenzovan kalibracijom kolorimetrijske sonde.

Na slici 8-7 je prikazana postavka za merenje slabljenja u optičkom vlaknu metodom zamene [120]. Najpre se meri snaga P_{L1} na izlazu referentnog vlakna dužine L_1 , a zatim se referentno vlakno zamenjuje vlaknom veće dužine L_2 i meri se snaga P_{L2} na izlazu drugog vlakna. Budući da u metodi zamene broj konektora ostaje isti u oba slučaja merne postavke, podrazumeva se da je slabljenje između konektora isto u svim merenjima (što važi samo u određenim granicama tolerancije). Za različite tipove konektora slabljenje koje oni unose može se razlikovati i za nekoliko dB. Metodom zamene slabljenje se računa na sledeći način [120]:

$$\alpha = \frac{10}{L_2 - L_1} \cdot \log \frac{P_{L1}}{P_{L2}} \quad (X)$$



Slika 8-7. Merenje slabljenja metodom zamene

Metoda zamene predstavlja nedestruktivnu metodu merenje slabljenja.

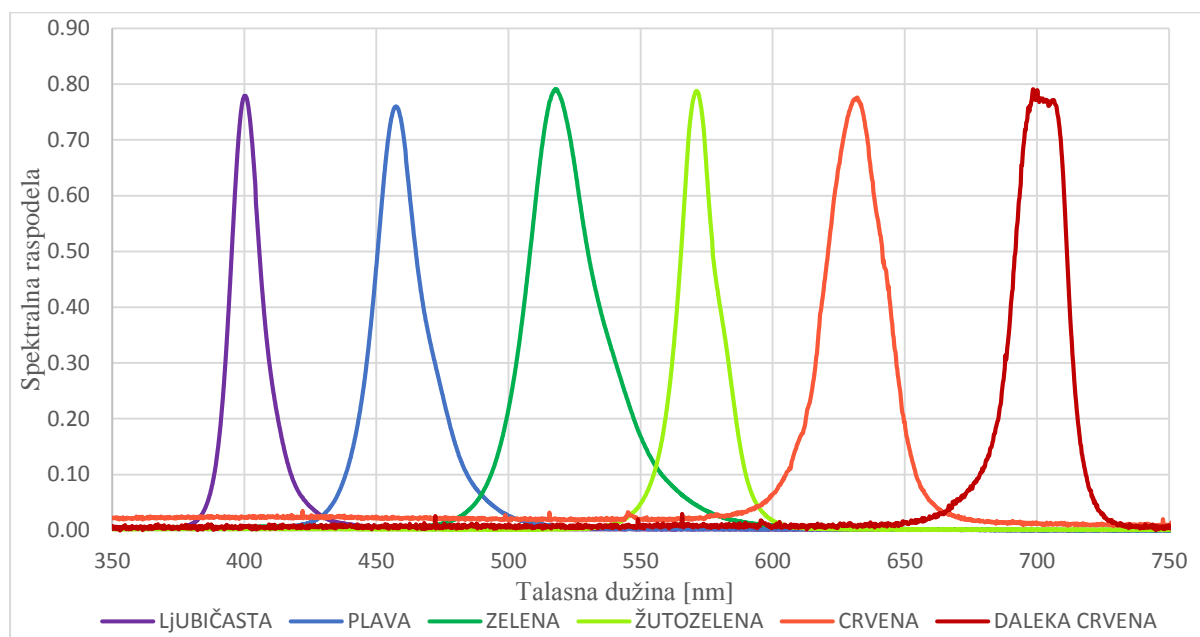
8.1.4. ODABIR LED SVETLOSNIH IZVORA

Odabrano je šest LED izvora na približno ekvidistantno raspoređenim talasnim dužinama u vidljivom spektru kako bi se postigla što ravnomernija pokrivenost. Optičko zračenje koje emituju LED izvori u vidljivom spektru razlikuje se u mnogim aspektima u odnosu na zračenja koja emituju drugi optički izvori. Spektar zračenja nije ni monohromatski (kakav emituju laserski izvori) ni širokopoljasni (kao kod tipičnih sijalica sa užarenom niti), već sa parametrom FWHM tipično 10-30 nm i talasnom dužinom zračenja bilo gde u vidljivom spektru (zavisno od boje LED izvora) [121].

LED izvori koji su izabrani u ovoj disertaciji imaju jačinu svetlosti u opsegu 1000-10000 mcd (tabela 8-2) i pakovani su u providna zaobljena kućišta veličine 5 mm, sa uglom gledanja od 30° . Na slici 8-8 su uporedo prikazani spektri svih šest korišćenih LED izvora, snimljenih pomoću spektrofotometra CCS200/M kompanije Thorlabs. Merni opseg talasnih dužina ovog spektrofotometra nad kojima su vršena merenja je 200-1000 nm, sa FWHM spektralnom tačnošću ~ 2 nm.

Tabela 8-2. Jačina svetlosti odabranih LED izvora

Boja LED izvora	Ljubičasta	Plava	Zelena	Žutozelena	Crvena	Daleka crvena
Jačina svetlosti [mcd]	1000	7000	10000	1500	2000	1500



Slika 8-8. Spektri korišćenih LED izvora

Za svaki od LED izvora izmerena je vršna talasna dužina i izračunata je centralna, centroidna i dominantna talasna dužina, kao i FWHM. Definicije ovih parametara date su ranije u poglavlju 6.7.1.

Merena vršna talasna dužina određena je pronalaskom maksimalne vrednosti relativnog intenziteta iz spektralne krive merenog LED izvora. Opseg talasnih dužina FWHM određen je razlikom talasnih dužina za koje je relativni intenzitet opao na 50% svog maksimuma. Centralna talasna dužina LED izvora određena je kao srednja talasna dužina nad FWHM. Centroidna talasna dužina LED izvora određena je kao:

$$\text{Centroidna talasna dužina} = \frac{\sum(\lambda \cdot S(\lambda))}{\sum S(\lambda)} \quad (8-4)$$

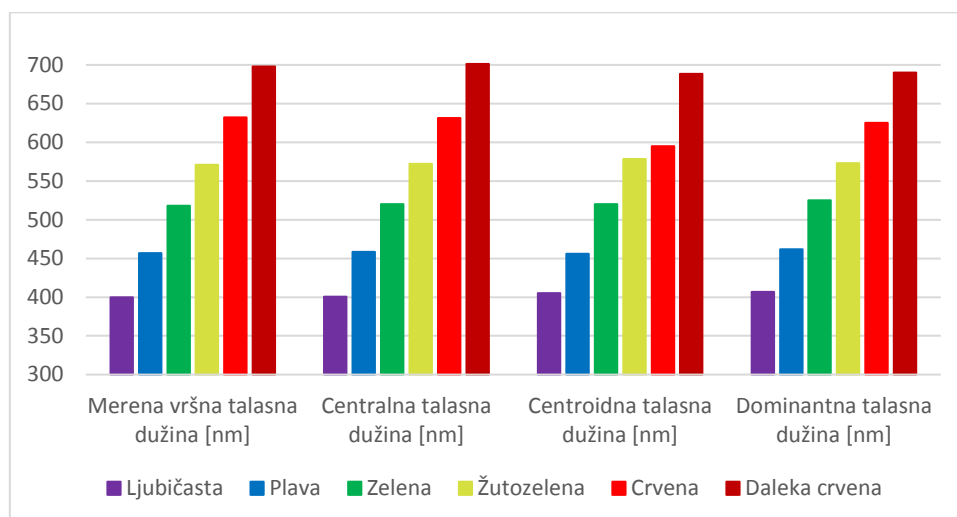
pri čemu je λ talasna dužina, a $S(\lambda)$ relativni intenzitet.

Za određivanje dominantne talasne dužine potrebno je predstaviti LED izvor u CIE xy hromatskom dijagramu.

Svi izmereni i izračunati parametri dati su numerički u tabeli 8-3, dok su uporedne vrednosti za svih šest LED izvora grafički prikazane na slici 8-9.

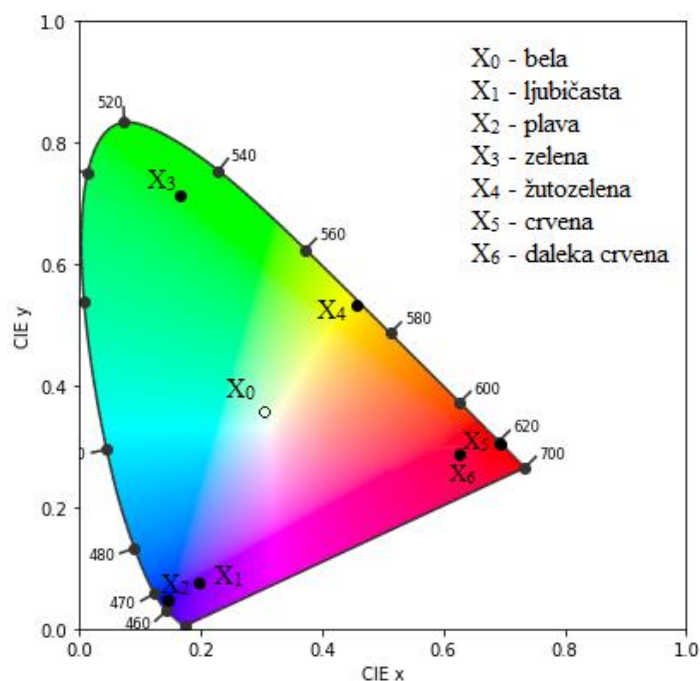
Tabela 8-3. Odabir LED svetlosnih izvora

Parametri LED izvora	Ljubičasta	Plava	Zelena	Žutozelena	Crvena	Daleka crvena
Merena vršna talasna dužina [nm]	400	457	518	571	632	698
FWHM [nm]	13.86	19.89	29.04	16.98	26.91	22.35
Centralna talasna dužina [nm]	400.78	458.45	520.28	572.06	631.37	701.12
Centroidna talasna dužina [nm]	405.03	456.14	519.99	578.41	595.14	688.45
Dominantna talasna dužina [nm]	407	462	525	573	625	690



Slika 8-9. Uporedne vrednosti vršne, centralne, centroidne i dominantne talasne dužine za sve korišćene LED izvore

LED izvori na CIE 1931 hromatskom dijagramu (slika 8-10), označeni su punim kružićem, a njihove hromatske koordinate su date u tabeli 8-4. Dodatna tačka X_0 na hromatskom dijagramu, označena praznim kružićem predstavlja poziciju referentnog izvora bele svetlosti.

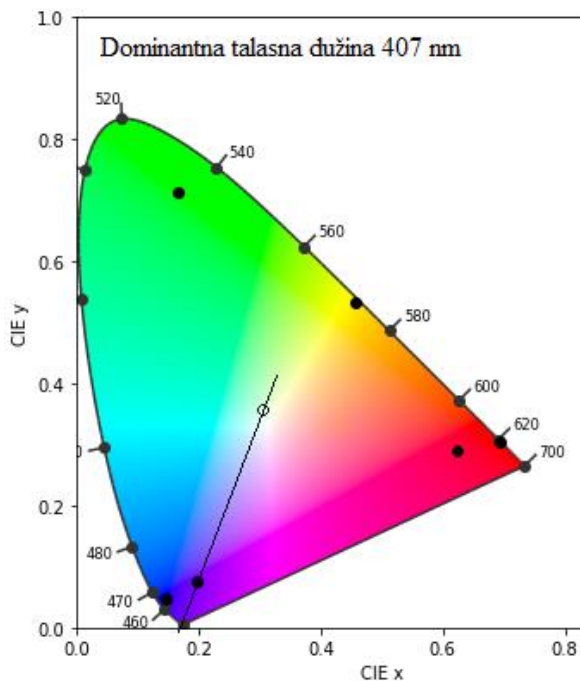


Slika 8-10. CIE 1931 Hromatski dijagram sa obeleženim LED izvorima

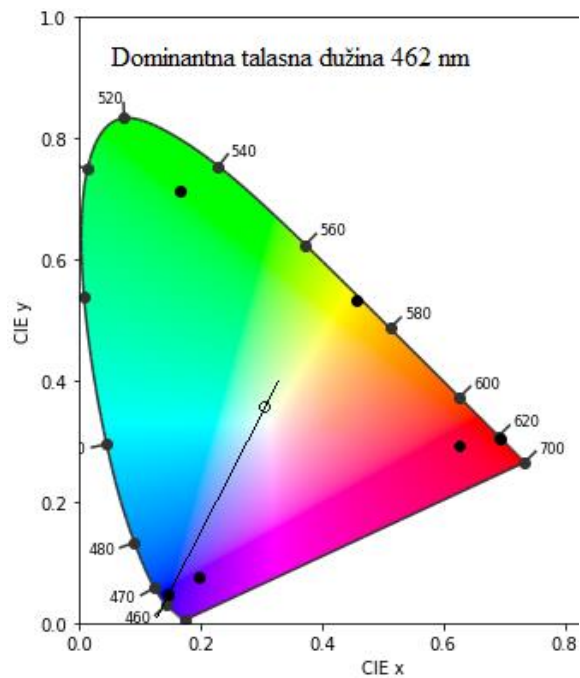
Tabela 8-4. Hromatske koordinate odabranih LED izvora

	x	y
Ljubičasta	0.19782147	0.07561701
Plava	0.14599374	0.04765087
Zelena	0.16511007	0.7135657
Žutozelena	0.45689534	0.53336052
Crvena	0.69455163	0.30395127
Daleka crvena	0.61276982	0.3097597
Bela	0.31486168	0.37191134

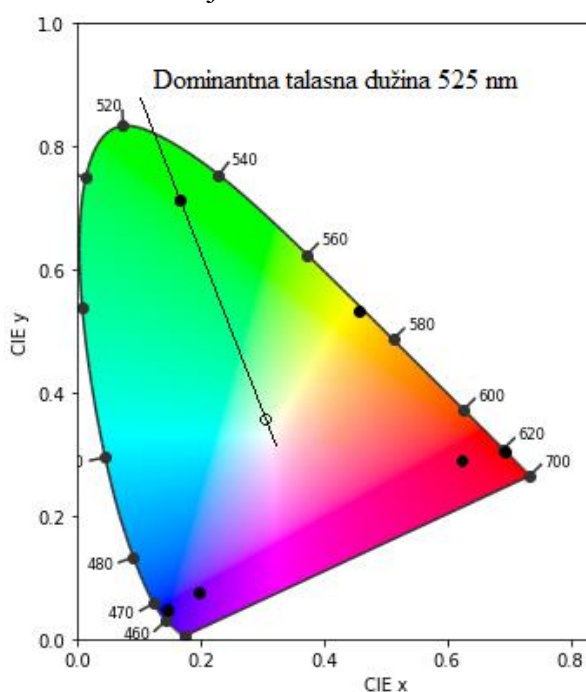
Provlačenjem prave kroz dve tačke, od kojih je jedna tačka referentni izvor bele svetlosti, a druga tačka pozicija LED izvora (njene hromatske koordinate) na CIE dijagramu, dobija se dominantna talasna dužina datog LED izvora na mestu preseka sa granicom hromatskog dijagrama. Na slici 8-11 prikazane su dominantne talasne dužine svih korišćenih LED izvora.



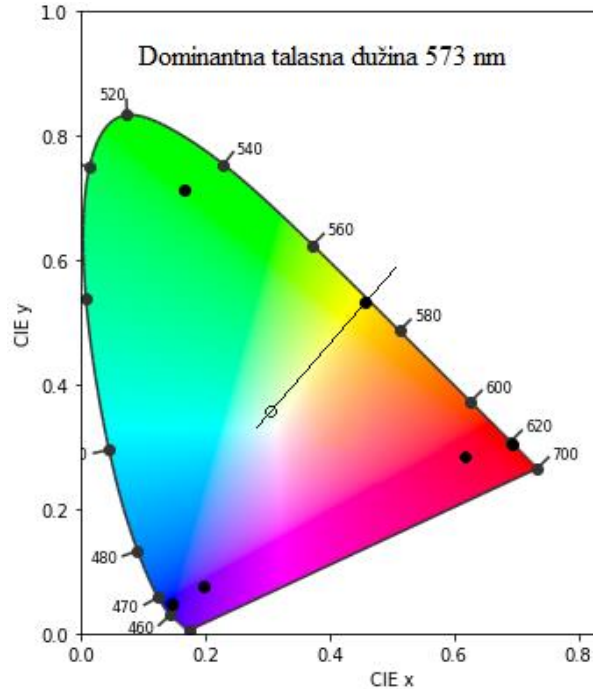
Ljubičasta LED



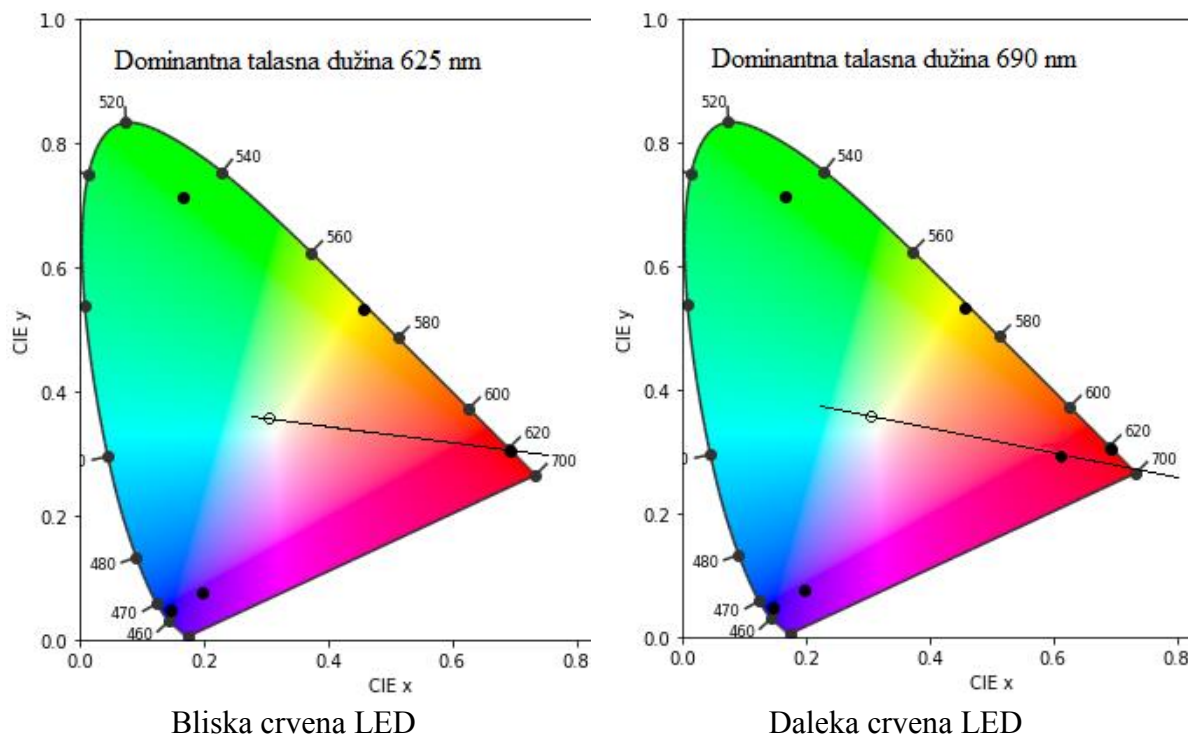
Plava LED



Zelena LED



Žutozelena LED

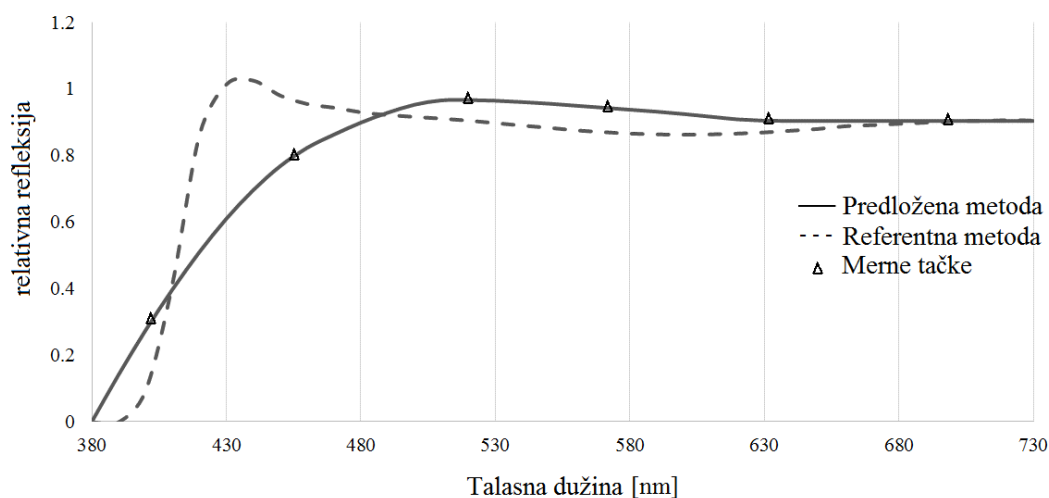


Slika 8-11. Pozicije LED izvora u hromatskom dijagramu CIE 1931, i njihove dominantne talasne dužine

8.1.5. SPEKTRALNA REFLEKSIJA FOTODETEKTORA TSL14SM

Širokopojasni silicijumski fotodetektor TSL14SM koji se sastoji od integrisanog sklopa fotodiode i transimpedansnog pojačavača iskorišćen je za prikupljanje reflektovanog intenziteta u sklopu kolorimetrijske sonde realizovane u ovoj disertaciji. Osetljivost ovog fotodetektora za bliske UV i ljubičaste talasne dužine (u opsegu 300-400 nm) je nešto niža u odnosu na ostatak vidljivog (400-700 nm) i bliski infracrveni deo spektra koji je zahvaćen merenjem (700-730 nm) gde fotodiode ima visoku osetljivost.

Poređenje reflektovanih spektara dobijenih korišćenjem referentne spektrofotometrijske i predložene metode u ovoj disertaciji (Cubic-Hermitovom interpolacijom nad merenim talasnim dužinama LED izvora) dato je na slici 8-12.



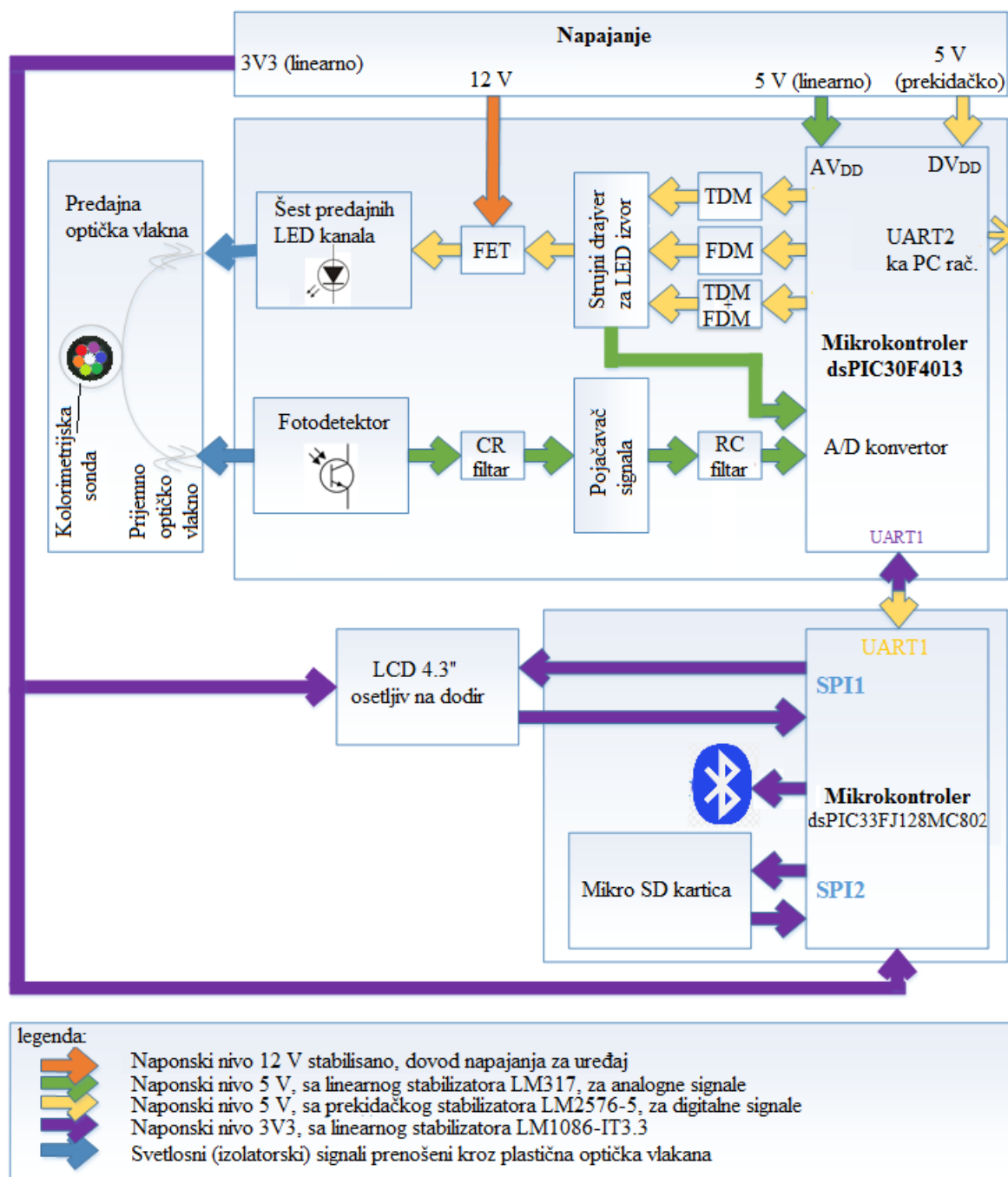
Slika 8-12. Testiranje odziva fotodetektora na referentnoj beloj podlozi

8.2. ELEKTRONSKI SKLOP

Hardverska struktura uređaja realizovanog u ovoj disertaciji koja čini elektronski sklop prikazan na slici 8-13, može se sagledati iz nekoliko modula. Prvi modul čini napojna jedinica, koja obezbeđuje napajanje kako analognim, tako i digitalnim komponentama.

Drugi modul sastoji se iz predajnog, prijemnog i upravljačkog sklopa. Predajni sklop čine LED izvori sa strujnim drajverima i FET tranzistorima. Prijemni sklop čine fotodetektor, operacioni pojačavač za pojačanje signala i pasivni RC i CR filtri koji odstranjuju komponente neželjenih frekvencija iz prijemnog signala. Upravljački sklop ima ulogu da sinhronizovano upravlja predajnim i prijemnim sklopom, obavljajući operacije multipleksiranja i demultipleksiranja signala. Glavna komponenta upravljačkog bloka je mikrokontroler kompanije *Microchip*, dsPIC30F4013.

Treći modul obuhvata mikrokontroler kompanije *Microchip*, dsPIC33FJ128MC802 a njegova uloga je da upravlja radom TFT ekrana (eng. *Thin Film Transistor*) veličine 4.3" sa rezolucijom 480x272, kao i tač panela pomoću odgovarajućih drajvera. Takođe, ovaj modul ima ulogu i da bežičnim putem pomoću Bluetooth tehnologije prosleđuje rezultate merenja na PC (eng. *Personal Computer*) radi dalje obrade. Komunikacija između drugog i trećeg modula odvija se putem integrisane hardverske jedinice za serijsku komunikaciju - UART (eng. *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*).



Slika 8-13. Hardverska organizacija uređaja

8.2.1. NAPAJANJE

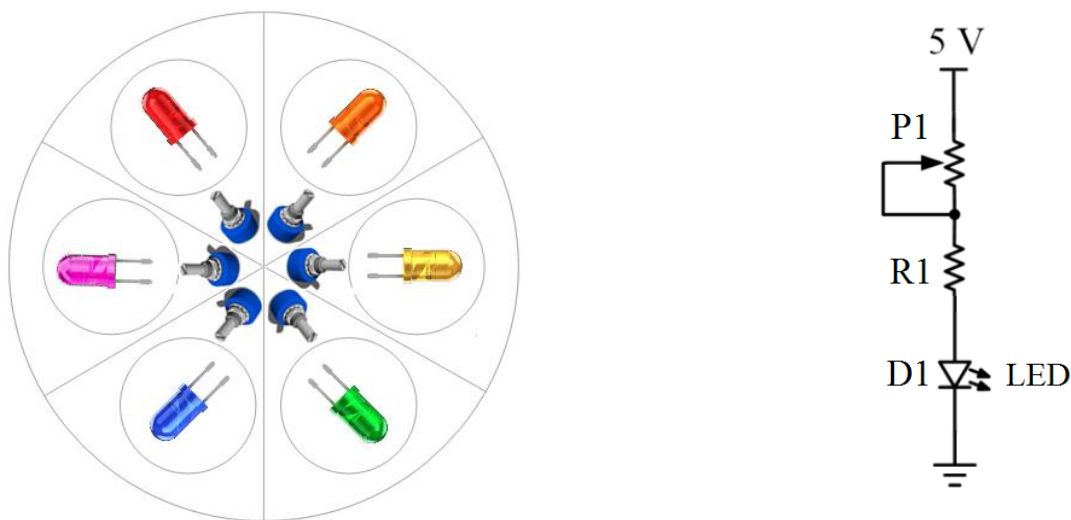
Poznato je da prekidačka napajanja ostvaruju znatno veći faktor korisnog dejstva u odnosu na linearne pretvarače. Džulovi gubici na tranzistoru u slučaju linearnih napajanja su izuzetno veliki pa je efikasnost ovih napajanja često redukovana na ispod 30%, za razliku od prekidačkih napajanja čija efikasnost se kreće u opsegu oko 90%. To je posledica činjenice da tranzistor kod njih radi u prekidačkom režimu, tj. prelazi iz režima saturacije u režim zakočenja i obrnuto, čime je izbegnut rad u linearnoj oblasti.

Zbog osetljivih odziva analognih senzora dizajnirano je napajanje pomoću linearnog stabilizatora napona, oznake LM317, dok je za manje osetljive, digitalne delove kola odabran efikasniji stabilizator, koji radi u prekidačkom režimu, oznake LM2576. Takođe, referentna

tačka (masa) digitalnih komponenti je feritnom perlom razdvojena od referentne tačke (mase) analognih komponenti. Na ovaj način je obezbeđeno da se neželjeni šumovi iz prekidačkih komponenti ne prenose na osetljive analogne signale malih amplituda.

8.2.2. PREDAJNI BLOK

Kako se u predajnom bloku nalazi šest LED izvora, potrebno je obezbediti drajverska kola za nezavisno regulisanje intenziteta svetlosti svakog LED izvora (ilustrovano na slici 8-14a). Veoma jednostavno drajversko kolo moglo bi se implementirati upotrebom potencijometra i otpora u grani sa LED izvorom, kao što je prikazano na slici 8-14b.



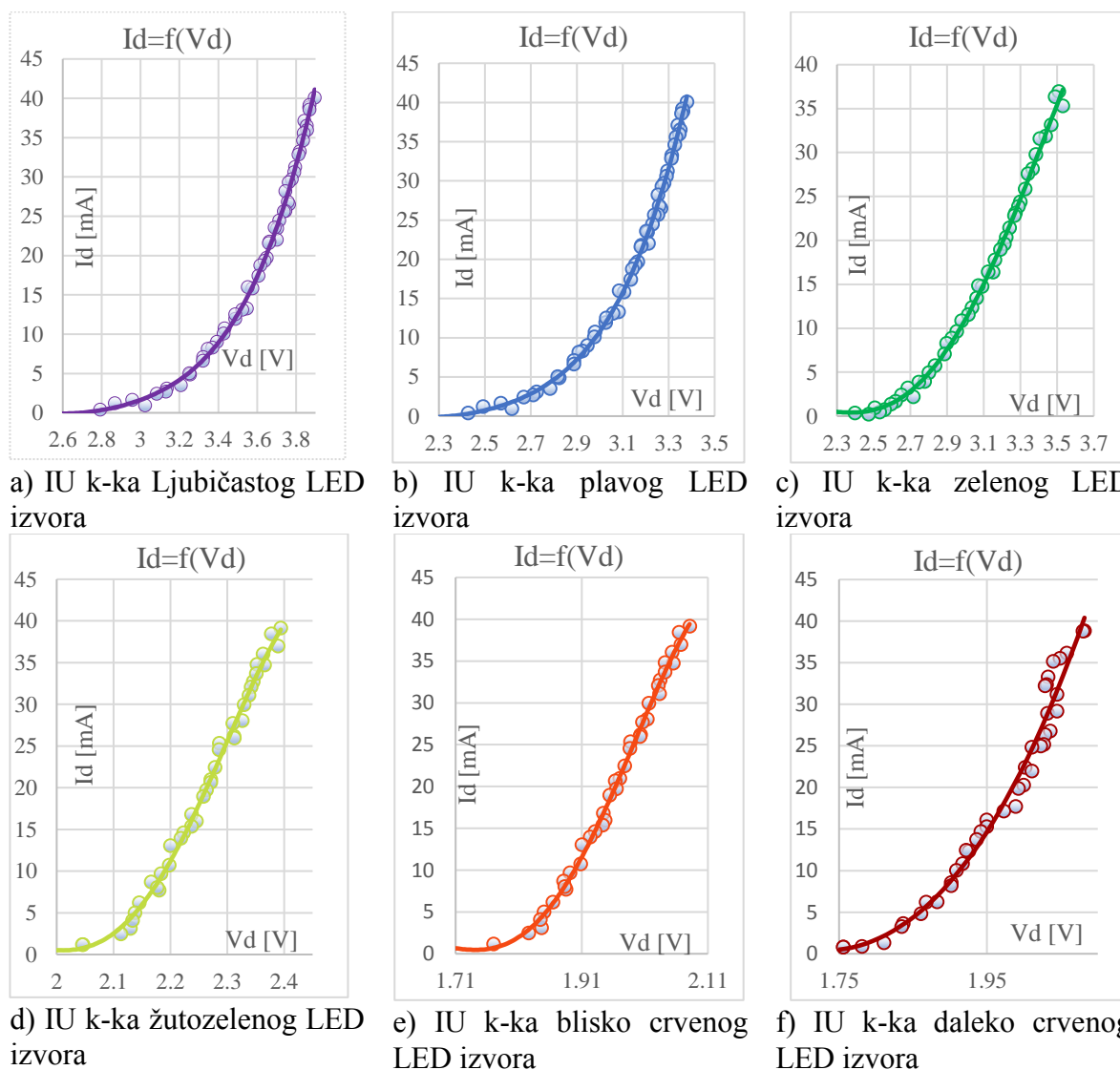
Slika 8-14.

a) Nezavisno upravljanje intenzitetom LED izvora b) Primer jednostavnog drajverskog kola

Međutim, pri ovakvoj realizaciji drajverskog kola pomeranjem klizača potencijometra P_1 se ostvaruje veoma nelinearna (nagla) promena intenziteta na optičkim LED izvorima. Budući da ovaj drajver ne predstavlja odgovarajuće rešenje za upravljanje intenzitetom LED izvora u ovoj disertaciji, iskorišćen je samo u svrhu eksperimentalnog snimanja strujno naponskih karakteristika u propusnom smeru za svih šest korišćenih LED izvora.

Otpornik R_1 služi da ograniči struju kroz LED izvor, u slučaju kada je na potencijometru P_1 podešena otpornost 0Ω . Pad napona na LED izvoru beleži se automatski pomoću priključenog A/D konvertora, a promena napona se vrši pomoću potencijometra koji se nalazi neposredno posle DC izvora koje napaja drajversko kolo.

Na slici 8-15 prikazane su snimljene strujno naponske karakteristike LED izvora za ljubičasti, plavi, zeleni, žutozeleni, bliski crveni i daleki crveni LED izvor. Na apscisama su prikazani padovi napona na LED izvorima, dok su na ordinatama prikazane struje kroz LED izvore. Kružićima su obeležene diskretne vrednosti dobijene merenjem, dok su punim linijama obeležene fitovane krive.



Slika 8-15. Snimanje strujno – naponskih karakteristika LED izvora

Na strujno-naponskim (IU) karakteristikama sa slika 8-15a-f može se primetiti da direktna struja kroz LED izvor počinje da teče nakon dostizanja napona praga, nakon čega naglo raste sa daljim porastom napona.

U blizini p - n spoja se formira oblast prostornog tovara ili osiromašena oblast, u kojoj nema slobodnih nosilaca elektriciteta [122]. To znači da se oblast oko p - n spoja ponaša kao izolator. Dijagrami zavisnosti struje od napona (slika 8-15a-f) opisuju ponašanje u osiromašenoj oblasti u poluprovodničkoj diodi. Kada se na priključke p - n spoja poveže naponski izvor tako da se pozitivan kraj postavi na p priključak, a negativan kraj na n priključak, doći će do smanjenja potencijalne barijere na spoju, do sužavanja osiromašene oblasti i olakšane pokretljivosti većinskih nosilaca elektriciteta preko spoja. Elektroni, koji predstavljaju većinske nosioce u n oblasti, difuzijom prelaze u p oblast, a šupljine, koje su većinski nosioci u p oblasti, difuzijom prelaze u n oblast, gde se vrši njihova rekombinacija. Kako je električno kolo zatvoreno, postojaće stalna difuzija nosilaca preko spoja, odnosno, postojaće struja kroz p - n spoj. Naime, pošto se povećava razlika potencijala između elektroda LED izvora, dolazi do stanja kada on postaje provodan. Struja kroz direktno polarizovanu diodu sastoji se od struje većinskih nosilaca (difuzne struje) i struje manjinskih nosilaca (struja usled električnog polja).

Budući da ove dve struje imaju suprotan smer, ukupna struja kroz direktno polarisan $p-n$ spoj može se odrediti kao njihova razlika [123]:

$$I = I_D - I_E = Ke^{\frac{U_0 - U}{kT}} - Ke^{-\frac{eU_0}{kT}} = I_S(e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \approx I_S e^{\frac{U}{U_T}} \quad (8-5)$$

pri čemu je K konstanta koja zavisi od geometrijskih karakteristika $p-n$ spoja, U_0 napon potencijalne barijere, U napon na spoju, k Bolcmanova konstanta, a T temperatura.

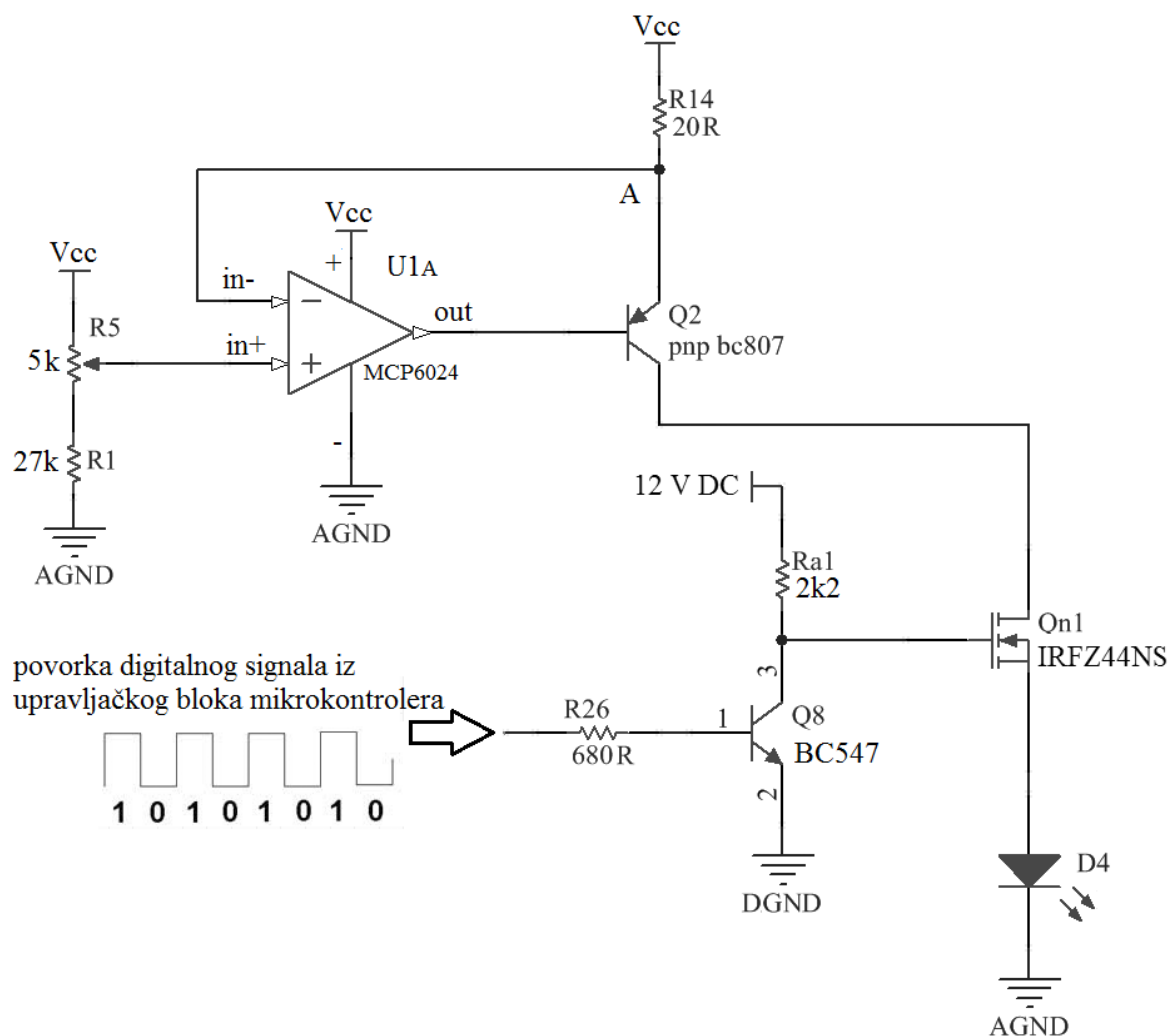
Struja I_S se naziva struja zasićenja i direktno je proporcionalna površini $p-n$ spoja. Napon U_T se naziva termički napon, a određuje se prema [123]:

$$U_T = \frac{kT}{e} \quad (8-6)$$

Na sobnoj temperaturi termički napon iznosi $U_T \approx 25 \text{ mV}$.

8.2.2.1. STRUJNI DRAJVERI ZA UPRAVLJANJE INTENZITETOM LED IZVORA

Budući da će u predloženoj metodi u svrhu kalibracije uređaja biti potreban što linearniji odziv upravljanja intenzitetima LED izvora, implementacija linearnih strujnih drajverskih kola na predajnoj strani predstavlja optimalno rešenje. Jedan od šest sklopova realizovanog predajnog kola sa strujnim drajverom prikazan je na slici 8-16. Preostalih pet kanala se jedino razlikuju po talasnoj dužini LED izvora, i zbog jednostavnosti biće izostavljeni iz prikaza.



Slika 8-16. Strujni drajver za upravljanje intenzitetom LED izvora

Strujni drajver u ovom sklopu čine otpornik R_{14} , tranzistor Q_2 , operacioni pojačavač MCP6024 (U_{1A}) i potencijometar R_5 . Prednost korišćenja ovakvog kola u odnosu na prethodno prikazani drajver je u tome što je jačina struje kroz granu potrošača nezavisna od otpornosti potrošača. Potencijometar R_5 ima funkciju razdelnika napona, koji obezbeđuje referentni napon V_{ref} kako na neinvertujućem, tako i na invertujućem ulazu operacionog pojačavača. Bipolarni PNP tranzistor BC807 (Q_2 na slici 8-16) je u ulozi strujnog pojačavača. Struja u grani emiter-kolektor biće h_{FE} puta veća od struje spoja emiter-baza. Operacioni pojačavač može da varira struju spoja emiter-baza tranzistora Q_2 . Kada ovo kolo isporučuje struju potrošaču, potencijal na bazi tranzistora Q_2 bi trebao biti za 0.7 V niži od potencijala na emiteru. Pad napona na spoju emitor-kolektor je obično nešto veći od 0.3 V.

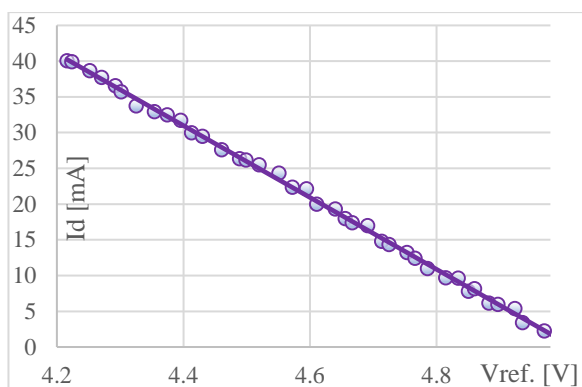
Operacioni pojačavač će stalno nastojati da održava što minimalniju razliku između napona na invertujućem i neinvertujućem ulazu. Drugim rečima, napon na emiteru će biti jednak referentnom naponu V_{ref} . Izlazna struja zavisi od otpornosti R_{14} i napona na klizaču potencijometra R_5 , i može se predstaviti kao:

$$I_{OUT} = \frac{V_{CC} - V_{ref}}{R_{14}} \quad (8-7)$$

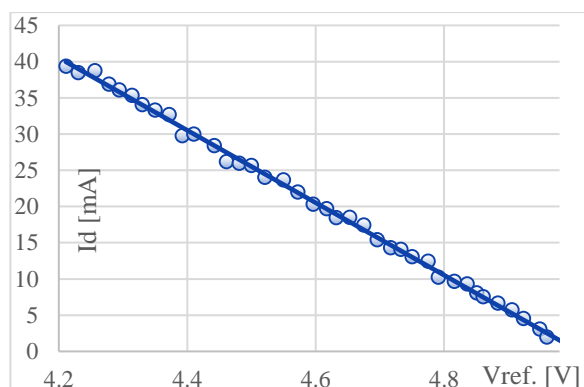
Otpornik R_1 (u ulozi predotpora na potencijometru) i potencijometar R_5 u kombinaciji sa operacionim pojačavačem U_{1A} (baferom) i pnp tranzistorom Q_2 , služe za kontrolu referentnog

napona u tački A, i na taj način regulišu struju u grani sa LED izvorom koja ne sme da prelazi maksimum od 40 mA, pri minimalnom naponu u tački A, koji iznosi 4.2 V. Napon u tački A zavisi od položaja klizača potenciometra R_5 . Maksimalna vrednost koju ovaj napon može da ima, kada je klizač potenciometra spojen na napon napajanja, iznosi 5 V, i tada struja ne teče kroz LED.

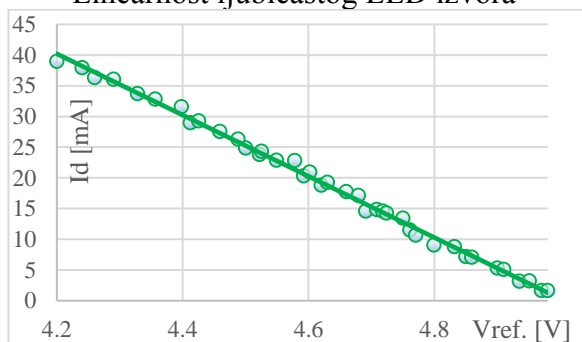
Na slici 8-17 prikazani su rezultati testiranja linearnosti opisanog strujnog drajvera na svih šest predajnih kanala, i to sa ljubičastim, plavim, zelenim, žutozelenim, bliskim crvenim i dalekim crvenim LED izvorom. Karakteristike prikazuju promenu struje kroz LED izvor u zavisnosti od promene položaja klizača na potenciometru strujnog drajvera. Zbog prisustva predotpornika R_1 , formiran je ofset koji obezbeđuje da se referentni napon u tački A može menjati od 4.2 V do 5 V. Karakteristike su snimljene ručnim okretanjem klizača potenciometra i automatskim beleženjem vrednosti napona u referentnoj tački A pomoću A/D konvertora. Struja je računata prema izrazu (8-7). Kružićima su obeležene diskretne vrednosti, dok su fitovane krive označene punim linijama.



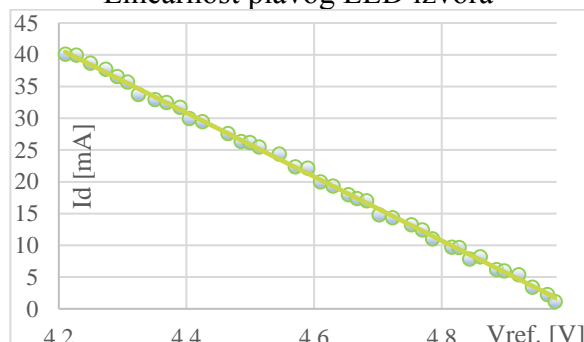
Linearnost ljubičastog LED izvora



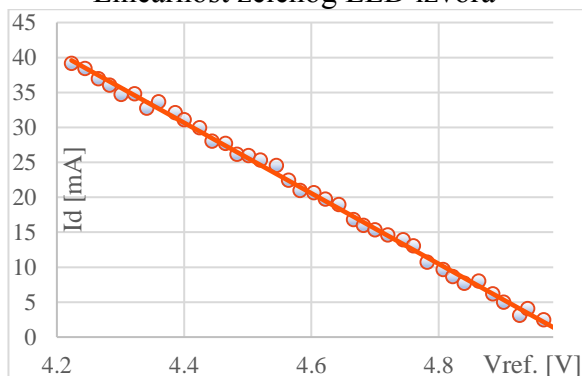
Linearnost plavog LED izvora



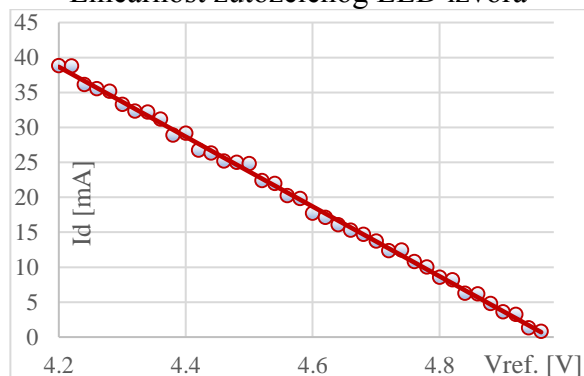
Linearnost zelenog LED izvora



Linearnost žutozelenog LED izvora



Linearnost blisko crvenog LED izvora



Linearnost daleko crvenog LED izvora

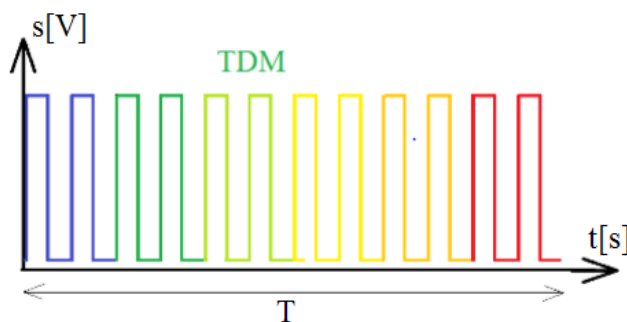
Slika 8-17. Snimanje karakteristika implementiranih strujnih drajvera

LED izvore u predajnom kolu je potrebno pobuđivati impulsima odgovarajuće frekvencije koje će generisati mikrokontroler, ali pošto postoji razlika u naponskim nivoima koje koriste mikrokontroler i MOSFET tranzistor (*eng. Metal Oxide Field Effect Transistor*) za upravljanje, realizovan je prilagodni deo predajnog kola koga čine tranzistori Q_{n1} i Q_8 , kao i otpornici R_{a1} i R_{26} (slika 8-16). Tranzistor Q_{n1} je n - kanalni MOSFET oznake IRFZ44NS, sa veoma malom otpornošću između elektroda drejna i sorsa u „uključenom“ stanju. Na upravljačku elektrodu ovog tranzistora je potrebno dovesti minimalni napon $V_{GS} \geq 10V$ kako bi on prešao u oblast zasićenja (zatvorio „prekidač“ ka LED izvoru), a pošto se upravljanje vrši sa izlaznog pina mikrokontrolera čiji je radni napon 5 V, dodat je i NPN tranzistor Q_8 (BC547) i povezan u kolo kao prekidač uz otpornike R_{a1} i R_{26} radi prilagođenja naponske logike.

Budući da na predajnoj strani ima šest LED izvora (i da postoji šest identičnih predajnih podsklopova poput ovog sa slike 8-16), potrebno je primeniti tehnike multipleksiranja. Multipleksiranje u osnovi predstavlja zajedničko deljenje prenosnih kapaciteta od strane više tokova podataka koji nose informacije. Signali na predajnoj strani se obično multipleksiraju vremenski, TDM (*eng. Time Domain Multiplexing*), ili frekvencijski, FDM (*eng. Frequency Domain Multiplexing*).

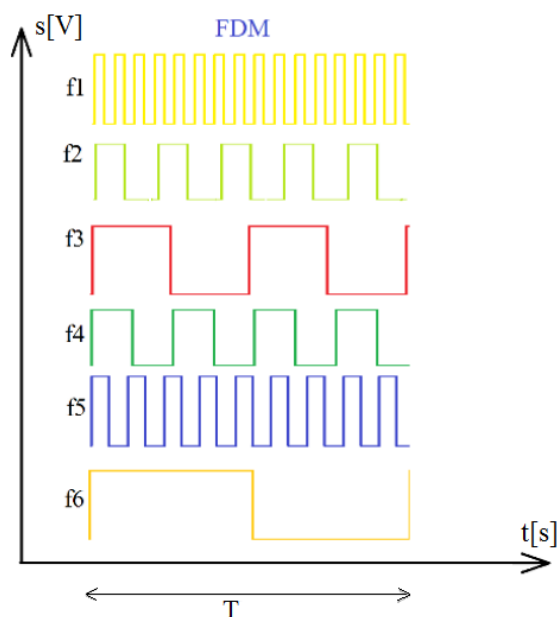
8.2.2.2. MULTIPLEKSIRANJE PREDAJNIH SIGNALA

U opštem slučaju, multipleksiranje sa vremenskom podelom daje bolje rezultate jer je u jednom vremenskom intervalu aktivan samo jedan LED izvor. Međutim, u ovom slučaju odziv sistema može biti veoma spor. Na slici 8-18 je prikazan uprošćen prikaz TDM signala, gde su naponski signali $s[V]$ za upravljanje različitim LED izvorima označeni odgovarajućom bojom pojedinačnih LED izvora.



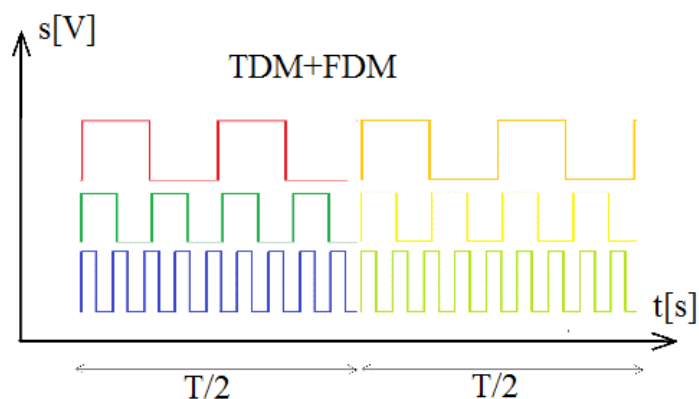
Slika 8-18. Ilustrativan primer upravljanja LED izvorima pomoću TDM-a

Sa druge strane, multipleksiranje sa podelom frekvencija daje odlične rezultate u pogledu brzine. Međutim, kod ovakvog tipa multipleksiranja signali različitih frekvencija su predstavljeni jednim kompozitnim signalom, pa se javlja problem sa skraćivanjem dinamičkog opsega. Ovo direktno utiče na smanjenje rezolucije merenja na prijemnoj strani. Na slici 8-19 je ilustrovan uprošćen prikaz FDM signala.



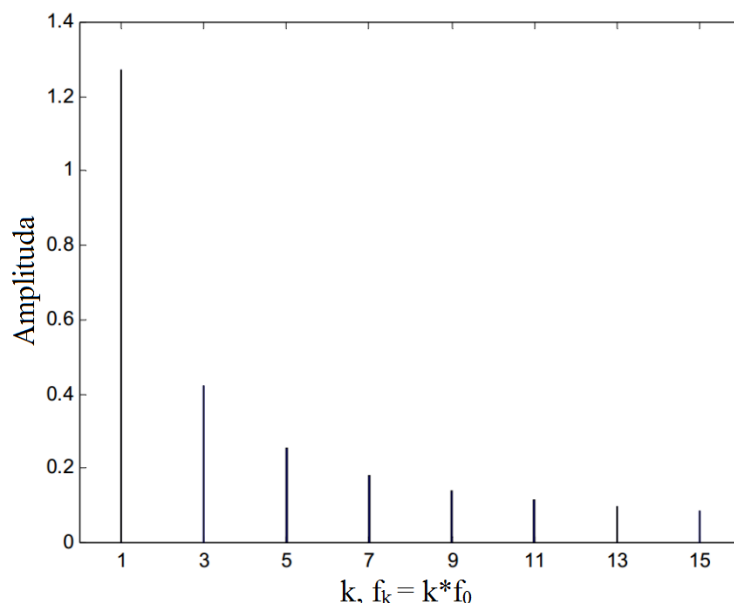
Slika 8-19. Ilustrativan primer upravljanja LED izvorima pomoću FDM-a

Kao optimalno rešenje, koje zahteva kompromis između brzine rada i rezolucije (dinamičkog opsega), u ovoj disertaciji za usklađivanje pobude na predajnom bloku je korišćena kombinacija vremenskog i frekvencijskog multipleksiranja. Naime, u prvoj polovini periode T istovremeno se pobuđuju tri LED izvora na različito odabranim frekvencijama, dok se u drugoj polovini periode T preostala tri LED izvora pobuđuju istim tim frekvencijama. Ovakva vrsta pobude prikazana je na slici 8-20.



Slika 8-20. Kombinovano vremensko i frekvencijsko multipleksiranje

Kada je reč o odabiru fekvencija, FDM signali ne smeju da budu previše spori jer uređaj mora da radi u realnom vremenu, a ni previše brzi da bi integrisani A/D konvertor (*eng. Analog to Digital Converter*) mikrokontrolera stigao da ih prati. Pored toga, potrebno je obratiti pažnju na harmonike koje stvaraju pobudni signali – četvrtke. Prema [124], kao što je prikazano na slici 8-21, svaka linija iz linijskog spektra četvrtke odgovara frekvenciji jednog harmonika. Visina linije (amplituda) označava doprinos date frekvencije signalu.



Slika 8-21. Linijski spektar signala četvrtke [124]

Uticaj harmonika na amplitudu i frekvenciju [124] dat je na sledeći način:

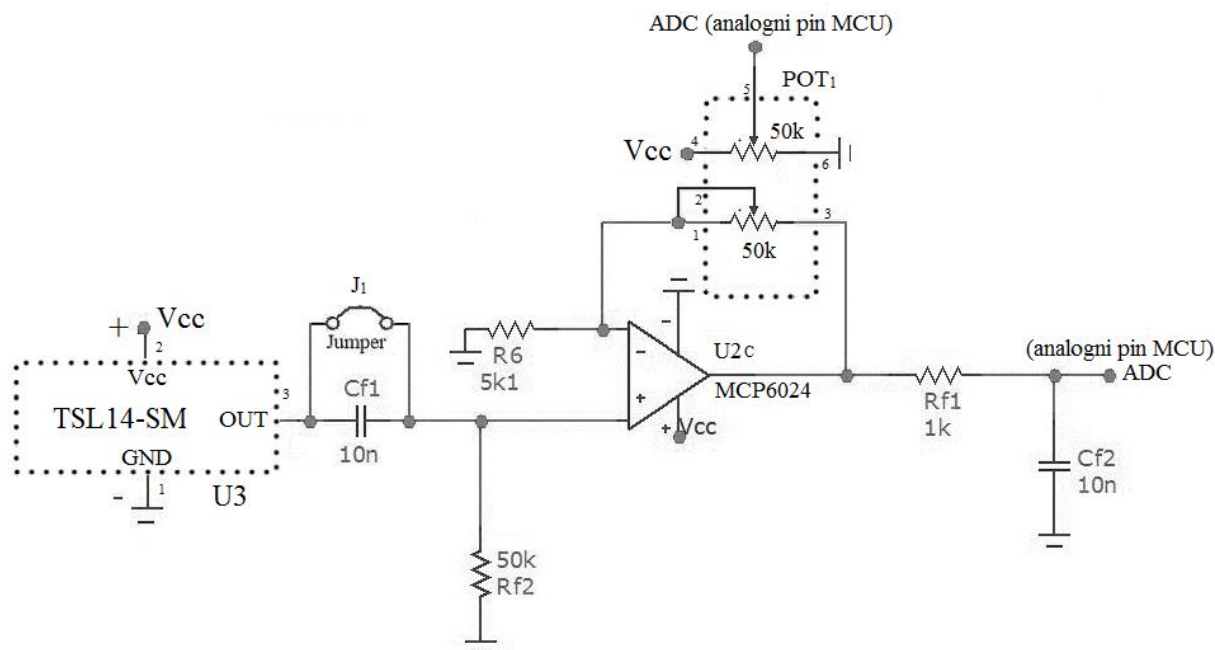
$$A_k = \begin{cases} \frac{4}{\pi k} & k = 1,3,5 \dots \\ 0 & k = 0,2,4 \dots \end{cases} \quad (8-8)$$

$$f_k = k \cdot f_0 \quad (8-9)$$

U kombinovanoj vremensko frekvencijskoj pobudi LED izvora odabrane su sledeće frekvencije za FDM: 2.5 kHz, 5 kHz i 10 kHz kako bi se izbegli neželjeni uticaji signala nižih frekvencija na signale viših frekvencija.

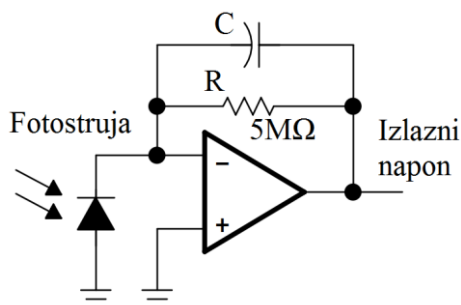
8.2.3. PRIJEMNI BLOK

Na ulazu prijemnog bloka (slika 8-22) nalazi se odabrani silicijumski fotodetektor, TSL-14SM, koji se, kao što je već napomenuto sastoji od monolitnog integrisanog kola sa fotodiodom i transimpedansnim pojačavačem, ali i otpornikom od 5 MΩ u kolu povratne sprege transimpedansnog pojačavača. Ovaj senzor reaguje na svetlost u opsegu talasnih dužina 320 – 1050 nm, i na svom izlazu daje linearnu promenu napona sa promenom intenziteta upadne svetlosti na fotiododi. Pored ovog fotodetektora testirani su i slični modeli sa oznakama TSL-250 i TSL-257. Međutim, pokazalo se da ovi detektori imaju manju osetljivost, pa je ipak odabran TSL-14SM.



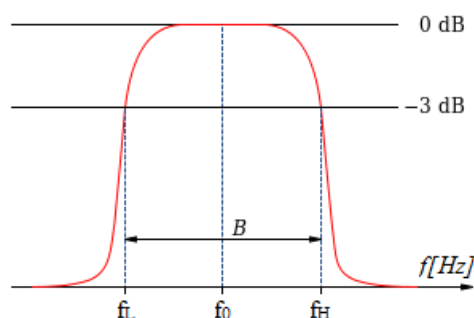
Slika 8-22. Električna šema prijemnog bloka

Električna šema fotodetektora sa slike 8-22, koji je povezan na konektor obeležen sa U3, data je na slici 8-23. Ovo kolo predstavlja konfiguraciju sa operacionim pojačavačem i jednim otpornikom u kolu povratne sprege, koja omogućava upravo to da se linearna promena struje na ulazu konvertuje u linearnu promenu napona na izlazu.



Slika 8-23. Unutrašnji sklop fotodetektora TSL-14SM

Kako je reflektovani signal koji dolazi sa ovog senzora veoma male amplitude, prijemno kolo sadrži i neinvertujući operacioni pojačavač kompanije *Microchip*, *MCP602* (označen sa U2 na šemi) sa izmenjivim pojačanjem koje omogućava potenciometar *POT1* u kombinaciji sa fiksnim otpornikom *R6*. Kondenzator *Cf1* zajedno sa otpornikom *Rf1* sačinjava pasivni visokopropusni (*CR*) filter prvog reda čija je uloga da ukloni jednosmernu komponentu koja kod ovakvog tipa senzora zasnovanog na promeni intenziteta može da unese dodatne greške. Na sličan način, da bi se eliminisale visokofrekventne smetnje, korišćen je pasivni niskopropusni (*RC*) filter prvog reda koga sačinjavaju *Rf1* i *Cf2*. Na ovaj način gradi se filter propusnik opsega (slika 8-24), koji propušta signale željenog opsega učestanosti.



Slika 8-24. Filtar propusnik opsega učestanosti pomoću pasivnih RC i CR filtara

U našem slučaju, koristan signal će biti u opsegu frekvencija 2.5 kHz-10 kHz. Granične frekvencije f_L i f_H koje eliminišu jednosmernu i visokofrekventnu komponentu postavljaju se prema:

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_{f1} C_{f2}}, \quad f_H = \frac{1}{2\pi R_{f2} C_{f1}} \quad (8-10)$$

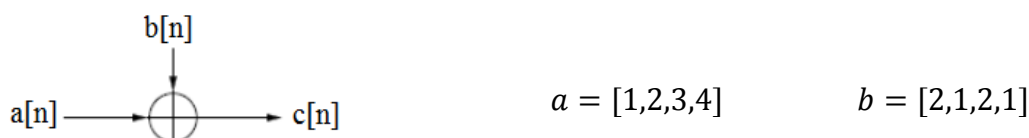
Na mesto potencijometra POT₁ postavljen je stereo potencijometar kako bi se u upravljački blok (ka A/D konvertoru mikrokontrolera) vratila povratna informacija o podešenom pojačanju. Uloga kratkospojnika (džampera) J_1 je da dozvoli očitavanje jednosmerne komponente sa fotodetektora, tj. da se na ovaj način eliminiše CR filter ukoliko za time ima potrebe. U opštem slučaju, ovaj džemper je odspojen iz kola i RC filter ima funkciju odstranjivanja jednosmerne komponente.

8.2.3.1. DEMULTIPLESIRANJE SIGNALA

Budući da su predajni svetlosni signali na LED izvorima multipleksirani, potrebno je izvršiti i sinhronizovano demultipleksiranje prijemnih signala sa fotodetektora, pomoću digitalnih filtara implementiranim na mikrokontroleru. Digitalna filtracija se najčešće postiže na dva načina, primenom filtra sa konačnim impulsnim odzivom (*eng. Finite Impulse Response - FIR*), ili primenom filtra sa beskonačnim impulsnim odzivom (*eng. Infinite Impulse Response - IIR*). Digitalni filtri kreirani u ovoj disertaciji implementirani su u algoritam rada mikrokontrolera dsPIC30F4013 koji se nalazi u upravljačkom bloku. U nastavku će najpre biti opisani sastavni delovi filtara, kao i strukture FIR i IIR filtara, a zatim će biti prikazani implementirani filtri i njihovi odzivi za sva tri propusna opsega (2.5kHz, 5kHz i 10kHz).

8.2.3.2. OSNOVNI ELEMENTI FILTARA

Svaki filter sastoji se od osnovnih elemenata, a to su sabirači, množači i elementi za kašnjenje. Na slici 8-25 prikazan je sabirač.



Slika 8-25. Osnovni element: sabirač

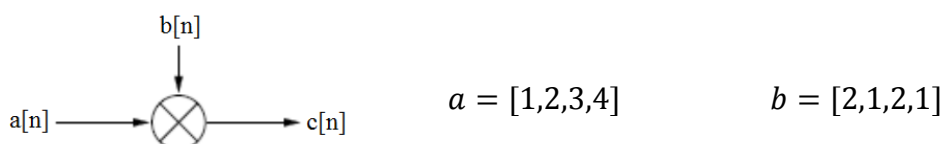
Parametri $a[n]$ i $b[n]$ predstavljaju ulaze sabirača, dok se parametar $c[n]$ karakteriše kao izlaz sabirača. Izlazni parametar u zavisnosti od zadatih ulaza određuje se kao $c[n] = a[n] + b[n]$, a pri tome važi:

$$\begin{aligned} c[0] &= a[0] + b[0] \\ c[1] &= a[1] + b[1] \\ c[2] &= a[2] + b[2] \\ c[3] &= a[3] + b[3] \end{aligned} \quad (8-11)$$

Može se zaključiti da su odgovarajući indeksi ulaznih parametara povezani sa odgovarajućim indeksima izlaznog parametra. Iz navedenih izraza dobija se $c[n]$:

$$c[n] = [3,3,5,5] \quad (8-12)$$

Na slici 8-26 prikazan je množač.



Slika 8-26. Osnovni element: množač

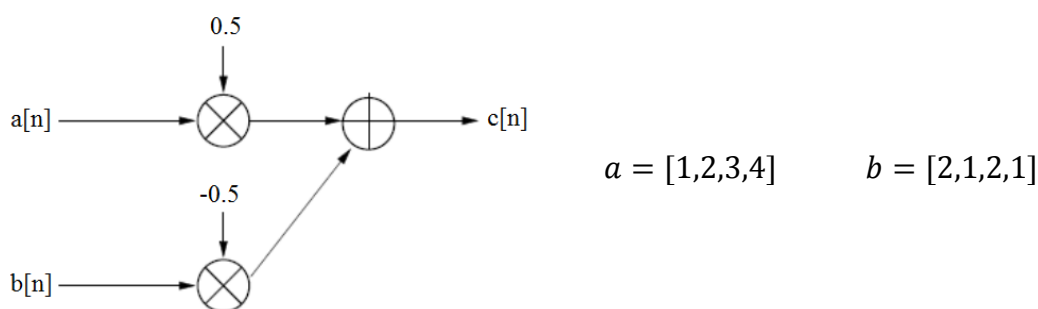
Slično kao i u slučaju sabirača, parametri $a[n]$ i $b[n]$ predstavljaju ulaze množača, dok se parametar $c[n]$ karakteriše kao izlaz množača. Izlazni parametar u zavisnosti od zadatih ulaza određuje se prema $c[n] = a[n] \times b[n]$, kao:

$$\begin{aligned} c[0] &= a[0] \times b[0] \\ c[1] &= a[1] \times b[1] \\ c[2] &= a[2] \times b[2] \\ c[3] &= a[3] \times b[3] \end{aligned} \quad (8-13)$$

Može se zaključiti da su odgovarajući indeksi ulaznih parametara povezani sa odgovarajućim indeksima izlaznog parametra. Iz navedenih izraza dobija se $c[n]$:

$$c[n] = [2,2,6,4] \quad (8-14)$$

Na slici 8-27 dat je primer jednog filtra koji sadrži dva množača čiji su koeficijenti 0.5 i -0.5 i jedan sabirač. Izlaz filtra određen je sa $c[n]$.



Slika 8-27. Primer filtra (FIR) sa koeficijetima množača 0.5 i -0.5

$$c = [1 \times 0.5 - 2 \times 0.5, 2 \times 0.5 - 1 \times 0.5, 3 \times 0.5 - 2 \times 0.5, 4 \times 0.5 - 1 \times 0.5] \quad (8-15)$$

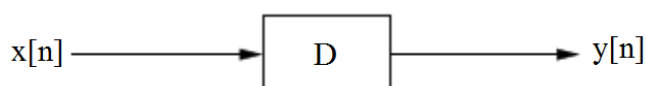
$$c = [-0.5, 0.5, 0.5, 1.5]$$

Iz ovoga se može zaključiti da je izlaz određen sa: $c[n] = 0.5 \times a[n] - 0.5 \times b[n]$.

Pored pomenuta dva elementa, sabirača i množača, za realizaciju filtra potrebno je predstaviti i element za kašnjenje koji pomera signal u vremenu. Kada je indeks izvan zadatog opsega, tada se vrednost signala za taj indeks predstavlja kao nulta vrednost. Ako signal nastaje jednostrukim kašnjenjem nekog signala x , kao što je prikazano na slici 8-28, i ako je $x = [1,3,5]$, tada se izlaz može predstaviti kao $y = [0,1,3,5]$. Relacije koje opisuju ovo kolo su:

$$\begin{aligned} x[-1] &= 0, & y[0] &= 0, \\ x[0] &= 1, & y[1] &= 1, \\ x[1] &= 0, & y[2] &= 0, \\ x[2] &= 1, & y[3] &= 1. \end{aligned} \quad (8-16)$$

pri čemu se zaključuje da važi: $y[n] = x[n - 1]$.

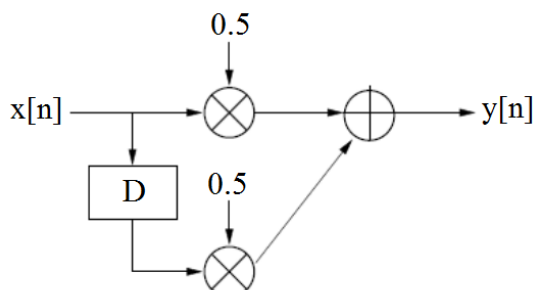


Slika 8-28. Element za kašnjenje, D

Element za kašnjenje obeležava se oznakom D (eng. *Delay*), a nekada u literaturi stoji i Z^{-1} zbog primene „Z“ transformacije, što ovde neće biti praktikovano.

8.2.3.3. FIR FILTER

Ukoliko su poznate broјčane vrednosti koje odgovaraju ulazima osnovnih elemenata, filter može biti u potpunosti opisan. Ove broјčane vrednosti predstavljaju koeficijente filtra. Osobina FIR filtera je to da izlaz zavisi samo od prethodnih ulaza i ne postoji povratna sprega sa izlaza. Primer FIR filtera dat je na slici 8-29.



Slika 8-29. Primer FIR filtera [125]

Ako se za ulazni signal postavi $x[n] = [1,0]$, na izlazu će se pojaviti $[0.5, 0.5]$ nakon čega će biti sve nulte vrednosti. U trenutku $t = 0$, na ulazu je $x[0]$, i može se smatrati da su svi prethodni ulazi bili 0, pa je izlaz elementa za kašnjenje takođe 0. U narednom trenutku vremena

se sve pomera, tako da izlaz iz elementa za kašnjenje poprima vrednost $x[0]$, dok na ulaz filtra stiže $x[1]$.

Obrasci koji određuju $y[0]$ i $y[1]$, mogu se zapisati kao:

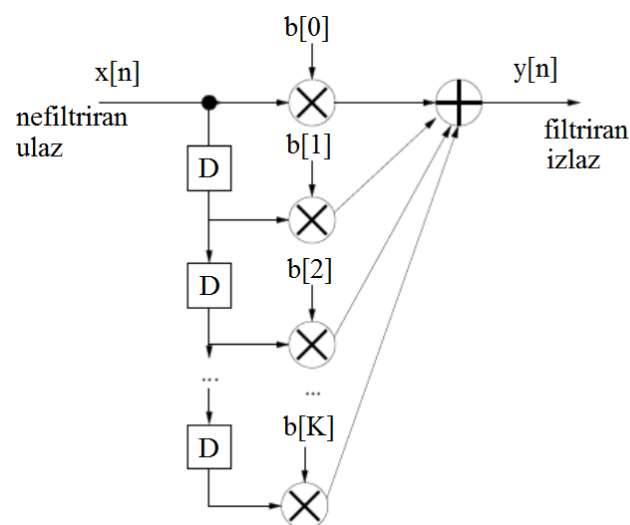
$$y[0] = 0.5x[0] + 0.5x[-1] \quad (8-17)$$

$$y[1] = 0.5x[1] + 0.5x[0]$$

iz čega se može zaključiti da ovde u opštem slučaju važi:

$$y[n] = 0.5x[n] + 0.5x[n - 1] \quad (8-18)$$

Opšta struktura FIR filtra sa $K + 1$ koeficijenata (filtrar K -tog reda) prikazana je na slici 8-30.



Slika 8-30. Opšta struktura filtra sa konačnim odzivom – FIR [125]

Za datu strukturu FIR filtra vrednost na izlazu se određuje na sledeći način:

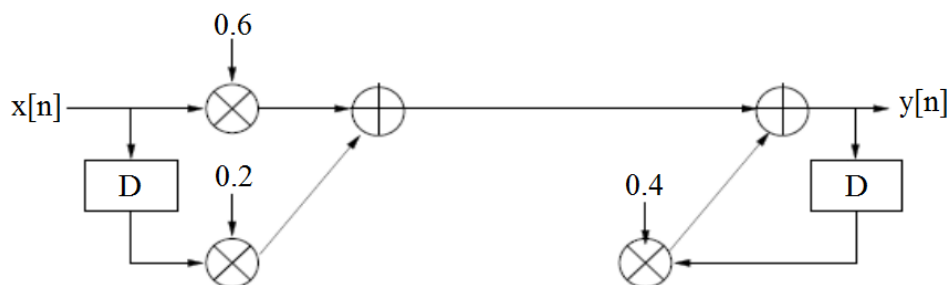
$$y[n] = b[0]x[n] + b[1]x[n - 1] + b[2]x[n - 2] + \dots + b[K]x[n - K] \quad (8-19)$$

ili, skraćenim zapisom:

$$y[n] = \sum_{k=0}^K b[k]x[n - k] \quad (8-20)$$

8.2.3.4. IIR FILTAR

Ukoliko se u formiranje izlaznih vrednosti uvede i povratna sprega sa izlaza, dobijaju se filtri čiji impulsni odziv ne mora biti konačan, i ovakvi filtri se nazivaju IIR filtri. Na slici 8-31 je prikazan primer filtra sa povratnom spregom.



Slika 8-31. Filtar sa povratnom spregom (IIR filter) [125]

Odziv ovog filtra može se opisati kao:

$$y[n] = 0.4y[n - 1] + 0.6x[n] + 0.2x[n - 1] \quad (8-21)$$

Ukoliko bismo smatrali da je ulaz u početnom trenutku imao nultu vrednost, a potom ako bi se kratkotrajno doveo jedinični impuls, posle čega bi opet usledio beskonačno dugačak niz nula, na izlazu bi se pojavio sledeći niz: 0, 0.6, 0.44, 0.176, 0.0707, 0.02816, 0.011264... [125].

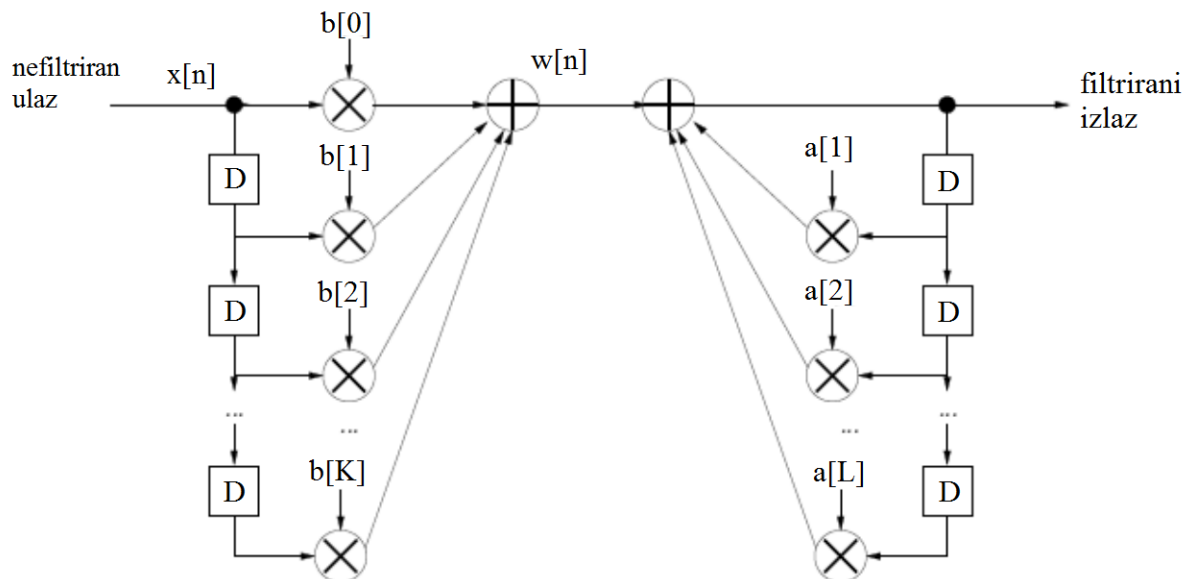
Može se primetiti da se u slučaju ove pobude vrednost izlaza smanjuje 0.4 puta u svakoj narednoj iteraciji težeći da dostigne nulu. Iako teorijski gledano, izlaz nikada neće dostići nulu, u praktičnoj realizaciji je ipak dostiže posle konačnog broja iteracija, zbog konačne tačnosti filtra.

Ukoliko bi vrednost koeficijenta množača u povratnoj sprezi sa slike 8-31 bila 1 umesto 0.4, tada bi filter za istu pobudu dao sledeći niz na izlazu: 0, 0.6, 0.8, 0.8, 0.8... Treba primetiti da će u ovom slučaju izlaz nakon druge iteracije zadržavati vrednost 0.8 dokle god je na ulazu nula, što je upravo jedna od glavnih karakteristika filtera sa beskonačnim odzivom.

Međutim, postoje i situacije koje mogu biti nepoželjne, i one nastaju zbog vrednosti koeficijenata na množačima u povratnoj sprezi. Ukoliko bi se razmotrio slučaj kada je na množaču u povratnoj sprezi filtera prikazanog na slici 8-31 dodeljena vrednost 1.1, na izlazu bi se formirao sledeći niz: 0, 0.6, 0.86, 0.946, 1.0406, 1.14466, 1.259126... U ovom slučaju, izlaz će nakon svake iteracije sve više da se uvećava, i težiće beskonačnosti.

Glavni problem kod IIR filtera je taj što izlaz može da teži beskonačnosti ili da osciluje. Ukoliko IIR filter teži nuli kada ulaz opadne na nulu, tada je izlaz stabilan, a ukoliko osciluje oko konstantne vrednosti, tada je izlaz uslovno stabilan. Međutim, ukoliko odziv IIR filtera teži beskonačnosti ili osciluje od pozitivne do negativne beskonačnosti, tada je izlaz nestabilan.

Opšta struktura IIR filtera prikazana je na slici 8-32, i naziva se direktna forma ili oblik IIR filtera [125].



Slika 8-32. Opšti oblik filtra sa beskonačnim odzivom [125]

U opštem slučaju, odziv IIR filtra se opisuje kao:

$$y[n] = \sum_{k=0}^K b[k]x[n-k] + \sum_{k=0}^L a[k]y[n-k] \quad (8-22)$$

8.2.3.5. REALIZACIJA DIGITALNIH IIR FILTARA

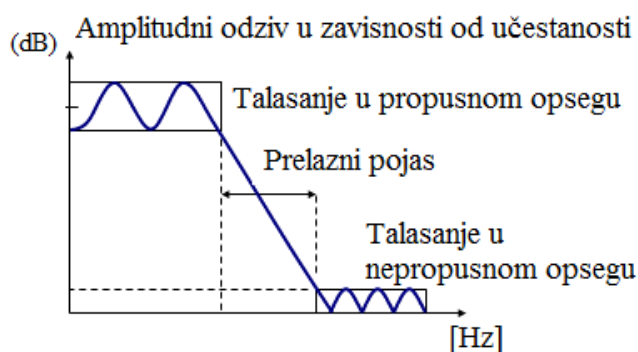
Digitalni filter generiše izlazni signal određenih karakteristika na osnovu povorke digitalnog signala sa ulaza. U nastavku će biti razmotrene prednosti i mane FIR i IIR filtara, i biće predstavljene osnovne karakteristike odabranih filtara za demultipleksiranje signala sa fotodetektora.

Diskretni FIR filtri mogu teoretski ukloniti proizvoljne delove spektra (neželjene spektralne komponente) propuštajući ostatak spektra (željene spektralne komponente). Na deo spektra koji se nalazi između željenih i neželjenih učestanosti se uglavnom ne može uticati, pa je cilj da se ovaj deo spektra smanji što je više moguće. Sa povećanjem preciznosti kontrole opsega frekvencija koje se propuštaju i frekvencija koje se potiskuju drastično se povećava složenost FIR filtra. U nekim slučajevima zbog ograničenih mogućnosti mikrokontrolera praktično nije moguće implementirati digitalni FIR filter. Problem nastaje kako zbog potrebe za velikim brojem operacija u jedinici vremena tako i zbog čuvanja velikog broja ulaznih bafera iz prethodnih stanja.

Kada nije potrebno sačuvati fazu filtriranog signala, moguće je koristiti filtre sa beskonačnim odzivom – IIR filtre. Budući da se kod ovih filtara odziv zavisi i od povratne sprege izlaza, smanjena je složenost u odnosu na realizaciju FIR filtara, ali na račun smanjenja stabilnosti filtra zbog uticaja povratne sprege. Takođe, ovi filtri imaju i nelinearnu faznu karakteristiku i njihova implementacija može dodatno usporiti odziv sistema.

U ovoj doktorskoj disertaciji su zbog ograničenih memorijskih resursa korišćenog mikrokontrolera implementirani IIR digitalni filtri, koji predstavljaju propusnike opsega za učestanosti 2.5 kHz, 5kHz i 10kHz. Prilikom kreiranja ovih filtara, potrebno je definisati odgovarajuće parametre koji se prvenstveno odnose na učestanost odabiranja, propusne učestanosti, blokirajuće učestanosti, kao i talasnosti propusnog i nepropusnog opsega. Propusne učestanosti filtra određuju opseg učestanosti na kojima signal ne slabi pri prolasku

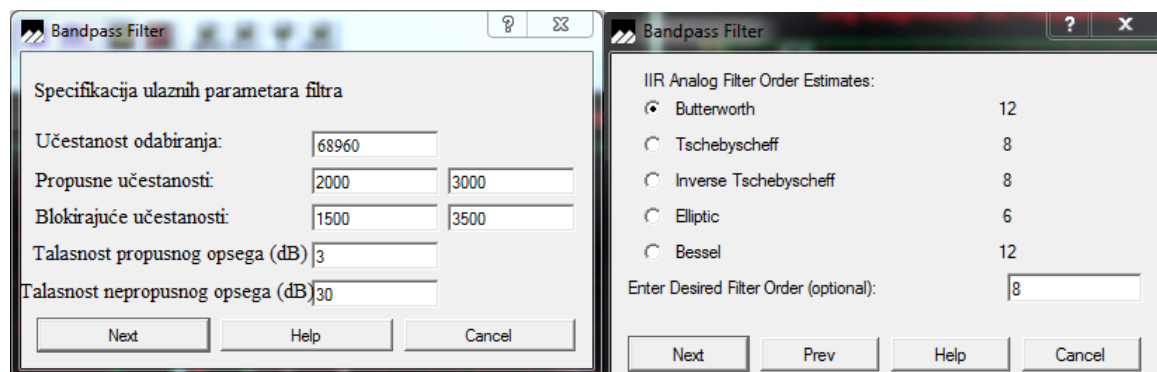
kroz filtar, dok blokirajuće učestanosti predstavljaju učestanosti na kojima filtar prigušuje signal. Na slici 8-33 na primeru filtra propusnika niskih učestanosti skicirani su parametri koji označavaju talasnost propusnog i nepropusnog opsega.



Slika 8-33. Parametri filtra

Talasanost propusnog i nepropusnog opsega odgovara fluktuacijama amplitude (izmerenim u dB) unutar propusnog i nepropusnog opsega.

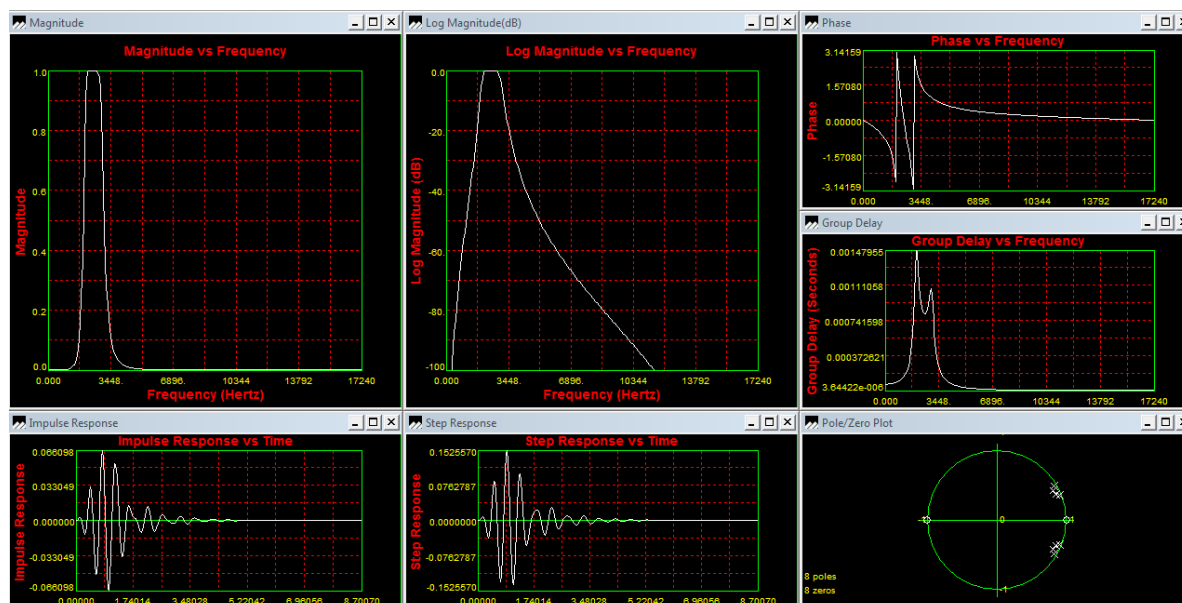
Budući da je implementiranje digitalnih filtara u ovoj disertaciji izvršeno na mikrokontroleru dsPIC30F4013, u svrhu izračunavanja koeficijenata na osnovu zadatih parametara filtara je korišćen softver kompanije *Microchip*, dsPICfdLite. Prozor sa parametrima koje je neophodno definisati za kreiranje IIR filtra propusnika opsega učestanosti prikazan je na slici 8-34. Učestanost odabiranja je 68.9 ksps, dok je kao tip filtra odabran Batervortov (*eng. Butterworth*) filtar osmog reda. Učestanosti koje filtar propušta bez slabljenja nalaze se u opsegu 2 kHz - 3 kHz, gde se na sredini propusnog opsega nalazi koristan signal sa prijemnog bloka koji se filtrira. Ovaj filtar propusnik prigušuje signale učestanosti ispod 1.5 kHz, kao i signale učestanosti iznad 3.5 kHz.



Slika 8-34. Parametri realizovanog IIR digitalnog filtra propusnika učestanosti na 2.5 kHz

Za zadate vrednosti talasnosti propusnog i nepropusnog opsega odabrano je 3 dB i 30 dB, a ove vrednosti su preporučene u softveru.

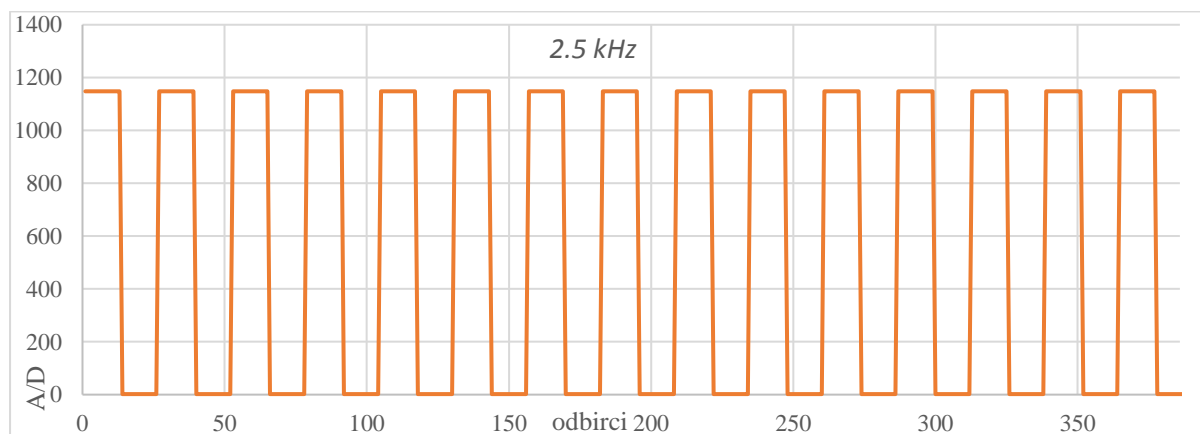
Grafici koji prikazuju amplitudu, fazu i grupno kašnjenje u zavisnosti od učestanosti, dati su na slici 8-35. Pored toga, na istoj slici ilustrovani su impulsni odziv u vremenu i polovi/nule.



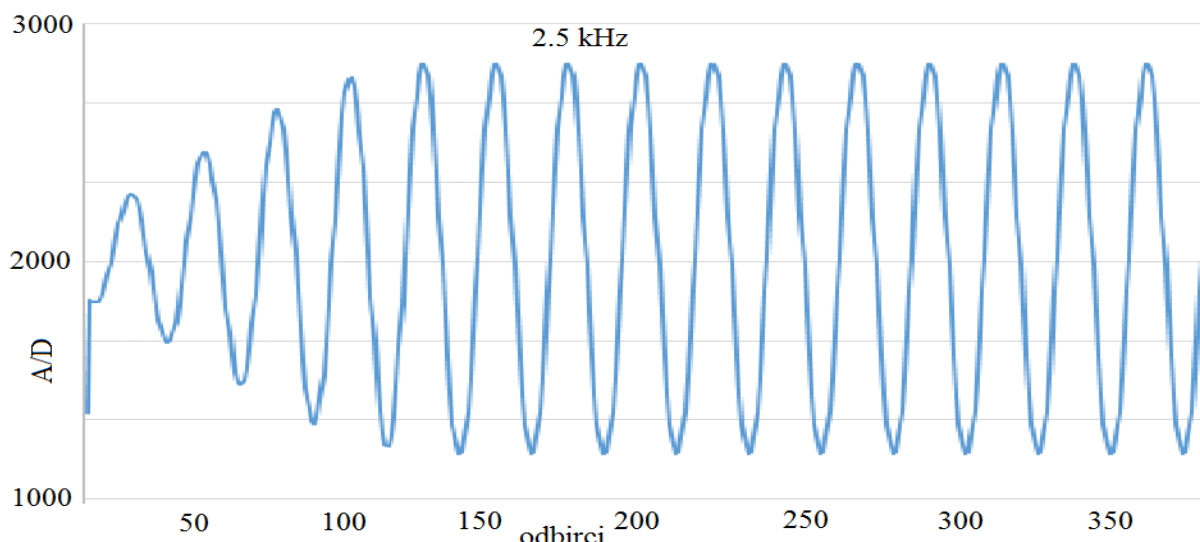
Slika 8-35. IIR filter propusnik opsega na 2.5 kHz, generisan programskim alatom dsPICFD Lite

Na osnovu definisanih parametara, generisani su koeficijenti IIR filtra, koji su implementirani u kodu kroz funkcije Batervortovog IIR filtra u biblioteci programskog jezika C, koja podržava rad sa digitalnim filtrima. Na ovaj način omogućeno je demultipleksiranje signala.

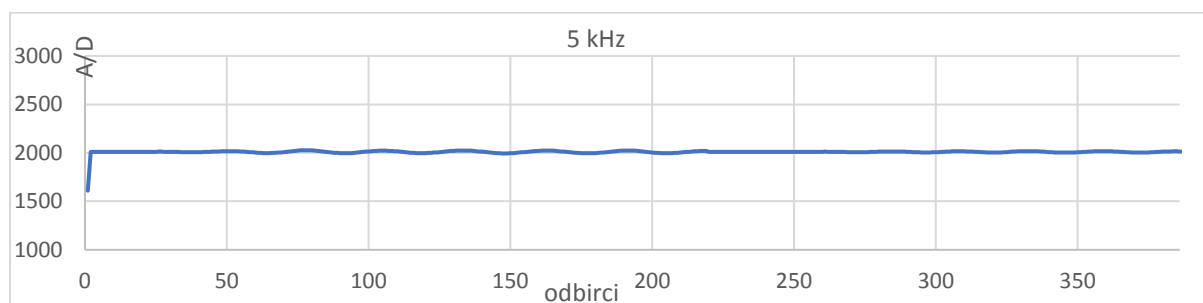
Testiranje implementiranog filtra izvršeno je uz simulaciju pobudnih signala pomoću funkcijskog generatora. Slika 8-36 predstavlja pobudni signal – četvrtku amplitude 1.5 V i učestanosti 2.5 kHz (prikazanu kao rezultat A/D konverzije mikrokontrolera), a slika 8-37 prikazuje odziv implementiranog filtra. Slike 8-38 – 8-39 prikazuju testirane odzive implementiranog filtra kada se učestanost pobudnog signala promeni na 5 kHz i na 10 kHz.



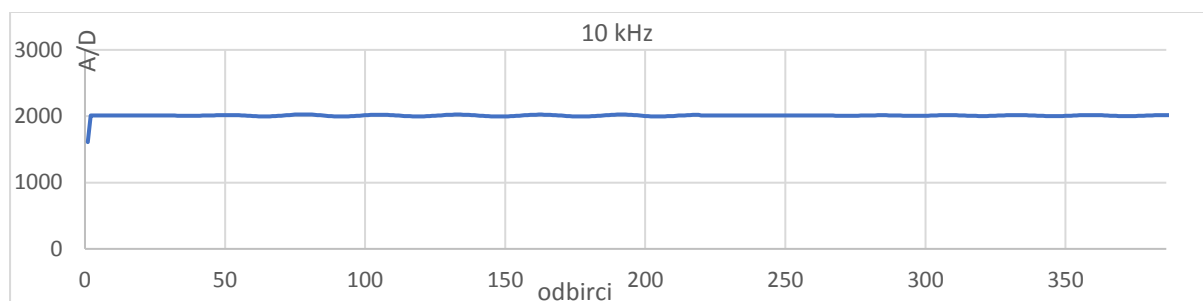
Slika 8-36. Pobudni signal – četvrtka amplitude 1.5 V i učestanosti 2.5 kHz



Slika 8-37. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 2.5 kHz



Slika 8-38. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 5 kHz



Slika 8-39. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 10 kHz

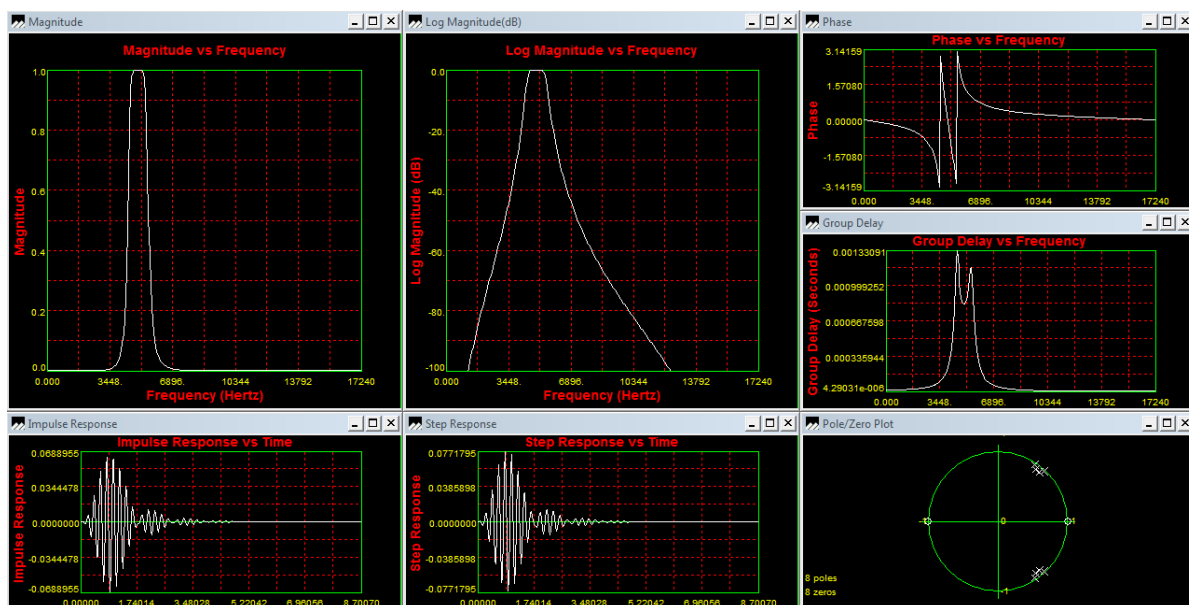
Može se primetiti da je filter propustio signale učestanosti 2.5 kHz, a veoma dobro prigušio signale učestanosti 5 kHz i 10 kHz, što je i bio zadatak ovog filtera.

Parametri koji su definisani za kreiranje filtera propusnika učestanosti na 5 kHz dati su u tabeli 8-5.

Tabela 8-5. Parametri za kreiranje filtera propusnika učestanosti na 5kHz

Učestanost odabiranja	68,9 k	
Propusne učestanosti	4500	5500
Blokirajuće učestanosti	4000	6000
Talasnost propusnog opsega	3 dB	
Talasnost nepropusnog opsega	30 dB	
Tip filtera	IIR, Butterworth	
Red filtera	8	

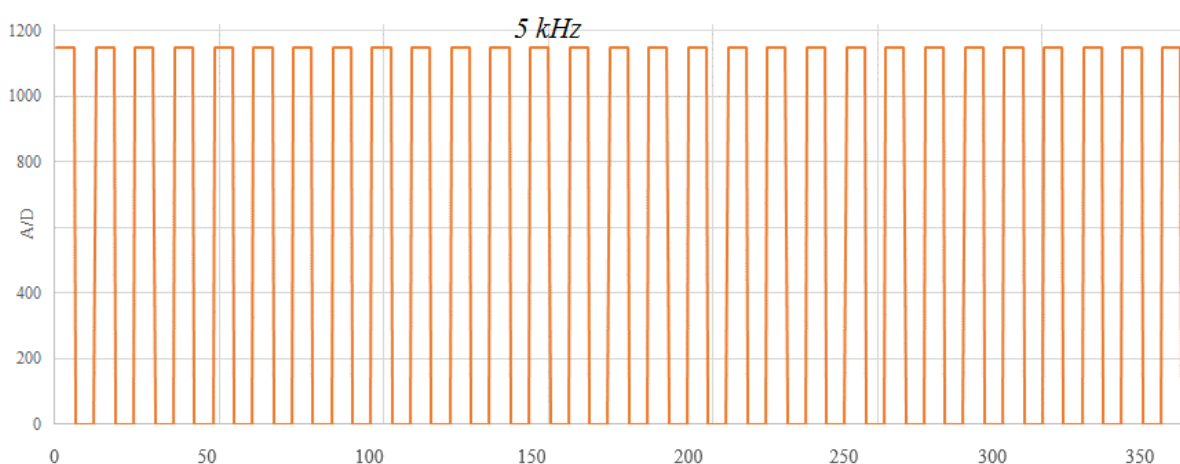
Grafici koji prikazuju amplitudu, fazu i grupno kašnjenje u zavisnosti od učestanosti definisanog filtra dati su na slici 8-40. Dodatno, na istoj slici ilustrovani su impulсни odziv u vremenu i polovi/nule.



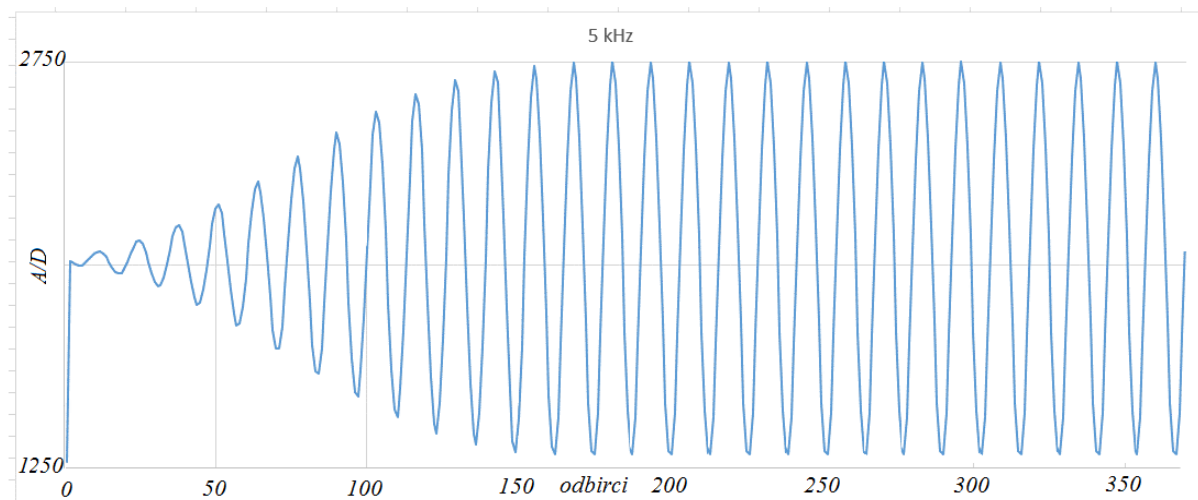
Slika 8-40. IIR filtar propusnik opsega na 5 kHz, generisan programskim alatom dsPICFD Lite

Na osnovu definisanih parametara, generisani su koeficijenti IIR filtra, koji su implementirani u kodu kroz funkcije Batervortovog IIR filtra u biblioteci programskog jezika C, koja podržava rad sa digitalnim filtrima. Na ovaj način omogućeno je demultipleksiranje signala.

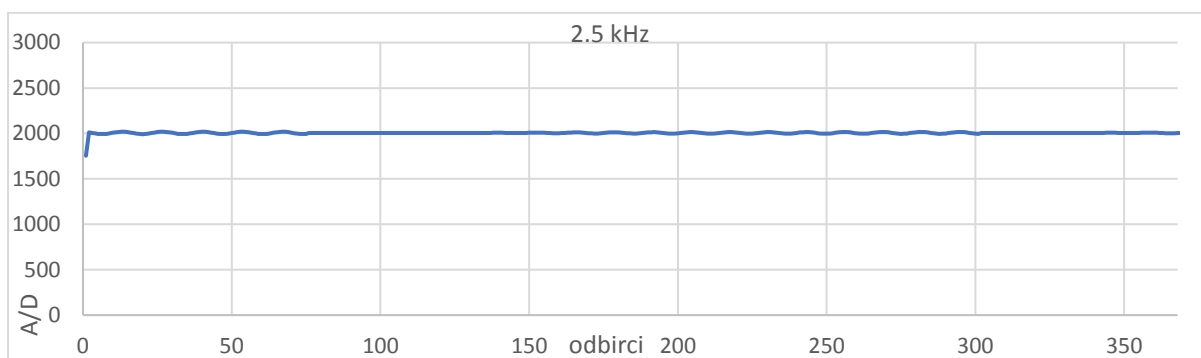
Testiranje implementiranog filtra izvršeno je uz simulaciju pobudnih signala pomoću funkcijskog generatora. Slika 8-41 predstavlja pobudni signal – četvrtku amplitude 1.5 V i učestanosti 5 kHz (prikazanu kao rezultat A/D konverzije mikrokontrolera), a slika 8-42 prikazuje odziv implementiranog filtra. Slike 8-43 – 8-44 prikazuju testirane odzive implementiranog filtra kada se učestanost pobudnog signala promeni na 2.5 kHz i na 10 kHz.



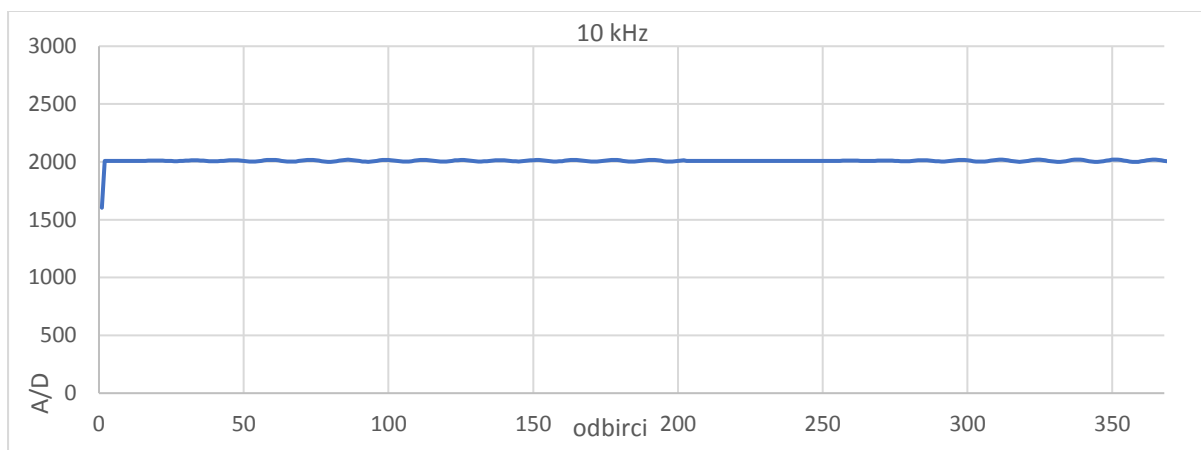
Slika 8-41. Pobudni signal – četvrtka amplitude 1.5 V i učestanosti 5 kHz



Slika 8-42. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 5 kHz



Slika 8-43. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 2.5 kHz



Slika 8-44. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 10 kHz

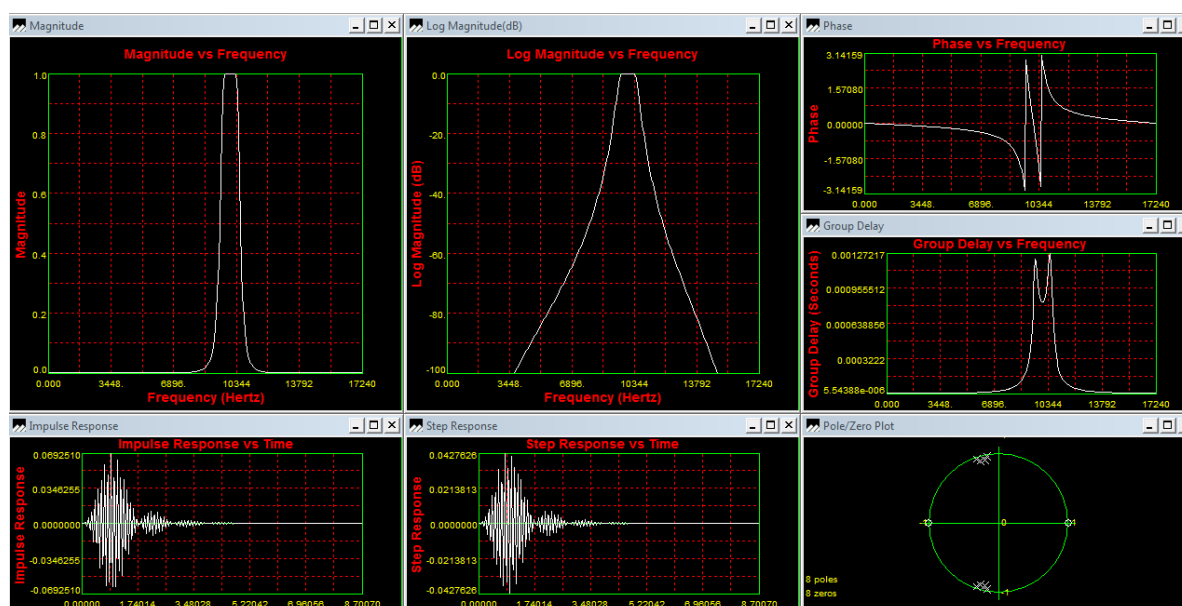
Može se primetiti da je filter propustio signale učestanosti 5 kHz, a sasvim dobro prigušio signale učestanosti 2.5 kHz i 10 kHz, što je i bio zadatak ovog filtra.

Parametri koji su definisani za kreiranje filtra propusnika učestanosti na 10 kHz dati su u tabeli 8-6.

Tabela 8-6. Parametri za kreiranje filtra propusnika učestanosti na 10kHz

Učestanost odabiranja	68,9 k	
Propusne učestanosti	9500	10500
Blokirajuće učestanosti	9000	11000
Talasnost propusnog opsega	3 dB	
Talasnost nepropusnog opsega	30 dB	
Tip filtra	IIR, Butterworth	
Red filtra	8	

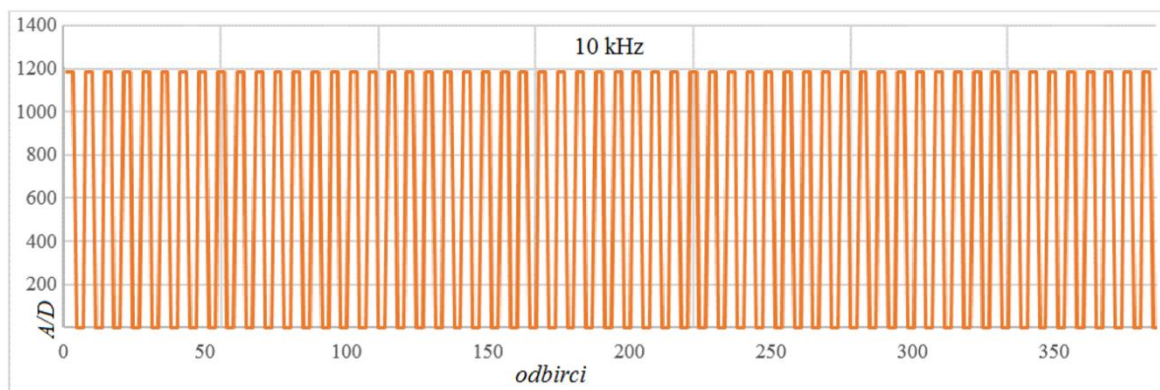
Grafici koji prikazuju amplitudu, fazu i grupno kašnjenje u zavisnosti od učestanosti prikazani su na slici 8-45. Takođe, na istoj slici dati su i impulsni odziv u vremenu i polove/nule.



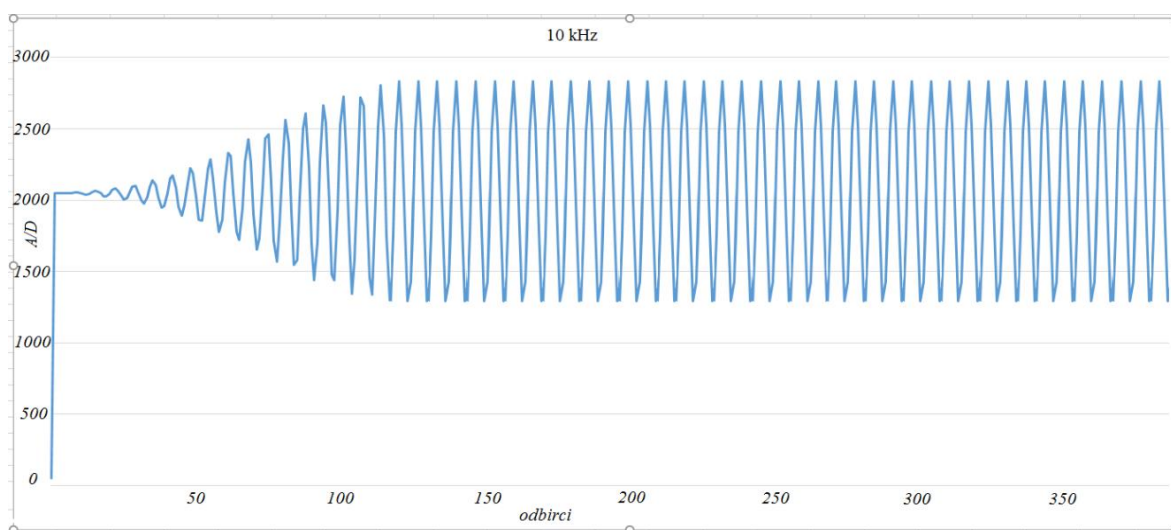
Slika 8-45. IIR filter propusnik opsega na 10 kHz, generisan programskim alatom dsPICFD Lite

Na osnovu odabranih parametara, generisani su koeficijenti IIR filtra, koji su implementirani u kodu kroz funkcije Batervortovog IIR filtra u biblioteci programskog jezika C, koja podržava rad sa digitalnim filtrima. Na ovaj način omogućeno je demultipleksiranje signala.

Testiranje implementiranog filtra izvršeno je uz simulaciju pobudnih signala pomoću funkcijskog generatora. Slika 8-46 predstavlja pobudni signal – četvrtku amplitude 1.5 V i učestanosti 10 kHz (prikazanu kao rezultat A/D konverzije mikrokontrolera), a slika 8-47 prikazuje odziv implementiranog filtra. Slike 8-48 – 8-49 prikazuju testirane odzive implementiranog filtra kada se učestanost pobudnog signala promeni na 2.5 kHz i na 5 kHz.



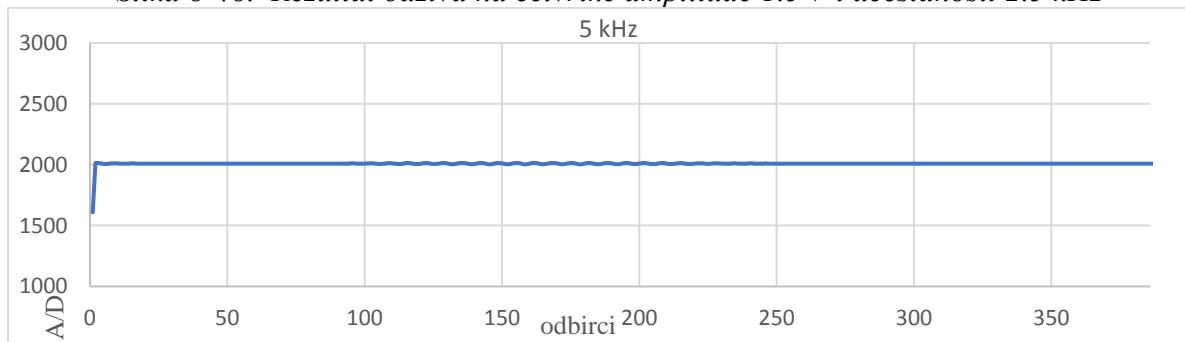
Slika 8-46. Pobudni signal – četvrtka amplitude 1.5 V i učestanosti 10 kHz



Slika 8-47. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 10 kHz



Slika 8-48. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.5 V i učestanosti 2.5 kHz



Slika 8-49. Rezultat odziva na četvrtke amplitude 1.8 V i učestanosti 5 kHz

Može se zaključiti da je filter propustio signale učestanosti 10 kHz, a sasvim dobro prigušio signale učestanosti 2.5 kHz i 5 kHz, što je i bio zadatak ovog filtra.

8.2.3.6. POBOLJŠANJE STABILNOSTI SISTEMA

Dalja obrada filtriranih signala zahteva dodatno usrednjavanje izmerenih vrednosti radi poboljšanja stabilnosti sistema, kao i ponovljivosti merenja. Ovo se može na jednostavan način postići izračunavanjem aritmetičke sredine, koja je ovde prvobitno primenjena, ali nije bila dovoljno efikasna. Pored toga, značajno je usporila odziv. Zbog toga je trebalo pronaći optimalnije rešenje, a to je učinjeno implementacijom algoritma Kalmanovog filtra. Ovaj filter se zasniva na proračunu koji uzima u obzir samo prethodno stanje signala, i biće detaljno opisan u nastavku.

8.2.3.7. KALMANOV FILTAR

Kako je veoma komplikovano shvatiti potpuno značenje Kalmanovog filtra polazeći od definicija i složenih jednačina, u ovom poglavlju će biti objašnjena osnovna ideja Kalmanovog filtra i biće dat primer implementacije filtra na jednodimenzionom sistemu (bez uvođenja u operacije sa matricama) [126,127].

Ne obazirući se na složene matrice, možemo postaviti izraz uz pomoć koga je mnogo jednostavnije započeti pristup problemu:

$$x_k = K_k \cdot z_k + (1 - K_k) \cdot x_{k-1} \quad (8-23)$$

pri čemu su: x_k – procena trenutne vrednosti, K_k – Kalmanovo pojačanje (koeficijent), z_k – merena vrednost i x_{k-1} – procena prethodne vrednosti.

Oznake “k” u indeksu odnose se na stanja. Ovde ih možemo posmatrati kao iteracije, počev od nulte pa na dalje. Cilj je da se pronađe x_k što predstavlja procenu signala x, i ovo je potrebno odrediti za svaku iteraciju k.

Kalmanovo pojačanje je od ključnog značaja za procenu vrednosti, i ono je jedina nepoznata u prethodnoj jednačini. Budući da imamo izmerene vrednosti, i pod pretpostavkom da imamo takođe procenjenju prethodnu vrednost signala, potrebno je izračunati Kalmanovo pojačanje za svako sledeće stanje.

Međutim, npr. kada bismo pretpostavili da je Kalmanovo pojačanje $K_k = 0.5$, dobili bismo prosto usrednjavanje. Drugim rečima, treba da pronađemo verodostojnije K_k koeficijente za svako stanje. Kalmanov filter pronalazi optimalni faktor usrednjavanja za svako sledeće stanje. Takođe, pamti se i uticaj prethodnih stanja.

Sledi pojednostavljeno rešenje pristupa problemu Kalmanovog filtra:

Postavka modela:

Najvažniji korak je postavka odgovarajućeg modela na kom će se primeniti Kalmanov filter. Postavićemo dva izraza:

$$x_k = A \cdot x_{k-1} + B \cdot u_k + w_{k-1} \quad (8-24)$$

$$z_k = H \cdot x_k + v_k \quad (8-25)$$

Svako x_k (vrednosti našeg signala) može se proceniti korišćenjem linearne stohastičke jednačine (8-24). Bilo koje x_k je linearna kombinacija prethodnih vrednosti signala u zbiru sa kontrolnim signalom u_k i šumom w_{k-1} . Treba obratiti pažnju da u većini vremena nema uticaja kontrolnog signala u_k .

Izraz (8-25) govori da bilo koja od merenih vrednosti (o čijoj tačnosti nismo sigurni) predstavlja linearnu kombinaciju merenog signala i prisustva šuma v_k prilikom merenja. Oba signala se smatraju Gausovim. Šumovi w_{k-1} i v_k su statistički nezavisni.

Elementi A, B i H su generalno forme matrica, ali u većini problema sa procesiranjem signala ih predstavljamo kao obične numeričke vrednosti. Takođe, da bi se problem znatno pojednostavio, u većini vremena možemo pretpostaviti da su ove vrednosti konstantne.

Kada smo postavili model, preostalo je da što preciznije procenimo usrednjavanje i standardnu devijaciju, w_{k-1} i v_k . Poznato je da u realnosti nijedan signal nema čistu Gausovu raspodelu, ali ćemo je pretpostaviti približno. Ovo nije prevelik problem, pošto će se pokazati da algoritam Kalmanovog filtra pokušava da konvergira što tačnijim procenama, čak iako su parametri Gausovog šuma loše procenjeni.

Jedna činjenica koju treba imati na umu je da će bolja pretpostavka parametara šuma rezultovati boljom procenom signala.

Nakon postavljanja modela Kalmanovog filtra, sledeći korak je određivanje potrebnih parametara i inicijalnih vrednosti.

Postoje dva različita tipa jednačina u sistemu: predviđanje i korekcija. Oba tipa jednačine su primenjena u svakoj "k" iteraciji.

U tabeli 8-7 dati su izrazi za predviđanje i korekciju.

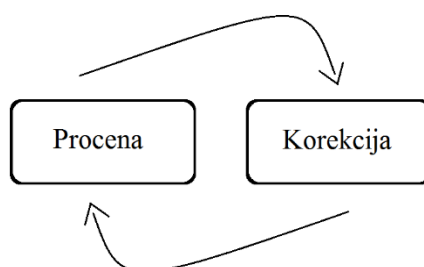
Tabela 8-7. Izrazi za predviđanje i korekciju u algoritmu Kalmanovog filtra

Predviđanje:	Korekcija:
$x_k^- = A \cdot x_{k-1} + B \cdot u_k$	$K_k = P_k^- \cdot H^T (H \cdot P_k^- H^T + R)^{-1}$
$P_k^- = A \cdot P_{k-1} \cdot A^T + Q$	$x_k = x_k^- + K_k \cdot (z_k - H \cdot x_k^-)$
	$P_k = (1 - K_k \cdot H) \cdot P_k^-$

Već je pomenuto da su matrice A, B i H zamenjene numeričkim vrednostima, i najverovatnije će imati vrednosti =1. Sada preostaje da se odrede R i Q. Parametar R je prilično jednostavno otkriti, budući da možemo jednostavno odrediti varijansu i standardnu devijaciju. Parametar Q treba da modeluje nesigurnost u sistemu i nije ga lako odrediti, pa ćemo u daljem razmatranju usvojiti da je Q = 0.

Za početak algoritma potrebno je znati procenu za x_0 i P_0 .

Sledeći korak su iteracije. Nakon prikupljanja svih informacija koje su nam bile potrebne i pokretanja algoritma, preostaju iteracije. Treba imati na umu da prethodna stanja predstavljaju ulaze za nova stanja (slika 8-50).



Slika 8-50. Iteracije algoritma

Parametar x_k^- je prethodna procena koja, na neki način, daje grubu procenu pre korekcije ažuriranja merenja. Isto tako, P_k^- je prethodna kovarijansa greške. Prethodne vrednosti se koriste u jednačinama za ažuriranje (korekciju) merenja. U ovim jednačinama zaista se pronalazi parametar x_k koji je procena vrednosti x u k -toj iteraciji. Takođe, određuje se i P_k koje je potrebno za buduću ($k + 1$) procenu, zajedno sa x_k . Vrednosti koje se određuju u jednačinama za korekciju merenja nazivaju se i “sledeće” vrednosti (jer se koriste u sledećim procenama).

8.2.3.8. IMPLEMENTIRANJE KALMANOVOG FILTRA U OVOJ DISERTACIJI

Pokušajmo da izvršimo procenu nad skalarnim vrednostima, koje se očitavaju sa dvanaestobitnog A/D konvertora i predstavljaju diskretizovane vredosti očitnog napona. Vrednosti se preuzimaju bez prethodnog usrednjavanja. Pretpostavimo da očitana vrednost može biti bilo koji br. 0-4095, što reprezentuje napon u punom opsegu 0-5 [V]. Takođe, pretpostavimo standardnu devijaciju šuma merenja 0.1. Sada možemo da formiramo model prema:

$$x_k = A \cdot x_{k-1} + B \cdot u_k + w_k \quad z_k = H \cdot x_k + v_k \quad (8-26)$$

Uvođenjem ranije objašnjenih pretpostavki $A = 1$ i $u_k = 0$, redukovane jednačine dobijaju veoma jednostavnu formu:

$$x_k = x_{k-1} + w_k \quad z_k = x_k + v_k \quad (8-27)$$

Kako imamo jednodimenzioni signal, svaki entitet u predstavljenom modelu ima numeričku vrednost, a ne matricu. Pošto nemamo kontrolni signal u_k , njegova vrednost je 0. Biramo vrednost parametra $H = 1$, zbog toga što znamo da je merenje sačinjeno od određene vrednosti na koju se dodaje neki šum. Retko se sreću slučajevi u kojima je parametar $H \neq 1$.

Konačno, pretpostavimo da imamo sledeće izmerene vrednosti, koje su prikazane u tabeli 8-8.

Tabela 8-8. Izmerene vrednosti za prvih 10 iteracija Kalmanovog filtra

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
vrednost	2456	2492	2460	2437	2464	2481	2491	2473	2450	2441

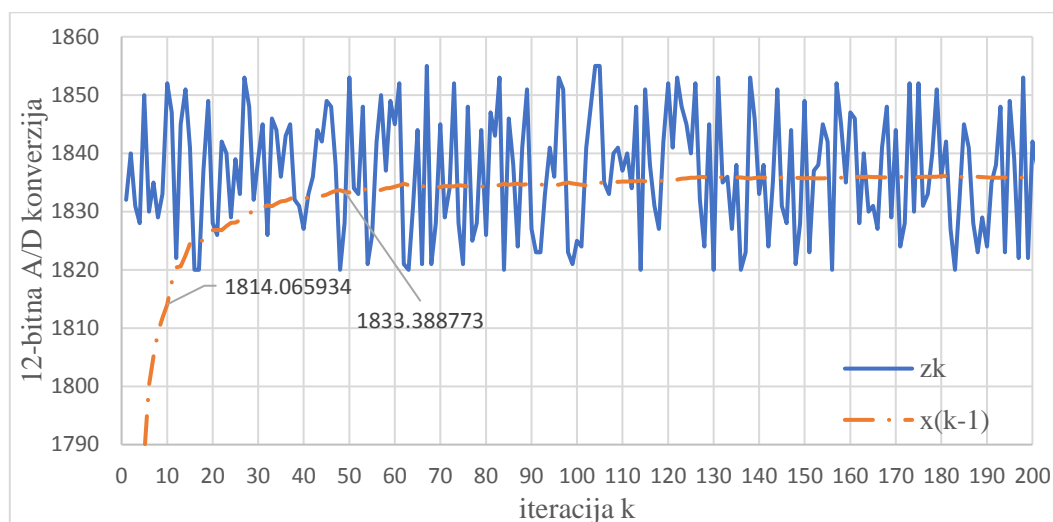
Algoritam započinje od iteracije $k = 0$. Pretpostavimo da je $x_0 = 0$ i $P_0 = 1$. Zbog čega ne pretpostavimo da je npr. $P_0 = 0$? Jednostavno zbog toga što bi to značilo da nema šuma u izmerenom signalu i vrednost X_k bi ostala 0 (kao što je bila u inicijalnom stanju). Zbog toga se P_0 bira da ima vrednost $\neq 0$.

U tabeli 8-9 su detaljno prikazani proračuni za prve dve iteracije, a u narednih 8 iteracija date su vrednosti dobijene primenom identičnih formula. Kalmanov filter je veoma jednostavan za implementaciju i pokazaće se kao veoma efikasan ukoliko se parametri sistema dobro odaberu i problem dobro postavi.

Tabela 8-9. Detaljan prikaz proračuna za realizovani Kalmanov filter

		Predviđanje (procena)				Korekcija (ažuriranje)	
		$x_k = x_{k-1}$ $P_k^- = P_{k-1}$				$K_k = \frac{P_k^-}{P_k^- + R}$ $x_k = x_k^- + K_k \cdot (z_k - x_k^-)$ $P_k = (1 - K_k) \cdot P_k^-$	
k	z_k	x_{k-1}	P_k^-	predviđanje	korekcija	x_k	P_k
1	1832	0	1	$x_k^- = x_{k-1} = 0$ $P_k^- = P_{k-1} = 1$	$K_k = \frac{1}{1+0.1} = 0.909090909$ $x_k = 0 + 0.909090909 \cdot (1832 - 0) = 1665.454545$ $P_k = (1 - 0.909090909) \cdot 1 = 0.090909091$	1665.454 545	0.09090 9091
2	1840	1665.454545	0.09090 9091	$x_k^- = 48.157248$ $P_k^- = 0.980392$	$K_k = \frac{0.090909091}{0.090909091 + 0.1} = 0.476190476$ $x_k = 1665.454545 + 0.476190476 \cdot (1840 - 1665.454545) = 1748.571429$ $P_k = (1 - 0.476190476) \cdot 0.090909091 = 0.047619048$	1748.571 429	0.04761 9048
3	1831	1748.571429	0.04761 9048			1775.161 290	0.03225 8065
4	1828	1775.161290	0.03225 8065			1788.048 780	0.02439 0244
5	1850	1788.048780	0.02439 0244			1800.196 078	0.01960 7843
6	1830	1800.196078	0.01960 7843			1805.081 967	0.01639 3443
7	1835	1805.081967	0.01639 3443			1809.295 775	0.01408 4507
8	1829	1809.295775	0.01408 4507			1811.728 395	0.01234 5679
9	1833	1811.728395	0.01234 5679			1814.065 934	0.01098 9011
10	1852	1814.065934	0.01098 9011			1817.821 782	0.00990 099

Na slici 8-51 plavom punom linijom prikazano je rasipanje signala bez usrednjavanja (z_k), koje je snimljeno za 200 iteracija (očitanja prijemnog signala), dok je narandžastom isprekidanom linijom prikazan odziv nakon primene Kalmanovog filtra (x_{k-1}).



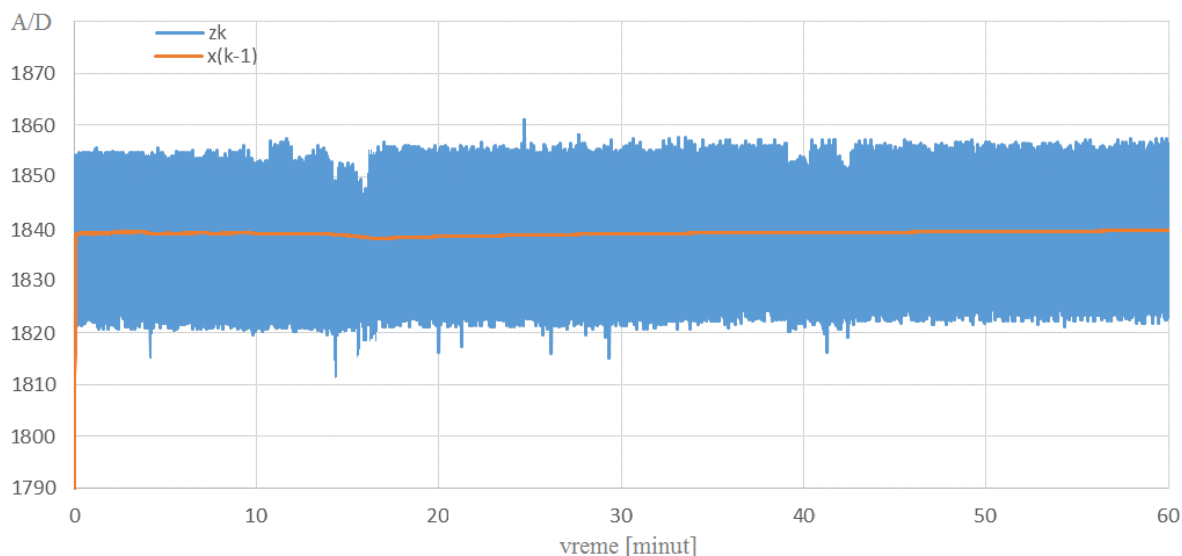
Slika 8-51. Testiranje implementiranog algoritma za Kalmanov filter

Kalmanov filter veoma brzo konvergira ka pravoj vrednosti. Već kroz desetak iteracija vide se jasni znakovi konvergencije, dok je posle pedesetak iteracija vrednost praktično idelana. Kako bi se poboljšala i ubrzala estimacija, potrebno je:

- postaviti sistem što preciznije
- preciznije dati procenu šuma.

8.2.3.9. REZULTATI TESTIRANJA VREMENSKE STABILNOSTI ODZIVA SISTEMA PRE I POSLE PRIMENE KALMANOVOG FILTRA

Vremenska stabilnost sistema nakon jednočasovnog očitavanja rezultata pri konstantnoj pobudi prikazana je na slici 8-52. Uporedo su dati mereni signal (z_k) bez usrednjavanja i signal (x_{k-1}) koji predstavlja rezultat nakon usrednjavanja implementiranim Kalmanovim algoritmom.



Slika 8-52. Stabilnost sistema pre i nakon prolaska kroz algoritam Kalmanovog filtra

Može se zaključiti da je sistem bez usrednjavanja ima vidno oscilovanje oko srednje vrednosti, dok se primenom klasičnog usrednjavanja pronalaskom aritmetičke sredine ta nestabilnost može u određenoj meri smanjiti ali na račun smanjenja brzine odziva. Međutim, veoma efikasno rešenje koje je obezbedilo standardnu devijaciju 0.07% nad iskorišćenim opsegom A/D konvertora usledilo je upotrebom opisanog Kalmanovog filtra.

8.2.4. ORGANIZACIJA FIRMVERA MIKROKONTROLERA U UPRAVLJAČKOM BLOKU

Budući da se upravljački blok sastoji iz dva dela, koje opslužuju zasebni mikrokontroleri, firmver je organizovan u dve celine koje međusobno komuniciraju putem UART jedinica.

Prva celina odnosi se na firmver mikrokontrolera dsPIC30F4013 koji je zadužen za sinhronizovano upravljanje predajnim i prijemnim blokom. U zavisnosti od podešene vrste multipleksiranja LED izvora⁴ (TDM, FDM ili TDM+FDM) vrši se pobuda na predajnom kolu, kojom upravljaju 16-bitni tajmeri ovog mikrokontrolera. Budući da na izlaz prijemnog kola podaci pristižu u analognom obliku u vidu naponskih signala, nad njima se najpre vrši analogno-digitalna konverzija a zatim se oni dekodiraju. Ovo je obezbeđeno implementacijom digitalnih IIR filtara koji kao rezultat izdvajaju amplitude signala na tačno određenim frekvencijama. U svrhu usrednjavanja ovih amplituda koje predstavljaju intenzitete reflektovanih signala, implementiran je Kalmanov filtar. Pored toga, ovaj mikrokontroler prosleđuje obrađene rezultate (bežično pomoću *Bluetooth* tehnologije ili žično pomoću USB kabla) na PC računar u svrhu dalje obrade.

Druga celina odnosi se na mikrokontroler dsPIC33FJ128MC802 koji je zadužen za opsluživanje ekrana osetljivog na dodir, upravljanje modovima rada senzorskog sistema gde korisnik može da izvrši podešavanje parametara, kao i za podešavanje brzine i načina komunikacije sa PC računarem. Opsluživanje korisničkog interfejsa je ujedno i glavni zadatak ovog algoritma, gde se interakcija između korisnika i mikrokontrolera ostvaruje putem TFT LCD ekrana osetljivog na dodir.

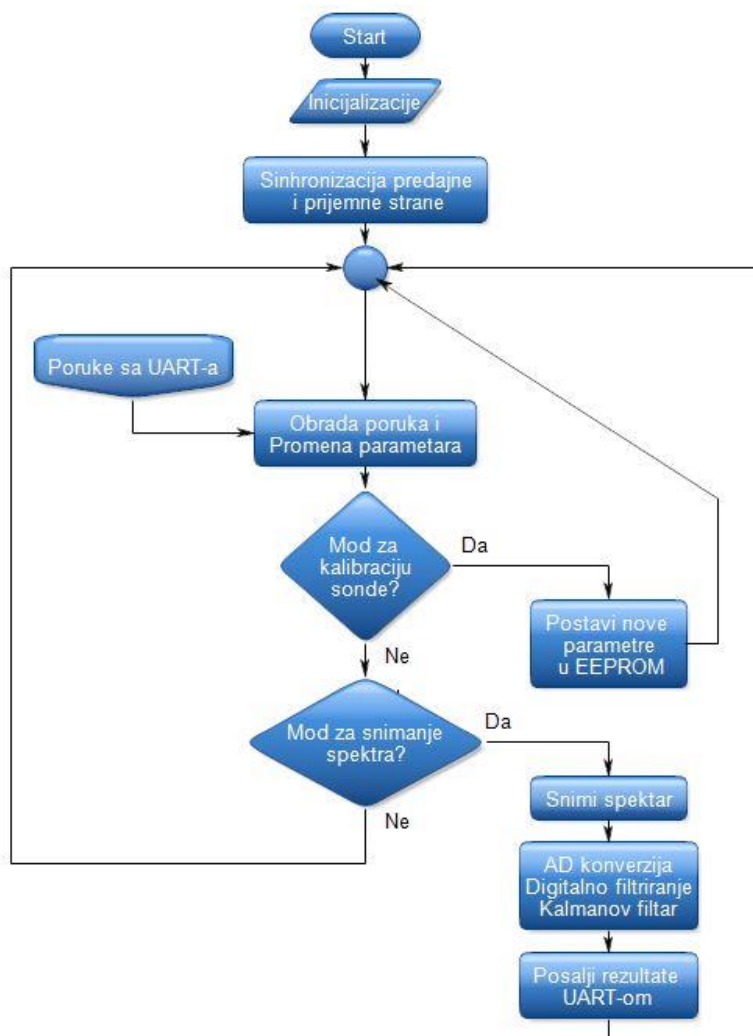
8.2.4.1. ALGORITAM RADA MIKROKONTROLERA DSPIC30F4013 (UPRAVLJAČKI PROGRAM)

Nakon neophodnih inicijalizacija u svrhu postavki radnog takta, definisanja portova mikrokontrolera, uključivanja modula A/D konvertora, UART-a, tajmera i EEPROM-a (eng. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*), program zadaje početne upravljačke parametre prijemnom i predajnom bloku, a zatim ulazi u beskonačnu petlju odakle izvršava algoritam koji je prikazan na slici 8-53. Poruke koje dolaze sa UART-a manifestuju se prekidnom rutinom i odnose se na obradu zahteva koje prosleđuje krajnji korisnik pristupajući korisničkom interfejsu (TFT ekranu osetljivom na dodir). Unutar ovog algoritma implementirano je nekoliko modova rada: mod za kalibraciju sonde, mod za podešavanje parametara predajnog i prijemnog bloka, mod za snimanje spektra.

Mod za kalibraciju sonde omogućava podešavanje odziva uređaja kada se on postavi u unapred definisano stanje. Ovde je upotrebljen jednostavan vid kalibracije pri čemu se odziv uređaja podešava prvo za belu, a zatim za crnu podlogu.

⁴ Podrazumevana podešena vrsta multipleksiranja signala je TDM+FDM, ali se putem korisničkog interfejsa može promeniti na FDM ili TDM vrstu multipleksiranja. Kada se odabere TDM multipleksiranje usporava se odziv sistema, dok FDM skraćuje dinamički opseg.

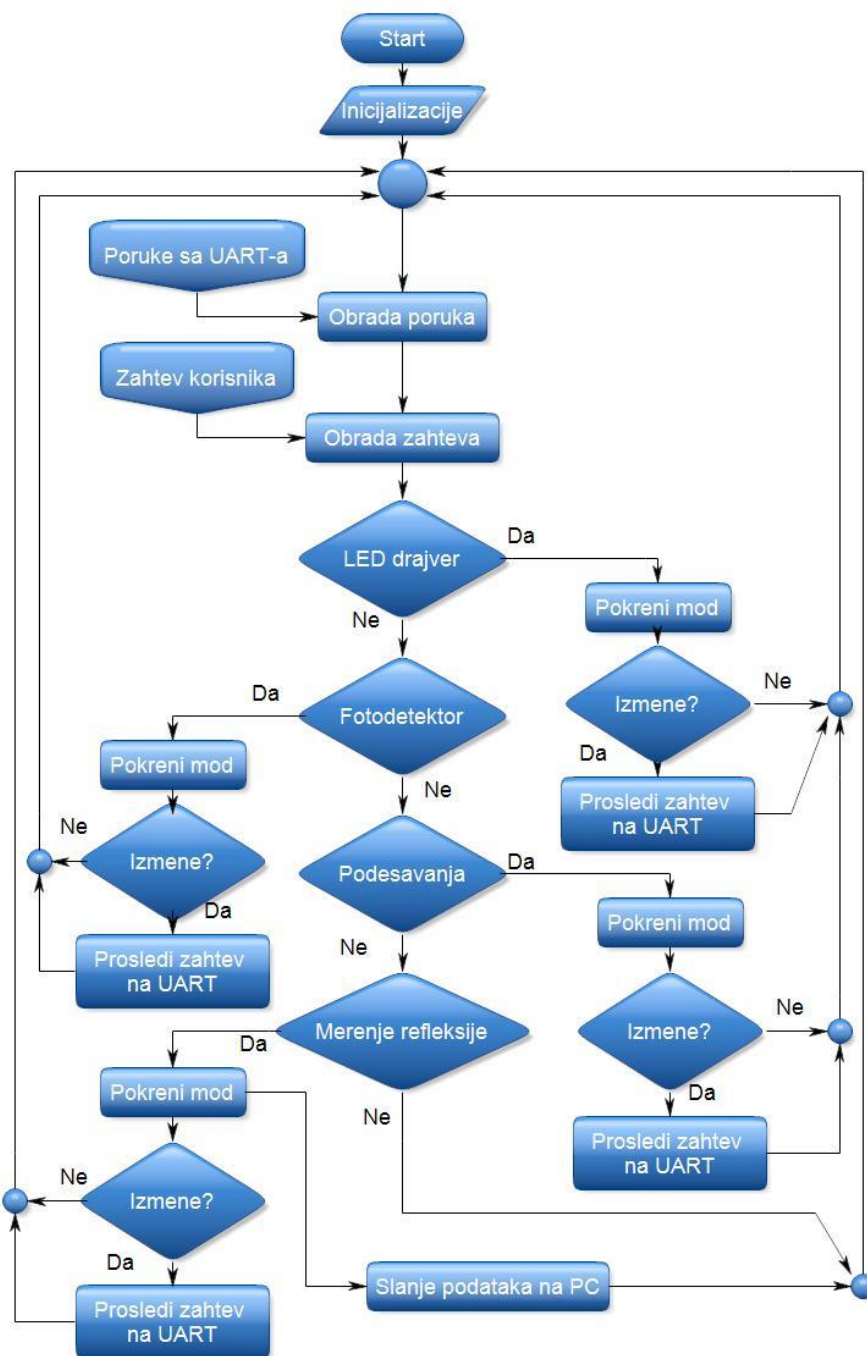
Ukoliko je pokrenut mod za snimanje spektra, vrednosti koje nastaju kao rezultat refleksije beleže se na širokopojasnom silicijumskom fotodetektoru. Nakon podrazumevane konverzije strujnog signala u naponski na transimpedansnom pojačavaču integrisanog unutar integralnog kola fotodetektora i pojačanja analognog naponskog signala, mikrokontroler vrši A/D konverziju ovih signala, digitalno filtriranje i usrednjavanje signala, nakon čega se dobijaju podaci o spektralnoj refleksiji razdvojeni prema talasnim dužinama koje odgovaraju korišćenim LED svetlosnim izvorima. Ovi podaci se prosleđuju na mikrokontroler dsPIC33FJ128MC802 putem UART-a kako bi se vrednosti prvobitno prikazale na displeju a zatim prosledile na PC računaru u cilju daljih estimacija spektra.



Slika 8-53. Algoritam rada implementiran na mikrokontroleru dsPIC30F4013

8.2.4.2. ALGORITAM RADA MIKROKONTROLERA dsPIC33FJ128MC802 (KORISNIČKI INTERFEJS)

Ovaj mikrokontroler omogućava spregu između korisnika i upravljačkog programa. Interakcija korisnika se detektuje prekidnom rutinom ekrana osetljivog na dodir nakon koje program obrađuje zahteve i izvršava primenjeni algoritam. Budući da ovi zahtevi (kao i poruke sa UART- a) dolaze sa prekidnih rutina i mogu se generisati u bilo kom trenutku u toku rada programa, oni imaju veći prioritet u odnosu na izvršavanje koda i služe za upravljanje mašinom stanja u okviru ovog algoritma. Algoritam obuhvata nekoliko modova, kao što je prikazano na slici 8-54. *LED drajver* mod omogućava korisniku da prikaže indikacije sa parametrima trenutno podešenih intenziteta LED svetlosnih izvora u okviru strujnih drajvera. Ovim parametrima se upravlja pomoću analognih potenciometara, a povratna informacija o intenzitetu se dobija na sledeći način: kada korisnik menja položaje potenciometara na analognim strujnim drajverima, upravljački program mikrokontrolera dsPIC30F4013 to prati na A/D konvertoru, i putem UART-a (prekidnom rutinom) daje informaciju mikrokontroleru dsPIC33FJ128MC802 o trenutno podešenim vrednostima struja i napona koje korisnik posmatra u realnom vremenu na ekranu. Mod *Fotodetektor* na sličan način daje vizuelnu informaciju o prikupljenim refleksijama na odgovarajućim talasnim dužinama. U modu *Podešavanja* moguće je upravljati načinom multipleksiranja/demultipleksiranja svetlosnih signala na sondi u okviru korisničkog interfejsa. Zahtevi za podešavanja za koja je zadužen upravljački program šalju se putem UART-a na mikrokontroler dsPIC30F4013, dok se podešavanja koji se tiču korisničkog interfejsa kao i načina komunikacije sa PC (*eng. Personal Computer*) računaru (Bluetooth/USB) obrađuju unutar ovog algoritma. U okviru moda *Merenje refleksije* korisniku je omogućeno da izvrši kalibraciju merne sonde, kao i da zahteva merenje refleksije. Ovi zahtevi šalju se najpre putem UART-a na upravljački program, koji nakon obrade vraća povratne informacije o izvršenoj kalibraciji/meranju putem UART-a. Informacije o reflektovanim relativnim intenzitetima se prosleđuju na PC kako bi se daljom obradom izvršila estimacija nad čitavim vidljivim spektrom.



Slika 8-54. Algoritam rada implementiran na mikrokontroleru dsPIC33FJ128MC802

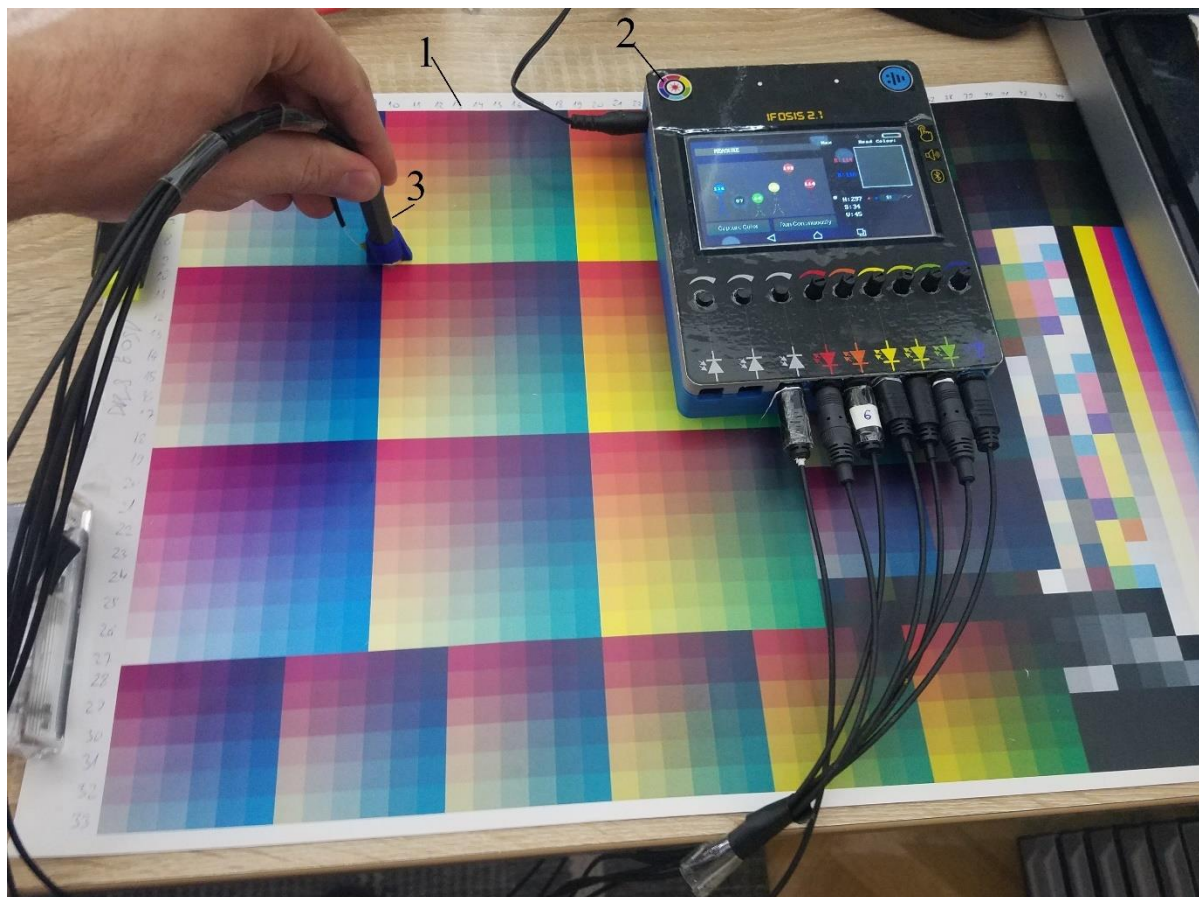
Na slici 8-55 data je fotografija implementiranog senzorskog sistema u ovoj disertaciji.



Slika 8-55. Fotografija implementiranog senzorskog sistema

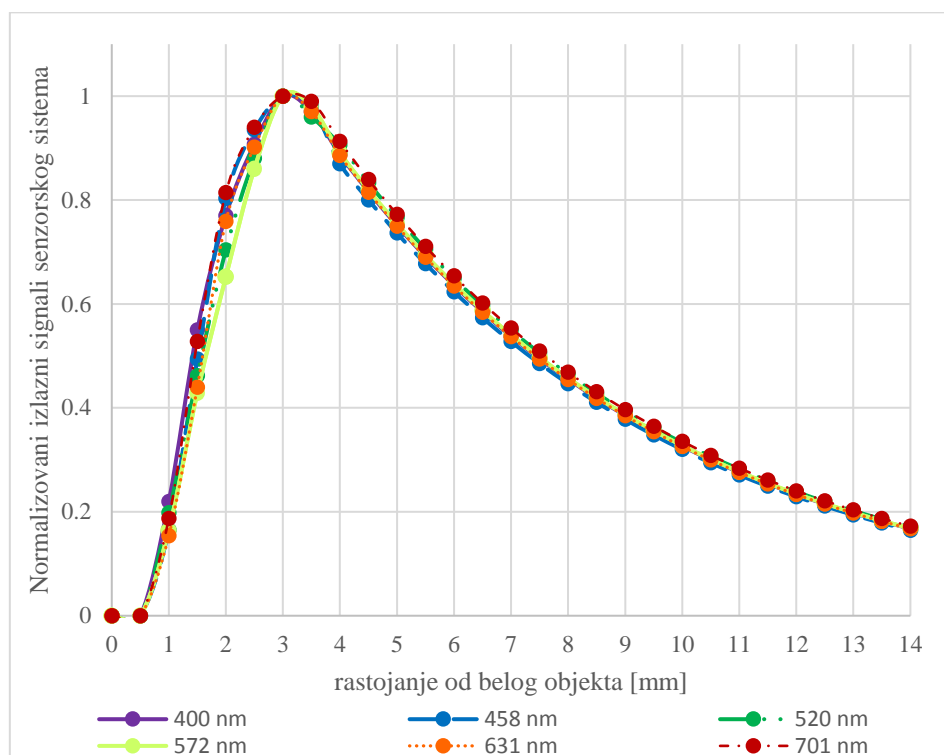
9. REZULTATI I DISKUSIJA

Nakon izrade senzora, usledio je odabir radnog opsega kolorimetrijske sonde, njena kalibracija, a zatim i određivanje boje svih štampanih uzoraka na karti boja *ECI 2002*. Ideja kalibracije je da se uređaj postavi u unapred definisano stanje i podesi odziv uređaja. Na slici 9-1 prikazana je merna postavka. Brojem 1 označena je karta boja *ECI2002* sa 1485 uzoraka, brojem 2 označen je implementirani senzorski sistem, a brojem 3 kolorimetrijska sonda.



Slika 9-1. Merna postavka

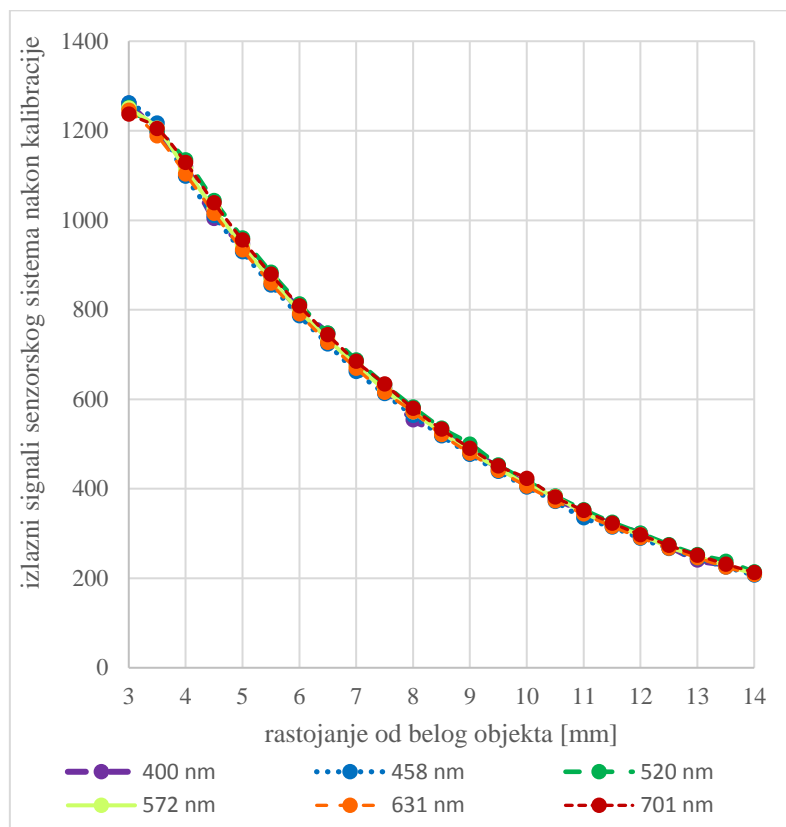
Na slici 9-2 su prikazane normalizovane vrednosti amplituda izlaznih signala implementiranog senzorskog sistema na odgovarajućim talasnim dužinama u zavisnosti od rastojanja belog kalibracionog objekta.



Slika 9-2. Normalizovane vrednosti izlaznih signala senzorskog sistema V_1 - V_6 u zavisnosti od rastojanja od belog kalibracionog objekta

Kako bi karakteristika senzorskog sistema bila monotona, potrebno je izabrati radni opseg (prednji ili zadnji nagib karakteristike). Na odziv u oblasti prednjeg nagiba u velikoj meri utiče ugaoni položaj senzora čija se boja određuje, što je posledica položaja predajnih optičkih vlakana u odnosu na prijemno optičko vlakno. U oblasti zadnjeg nagiba pomenuti problem je izražen u znatno manjoj meri, pa je ovaj deo karakteristike izabran kao radni opseg. Pomoću odstojnika na kolorimetrijskoj sondi (videti sliku 8-4 u poglavlju 8.1.2) eliminisan je radni opseg iz oblasti prednjeg nagiba i kao radna tačka (rastojanje od objekta gde je izvršena kalibracija) postavljeno je rastojanje 4 mm.

Najjednostavniji vid kalibracije je da se kalibrišu crna i bela boja. Na ovaj način, prilikom postavljanja kolorimetrijske sonde ispred crnog objekta, vrši se korekcija ofseta za sve LED izvore pojedinačno, a postavljanjem ispred belog objekta vrši se skaliranje odziva za sve LED izvore pojedinačno. Prilikom merenja čiji će rezultati biti izloženi u ovom poglavlju kao beli objekat korišćen je papir na kojem je vršena štampa. Kalibrisane vrednosti beleže se u EEPROM memoriji mikrokontrolera dsPIC30F4013, čijim radom upravlja prethodno opisani algoritam. Na slici 9-3 je prikazan odziv senzorskog sistema u zavisnosti od rastojanja sonde od belog objekta, nakon kalibracije.



Slika 9-3. Odziv senzorskog sistema u zavisnosti od rastojanja sonde od belog objekta nakon kalibracije

Procedura merenja je sledeća: Merna sonda se postavlja iznad uzorka čija se boja određuje, a podaci o optičkoj snazi beleže se pomoću širokopoljnog optičkog detektora, i to za šest centralnih talasnih dužina emitujućih LED izvora koji su ekvidistantno raspoređeni duž vidljivog spektra. Postupak se ponavlja za sve uzorke boja, a na kraju merenja se podaci otpremaju na računar radi dalje obrade numeričkom aproksimacijom.

9.1. NUMERIČKA APROKSIMACIJA

Budući da senzorski sistem realizovan u ovoj disertaciji beleži izlazne vrednosti (pomenute reflektovane intenzitete) kao niz od 6 elemenata (tačaka), da bi se odredio oblik spektralne krive u opsegu talasnih dužina 380-730 nm, potrebno je izvršiti numeričku aproksimaciju koja će definisati funkcije između datih tačaka. U ovoj disertaciji estimacija spektra predložene metode bazira se na interpolacionoj metodi.

Interpolacione funkcije se najčešće predstavljaju pomoću [134]:

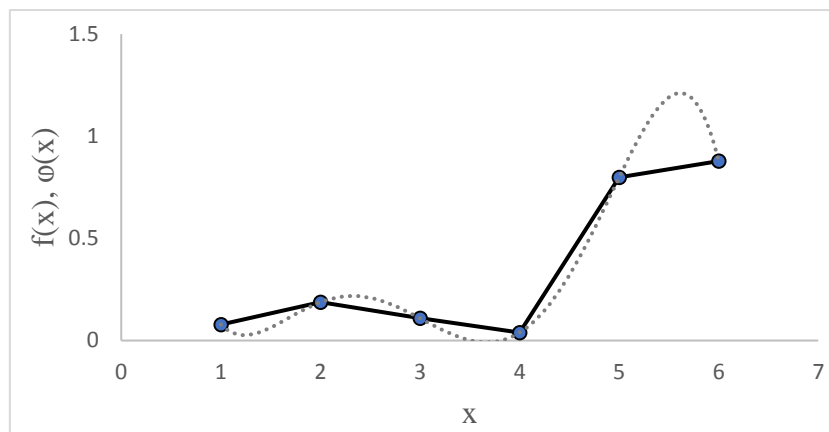
- Polinomijalnih funkcija,
- “*Piece-wise*” polinomijalnih funkcija (koje se u opštem slučaju razlikuju na svakom podintervalu).

Linearna interpolacija predstavlja veoma jednostavan vid aproksimacije (slika 9-4). Ova aproksimacija se može dobiti sa samo dve tačke, $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$. Kroz te tačke moguće je definisati pravu, kao:

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) \quad (9-1)$$

Izraz (9-1) se može upotrebiti između bilo koje dve tačke. Međutim, ograničenje ovakve interpolacije ogleda se u tome da tačke moraju biti što bliže jedna drugoj kako bi aproksimacija što vernije opisala segmente krive.

Na slici 9-4 originalna kriva je predstavljena isprekidanom linijom, a njena linearna aproksimacija punom linijom. Ukoliko kriva ima naglih prevoja, linearna aproksimacija će biti gruba.



Slika 9-4. Aproksimacija linearnom interpolacijom

Termin “splajn” (eng. *Spline*) se odnosi na funkciju koja predstavlja segment polinomijalne krive. Ovakav pristup se koristi zbog povećanja tačnosti procene.

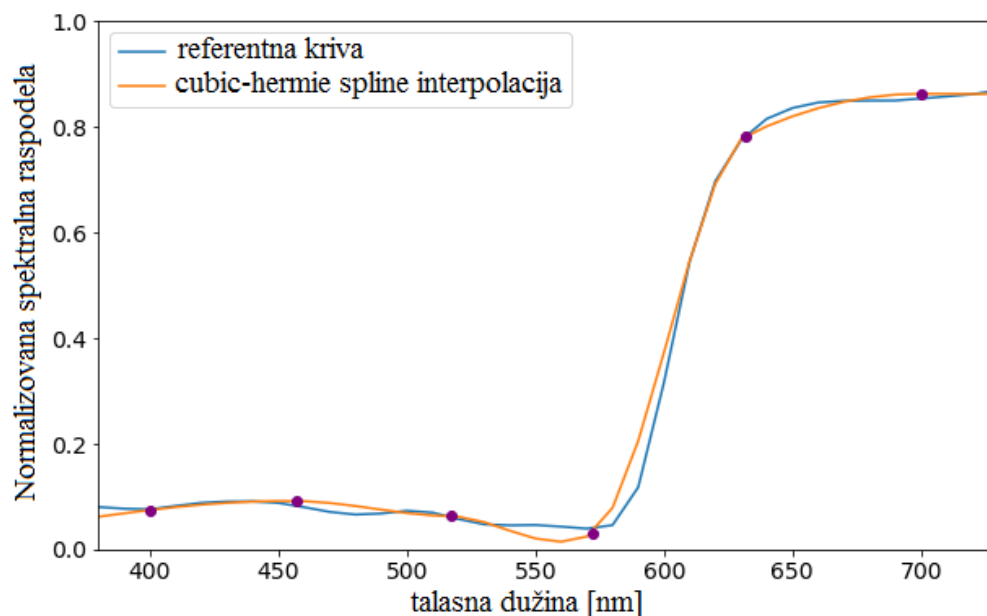
Ako želimo da uradimo interpolaciju funkcije $f(x)$ na relativno dugačkom intervalu $\langle a, b \rangle$, tada interpolacioni polinomi moraju biti polinomi visokog stepena, što dovodi do velikih grešaka, budući da interpolacioni polinom osciluje između interpolacionih tačaka [134]. Dakle, ovo nije poželjan način realizacije. Umesto toga, bolji način je podeliti interval $\langle a, b \rangle$ na mnogo malih podintervala i na svakom podintervalu definisati interpolacioni polinom niskog stepena. Ako su u nekim od čvorova interpolacije i izvodi interpolacionog polinoma jednaki odgovarajućim izvodima funkcije koju interpoliramo, onda se takav interpolacioni polinom naziva Hermitov interpolacioni polinom.

9.1.1. CUBIC-HERMITE SPLINE INTERPOLATOR

Cubic-Hermite Spline interpolator je odabran kao interpolator jer omogućava kreiranje parcijalnih interpolacionih krivih. Na ovaj način postignuta je lokalna kontrola nad segmentom dva susedna merena relativna intenziteta bez uticaja na druge delove krive, budući da se zadaje nagib na svakoj kontrolnoj tački (izmerenoj vrednosti na datoj talasnoj dužini). Kako se svaki segment računa posebno, u svrhu formiranja celokupne krive, proračuni se moraju ponoviti za sve kontrolne tačke. Ova interpolacija je izvršena u programskom jeziku *Python*, pri čemu je korišćena biblioteka *SciPy*⁵.

Na slici 9-5 plavom linijom je ilustrovan primer Cubic-Hermite spline interpolacije kroz šest tačaka u svrhu estimiranja spektra (a narandžastom linijom je prikazana referentna kriva).

⁵ SciPi biblioteka je prilagođena programskom jeziku Python i obezbeđuje algoritme za optimizaciju, integraciju, interpolaciju, algebarske jednačine, diferencijalne jednačine i statističku obradu podataka.



Slika 9-5. Cubic-Hermite Spline interpolacija

U tabeli 9-1 su prikazani koeficijenti koji se odnose na nagibe u kontrolnim tačkama. Ovi koeficijenti su određeni eksperimentalno i korišćeni su u svim aproksimacijama rezultata predloženom metodom u ovoj disertaciji.

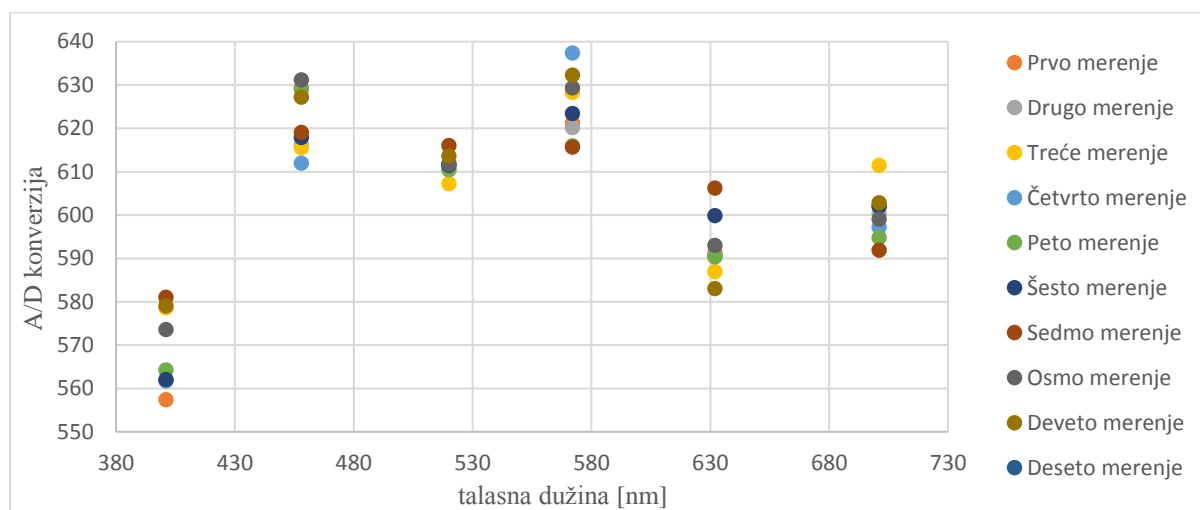
Tabela 9-1. Koeficijenti nagiba kontrolnih tačaka za Cubic-Hermite interpolator

Centralna Talasna dužina [nm]	380	400	458	520	572	631	701	730
Koeficijent nagiba	1.0	2.0	0.1	0.1	0.2	2.0	0.1	0.1

Reflektovani svetlosni intenziteti kontrolnih tačaka na talasnim dužinama 400 nm, 458 nm, 520 nm, 572 nm, 631 nm, 701 nm dobijeni su kao rezultat merenja u opisanoj metodi. Na talasnim dužinama na početku i kraju vidljivog spektra (380 nm i 730 nm) relativni svetlosni intenziteti aproksimirani su na taj način da početak spektra ima nulti reflektovani intenzitet, a kraj spektra intenzitet jednak izmerenom intenzitetu krajnjeg, crvenog LED izvora.

9.2. PONOVLJIVOST REALIZOVANOG UREĐAJA

Ponovljivost, kao mera reprodukcije odziva senzora pod istim uslovima merenja, odnosno greška merenja usled nemogućnosti senzora da daje identične rezultate pri istim mernim uslovima [129-130], data je na slici 9-6. Ovde je testirana ponovljivost senzora za deset uzastopnih merenja istog štampanog uzorka.



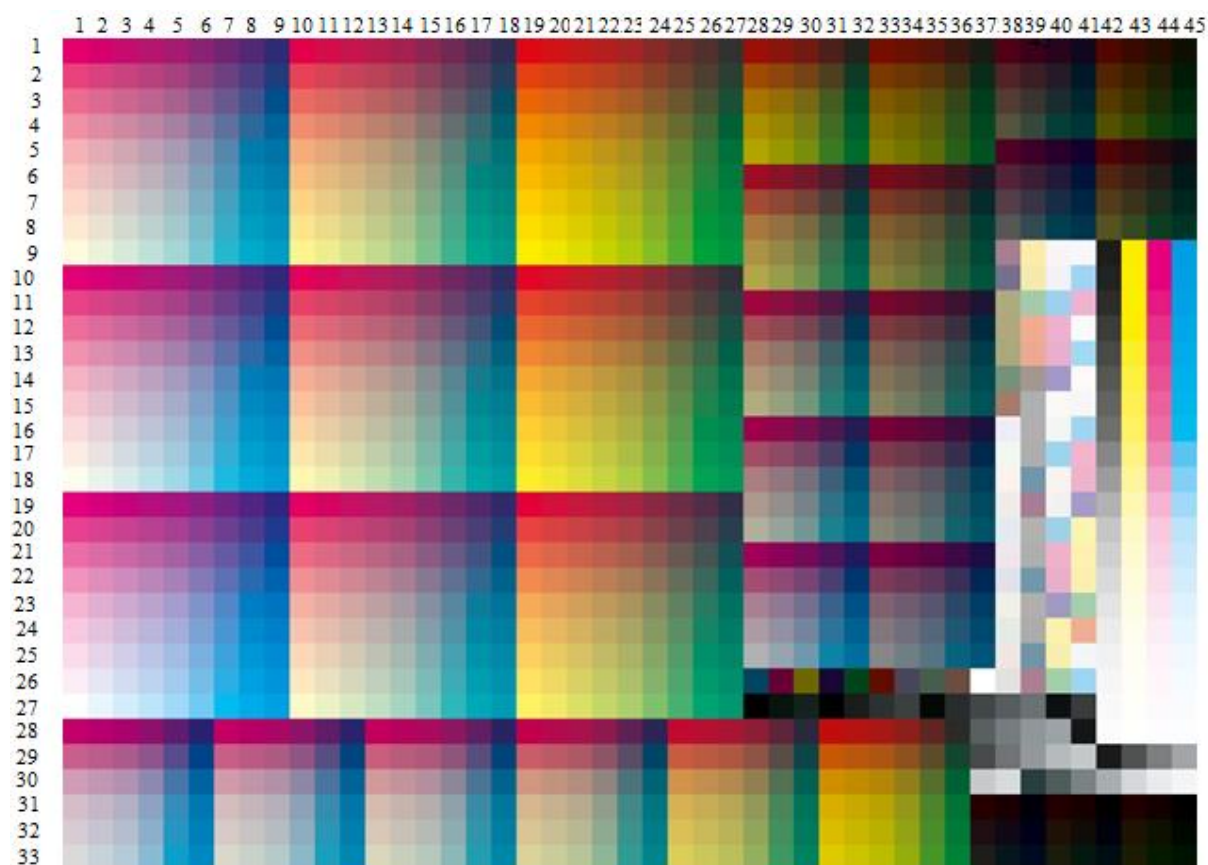
Slika 9-6. Ponovljivost realizovanog uređaja

Na apscisi je prikazana talasna dužina, ordinata predstavlja odzive realizovanog uređaja koji su prikazani kao rezultati 12-bitne A/D konverzije. Postignuta ponovljivost je oko $\pm 0.27\%$.

9.3. POREĐENJE REZULTATA PREDLOŽENE I REFERENTNE METODE

U ovom odeljku biće izloženi uporedni rezultati predložene refleksione optoelektronske i referentne spektrofotometrijske metode nad istim mernim uzorcima. Referentna spektrofotometrijska metoda u ovoj disertaciji podrazumeva rezultat merenja industrijskim spektrofotometrom *XRite EyeOnePro* uz geometriju merenja $45^\circ/0^\circ$, pri standardnom osvetljenju D50, (CIE 1931 2° standardni posmatrač). Uslovi merenja su bili sledeći: režim merenja M1, sa primenjenom crnom podlogom ispod uzoraka. Pre merenja je izvršena ručna kalibracija prema spoljnoj keramičkoj beloj referentnoj pločici. Spektralni podaci sa referentnog uređaja su obrađeni softverom za merenje i analizu boje BabelColor CT&A.

Kako referentna, tako i merenja predloženom metodom su izvršena u ručnom modu, uzorak po uzorak, na karti boja ECI2002 (*VisualLayoutCMYK1485*). Ova karta boja se sastoji od 1485 uzoraka, koji su organizovani u 33 reda sa po 45 kolona, kao što je prikazano na slici 9-7. Veličina svakog uzorka je 9×9 mm i nema obeleženih granica između susednih uzoraka. Digitalna štampa karte boja ECI2002 izvršena je uz pomoć kalibrisanog *Xerox Versant 80 Press* digitalne mašine za štampu (elektrofotografijom). Štampanje je najpre primenjeno na belom mat, a zatim i na belom sjajnom papiru prema *ISO Fogra Coated 39* profilu.



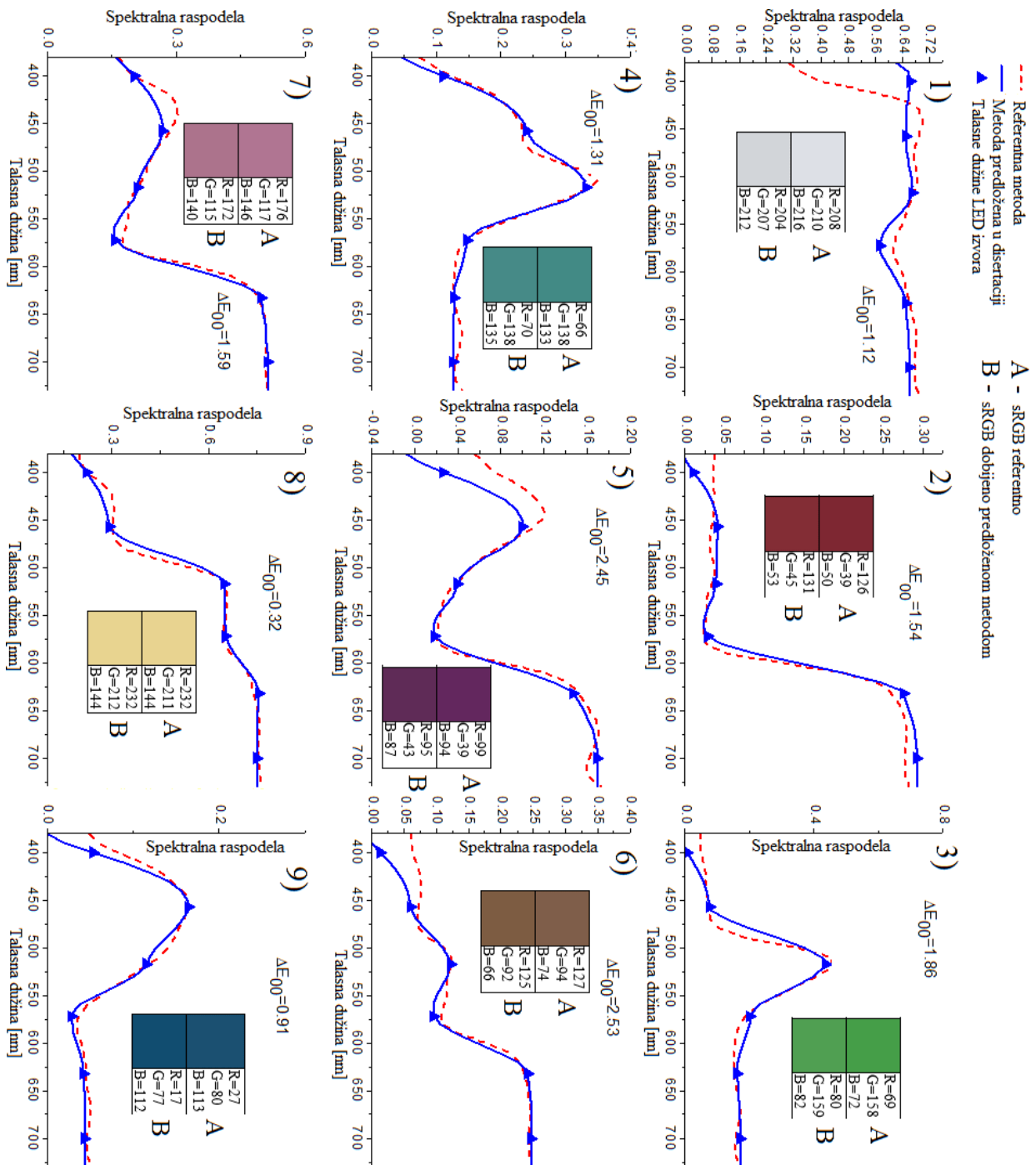
Slika 9-7. Karta boja ECI2002 (VisualLayoutCMYK1485)

Prikaz spektralnih raspodela dobijenih na osnovu predložene metode, prilagođenih za D50 standardno osvetljenje (kako bi rezultati bili uporedivi sa referentnom metodom), kao i proračun tristimulusnih vrednosti XYZ, mera odstupanja dobijenih rezultata ΔE_{00} i konverzija u sRGB prostor radi vizuelnog predstavljanja boja izvršene su u programskom jeziku *Python* uz korišćenje biblioteke *Color Science*.

9.3.1. PRIKAZ REZULTATA DOBIJENIH MERENJEM NA MAT PAPIRU

Budući da su merenja na mat papiru ostvarena kolorimetrijskom sondom razmotrenom u odeljku 8.1, koja je implementirana bez primenjene merne geometrije $0^\circ/45^\circ$ ili $45^\circ/0^\circ$, ovi rezultati predstavljaju testiranje koncepta predložene kolorimetrijske metode, gde važi pretpostavka da nema izraženog uticaja tačkaste refleksije.

Na slici 9-8 prikazani su rekonstruisani spektri dobijeni predloženom metodom (označeni punom plavom linijom), kao i spektri dobijeni referentnom spektrofotometrijskom metodom (označeni crvenom isprekidanom linijom). Odabrani su štampani uzorci sa što različitim spektralnim krivama kako bi se ispitala verodostojnost predložene metode sa što više aspekata. Dodatno, na slici 9-8 su dati i rezultati konverzije spektralnih krivih u sRGB prostor boja, radi vizuelnog poređenja dobijenih nijansi boja, kao i parametar ΔE koji izražava brojčano odstupanje u odnosu na referentnu metodu.



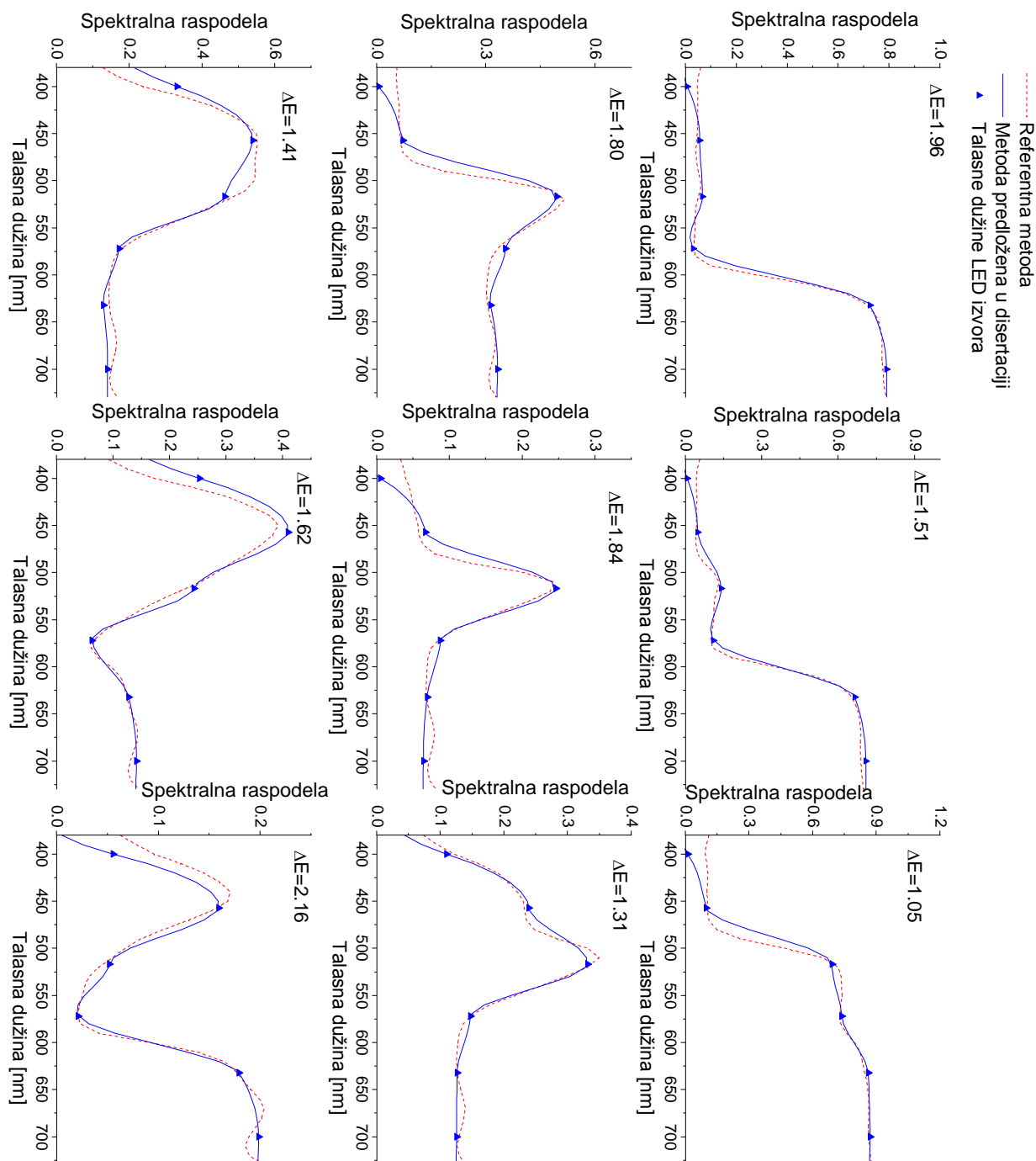
Slika 9-8. Uporedne krive dobijene predloženom i referentnom metodom za devet odabranih boja sa što različitim spektralnim raspodelama

Očekivano manja preciznost predložene metode može se uočiti na svim krivama u ljubičasto-plavom delu spektra (u opsegu talasnih dužina 400-450 nm), što je direktna posledica korišćenja silicijumskog fotodetektora. Dodatno, kod uzoraka tamnijih boja označenih brojevima 4 i 5 gde je nivo reflektovane svetlosti veoma nizak, uočava se izraženije odstupanje ΔE_{00} nego kod svetlih uzoraka označenih sa 1 i 8. Na uzorcima 8 i 9 se može uočiti gotovo idealno vizuelno poklapanje boja u sRGB modelu, dok kod uzoraka označenih sa 1, 2, 3, 4 i 7 iskusno oko može zapaziti minimalna odstupanja. Preostali uzorci (5 i 6) su takođe u okviru

granica tolerancije ΔE_{00} . Budući da su niži nivoi refleksije i oštriji prevoji spektralnih krivih uzrokovali različite greške, dalji raspored dobijenih rezultata će biti sortiran prema različitim setovima boja.

9.3.1.1. TESTIRANJE METODE NA UZORCIMA ZASIĆENIH BOJA

Uporedne spektralne krive predložene i referentne metode prikazane na slici 9-9 dobijene su za set od devet uzoraka zasićenih boja, pri čemu su uzorci birani na taj način da prikažu što više različitih spektara.



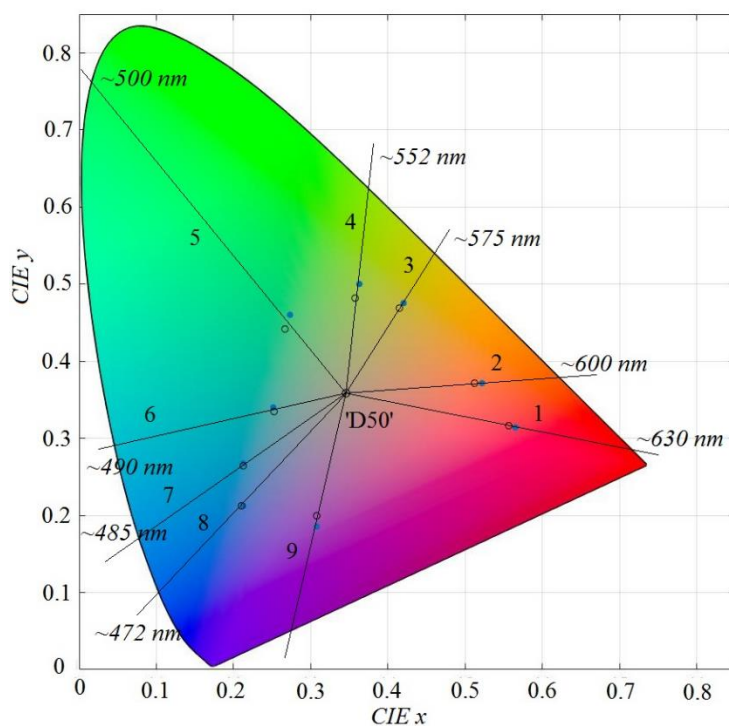
Slika 9-9. Uporedne spektralne krive dobijene predloženom i referentnom metodom za uzorke zasićenih boja

Tristimulusne vrednosti, kao i normalizovane x , y hromatske koordinate izračunate su na osnovu spektralnih krivih i date su u tabeli 9-2.

Tabela 9-2. Tristimulusne vrednosti i normalizovane hromatske koordinate za uzorke zasićenih boja

Metoda:	X	Y	Z	x	y	uzorak
referentna	23.86	13.25	5.06	0.565805	0.314204	1
predložena	25.83	14.7	5.85	0.556921	0.316947	
referentna	26.36	18.76	5.31	0.522705	0.372001	2
predložena	27.41	19.96	6.16	0.512049	0.372875	
referentna	62.33	70.36	15.39	0.420921	0.475149	3
predložena	62.58	70.77	17.41	0.415097	0.469422	
referentna	26.87	37.02	10.09	0.363206	0.500406	4
predložena	28.26	38.16	12.6	0.357631	0.482916	
referentna	7.78	13.1	7.59	0.27327	0.460133	5
predložena	8.37	13.84	9.05	0.267754	0.442738	
referentna	15.58	21.11	25.31	0.25129	0.340484	6
predložena	15.94	21.19	26.09	0.252135	0.335179	
referentna	23.45	29.48	57.01	0.213298	0.268146	7
predložena	22.83	28.29	55.9	0.213325	0.264343	
referentna	14.44	14.42	38.65	0.213894	0.213598	8
predložena	14.94	15.11	41.05	0.210127	0.212518	
referentna	9.47	5.71	15.52	0.308469	0.185993	9
predložena	9.47	6.17	15.06	0.308469	0.200977	

Na osnovu hromatskih koordinata, uzorci su predstavljeni u hromatskom dijagramu na slici 9-10.

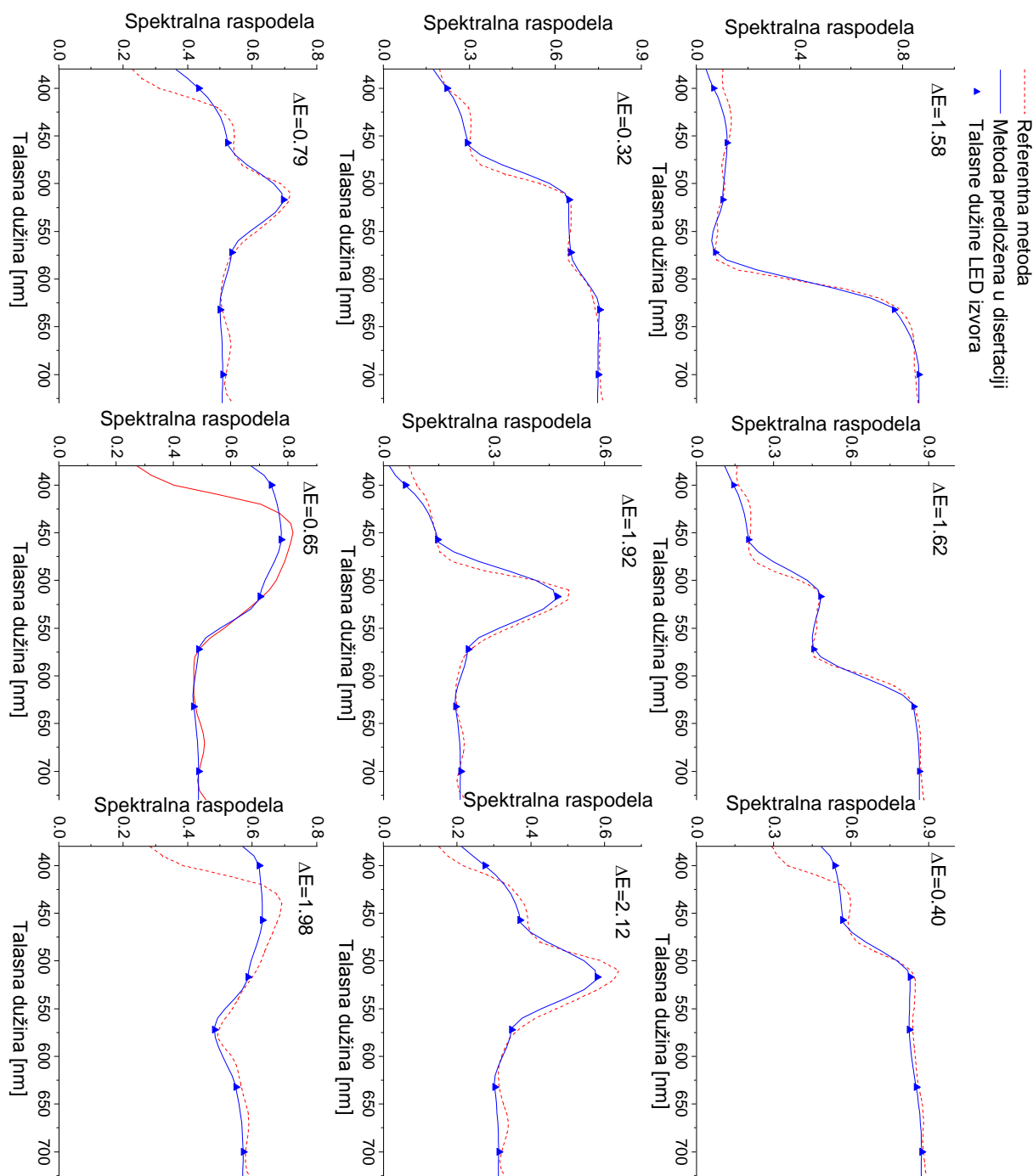


Slika 9-10. Uzorci zasićenih boja prikazani na hromatskom dijagramu

Monohromatske boje koje su potpuno zasićene i ne sadrže udeo bele smeštene su po ivici hromatskog dijagrama. Polihromatske boje, koje su rezultat merenja ovih devet uzoraka, imaju određeni udeo bele u svojoj nijansi, i zbog toga se nalaze u unutrašnjosti hromatskog dijagrama (stepen zasićenja je obrnuto proporcionalan količini prisutne bele). Međutim, svaki od ovih devet uzoraka možemo klasifikovati pretežno kao kao daleka crvena, crvena, narandžasta, žuto-zelena, zelena, tirkizna, cijan, plava i ljubičasta boja. To određuje njihova dominantna talasna dužina, koja se za svaki od uzoraka može odrediti kada se povuče poluprava koja je određena koordinatama referentne bele „D50“ i hromatskim koordinatama datog uzorka. Tačka preseka sa granicom hromatskog dijagrama određuje dominantnu talasnu dužinu datog uzorka. Punim kružićima su označene hromatske koordinate dobijene referentnim merenjima, dok su praznim kružićima označene hromatske koordinate dobijene merenjima predložene metode. Brojevima 1-9 su označene prave koje određuju dominantnu dužinu svakog od uzoraka.

9.3.1.2. TESTIRANJE METODE NA UZORCIMA MANJE ZASIĆENIH BOJA

Uporedne spektralne krive predložene i referentne metode prikazane na slici 9-11 dobijene su za set od devet uzoraka manje zasićenih boja.



Slika 9-11. Uporedne spektralne krive dobijene predloženom i referentnom metodom za uzorke manje zasićenih boja

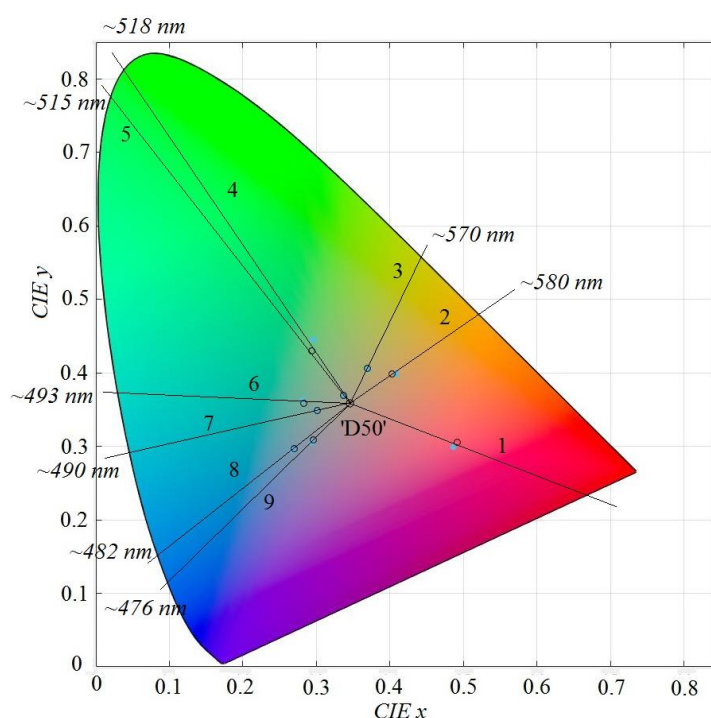
Kao i u slučaju zasićenih boja, kao posledica korišćenog fotodetektora, i ovde se mogu uočiti blaža odstupanja u ljubičastom delu spektra.

Tristimulusne vrednosti, kao i normalizovane x , y hromatske koordinate izračunate su na osnovu spektralnih krivih i date su u tabeli 9-3.

Tabela 9-3. Tristimulusne vrednosti i normalizovane hromatske koordinate za uzorke manje zasićenih boja

Metoda:	X	Y	Z	x	y	
referentna	30.01	18.45	13.2	0.486701	0.299222	1
predložena	30.04	18.72	12.38	0.491331	0.306183	
referentna	52.11	50.85	24.59	0.408546	0.398667	2
predložena	51.47	50.93	25.09	0.403718	0.399482	
referentna	76.14	83.08	66.13	0.337874	0.368671	3
predložena	74.77	81.69	64.81	0.337913	0.369187	
referentna	58.62	64.24	35.58	0.369982	0.405453	4
predložena	58.97	64.79	35.77	0.369648	0.406131	
referentna	20.83	31.23	18.09	0.296935	0.445189	5
predložena	20.73	30.25	19.31	0.294921	0.43036	
referentna	34.53	44.62	43.64	0.281212	0.363385	6
predložena	33.31	42.12	42.19	0.2832	0.358102	
referentna	50.99	59.41	59.75	0.299677	0.349163	7
predložena	50.44	58.46	58.36	0.301566	0.349516	
referentna	52.56	57.92	85.5	0.268191	0.29554	8
predložena	52.07	57.24	83.2	0.270479	0.297335	
referentna	53.35	55.28	72.39	0.294719	0.305381	9
predložena	51.15	53.45	68.06	0.296247	0.309568	

Na osnovu hromatskih koordinata, uzorci su predstavljeni u hromatskom dijagramu na slici 9-12.



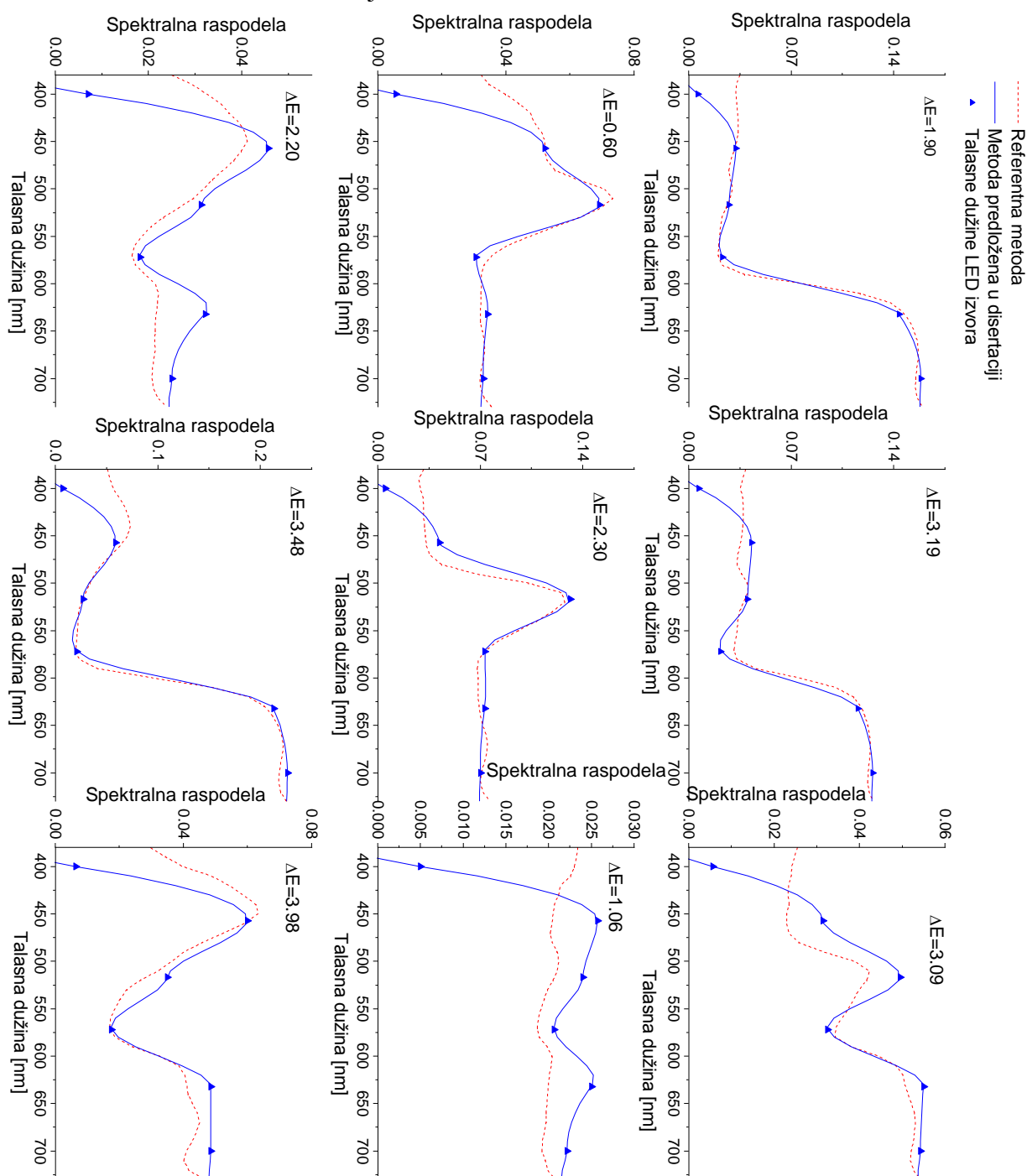
Slika 9-12. Uzorci manje zasićenih boja prikazani na hromatskom dijagramu

Svetlije boje zbog prisustva veće količine bele koja je pomešana sa tonom nalaze se fokusirane bliže centru dijagrama, u odnosu na prethodno razmatranje sa slike 9-9, gde su boje bile sa

većim stepenom zasićenja. U centru se nalazi referentna bela „D50“, koja odgovara veštačkom dnevnom svetlu sa korelisanom temperaturom boje od oko ~ 5000 K.

9.3.1.3. TESTIRANJE METODE NA UZORCIMA TAMNIH BOJA

Uporedne spektralne krive predložene i referentne metode prikazane na slici 9-13 dobijene su za set od devet uzoraka tamnih boja.



Slika 9-13. Uporedne spektralne krive dobijene predloženom i referentnom metodom za uzorke tamnih boja

Može se primetiti da je u slučaju tamnijih uzoraka vizuelno odstupanje spektralnih krivih referentne i predložene metode nešto izraženije, pa je samim tim i nešto veća greška ΔE_{00} (ali u prihvatljivim granicama). Slično kao i usled šuma, ovo odstupanje nastaje zato što male

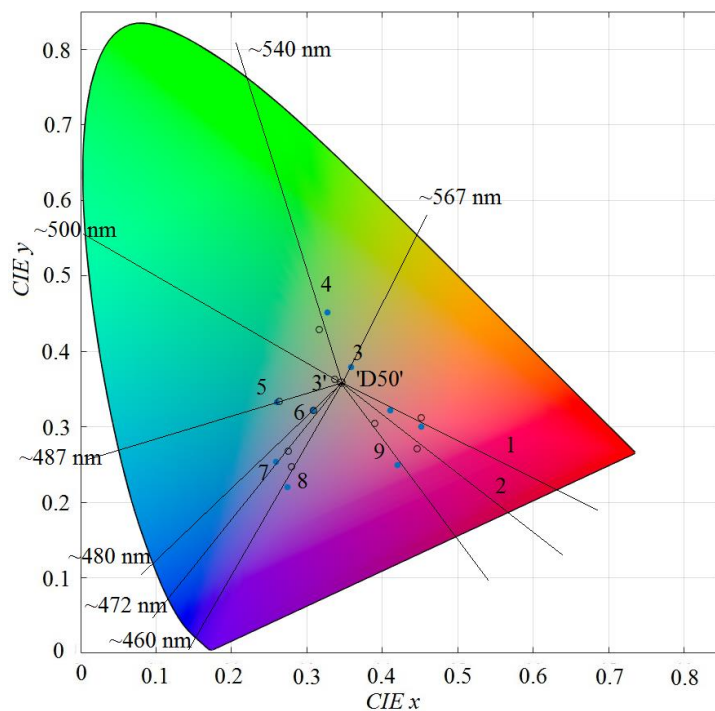
varijacije u intenzitetu LED izvora mogu izazvati grešku merenja s obzirom na to da postoji veoma nizak nivo reflektovanog signala.

Tristimulusne vrednosti, kao i normalizovane x , y hromatske koordinate izračunate su na osnovu spektralnih krivih i date su u tabeli 9-4.

Tabela 9-4. Tristimulusne vrednosti i normalizovane hromatske koordinate za uzorke tamnih boja

Metoda:	X	Y	Z	x	y	
referentna	6.24	4.14	3.41	0.452502	0.300218	1
predložena	6.19	4.27	3.21	0.452816	0.312363	
referentna	5.98	4.7	3.9	0.410151	0.322359	2
predložena	5.5	4.29	4.31	0.390071	0.304255	
referentna	3.7	3.9	2.69	0.359572	0.379009	3
predložena	3.87	4.16	3.42	0.337991	0.363319	
referentna	3.7	4.72	5.76	0.260931	0.332863	4
predložena	3.58	4.55	5.48	0.263042	0.334313	
referentna	6.39	8.83	4.3	0.327357	0.452357	5
predložena	6.74	9.15	5.4	0.316581	0.429779	
referentna	1.88	1.97	2.25	0.308197	0.322951	6
predložena	2.18	2.27	2.59	0.309659	0.322443	
referentna	2.24	2.2	4.19	0.25956	0.254925	7
predložena	2.69	2.62	4.45	0.275615	0.268443	
referentna	8.54	5.06	6.71	0.420483	0.249138	8
predložena	8.75	5.31	5.52	0.446885	0.271195	
referentna	3.28	2.63	6.04	0.274477	0.220084	9
predložena	3.42	3.02	5.74	0.280788	0.247947	

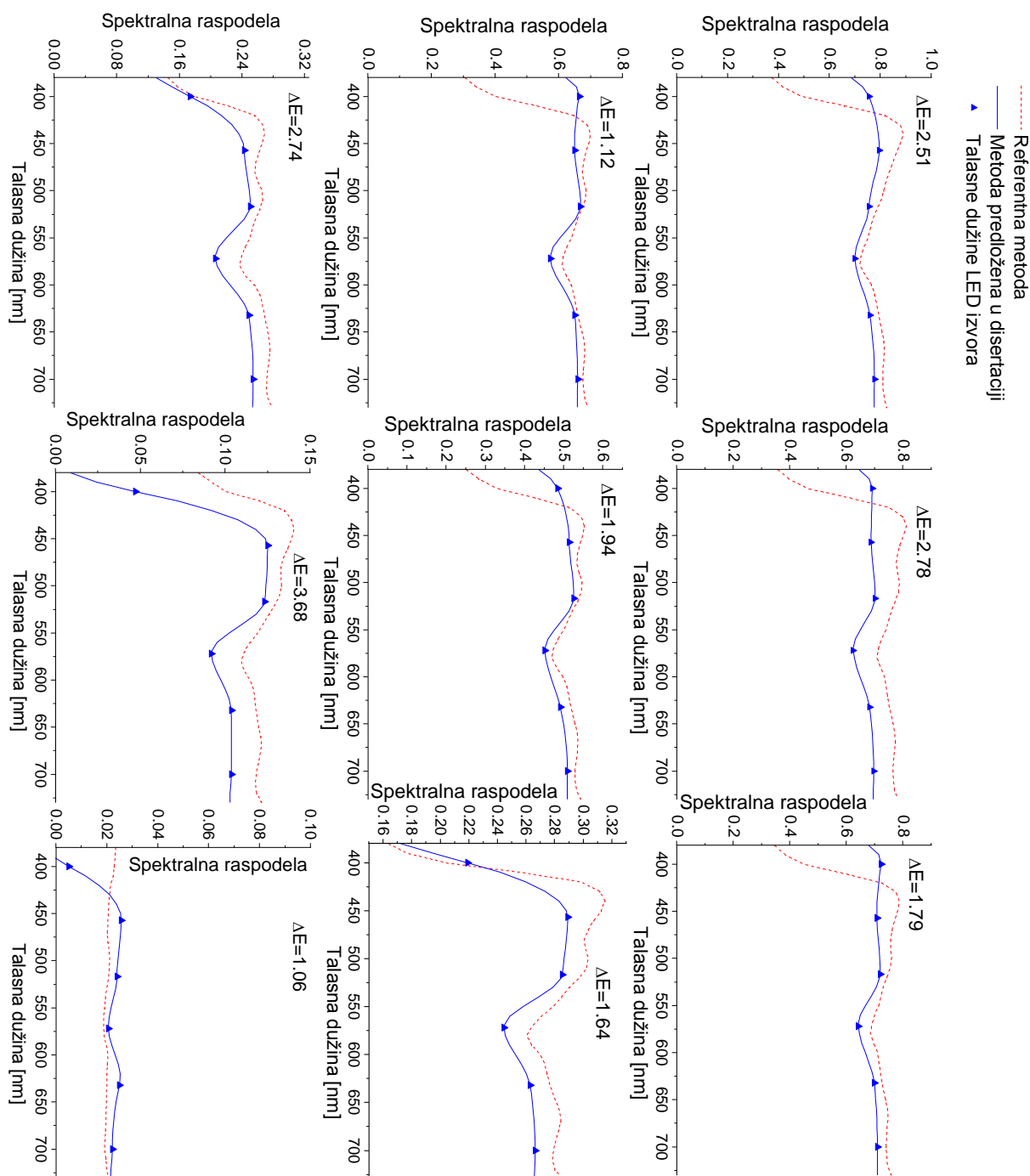
Na osnovu hromatskih koordinata, uzorci su predstavljeni u hromatskom dijagramu na slici 9-14.



Slika 9-14. Uzorci svetlih boja prikazani na hromatskom dijagramu

9.3.1.4. TESTIRANJE METODE NA SIVOJ SKALI

Uporedne spektralne krive predložene i referentne metode prikazane na slici 9-15 dobijene su za set od devet uzoraka sive.



Slika 9-15. Uporedne spektralne krive dobijene predloženom i referentnom metodom za uzorke različitih nijansi sive

Tristimulusne vrednosti, kao i normalizovane x , y hromatske koordinate izračunate su na osnovu spektralnih krivih i date su u tabeli 9-5.

Tabela 9-5. Tristimulusne vrednosti i normalizovane hromatske koordinate za sive uzorke

Metoda:	X	Y	Z	x	y	
referentna	70.84	74.51	85.63	0.306693	0.322582	1
predložena	74.78	77.64	83.44	0.317052	0.329178	
referentna	61.51	64.59	74.12	0.307212	0.322595	2
predložena	70.1	72.68	79.02	0.31605	0.327683	
referentna	48.11	50.67	58.64	0.305616	0.321878	3
predložena	54.3	56.85	61.76	0.314036	0.328784	
referentna	42.42	44.62	52.28	0.304479	0.32027	4
predložena	47.72	49.7	54.18	0.314776	0.327836	
referentna	26.47	28	33.35	0.301412	0.318834	5
predložena	29.25	30.77	33.58	0.3125	0.328739	
referentna	25.2	26.91	31.8	0.300322	0.320701	6
predložena	27.37	29.3	31.15	0.31166	0.333637	
referentna	5.15	5.68	7.19	0.285794	0.315205	7
predložena	3.77	4.52	4.63	0.291796	0.349845	
referentna	2.71	2.95	3.55	0.294245	0.320304	8
predložena	2.57	2.76	3.04	0.307049	0.329749	
referentna	2.11	2.23	2.73	0.298444	0.315417	9
predložena	2.02	2.11	2.81	0.291066	0.304035	

9.3.1.5. VIZUELNO POREĐENJE REZULTATA TESTIRANIH UZORAKA U SRGB MODELU BOJA

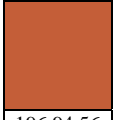
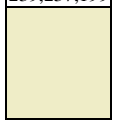



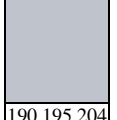
U tabeli 9-6 dat je raspored boja koje su prikazane na slikama 9-9, 9-11, 9-13 i 9-15, prema poziciji (red/kolona) na karti boja ECI2002 (*VisualLayoutCMYK1485*).

Tabela 9-6. Raspored testiranih mat uzoraka boja prema poziciji na karti boja ECI2002

Boje:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zasićene	1/20	3/20	18/19	9/23	6/26	16/16	17/7	23/7	19/6
Svetle	20/10	7/10	9/1	10/39	27/24	27/14	9/3	22/45	22/38
Tamne	28/28	1/25	29/35	14/36	5/35	9/42	22/37	21/28	21/31
Sive	25/42	24/42	22/42	21/42	19/42	21/39	27/38	27/37	27/41

Tabela 9-7 predstavlja vizuelni prikaz, kao i numeričko poređenje pomenutih setova zasićenih, svetlih, tamnih i sivih boja predstavljenih u sRGB modelu boja. Boje dobijene referentnom metodom označene su slovom A (sRGB vrednosti su napisane iznad obojenih uzoraka), dok su boje dobijene predloženom metodom označene slovom B (sRGB vrednosti su napisane ispod obojenih uzoraka).

Tabela 9-7. sRGB model boja: vizuelni prikaz i numeričko poređenje referentne metode i predložene metode nad razmatranim mat uzorcima zasićenih, svetlih, tamnih i sivih boja.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zasićene		195,38,56	194,89,51	239,221,66	137,177,61	30,116,68	66,138,133	41,160,197	66,107,167	105,41,111
	A									
	B									
		208,40,79	196,94,56	238,222,77	141,178,75	30,118,76	70,138,135	45,156,195	61,110,172	104,49,109
Svetle		207,70,97	229,181,119	239,237,199	223,211,144	91,168,104	128,191,168	177,210,194	167,205,233	191,196,215
	A									
	B									
		207,72,93	226,182,121	237,236,197	223,212,144	93,165,109	130,185,165	178,208,192	168,204,230	187,193,209
Tamne		98,37,49	90,50,53	61,55,41	37,66,65	63,91,49	38,38,40	37,40,57	113,33,72	53,39,69
	A									
	B									
		97,40,47	85,47,56	59,58,48	37,65,64	64,93,58	42,41,43	44,44,59	116,35,65	53,45,67
Sive		39,40,41	51,53,56	93,98,104	120,128,136	140,145,151	175,178,185	197,201,210	218,221,227	226,226,240
	A									
	B									
		41,42,43	49,47,49	84,93,97	111,124,129	135,141,146	171,175,180	190,195,204	212,210,220	221,222,231

9.3.2. PRIKAZ REZULTATA DOBIJENIH MERENJEM NA SJAJNOM PAPIRU

Redizajnirana kolorimetrijska sonda koja je opisana u odeljku 8.1.2 omogućila je testiranje predložene refleksione metode na sjajnoj podlozi, gde uticaj tačkaste refleksije ne može biti zanemaren. Dodatno, budući da je predložena metoda estimacijom spektra na osnovu Cubic-Hermite interpolatora pokazala nedostatke, a u skladu sa sve većom primenom mašinskog učenja u senzorskoj tehnologiji, ovde je predložena korekciona metoda bazirana na veštačkim neuronskim mrežama ANN (*eng. Artificial Neural Networks*).

9.3.2.1. KRATAK OPIS KOREKCIONE METODE BAZIRANE NA MAŠINSKOM UČENJU

U ovom odeljku biće prikazani i rezultati predložene korekciione metode uporedo sa rezultatima prethodno razvijene metode i referentne metode.

U svrhu što bolje estimacije spektra, korišćena je arhitektura sa više slojeva. Ulazni sloj neuronske mreže sastoji se od šest izmerenih vrednosti koje predstavljaju intenzitete reflektovane svetlosti (koji odgovaraju centralnim talasnim dužinama zračenja korišćenih LED svetlosnih izvora, dok izlazni sloj obezbeđuje trideset i šest vrednosti (sa rezolucijom 10 nm) koje direktno reprezentuju estimirani spektar na opsegu 380-730 nm. Između ova dva sloja postoje četiri skrivena sloja. Celokupna konfiguracija je prikazana u tabeli 9-8. Svi slojevi poseduju identičnu *'hyperbolic tangent'* aktivacionu funkciju.

Tabela 9-8. Arhitektura sa više slojeva korekciione metode bazirane na mašinskom učenju

Naziv sloja	Broj neurona
Ulazni sloj	6
Prvi skriveni sloj	576
Drugi skriveni sloj	288
Treći skriveni sloj	144
Četvrti skriveni sloj	72
Izlazni sloj	36

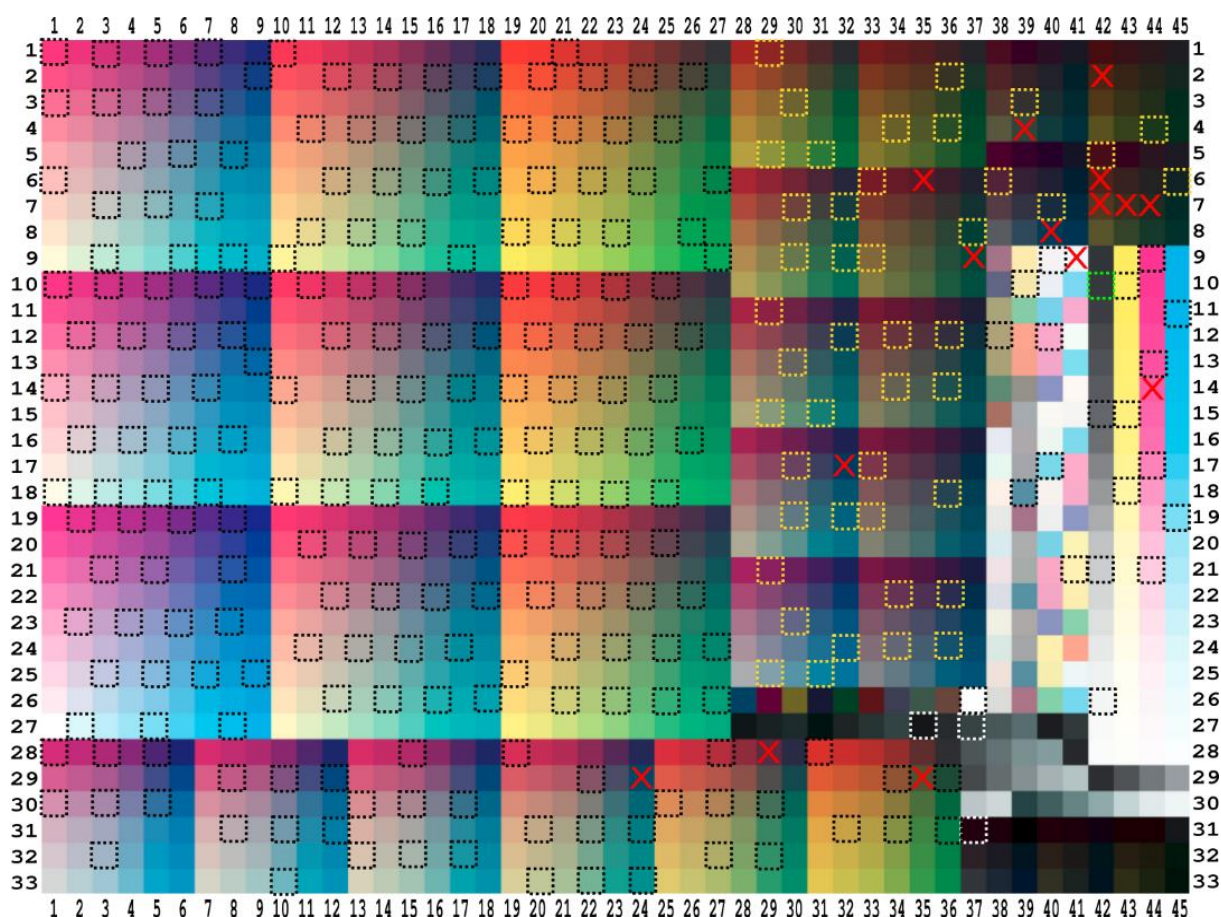
Broj neurona u ulaznom sloju je odabran u skladu sa brojem tačaka reflektovanih intenziteta u predloženoj metodi, dok je broj neurona u izlaznom sloju odabran na taj način da odgovara rezoluciji merenja referentne metode.

Broj neurona i vrsta aktivacione funkcije u skrivenim slojevima određeni su metodom pokušaja i grešaka (eng. *Trial and Error method*).

9.3.2.2. SELEKCIJA BOJA ZA TRENING SET I TEST SET

Da bi se omogućilo adekvatno treniranje neuronske mreže, potrebno je test kartu ECI2002 sa uzorcima boja podeliti na set za treniranje (eng. *training set*) i set koji će obezbediti rezultate postavljenog algoritma (eng. *test set*). Ovde je potrebno naglasiti da se boje koje su odabrane za training set ne smeju koristiti u svrhu testiranja rezultata. Shodno tome, karta boja je podeljena na način koji je prikazan na slici 9-16. Uokvireni kvadratići predstavljaju test set, dok su preostali uzorci u okviru training seta. Training set je odabran na taj način da obuhvati što različite primere spektra kako bi metoda dala što adekvatnija predviđanja u test setu.

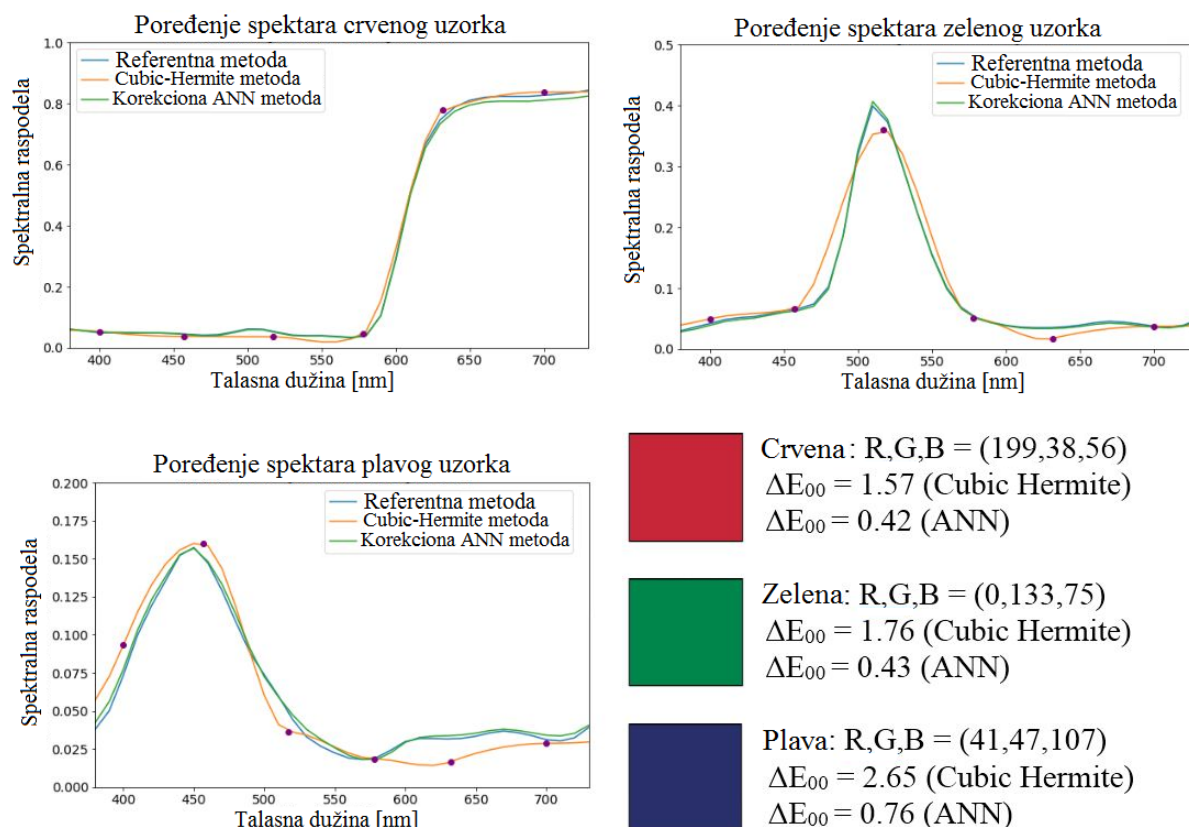
Napomena: grube greške merenja su označene crvenim slovom X, i one se u daljem razmatranju rezultata ne tretiraju. Te grube greške dobijene su na uzorcima za koje rekonstruisani spektar (bilo u slučaju merenja referentnom ili predloženom metodom) pokazuje značajno odstupanje od očekivanog izgleda spektra, i direktno predstavljaju posledicu ručnog merenja uzoraka na karti boja.



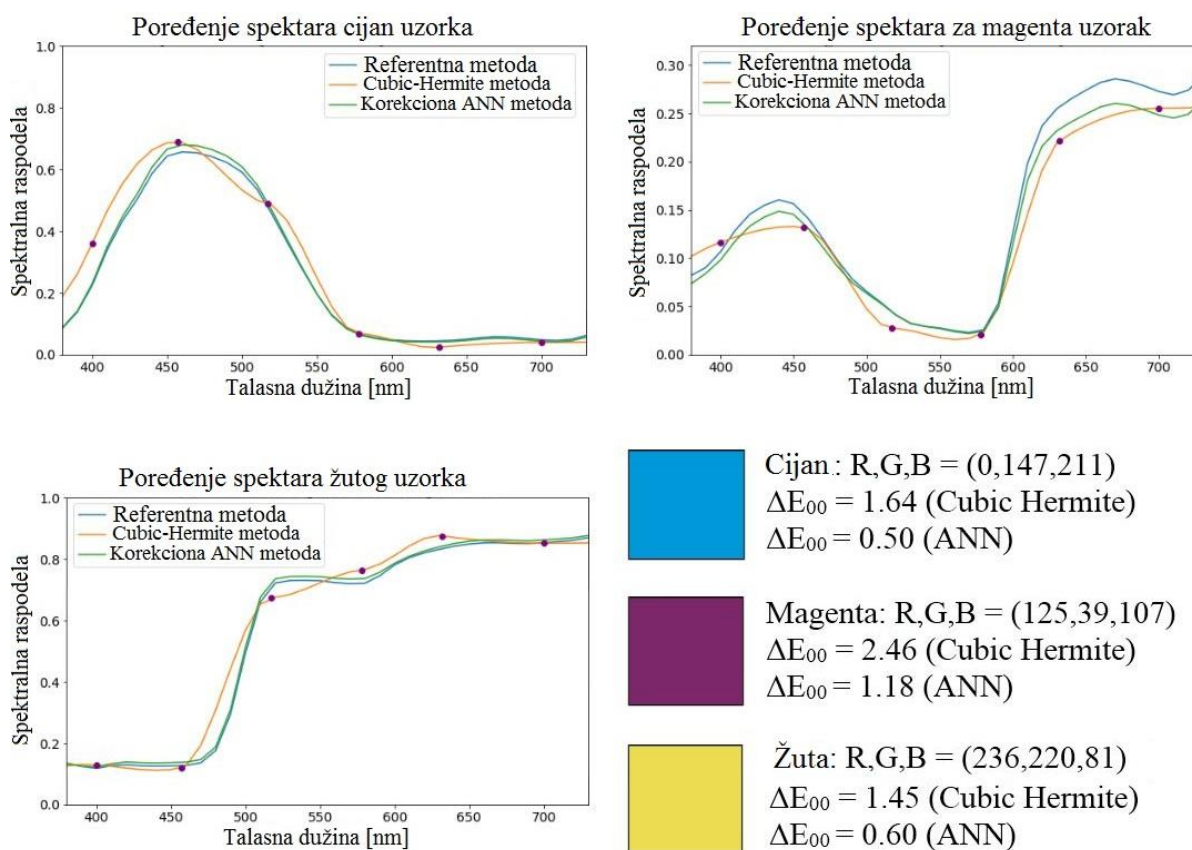
Slika 9-16. Organizacija karte boja na set za treniranje i set za testiranje rezultata

9.3.2.3. TESTIRANJE PREDLOŽENE I KOREKCIONE METODE NA SETU PRIMARNIH I SEKUNDARNIH BOJA

Rekonstruisani spektri selektovanih uzoraka boja, dobijenih referentnom, prethodno predloženom (Cubib-Hermite), kao i korekcionom metodom pomoću mašinskog učenja prikazani su na slikama 9-17 – 9-19. Uzorci su selektovani na taj način da prikažu set primarnih i sekundarnih boja, upoređujući različite segmente kroz čitav vidljivi spektar. Shodno tome, slika 9-17 prikazuje poređenje estimiranih spektara crvene, zelene i plave boje, koje predstavljaju osnovne boje RGB modela boja. Slika 9-18 prikazuje poređenje spektara cijan, magente i žute boje, koje se koriste kao osnovne komponente u CMYK modelu boja u digitalnoj štampi. Poređenje spektara tamnog, sivog i svetlog uzorka, dato je na slici 9-19.

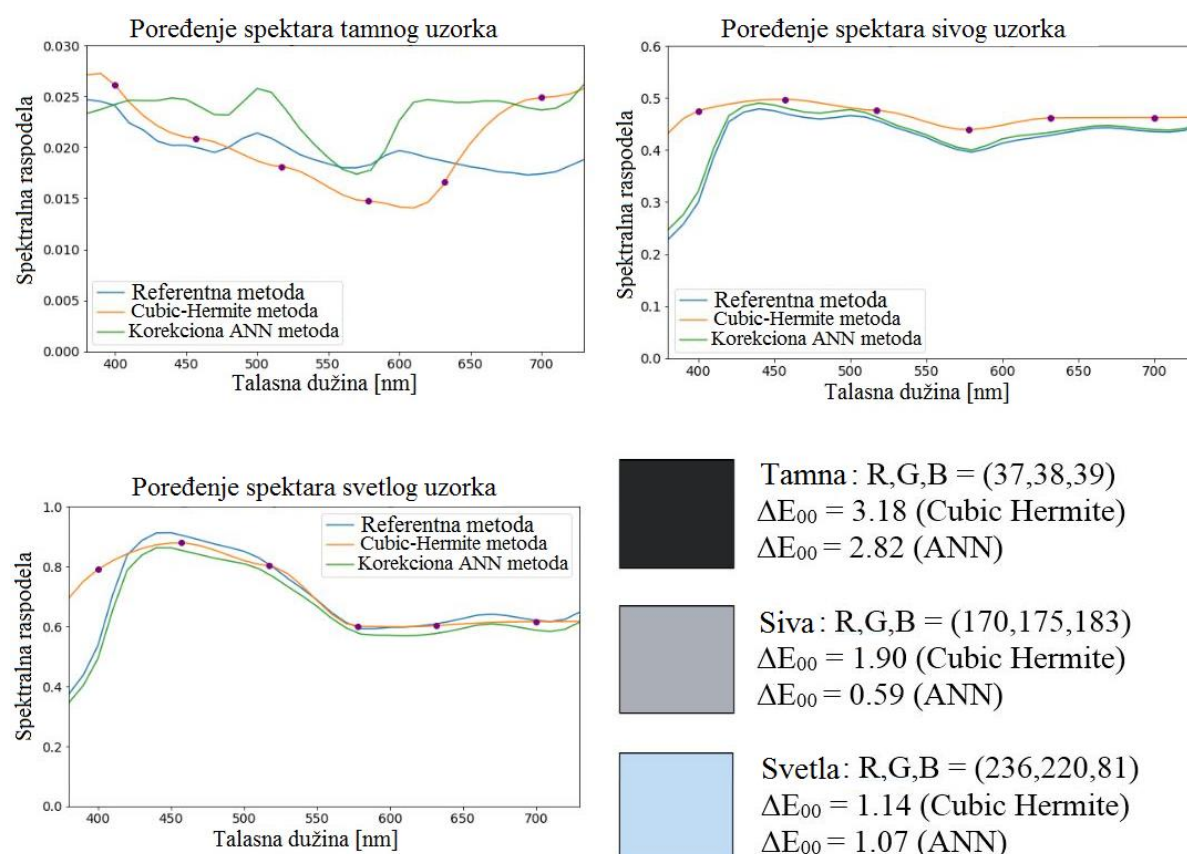


Slika 9-17. Poređenje estimiranih spektara osnovnih boja RGB modela



Slika 9-18. Poređenje estimiranih spektara osnovnih komponenti CMYK modela

Kao što je i ranije ustanovljeno, na talasanim dužinama oko 400 nm mogu se uočiti razlike između referentnih signala i signala dobijenih *Cubic-Hermite Spline* metodom, i one predstavljaju posledicu manje preciznog očitavanja silicijumskog fotodetektora u ovoj oblasti. Sa slike 9-19 može se primetiti da je u okviru prikazanih spektara sivog i svetlog uzorka ovaj nedostatak najizraženiji jer je kod ovakvih uzoraka značajan intenzitet svetlosti reflektovan na početku vidljivog spektra pri 400 nm. Ipak, u okviru svih pomenutih uzoraka može se primetiti da je primenom korekcione (ANN) metode usled treniranja mreže ovaj nedostatak veoma uspešno otklonjen.

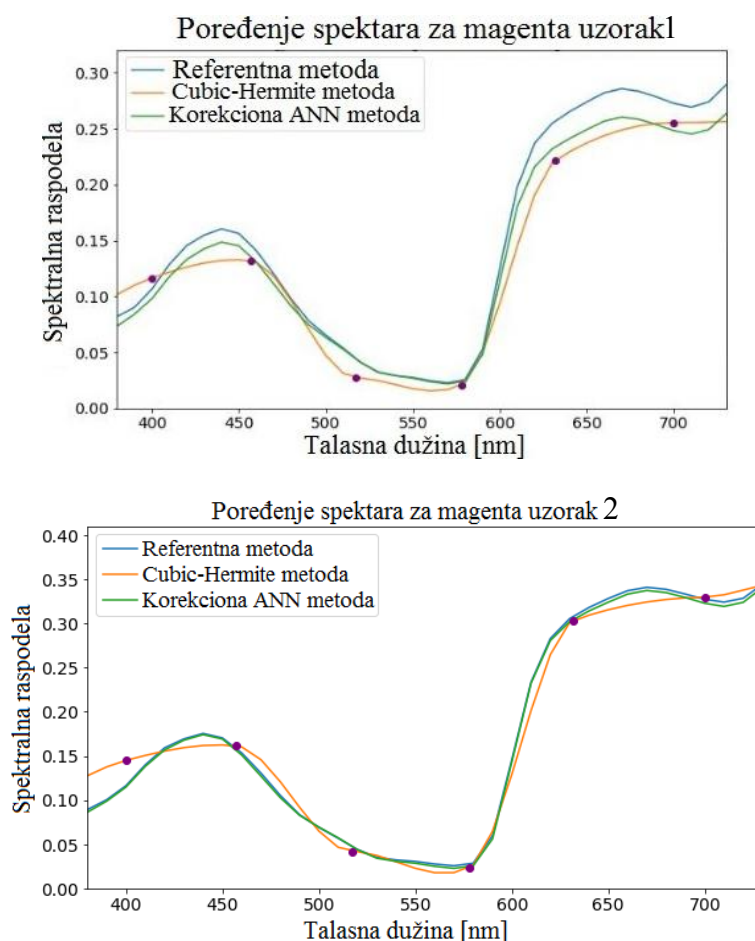


Slika 9-19. Poređenje estimiranih spektara tamnog, sivog i svetlog uzorka

Takođe, u slučaju merenja tamnog uzorka (slika 9-19), gde je reflektovani intenzitet svetlosti nizak, fluktuacije u intenzitetima LED svetlosnih izvora prouzrokuju dodatna odstupanja u predloženoj (*Cubic-Hermite*) metodi. Može se primetiti da i korekciona (ANN) metoda pokazuje najveću mernu nesigurnost u slučaju tamnih uzoraka.

9.3.2.4. UTICAJ LJUDSKOG FAKTORA NA GREŠKU MERENJA

Uzimajući u obzir to da su i referentni spektri, kao i spektri dobijeni predloženom metodom rezultati merenja, moguće je odstupanje (razilaženje krivih) u određenim segmentima, koje je izazvano promenom nagiba merne sonde. Ukoliko se posmatra uzorak magente sa slike 9-18, može se uočiti odstupanje segmenata krivih referentne i predložene metode u opsegu 630 - 730 nm. Može se zaključiti da je najčešći uzrok ovih grešaka izazvan ljudskim faktorom. Na slici 9-20 prikazan je još jedan uzorak magente (uzorak 2), koji u pređenju sa prethodno prikazanim uzorkom magente (uzorak 1) pokazuje manja razilaženja krivih nad opsegom talasnih dužina 630-730 nm, što potvrđuje prethodni zaključak.



Slika 9-20. Dva uzorka magente od kojih prvi pokazuje veće odstupanje izazvano ljudskim faktorom

U tabeli 9-9 data su numerička poređenja sRGB parametara i vizuelni prikaz istih, za oba uzorka magente. Nakon poređenja spektara i vizuelne inspekcije boja predstavljenih u RGB modelu, može se zaključiti da su u pitanju dva uzorka sličnog tona. Veća odstupanja, kako u spektralnim krivama tako i u vizuelnom opažanju nastala usled ljudskog faktora prilikom merenja mogu se primetiti kod uzorka 1.

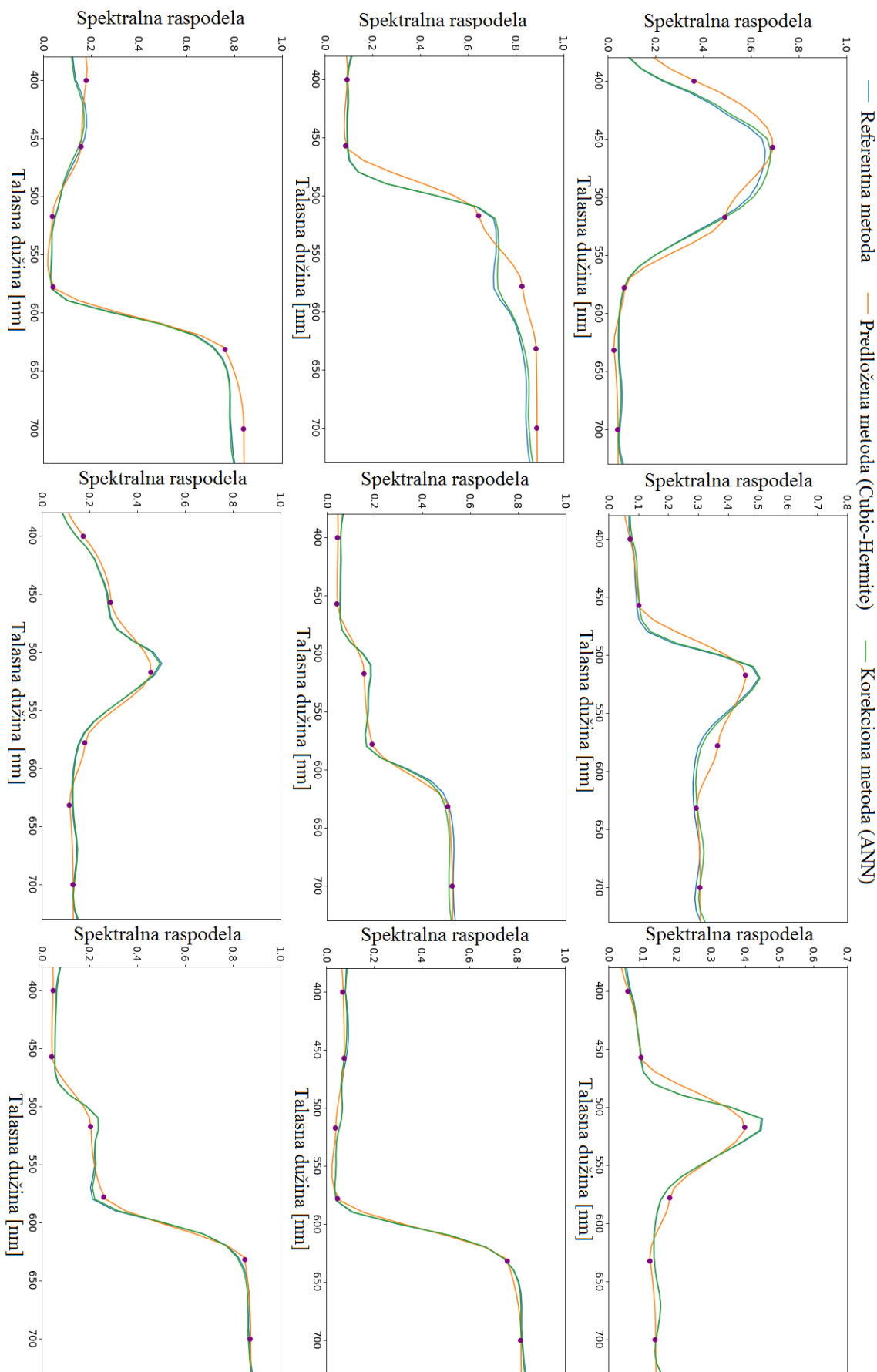
Tabela 9-9. numerička poređenja sRGB parametara i vizuelni prikaz istih za dva slična uzorka magente

	Magenta uzorak 1	Magenta uzorak 2
sRGB (referentna metoda)	125,39,107	136,40,111
sRGB (Cubic-Hermite metoda)	114,29,101	132,36,112
sRGB (korekciona ANN metoda)	120,40,103	135,38,111
ΔE_{00} Cubic-hermite metoda	2.4	1.4
ΔE_{00} korekciona ANN metoda	1.1	0.3

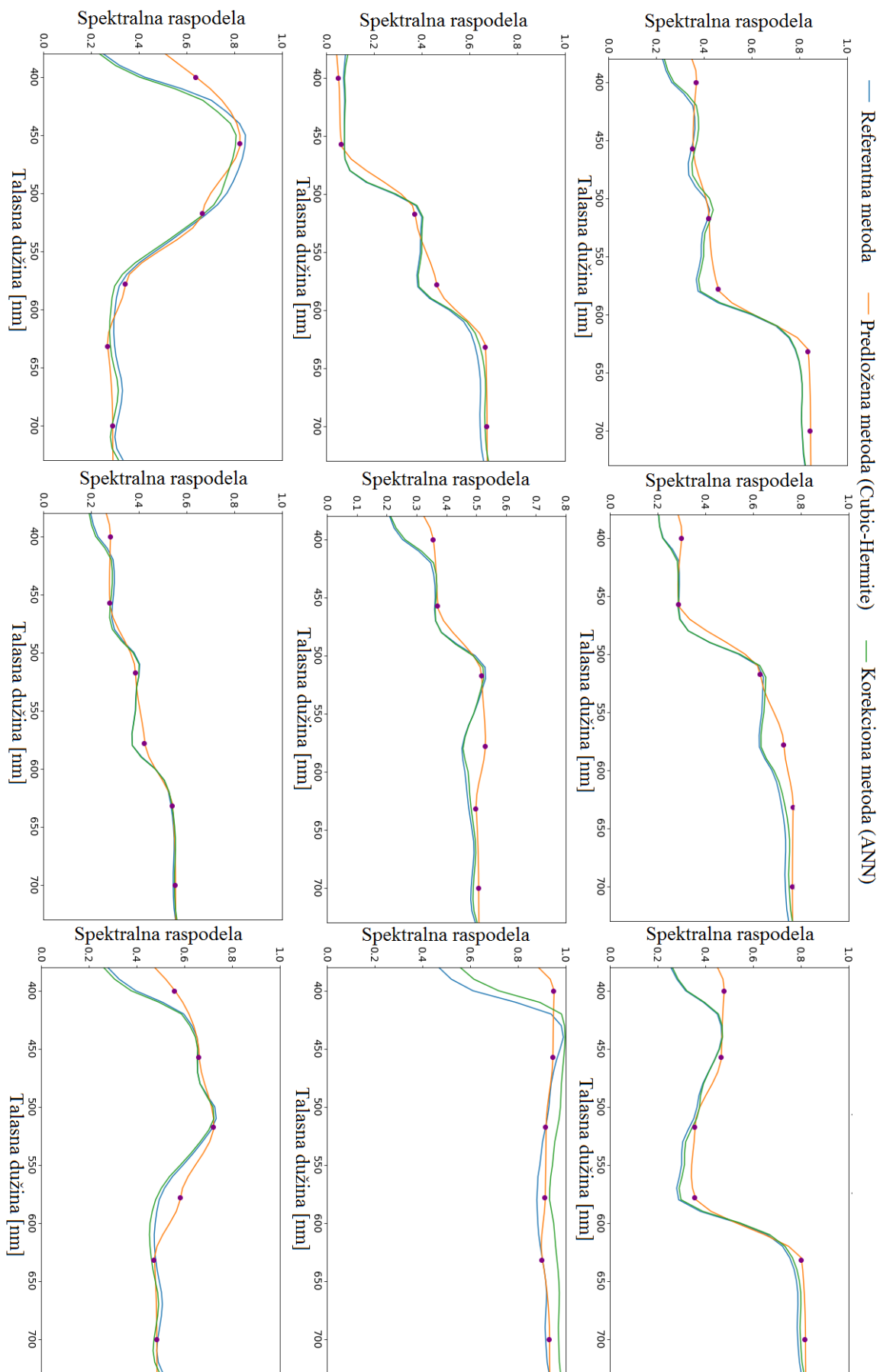
9.3.2.5. TESTIRANJE REZULTATA PREDLOŽENE I KOREKCIONE METODE NA SETOVIMA ZASIĆENIH, SVETLIH I TAMNIH UZORAKA

Na slikama 9-21 – 9-23 prikazano je po devet uporednih spektara snimljenih za uzorke zasićenih, svetlih i tamnih boja. Uporedni prikaz obuhvata referentnu, predloženu interpolacionu, kao i korektivnu metodu na bazi neuronskih mreža. Na primerima zasićenih boja (slika 9-21), mogu se uočiti najbolja poklapanja između merenih spektara referentne i

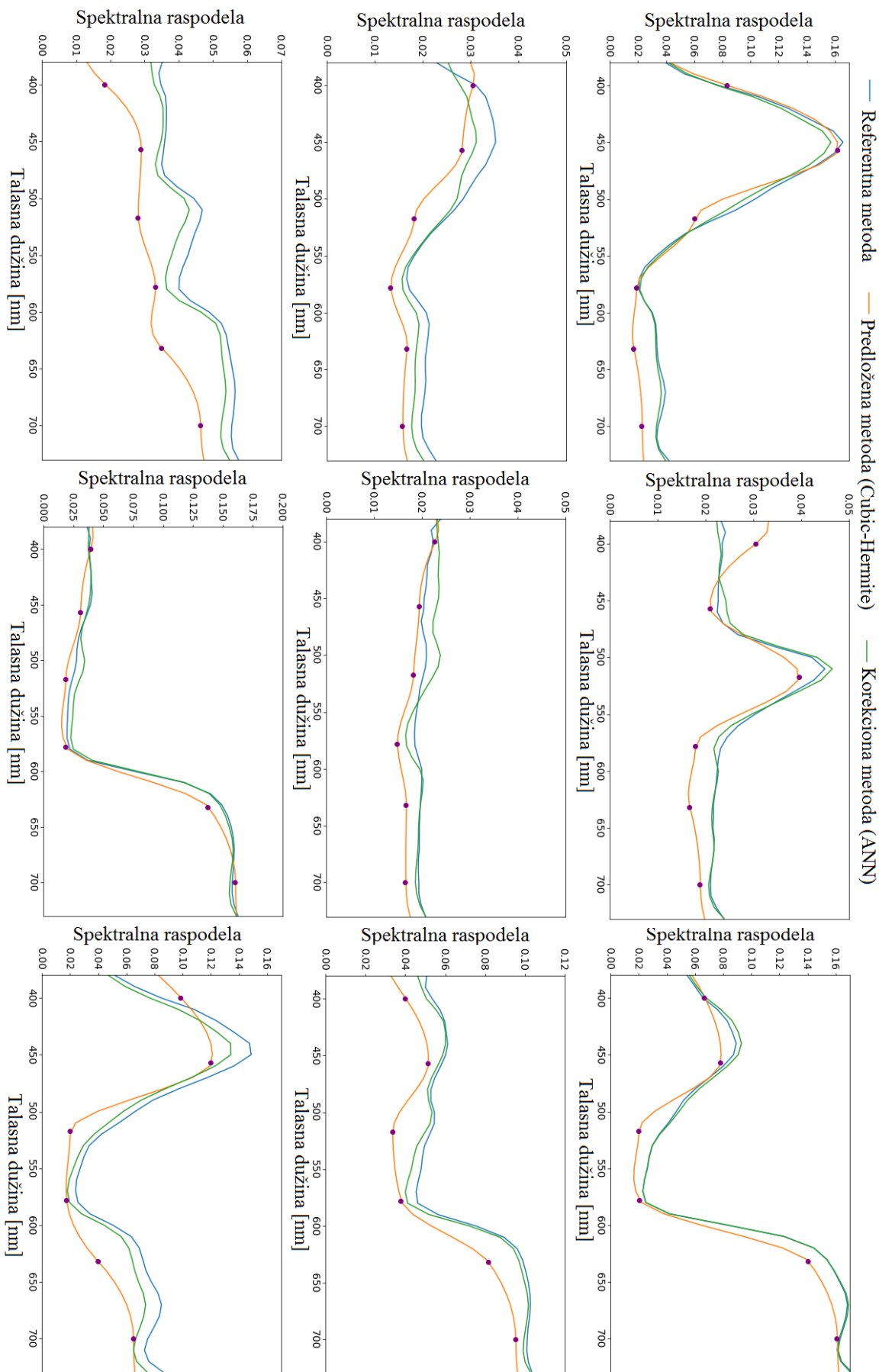
predložene metode, a samim tim će i greška ΔE_{00} imati najmanje vrednosti kod ovih uzoraka. U skladu sa svim prethodnim razmatranjima, u slučaju svetlih uzoraka (slika 9-22) može se zapaziti izraženije odstupanje predložene metode na talasnim dužinama ~ 400 nm. Što je veći reflektovani intenzitet na ovim talasnim dužinama, ovaj efekat će biti izraženiji.



Slika 9-21. Uporedne spektralne krive zasićenih uzoraka



Slika 9-22. Uporedne spektralne krive svetlih uzoraka



Slika 9-23. Uporedne spektralne krive tamnih uzoraka

Na uzorcima tamnih boja, koji su dati na slici 9-23, slično kao i u prethodnim rezultatima, uočavaju se najveća odstupanja između referentne i predložene metode. Prilikom merenja ovakvih uzoraka, amplitude merenih signala su veoma niske (na nivou šuma), i svaka fluktuacija dodatno utiče na rezultat merenja.

U tabeli 9-10 date su pozicije odabranih uzoraka na karti boja u formatu red/kolona, za sve prikazane boje na slikama 9-21 – 9-23, dok su u tabeli 9-11 date sRGB kao i vizuelna poređenja između referentne metode (oznaka A) i predložene Cubic-Hermite metode (oznaka B).

Tabela 9-10. Raspored testiranih sjajnih uzoraka boja prema poziciji na karti boja ECI2002

Boje:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zasićene	11/45	18/23	18/25	18/19	4/21	1/10	10/1	18/16	4/19
Svetle	6/1	10/39	12/40	16/20	26/12	26/37	27/5	32/13	18/3
Tamne	2/9	4/44	10/15	7/40	10/42	20/25	2/26	11/29	28/5

Tabela 9-11. sRGB model boja: vizuelni prikaz i numeričko poređenje referentne metode i Cubic-Hermite metode nad razmatranim sjajnim uzorcima zasićenih, svetlih i tamnih boja

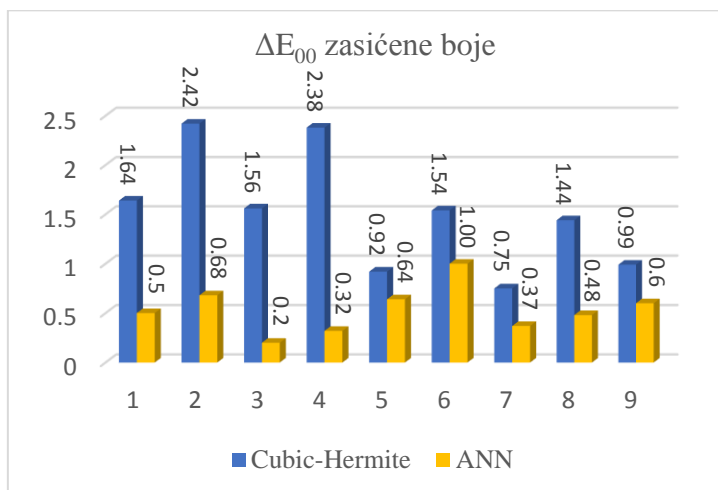
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	30,147,211	130,174,79	53,155,84	235,218,58	178,112,56	199,33,78	201,22,108	21,158,144	219,124,53	
Zasićene	A									
	B									
	47,152,217	143,176,89	64,154,91	247,222,71	177,110,51	201,21,72	205, 5,110	45,160,148	221,125,47	
	219,165,157	219,208,140	213,146,178	202,165,61	178,188,160	241,253,251	110,193,237	188,166,145	168,208,212	
Svetle	A									
	B									
	226,173,159	230,215,143	217,155,181	210,171,60	189,192,163	243,245,249	112,193,235	192,169,142	178,214,212	
	29,60,111	32,52,42	99,41,81	37,39,53	38,38,39	84,61,68	65,59,53	98,34,53	68,46,104	
Tamne	A									
	B									
	2,57,111	24,49,42	94,29,78	31,33,47	33,35,39	76,51,63	53,48,46	92,29,49	50,32,97	

U tabeli 9-12 su date numeričke sRGB vrednosti kao i vizuelna poređenja između referentne metode (oznaka A) i korekcionu ANN metode (oznaka B).

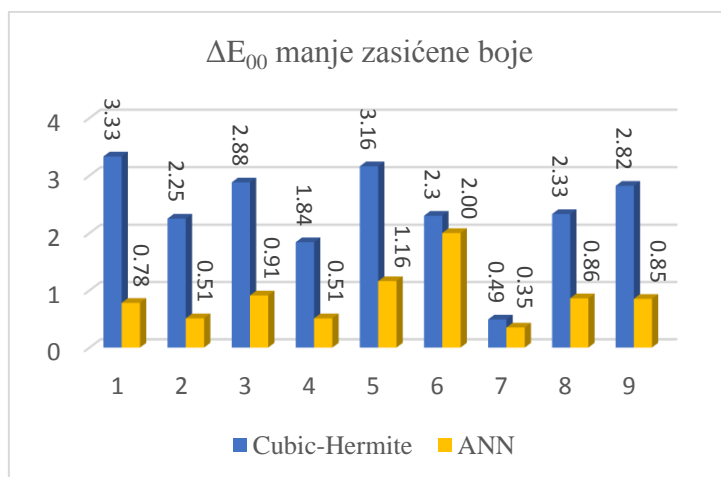
Tabela 9-12. sRGB model boja: vizuelni prikaz i numeričko poređenje referentne metode i korekzione metode nad razmatranim sjajnim uzorcima zasićenih, svetlih i tamnih boja

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zasićene		30,147,211	130,174,79	53,155,84	235,218,58	178,112,56	199,33,78	201,22,108	21,158,144	219,124,53
	A									
	B									
		50,149,214	133,175,83	53,154,85	236,219,60	176,112,58	200,34,75	199,25,108	32,158,143	219,125,51
Svetle		219,165,157	219,208,140	213,146,178	202,165,61	178,188,160	241,253,251	110,193,237	188,166,145	168,208,212
	A									
	B									
		219,168,161	220,210,139	214,148,178	204,167,62	180,187,161	249,249,254	103,190,232	188,166,142	164,206,211
Tamne		29,60,111	32,52,42	99,41,81	37,39,53	38,38,39	84,61,68	65,59,53	98,34,53	68,46,104
	A									
	B									
		30,60,109	31,52,44	99,41,83	34,38,39	36,38,42	83,58,68	62,55,52	98,40,53	64,41,100

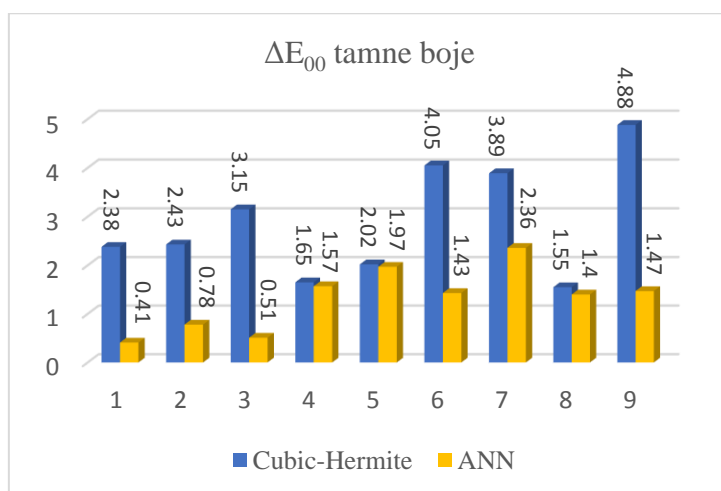
Iz tabele 9-12 se može primetiti da u slučaju zasićenih boja, vizuelnom inspekcijom čak ni najiskusnije oko ne primećuje razliku između vizuelnih sRGB prikaza koji su dobijeni referentnom metodom i sRGB prikaza dobijenih nakon primene korekzione metode. Shodno ovome, na graficima prikazanim na slici 9-24 može se uočiti da su i sva odstupanja ΔE_{00} uzoraka zasićenih boja u osegu $[0, 1]$. Kada je reč o manje zasićenim (svetlim) uzorcima, nakon korekzione metode greška ΔE_{00} ne prelazi vrednost 2 (slika 9-25), što znači da ovde samo najiskusnije oko može da uoči razliku. Kod ispitivanih tamnih uzoraka je korekciona metoda značajno redukovala ΔE_{00} , koje za prikazane uzorke ne prelazi vrednost 2.36, te ovde prosečno ljudsko oko prilikom vizuelne inspekcije može uočiti minimalnu razliku u uzorcima (slika 9-26).



Slika 9-24. Uporedni prikaz odstupanja ΔE_{00} za zasićene uzorke pre i nakon primene korekcijske metode



Slika 9-25. Uporedni prikaz odstupanja ΔE_{00} za svetle uzorke pre i nakon primene korekcijske metode



Slika 9-26. Uporedni prikaz odstupanja ΔE_{00} za tamne uzorke pre i nakon primene korekcijske metode

9.3.2.6. UPOREDNE TABELE Odstupanja od referentne metode pre i nakon korekcijske metode

Tabele 9-13 – 9-15 prikazuju min. ΔE_{00} , maks. ΔE_{00} , prosečne vrednosti ΔE_{00} i standardne devijacije za sve skupove boja (zasićene, tamne, manje zasićene i sive) testiranih na sjajnom papiru. Vrednosti koje se odnose na Cubic-Hermite interpolacionu metodu prikazane su sa leve strane, dok su vrednosti dobijene nakon primene korekcijske metode pomoću mašinskog učenja prikazane sa desne strane pomenutih tabela.

Tabela 9-13. min., maks., prosečne vrednosti ΔE_{00} i standardne devijacije za zasićene boje

#	Cubic-Hermite					Korekcijska metoda				
	ΔE_{00}	Min. ΔE_{00}	Sr. ΔE_{00}	Max. ΔE_{00}	St. Dev.	ΔE_{00}	Min. ΔE_{00}	Sr. ΔE_{00}	Max. ΔE_{00}	St. Dev.
1	1.64	0.75	1.51	2.42	0.59	0.5	0.2	0.53	1.00	0.26
2	2.42					0.68				
3	1.56					0.2				
4	2.38					0.32				
5	0.92					0.64				
6	1.54					1.00				
7	0.75					0.37				
8	1.44					0.48				
9	0.99					0.6				

Iz tabele 9-13 može se zapaziti da je maksimalno odstupanje prikazanih zasićenih uzoraka u slučaju Cubic-Hermite metode $\Delta E_{00} = 2.42$, dok je nakon korekcije pomoću ANN ova vrednost redukovana na $\Delta E_{00} = 1.00$. Ovo dovodi do zaključka da se vizuelnom inspekcijom ne može utvrditi da postoji razlika rezultata u sRGB modelu boja između referentne i predložene korekcijske metode (videti tabelu 9-12).

Tabela 9-14. min., maks., prosečne vrednosti ΔE_{00} i standardne devijacije za manje zasićene (svetle) boje

#	Cubic-Hermite					Korekcijska metoda				
	ΔE_{00}	Min. ΔE_{00}	Sr. ΔE_{00}	Max. ΔE_{00}	St. Dev.	ΔE_{00}	Min. ΔE_{00}	Sr. ΔE_{00}	Max. ΔE_{00}	St. Dev.
1	3.33	0.49	2.37	3.33	0.85	0.78	0.35	0.88	2.00	0.50
2	2.25					0.51				
3	2.88					0.91				
4	1.84					0.51				
5	3.16					1.16				
6	2.3					2.00				
7	0.49					0.35				
8	2.33					0.86				
9	2.82					0.85				

Prilikom poređenja parametra odstupanja ΔE_{00} prikazanih svetlih uzoraka, iz tabele 9-14 se vidi da je pomoću Cubic-Hermite metode dobijena maksimalna vrednost $\Delta E_{00} = 3.33$, a nakon primene korekcijske metode ta vrednost je redukovana na 2.00. Ovo znači da razliku između prikazanih svetlih uzoraka dobijenih referentnom i predloženom korekcionom metodom uočava samo iskusno oko (videti tabelu 9-12).

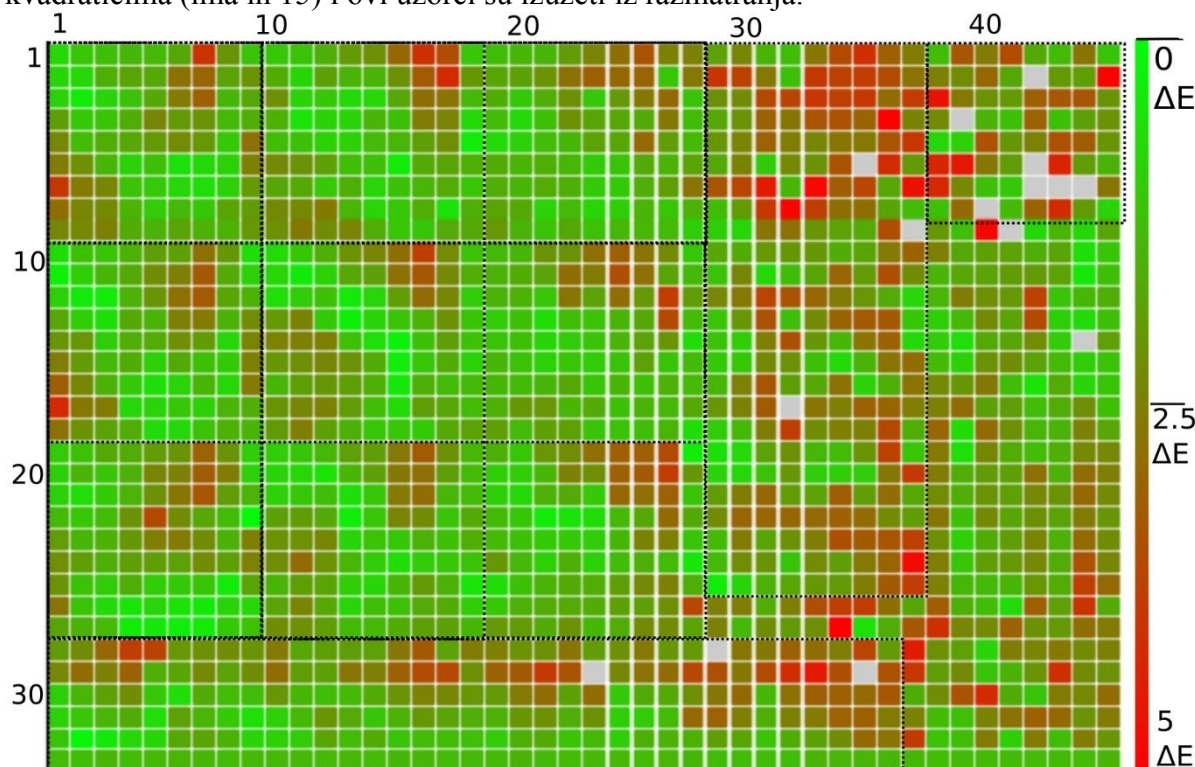
Tabela 9-15. min., maks., prosečne vrednosti ΔE_{00} i standardne devijacije za tamne boje

#	Cubic-Hermite					Korekciona metoda				
	ΔE_{00}	Min. ΔE_{00}	Sr. ΔE_{00}	Max. ΔE_{00}	St. Dev.	ΔE_{00}	Min. ΔE_{00}	Sr. ΔE_{00}	Max. ΔE_{00}	St. Dev.
1	2.38	1.55	2.88	5.0	1.16	0.41	0.41	1.32	2.36	0.65
2	2.43					0.78				
3	3.15					0.51				
4	1.65					1.57				
5	2.02					1.97				
6	4.05					1.43				
7	3.89					2.36				
8	1.55					1.4				
9	4.88					1.47				

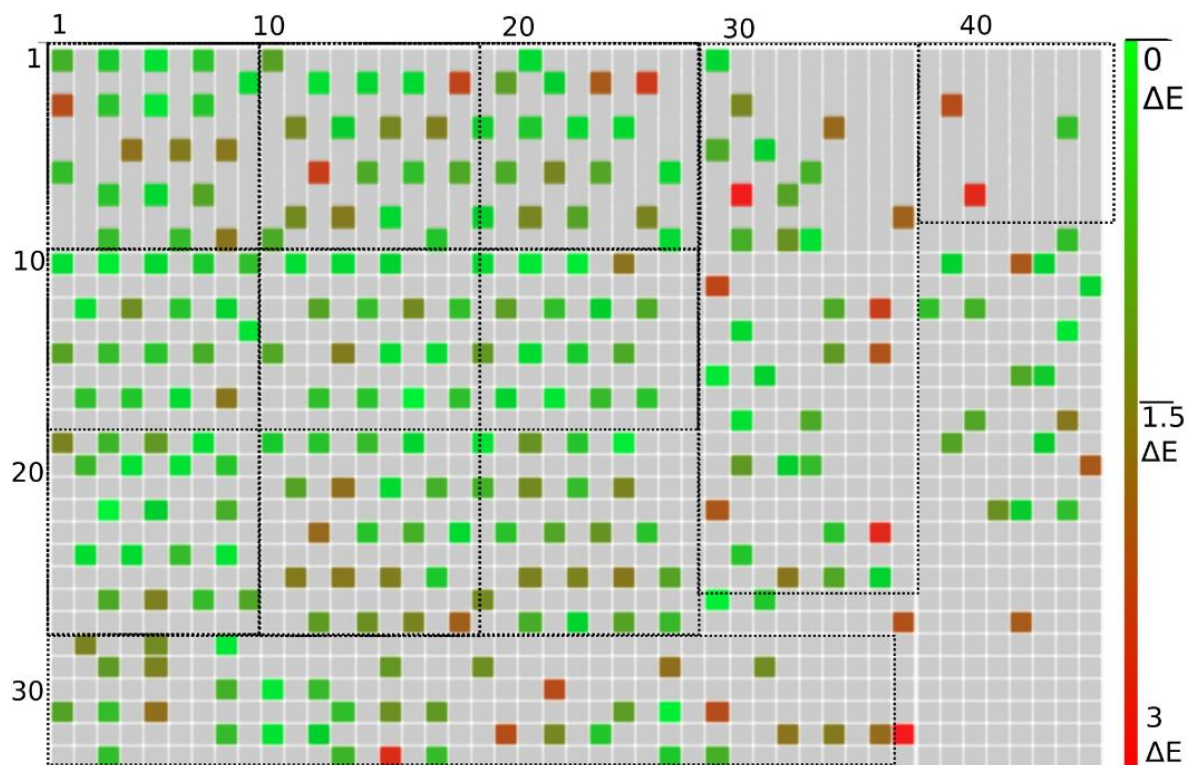
U slučaju tamnih uzoraka, maksimalno odstupanje ΔE_{00} dobijeno Cubic-Hermite metodom ne prelazi vrednost 5, a nakon primene korekcionne metode ova vrednost je redukovana na vrednost 2.36. Ovo znači da će u slučaju tamnih uzoraka prilikom vizuelne inspekcije rezultata u sRGB modelu boja, za prosečno oko ipak biti vidljiva minimalna razlika u nijansi (videti tabelu 9-12).

9.3.2.7. MAPA GREŠKE SVIH UZORAKA KARTI BOJA ECI2002

Na slici 9-27 data je mapa u vidu matričnog prikaza, formata 45x33, koja predstavlja odstupanje ΔE_{00} svih uzoraka na karti boja ECI2002. Mapa je formirana na osnovu rezultata dobijenih pomoću predložene Cubic-Hermite metode koja je razvijena u ovoj disertaciji. Gadijent prikazuje vrednosti ΔE_{00} u opsegu 0-5. Grube greške merenja su označene sivim kvadratićima (ima ih 15) i ovi uzorci su izuzeti iz razmatranja.

Slika 9-27. Mapa greške ΔE_{00} svih uzoraka boja na karti ECI2002

Takođe, korekciona metoda zasnovana na mašinskom učenju se pokazala kao veoma pouzdano rešenje za procenu spektra i njenim implementiranjem merna nesigurnost metode izložene u ovoj disertaciji je dodatno redukovana. Na slici 9-28 prikazana je mapa greške nakon primene korekcionne metode na sve merne uzorke iz seta za testiranje. Skala koja se menja od zelene do crvene boje predstavlja gradaciju greške ΔE_{00} u opsegu 0-3, dok su sivom bojom označeni uzorci koji su se nalazili u setu za treniranje mreže.



Slika 9-28. Mapa greške ΔE_{00} nakon korekcionne metode, za sve uzorke iz seta za testiranje

10. ZAKLJUČAK I DALJI PRAVCI ISTRAŽIVANJA

Motivacija za istraživanja predstavljena u ovoj disertaciji podstaknuta je činjenicom da je sposobnost ljudskog vizuelnog predstavljanja informacija o boji veoma ograničena. Shodno tome, instrumenti igraju neizostavnu ulogu prilikom specificiranja boje. O ovome svedoči veliki broj naučnih radova čija istraživanja imaju za cilj kako unapređenje postojećih komercijalnih rešenja, tako i razvoj novih jednostavnih senzorskih sistema.

Tokom istraživanja u oblasti optoelektronike i senzorskih sistema koji imaju primenu u kolorimetriji, kao rezultat ove disertacije publikovani su sledeći radovi [131] i [132] u međunarodnim časopisima:

- Batinić, Branislav; Bajić, Jovan; Dedijer, Sandra; Kulundžić, Nenad; Joža, Ana; Laković, Nikola; Rajs, Vladimir (2020). Colorimetric fiber-optic sensor based on reflectance spectrum estimation for determining color of printed samples. *Optical and Quantum Electronics*, 52(7), 342–. doi:10.1007/s11082-020-02458-7
- Batinić, Branislav; Arbanas, Miloš; Bajić, Jovan; Dedijer, Sandra; Rajs, Vladimir; Laković, Nikola; Kulundžić, Nenad (2020). Using machine learning for improvement of reflected spectrum estimations of colorimetric probe. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1–1. doi:10.1109/TIM.2020.3011763

kao i rad na međunarodnoj konferenciji [133]:

- Batinić, Branislav, Bajić, Jovan, Rajs, Vladimir, Laković, Nikola, Kulundžić, Nenad, Rodić, Dragan, Joža, Ana: Implementation and signal processing of colorimetric probe. *ZINC*, pp. 58–63 (2019). ISBN 978-1-7281-2901-3.

U petom poglavlju ove disertacije dat je pregled standardnih metoda za određivanje boje, dok šesto poglavlje prikazuje pregled naučnih radova u oblasti kolorimetrijskih rešenja. Uopšteno, postojeće spektrofotometrijske metode koje poseduju visoku pouzdanost i rezoluciju često zahtevaju kompleksne merne postavke sa osetljivim optičkim elementima što znatno utiče na cenu ovakvih uređaja. Pored toga, oni se mogu svrstati u uređaje laboratorijskog tipa, što je veoma nepraktično u većini primena, naročito u industrijskim procesima. Sa druge strane, postojeća komercijalna rešenja koja imaju nisku cenu izrade i visoku robustnost, često su praćena i nedostacima poput niske rezolucije i nedovoljne tačnosti za većinu primena. Ovakva rešenja najčešće nemaju mogućnost snimanja spektra, a rezultate određivanja boje predstavljaju pomoću tristimulusnih vrednosti. Dodatno, većina ovakvih rešenja zahteva filtre u boji, koji treba što bolje da se poklapaju sa CIE funkcijama odziva standardnog posmatrača, te oni predstavljaju glavni uzrok merne nesigurnosti ovakvih metoda. Takođe, klasični kolorimetri moraju imati tačno specificiran standardni izvor svetla prilikom određivanja boje uzorka, a da bi se videlo kako uzorak izgleda pri drugačijim svetlosnim izvorima potrebno je izvršiti hromatsku adaptaciju.

Prednosti senzorskog sistema predloženog u ovoj disertaciji ogledaju se u jednostavnosti konstrukcije, kompaktnom i robustnom dizajnu, niskoj ceni izrade i velikoj brzini odziva usled optimalne pokrivenosti spektra LED izvorima. Takođe, dodatna prednost ovako realizovane refleksione metode je to što se koristi bez standardizovanog izvora svetla, a meri se samo refleksija $r(\lambda)$ na unapred definisanim talasnim dužinama, nakon čega se interpolacijom između merenih vrednosti rekonstruiše spektar. Shodno tome, veoma lako se može proveriti kako uzorak izgleda pod bilo kojim (standardnim) osvetljenjem čiji je spektar snage poznat.

U poglavlju 8 detaljno je izložen senzorski sistem na osnovu kojeg je predložena metoda određivanja boje. Rezolucija A/D konvertora pri merenju intenziteta reflektovanih signala određena je sa 12 bita, dok je pokrivenost spektra LED izvorima ograničena na šest tačaka, između kojih se vrši interpolacija. Ponovljivost uređaja ispitana nad deset uzastopnih merenja

istog uzorka iznosi $\pm 0.27\%$. Standardna devijacija (1σ) dobijena ispitivanjem stabilnosti u trajanju od 1 h iznosi 0.07% nad iskorišćenim opsegom A/D konvertora.

Rezultati testiranja metode na bazi senzorskog sistema izneti su u poglavlju 9. Ovi rezultati su upoređeni sa rezultatima komercijalnog spektrofotometra, i razvrstani su prema sjajnosti ispitivane podloge, kao i prema različitim setovima boja koji su pokazali različita odstupanja izražena greškom ΔE_{00} .

Prvi deo rezultata odnosi se na merenja koja su izvršena na mat papiru uz pomoć prototipa kolorimetrijske sonde, gde je dominantan efekat difuzne refleksije. Drugi deo rezultata odnosi se na merenja koja su izvršena na papiru sa visoko sjajnim premazom gde je implementirana geometrijska postavka $0^\circ/45^\circ$ u svrhu eliminisanja uticaja tačkaste refleksije. Dodatno, rezultati su grupisani nad odgovarajućim setovima zasićenih, svetlih i tamnih uzoraka, kao i nad tonovima sive. Svi rezultati dati u formi spektralnih krivih su upoređeni sa rezultatima dobijenim pomoću komercijalnog spektrofotometra, i izračunata je greška ΔE_{00} . Maksimalna vrednost ove greške je iznosila $\Delta E_{00} = 5$, i to je zabeleženo na tamnim uzorcima. Ovo odstupanje od referentne metode se ogleda u veoma malim reflektovanim intenzitetima usled apsorpcije većeg dela svetlosti na tamnom uzorku, usled čega male fluktuacije intenziteta svetlosti na LED izvorima mogu da utiču na rezultat merenja.

Budući da u digitalnoj štampi, ink jet i elektrofotografiji prema *IDEAlliance* [139] smernicama se smatra da maksimalna razlika u boji za svaku testiranu boju treba da bude jednaka ili niža od $5 \Delta E_{00}$, opisano rešenje je opravdalo polaznu hipotezu i pokazalo se kao primenjivo za oblast digitalne štampe. Dodatno, u okviru 9-og poglavlja dat je predlog korekcionne metode na bazi algoritma mašinskog učenja, pod pretpostavkom da se zabeležena odstupanja mogu dodatno redukovati. Nakon testiranja korekcionne metode, ova pretpostavka je potvrđena, a najveće odstupanje ΔE_{00} zabeleženo za tamne uzorke redukovano ne prelazi vrednost $3 \Delta E_{00}$. Dalja istraživanja na ovu temu mogla bi biti sprovedena u cilju određivanja minimalnog broja spektralnih tačaka neophodnih da bi se postigla tačnost rekonstrukcije spektra. Ovo bi se moglo istražiti na osnovu korišćenja podskupa nad izmerenim setom podataka i implementacijom naprednog algoritma baziranog na mašinskom učenju. Ovo bi dodatno smanjilo kompleksnost senzorskog sistema, ali i povećalo brzinu odziva. Shodno tome, pojednostavljen dizajn bi dodatno smanjio troškove izrade ovakvog uređaja.

Merni koncept predložen u okviru ove disertacije u budućnosti može rezultovati senzorskim sistemom visokih performansi koji obezbeđuje spektrofotometarsku klasu tačnosti.

11. LITERATURA

- [1] Boada, M., Lazaro, A., Villarino, R., Girbau, D.: Battery-less NFC sensor for pH monitoring. *IEEE Access* (2019). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2904109>.
- [2] Oncescu, V., O'Dell, D., Erickson, D.: Smartphone based health accessory for colorimetric detection of bio-markers in sweat and saliva. *R Soc Chem* (2013). <https://doi.org/10.1039/c3lc50431j>.
- [3] Marius, I., Sever, P.: Algorithms of absorbance and colorimeter for measuring blood glucose. In: *The 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. <https://doi.org/10.1109/atee.2019.8724886> (2019).
- [4] Janos Schanda, "Colorimetry, Understanding the CIE System", A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2007.
- [5] Gilchrist, Alison (2017). *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry Colorimetry, Theory.*, doi:10.1016/B978-0-12-803224-4.00124-2.
- [6] Oleari Claudio, "Standard colorimetry: definitions, algorithms and software", Wiley, 2015, ISBN:1118894472
- [7] Rolf G. Kuehni (2003). *Color Space and Its Divisions: Color Order from Antiquity to Present*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-32670-4.
- [8] McDonald, R., *Colour Physics for Industry*, 2nd ed., Society of Dyers and Colourists, West Yorkshire, U.K. (1997).
- [9] Judd, Deane B.; Wyszecki, Günter (1975). *Color in Business, Science and Industry*. Wiley Series in Pure and Applied Optics (third ed.). New York: Wiley-Interscience. p. 388. ISBN 978-0-471-45212-6.
- [10] R.W.G. Hunt, M.R. Pointer, "Measuring Colour", A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2011.
- [11] D. L. MacAdam. Leonardo (1982). *Color Measurement Theme and Variations*. Springer, ISBN 978-3-540-15573-7.
- [12] Wright, W. D. and Pitt, F. H. G., "Hue discrimination in normal color vision," *Proc. Phys. Soc. London* 46, 459–473 (1934).
- [13] Ruddock, K.H. (1972) Light transmission through the ocular media and its significance for psychophysical investigation. In D. Jameson and L.M. Hurvich (eds), *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. VII/4. New York: Springer-Verlag, pp. 455–69.
- [14] Steven K. Shevell (2003): "The Science of Color", OSA, ISBN: 9780444512512.
- [15] Daniel Malacara (2011): *Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications*, <https://doi.org/10.1117/3.881172>.
- [16] White, H. E. and Levatin, P., "Floaters in the eye," *Sci. Am.* 206, 119–127 (1962).
Williams, D. R., "Visibility of interference fringes near the resolution limit," *J. Opt. Soc. Am. A* 2, 1087–1093 (1985).
- [17] Cooper, G.F., Robson, J.G. (1969) The yellow colour of the lens of man and other primates. *J Physiol (Lond)*, 203, 411–17.
- [18] Boettner, E.A. and Wolter, J.R. (1962) Transmission of the ocular media. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1, 776–83.

- [19] Pokorny, Joel; Smith, Vivianne C.; Lutze, Margaret (1987). Aging of the human lens. *Applied Optics*, 26 (8), 1437–40. doi:10.1364/AO.26.001437.
- [20] Young, R. W., “Visual cells,” *Sci. Am.* 223, 80–91 (1970).
- [21] Fairchild M. D. (2005). *Color Appearance Models*, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- [22] Rushton, W. A. H., “Visual pigments in man,” *Sci. Am.* 207, 120–132 (1962).
- [23] Eisner, A. and MacLeod, D. I. A., “Blue sensitive cones do not contribute to luminance,” *J. Opt. Soc. Am.* 70, 121–123 (1980).
- [24] Nathans, J., “The genes for color vision,” *Sci. Am.* 260, 28–35 (1989).
- [25] Nathans, J., Piantanida, T. P., Eddy, R. L., Shows, T. B., and Hogness, S. G., “Molecular genetics of inherited variation in human color vision,” *Science* 232, 203–210 (1986).
- [26] Schnapf, J. L., Kraft, T. W., and Baylor, D. A., “Spectral sensitivity of human cone photoreceptors,” *Nature* 323, 439–441 (1987).
- [27] Mollon, J.D., Color vision, *Ann. Rev. Psychol.*, 33, 41–85 (1982).
- [28] K.N. Plataniotis, A.N. Venetsanopoulos, *Color Image Processing and Applications*, Springer-Verlag, 2000. ISBN: 9783662041864.
- [29] Gonzalez, R., Woods, R.E. (1992): *Digital Image Processing*. Addison Wesley, Reading MA.
- [30] Wyszecki, G., Stiles, W.S. (1982): *Color Science, Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas*. John Wiley, N.Y. ,2nd Edition.
- [31] J. Scanda, “CIE Colorimetry,” in *Colorimetry: Understanding the CIE System*, John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [32] Chi, N. (2018). LED-Based Visible Light Communications. *Signals and Communication Technology*. doi:10.1007/978-3-662-56660-2.
- [33] Zheludev, Nikolay (2007). The life and times of the LED — a 100-year history., 1(4), 189–192. doi:10.1038/nphoton.2007.34.
- [34] Marle, L.; Greenway, G.M. Microfluidic devices for environmental monitoring. *Trends in Analytical Chemistry* 2005, 24, 795-802.
- [35] Trojanowicz, M.; Worsfold, P.J.; Clinch, J.R. Solid-state photometric detectors for flow injection analysis. *Trends in Analytical Chemistry* 1988, 7, 301-305.
- [36] Liu, H.; Dasgupta, P.K.; Zheng, H.J. High performance optical absorbance detectors based on low noise switched integrators. *Talanta* 1993, 40, 1331-1338.
- [37] Dasgupta, P.K.; Bellamy, H.S.; Liu, H.; Lopez, J.L.; Loree, E.L.; Morris, K.; Petersen, K.; Mir, K.A. Light emitting diode-based flow-through optical absorption detectors. *Talanta* 1993, 40, 53-74.
- [38] Taib, M.N.; Narayanaswamy, R. Solid-state Instruments for Optical Fibre Chemical Sensors. *The Analyst* 1995, 120, 1617-1625.
- [39] Dasgupta, P.K.; Eom, I.-Y.; Morris, K.J.; Li, J. Light emitting diode-based detectors: Absorbance, fluorescence and spectroelectrochemical measurements in a planar flow-through cell. *Analytica Chimica Acta* 2003, 500, 337-364.
- [40] Kovac, J.; Peternai, L.; Lengyel, O. Advanced lightemitting diodes structures for optoelectronic applications. *Thin Solid Films* 2003, 433, 22-26.

- [41] Taib, M.N.; Narayanaswamy, R. Solid-state Instruments for Optical Fibre Chemical Sensors. *The Analyst* 1995, 120, 1617-1625.
- [42] Dasgupta, P.K.; Genfa, Z.; Poruthoor, S.K.; Caldwell, S.; Dong, S.; Liu, S.-Y. High-Sensitivity Gas Sensors Based on Gas-Permeable Liquid Core Waveguides and Long-Path Absorbance Detection. *Analytical Chemistry* 1998, 70, 4661-4669.
- [43] Toda, K.; Yoshioka, K.-I.; Ohira, S.-I.; Li, J.; Dasgupta, P.K. Trace Gas Measurement with an Integrated Porous Tube Collector/Long-Path Absorbance Detector. *Analytical Chemistry* 2003, 75, 4050-4056.
- [44] Galanis, S.; Dasgupta, P.K. Measurement of parts per million levels of potassium hydroxide in polyether polyol streams. *Analytica Chimica Acta* 2001, 429, 101-110.
- [45] Samanta, G.; Boring, C.B.; Dasgupta, P.K. Continuous Automated Measurement of Hexavalent Chromium in Airborne Particulate Matter. *Analytical Chemistry* 2001, 73, 2034-2040.
- [46] Jenkins F.A., White H.E., Jenkins F., White H. *Fundamentals of Optics* (MGH Science Engineering Math, 2001), (ISBN 0072561912).
- [47] S.K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade, Surface reflection: Physical and geometrical perspectives, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 13 (1991) 611–634.
- [48] X.D. He, K.E. Torrance, F.X. Sillion, D.P. Greenberg, A comprehensive physical model for light reflection, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 25 (1991) 175–186.
- [49] P. Shirley, B. Smits, H. Hu, E. Lafortune, A practitioners' assessment of light reflection models, *Proceedings The Fifth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*. (1997).
- [50] M. Oren, S.K. Nayar, Generalization of Lambert's Reflectance Model, *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH '94*. (1994) 239–246
- [51] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M.L. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, vol. 1, Addison–Wesley, Redwood, City, Calif., 1989 (Chapter 35–36).
- [52] R.S. Berns, Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, third ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 2000.
- [53] Jan Morović (2008). *Color Gamut Mapping*. John Wiley & Sons Ltd. ISBN 978-0-470-03032-5.
- [54] Rastislav Lukac, Konstantinos N. Plataniotis. *Color Image Processing Methods and Applications*. CRC Press. 2006. ISBN:9780849397745.
- [55] R. Berns. Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, John Wiley & Sons, New York. 2000.
- [56] Wright W. D. (1928) A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours, *Transactions of the Optical Society*, vol. 30, pp. 141–164.
- [57] Guild J. (1931) The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. A230, pp. 149–187.
- [58] C. Wyman, P. Sloan, P. Shirley, Simple Analytic Approximations to the CIE XYZ Color Matching Functions, *Journal of Computer Graphics Techniques*. 2 (2013) 1–11.

- [59] Wyszecki, G., Stiles, W.S. (1982): *Color Science, Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas*. John Wiley, N.Y., 2nd Edition.
- [60] R.S. Berns, Billmeyer and Saltzman's *Principles of Color Technology*, third ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 2000.
- [61] Asim Kumar, Roy Choudhury. *Principles of colour appearance and measurement*. Elsevier 2014. ISBN: 978-0-85709-229-8.
- [62] Bao Chau K. Ly, Ethan B. Dyer, Jessica L. Feig, Anna L. Chien and Sandra Del Bino. *Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry: A Reliable Technique for Objective Skin Color Measurement*. *Journal of Investigative Dermatology*. 2020. DOI: 10.1016/j.jid.2019.11.003.
- [63] H. Mangine, K. Jakes, C. Noel (2005) A Preliminary Comparison of CIEColor Differences to Textile ColorAcceptability Using AverageObservers, *Color Res. Appl.*, 30 (4), pp. 288 - 294 doi: <https://doi.org/10.1002/col.20124>.
- [64] D. R. Pant, I. Farup (2010) Riemannian Formulation of the CIEDE2000 Color Difference Formula, *Proc. IS and T/SID Color Imaging Conference*, pp. 103-108.
- [65] B. Ortiz-Jaramillo, A. Kumcu, W. Philips (2016) Evaluating color difference measures in images, *Proc. 8th Int. Conf. on Qual. Multim. Exp.*, pp.1-6.
- [66] D. R. Pant, I. Farup (2012) Riemannian Formulation and Comparison of Color Difference Formulas, *Color Res. Appl.*, 37 (6), pp. 429-440.
- [67] M. Melgosa (1999) Testing CIELAB based color difference formulas, *Color Res. Appl.*, 25 (1), pp. 49 - 55 doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6378\(200002\)25:1<49::AID-COL7>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6378(200002)25:1<49::AID-COL7>3.0.CO;2-4).
- [68] K. M. R. Ho, G. Cui, M. R. Luo, B. Rigg (2004) Assessing color differences with different magnitudes, *Proc. of the Interim Meeting of the International Color Association*, pp.117-120.
- [69] M. Vik (2004) Industrial color difference evaluation: LCAM textile data, *Proc. of the Interim Meeting of the International Color Association*, pp.138-142.
- [70] Gulrajani, M. L. (2010) *Color measurement principles, advances and industrial applications*, Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute Abington Hall, Granta Park, Great Abington Cambridge CB21 6AH, UK, ISBN: 978-1845695590.
- [71] W. Collins, A. Hass, K. Jeffery, A. Martin, R. Medeiros, S. Tomljanovic (2010) *Graphic Design and Print Production Fundamentals*, BCCAMPUS VICTORIA, B.C., CANADA, Ebook ISBN: 978-1-989623-67-1.
- [72] Gaurav Sharma; Wencheng Wu; Edul N. Dalal (2005). The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *30(1)*, 21–30. doi:10.1002/col.20070.
- [73] Erb, W., Krystek, M., and Budde, W., A method for improving the accuracy of tristimulus colorimeters. *Color Res. Appl.*, 9, 84–88 (1984).
- [74] Hunt, R.W.G., The importance of being not too earnest, *IS&T and SID's 11th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, and Applications*, pp. 6-10, IS&T, Springfield, VA, USA (2003).
- [75] Wharmby, D.O., Improvements in the use of filter colorimeters, *J. Phys. E: Scientific Instrum.*, 8, 41–43 (1975).

- [76] George Eppeldauer. Spectral Response Based Calibration Method of Tristimulus Colorimeters. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. Volume 103, Number 6, November–December 1998.
- [77] Gavrilov AS, Zalukina IV, Koneva LA, Bakharev VP, Petrov AYu (2003) Rapid evaluation of tablet color. *Pharm Chem J* 37: 273–276.
- [78] Gavrilov AS, Gusel'nikova EV, Petrov AYu (2005) Optimization of the composition and wet granulation technology of drotaverine hydrochloride tablets. *Pharm Chem J* 39: 274–277.
- [79] J. Subert, J. Cizmarik (2008). Application of instrumental colour measurement in development and quality control of drugs and pharmaceutical excipients. *Pharmazie* 63: 331–336. DOI:10.1691/ph.2008.7395.
- [80] Jun Qiao; Akira Sasao; Sakae Shibusawa; Naoshi Kondo; Eiji Morimoto (2005). Mapping Yield and Quality using the Mobile Fruit Grading Robot., 90(2), 135–142. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.10.002.
- [81] R. Furferi (2011). Colour Classification Method for Recycled Melange Fabrics. *Journal of Applied Sciences* 11(2). DOI: 10.3923/jas.2011.236.246.
- [82] Wu, Yifeng; Eschbach, Reiner; Marcu, Gabriel G.; Tominaga, Shoji (2008). SPIE Proceedings [SPIE Electronic Imaging 2008 - San Jose, CA] Color Imaging XIII: Processing, Hardcopy, and Applications - Convert a low-cost sensor to a colorimeter using an improved regression method., 6807(), 68070S–. doi:10.1117/12.764936.
- [83] E. Diemann, An inexpensive pocket reflectometer for semi-quantitative spot test analyses, *J. Chem. Educ.* 66 (1989) 595–596, DOI: 10.1021/ed066p595.
- [84] A.V. Rossi, X. He, M. Tubino, A simple, portable and low-cost device for a colorimetric spot test quantitative analysis, *Ann. Lett.* 33 (2000) 1885–1898, doi:10.1080/00032710008543165.
- [85] Francisco A.A. Matias; Marta M.D.C. Vila; Matthieu Tubino (2003). A simple device for quantitative colorimetric diffuse reflectance measurements., 88(1), 60–66. doi:10.1016/s0925-4005(02)00309-x.
- [86] Shih-Mim Liu (2004). The development of a portable spectrophotometer for noncontact color measurement., 53(1), 155–162. doi:10.1109/tim.2003.822009.
- [87] Kohns, P., Muravski, A.A., Machekhin, Y., Kankia, R., Svirid, V., Per Rudquist, G.: Lester: High-precision low-cost colorimeters and spectrophotometers based on liquid crystalline optics. In: *Proceedings of SPIE*, vol. 5565, pp. 332–337 (2004).
- [88] P. Boher, T. Leroux, V. Collomb Patton & T. Bignon (2012) Color accuracy of imaging using color filters, *Journal of Information Display*, 13:1, 7-16, DOI: 10.1080/15980316.2012.652204.
- [89] Lau, K.T.; Baldwin, S.; Shepherd, R.L.; Dietz, P.H.; Yezunis, W.S.; Diamond, D. Novel fused-LEDs devices as optical sensors for colorimetric analysis. *Talanta* 2004, 63, 167-173.
- [90] Mims III, F.M. Sun photometer with light emitting diode as spectrally selective detectors. *Applied Optics* 1992, 31, 6965-6967.

- [91] Berry, R.J.; Harris, J.E.; Williams, R.R. Light-Emitting Diodes as Sensors for Colorimetric Analyses. *Applied Spectroscopy* 1997, 51, 1521-1524.
- [92] Bhattacharyya, S., Mukherjee, S.S., Dutta, P., Chakraborty, S.: Low cost intelligent colorimeter using color LEDs. Patent: 886/KOL/2015 (2015).
- [93] Yuan, K., Yan, H., Jin, S.: Integral colorimeter based on compound LED illumination. *Chin Opt Lett* 12(2), 023302 (2014). <https://doi.org/10.13788/COL201412.023302>.
- [94] Tromberg, Bruce J.; Shah, Natasha; Lanning, Ryan; Cerussi, Albert; Espinoza, Jennifer; Pham, Tuan; Svaasand, Lars; Butler, John (2000). Non-Invasive In Vivo Characterization of Breast Tumors Using Photon Migration Spectroscopy. *Neoplasia*, 2(1-2), 26–40. doi:10.1038/sj.neo.7900082.
- [95] El-Hageen, Hazem M. M. (2020). A New Technique for Improving the Estimation of a Reflective Optical Color Sensor. *Sensing and Imaging*, 21(1), 12–. doi:10.1007/s11220-020-0276-5.
- [96] Mihai, D. and Străjescu, E. (2007). From wave length to R G B filter. University “Politehnica” of Bucharest Scientific Bulletin, Series D, 69(2), 77–84.
- [97] Ho, D., Gulak, G., & Genov, R. (2011). CMOS field-modulated color sensor, In IEEE custom integrated circuits conference (pp. 1–4).
- [98] Jiang, Y., & Deng, Y. (2011). Design of multipoint color measuring device based on TCS3200. *Instrumentation Technology*, 03, 54–57.
- [99] Liu, J., Yao, L., & Zhang, L. (2010). A solution color detection method based on TCS3200 sensor. *Journal of Nanjing University*, 46, 100–103.
- [100] Heo, G., Manivannan, R., Myeong, H. K., Kyeong, J. K., Min, S., & Son, Y.-A. (2019). Developing an RGB—Arduino device for the multi-color recognition, detection and determination of Fe(III), Co(II), Hg(II) and Sn(II) in aqueous media by a terpyridine moiety. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 297, 126723.
- [101] Jeeva, B., Babu, J. R. S., & Chitra, M. (2012). Study of inter -integrated circuit color sensor with microcontroller. 2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM). doi:10.1109/iceteem.2012.6494433.
- [102] M. R. Antognazza; U. Scherf; P. Monti; G. Lanzani (2007). Organic-based tristimuli colorimeter. *Applied Physics Letters*. doi:10.1063/1.2723653.
- [103] Liu, H.; Dasgupta, P.K.; Zheng, H.J. High performance optical absorbance detectors based on low noise switched integrators. *Talanta* 1993, 40, 1331-1338.
- [104] Dasgupta, P.K.; Bellamy, H.S.; Liu, H.; Lopez, J.L.; Loree, E.L.; Morris, K.; Petersen, K.; Mir, K.A. Light emitting diode-based flow-through optical absorption detectors. *Talanta* 1993, 40, 53-74.
- [105] Clinch, J.R.; Worsfold, P.J.; Casey, H. An automated spectrophotometric field monitor for water quality parameters: Determination of nitrate. *Analytica Chimica Acta* 1987, 200, 523-531.
- [106] Hauser, P.C.; Chiang, D.W.L. A photometric detector based on a blue light-emitting diode. *Talanta* 1993, 40, 1193-1200.
- [107] Yamada, A.; Sakuraba, M.; Murota, J. Integration of Si p-i-n diodes for light emitter and detector with optical waveguides. *Materials Science in Semiconductor Processing* 2005, 8, 435-438.

- [108] Fonseca, A.; Raimundo, J.; Ivo M. A multichannel photometer based on an array of light emitting diodes for use in multivariate calibration. *Analytica Chimica Acta* 2004, 522, 223-229.
- [109] Yang, Pao-Keng (2012). Noniterative algorithm for improving the accuracy of a multicolor-light-emitting-diode-based colorimeter. *Review of Scientific Instruments*, 83(5), 053115-. doi:10.1063/1.4723826.
- [110] Wego, Ansgar (2013). Accuracy simulation of an LED based spectrophotometer. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 124(7), 644-649. doi:10.1016/j.ijleo.2012.01.005.
- [111] *ColorChecker karta boja sa 24 test uzorka*: <https://www.babelcolor.com/colorchecker.htm>, pristup sajtu: 1.10.2021
- [112] P.K. Yang; J.C. Chen; Y.H. Chuang (2007). Improvement on reflective color measurement using a tri-color LED by multi-point calibration. , 272(2), 320-324. doi:10.1016/j.optcom.2006.11.051.
- [113] Parmar, M., & Reeves, S. J. (2010). Selection of optimal spectral sensitivity functions for color filter arrays. *IEEE Transactions on Image Processing*, 19, 3190-3203
- [114] C. L. Cromer, G. Eppeldauer, J. E. Hardis, T. C. Larason, and A. C. Parr, National Institute of Standards and Technology Detec-tor-based Photometric Scale, *Appl. Opt.* 32(16), 2936-2948 (1993).
- [115] Thomas Stieglitz; Hansjörg Beutel; Martin Schuettler; J.-Uwe Meyer (2000). Micromachined, Polyimide-Based Devices for Flexible Neural Interfaces. , 2(4), 283-294. doi:10.1023/a:1009955222114.
- [116] Berns, R.S. Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, 3rd ed.; Wiley: New York, 2000.
- [117] Ohta, N.; Robertson, A.R. *Colorimetry*, Wiley: England, 2005.
- [118] Clifford R. Pollock, *Fundamentals of optoelectronics*, Chicago: Irwin, 1995.
- [119] *Industrial Fiber Optics*, web adresa: <https://i-fiberoptics.com/fiber-detail.php?id=69>, pristup sajtu: Decembar 2021.
- [120] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, and W. Daum, "Optical Measuring Methods," in *POF Handbook*, Springer-Verlag, 2008.
- [121] K. Murray (1995): Color measurement of LEDs (diode emitters) with tristimulus colorimeter. *The International Society for Optical Engineering*, <https://doi.org/10.1117/12.221414>.
- [122] M. Popović, *Osnovi elektronike*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2006.
- [123] Wen, Jing; Wen, Yumei; Li, Ping; Li, Lian (2011). Current-voltage characteristics of light-emitting diodes under optical and electrical excitation. *Journal of Semiconductors*, 32(8), 084004-. doi:10.1088/1674-4926/32/8/084004.
- [124] Yao Wang, *Frequency Domain Characterization of Signals*, Polytechnic University, Brooklyn, New York, 2006, <http://eeweb.poly.edu/~yao>.
- [125] Ž. Banković, M. Erić, M. Radosavljević, M. Savić, N. Savić. *Fir Filtar*, http://es.elfak.ni.ac.rs/Papers/ZBankovic-MEric-MRadosavljevic-MSavic-NSavic%20-%20DSP_FIR.pdf.
- [126] Greg Welch, Gary Bishop, *An Introduction to the Kalman Filter*, University of North Carolina at Chapel Hill Department of Computer Science, 2001.
- [127] M. S. Grewal, A.P. Andrews, *Kalman Filtering - Theory and Practice Using MATLAB*, Wiley, 2001.

- [128] R. Hui and M. S. O'Sullivan, "Optical Fiber Measurement," in *Fiber Optic Measurement Techniques*, Elsevier Academic Press, 2009.
- [129] J. Fraden, *Modern Sensors Handbook*, Springer, 2010.
- [130] D.S. Nyce, *Linear Position Sensors: Theory and Application*, John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [131] Batinić, Branislav; Bajić, Jovan; Dedijer, Sandra; Kulundžić, Nenad; Joža, Ana; Laković, Nikola; Rajs, Vladimir (2020). Colorimetric fiber-optic sensor based on reflectance spectrum estimation for determining color of printed samples. *Optical and Quantum Electronics*, 52(7), 342–. doi:10.1007/s11082-020-02458-7.
- [132] Batinić, Branislav; Arbanas, Miloš; Bajić, Jovan; Dedijer, Sandra; Rajs, Vladimir; Laković, Nikola; Kulundžić, Nenad (2020). Using machine learning for improvement of reflected spectrum estimations of colorimetric probe. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1–1. doi:10.1109/TIM.2020.3011763.
- [133] Batinić, Branislav, Bajić, Jovan, Rajs, Vladimir, Laković, Nikola, Kulundžić, Nenad, Rodić, Dragan, Joža, Ana: Implementation and signal processing of colorimetric probe. *ZINC*, pp. 58–63 (2019). ISBN 978-1-7281-2901-3.
- [134] Kahaner, David, Cleve Moler, Stephen Nash. *Numerical Methods and Software*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1988.
- [135] Jovan Bajić: *Metoda merenja ugaonog položaja na bazi nove klase optoelektronskih senzora*, (doktorska disertacija), Fakultet tehničkih nauka, 2015.
- [136] A. Suhadolnik, A. Babnik, J. Možina, Optical fiber reflection refractometer, *Sensors and Actuators B: Chemical*. 29 (1995) 428–432.
- [137] P. Buchade, A. Shaligram, Simulation and experimental studies of inclined two fiber displacement sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*. 128 (2006) 312–316.
- [138] ISO standard 12647-2:2013.
- [139] IDEAlliance (2011) IDEAlliance Digital Press Certification Program Version 2.2.
- [140] CIE (2014) CIE TN 001:2014:CIE technical note.
- [141] Patrick Rood "Practical instrumentation for graphic arts color measurement", *Proc. SPIE 2171, Color Hard Copy and Graphic Arts III*, (9 May 1994); <https://doi.org/10.1117/12.175307>.
- [142] Pedersen, Marius. *Image quality metrics for the evaluation of printing workflows*. Doktoravhandling, University of Oslo, 2011, <http://hdl.handle.net/10852/9035>.

BIOGRAFIJA

Branislav Batinić rođen je 19. juna 1990. godine u Novom Sadu, u Republici Srbiji. Srednju tehničku školu u Rumi, smer Elektrotehničar računara, završio je 2009. godine, i iste godine upisao Fakultet tehničkih nauka na Univerzitetu u Novom Sadu. Osnovne akademske studije na odseku Energetika, elektronika i telekomunikacije, usmerenje Primenjena elektronika završio je 2013. godine, završnim bečelov radom na temu „Realizacija Web servera pomoću mikrokontrolera Atmega16 i Ethernet kontrolera ENC28J60”. Master studije završio je na istom odseku 2014. godine završnim master radom na temu „Realizacija merenja na fotonaponskoj elektrani“. Doktorske studije na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu upisao je školske 2014/15. godine.

Od decembra 2014. do novembra 2017. godine bio je zaposlen kao istraživač pripravnik na Katedri za elektroniku, Fakulteta tehničkih nauka i angažovan na dva projekta Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije. Od novembra 2017. do novembra 2020. godine bio je u zvanju istraživača saradnika, a u zvanje asistenta je izabran 2020. godine na Katedri za elektroniku. Učestvovao je u pripremi i izvođenju nastave na predmetima: Praktična elektronika, Projektovanje elektronskih kola pomoću računara, Digitalna upravljačka elektronika, Optoelektronski i laserski sistemi, Optoelektronika, M2M (Machine-to-Machine) elektronski sistemi, Mikroročunarska elektronika, Sistemi za dojavu, detekciju i upozorenja. Oblasti interesovanja su mu digitalna elektronika, analogna elektronika, optoelektronski senzorski sistemi, mikrokontroleri. Autor i koautor je brojnih radova objavljenih na domaćim i međunarodnim konferencijama, kao i u međunarodnim časopisima.

Predmete predviđene planom i programom doktorskih studija položio je prosečnom ocenom 10, a dana 28.12.2017 senat univerziteta u Novom Sadu mu je odobrio temu doktorske disertacije pod nazivom „Razvoj refleksione optoelektronske metode za određivanje kolorimetrijskih vrednosti boje štampanih uzoraka“.

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Развој рефлексионе оптоелектронске методе за одређивање колориметријских вредности боје штампаних узорака
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду.
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Енергетика, електроника и телекомуникације
1. Опис података
<p>1.1 Врста студије</p> <p><i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i></p> <hr/> <p>У овој студији нису прикупљани подаци.</p> <hr/> <hr/>
<p>1.2 Врсте података</p> <p>а) квантитативни</p> <p>б) квалитативни</p>
<p>1.3. Начин прикупљања података</p> <p>а) анкете, упитници, тестови</p>

б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи

в) генотипови: навести врсту _____

г) административни подаци: навести врсту _____

д) узорци ткива: навести врсту _____

ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____

е) текст, навести врсту _____

ж) мапа, навести врсту _____

з) остало: описати _____

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

а) Excel фајл, датотека _____

б) SPSS фајл, датотека _____

в) PDF фајл, датотека _____

г) Текст фајл, датотека _____

д) JPG фајл, датотека _____

е) Остало, датотека _____

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

а) број варијабли _____

б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) _____

1.3.3. Поновљена мерења

а) да

б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) временски размак између поновљених мера је _____

б) варијабле које се више пута мере односе се на _____

в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

a) Да

б) Не

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

a) експеримент, навести тип _____

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип _____

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

a) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да Не

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

a) Колики је број недостајућих података? _____

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у _____ репозиторијум.

3.1.2. URL адреса _____

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

а) Да

б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____

в) Не

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да Не

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

- а) јавно доступни
- б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области
- ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима
