

# Prostor boja

---

**Komugović, Ana**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:263927>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-15**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAFIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

Ana Komugović



Sveučilište u Zagrebu  
Grafički fakultet

Smjer: tehničko-tehnološki

# ZAVRŠNI RAD

## PROSTOR BOJA

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Nina Knešaurek

Student:  
Ana Komugović

Zagreb, 2015

## **SAŽETAK**

Cilj ovog završnog rada je proučiti prostore boja. Proučavaju se počeci objektivnog definiranja boja te njihov smještaj u određeni prostor boja. Razmatraju se osnovni CIE standardi i CIE prostori boja. Proučava se evolucija CIE prostora boja u dvadesetom stoljeću prema uniformnim prostorima boja. Proučavaju se RGB i CMYK prostori boja.

Proučavaju se transformacije vrijednosti jednog prostora boja u drugi pomoću matematičkih jednadžbi. Razmatraju se prednosti i nedostaci pojedinog prostora boja. Proučava se način određivanja ukupne razlike između boja unutar određenog prostora.

Razmatra se uloga prostora boja unutar sustava za upravljanje bojom.

Ključne riječi: CIE standardni promatrač, CIEXYZ prostor boja, CIELAB prostor boja, RGB prostor boja, CMYK prostor boja

## **ABSTRACT**

The goal of this baccalaureus work is to study color spaces. This work researches the beginnings of objective color definitions and their positioning in specific color spaces. It also considers the main CIE standards, CIE color spaces and studies their 20th century evolution towards uniform color spaces. It studies CMYK and some of RGB color spaces. Transformations from one color space to another by means of mathematical equations are examined. The work considers advantages and shortcomings of different color spaces. Ways of determining difference between colors are studied.

Role of color spaces in color management systems is considered.

Key words: CIE standard observer, CIEXYZ color space, CIELAB color space, RGB color space, CMYK color space



## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. OSNOVNI CIE STANDARDI</b> .....	2
2.1 CIE međunarodna komisija za rasvjetu.....	2
2.2 CIE standardni promatrač.....	3
2.3 CIE standardni <i>illuminati</i> .....	7
<b>3. CIE PROSTORI BOJA</b> .....	8
3.1 CIE XYZ prostor boja.....	8
3.1.1. Određivanje XYZ tristimulusnih vrijednosti.....	8
3.2 CIE 1931 dijagram kromatičnosti.....	9
3.2.1 Dominantna valna duljina i čistoća pobude.....	12
3.2.2 Nedostaci CIE dijagrama kromatičnosti.....	13
3.3. CIE 1960 UCS dijagram i CIE U*V*W* 1964 prostor boja.....	14
3.3.1. Razlika boja u CIE UVW prostoru boja.....	15
3.4. CIE 1976 L*a*b* prostor boja.....	16
3.4.1. Transformacija XYZ tristimulusnih vrijednosti u L*a*b* vrijednosti.....	18
3.4.2. CIE Lch model boja.....	19
3.4.3. Razlika boja u CIE LAB prostoru boja.....	20
3.5. CIE 1976 L*u*v* prostor boja.....	21
3.5.1. Transformacija XYZ tristimulusnih vrijednosti u L*u*v* vrijednosti.....	21
<b>4. RGB PROSTORI BOJA</b> .....	23
4.1. Aditivna sinteza.....	23
4.2. RGB model.....	24
4.3. Vrste RGB prostora boja.....	25
4.4. sRGB prostor boja.....	26
4.4.1. Transformacija XYZ tristimulusnih vrijednosti u sRGB vrijednosti.....	27
4.5 AdobeRGB98 prostor boja.....	28
4.5.1. Transformacija XYZ tristimulusnih vrijednosti u AdobeRGB98 vrijednosti.....	29
<b>5. CMYK PROSTOR BOJA</b> .....	30
5.1. Suptraktivna sinteza.....	31
<b>6. SUSTAV UPRAVLJANJA BOJOM I PROSTORI BOJA</b> .....	32
6.1. Sustav upravljanja bojom.....	32
6.1.2. Referentni prostor boja.....	33
6.1.3. ICC profili.....	34
6.1.4. Modul za upravljanje bojama.....	35
6.1.5. Modeli za smještanje i usklađivanje boja (rendering intents).....	35
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	36
<b>8. LITERATURA</b> .....	37

## 1. UVOD

Osjet boje je psihofizički doživljaj i kao takav vrlo subjektivan. Doživljaj koji se razlikuje od čovjeka do čovjeka što znači da različiti ljudi iste boje doživljavaju različito. Kako taj subjektivni doživljaj objektivno opisati? Kako sistematizirati veliki opseg boja koje može razaznati ljudsko oko (~10 milijuna)? Odgovor je nađen u kolorimetriji - znanosti koja se bavi mjerenjem boja. Prema Wyszecki - Stiles definiciji u kolorimetriji se nastoji brojčano odrediti boju u odnosu na određeni vizualni podražaj (stimulus). Početkom dvadesetog stoljeća, razvojem industrija u kojoj je boja igrala veliku ulogu (grafička, tekstilna, automobilna itd) raste sve veće zanimanje za kolorimetriju. Javila se potreba da se razlika između reproducirane boje i orginalne (izvorne) boje brojčano odredi. Da bi se to postiglo trebalo je sve boje koje čovjek vidi objektivno, brojčano opisati i smjestiti ih smisleno u neki sustav. To se postiglo eksperimentalnim putem, a boje su prezentirane u tzv. prostoru boja.

Prostor boja može se definirati kao metoda koju koristimo za vizualiziranje boja. To je je trodimenzionalni geometrijski prostor sa koordinatama (parametrima) definiranim tako da u taj prostor simbolički stanu sve boje koje ljudsko oko raspoznaje te da taj raspored odgovara psihološkom rasporedu. U prostoru boja određenu boju predstavlja točka. [1] Koordinate daju položaj boje unutar određenog prostora boja ali ne definiraju o kojoj se boji radi. O kojoj je boji riječ ovisi o tome koji se prostor boja koristi.

Postoji više različitih prostora boja a koji se prostor koristi ovisi o namjeni određenog prostora boja ili o specifikacijama uređaja koji koristi neki prostor boja.

## 2. OSNOVNI CIE STANDARDI

### 2.1 CIE međunarodna komisija za rasvjetu

Međunarodna komisija za rasvjetu (*Commission internationale de l'éclairage*, kratica CIE) je nezavisna neprofitabilna organizacija koja se bavi tehničkim i znanstvenim i kulturološkim aspektima rasvjete, svjetla, boje i prostora boja.

Ciljevi organizacije su [2]:

1. stvaranje međunarodnog foruma za raspravu i razmjenu informacija o znanosti, tehnologiji i umjetnosti u području svjetla i rasvjete.
2. Pomoć pri primjeni principa i procedura u razvoju međunarodnih i nacionalnih standarda u području svjetla i rasvjete.
3. Priprema i izdavanje standarda, izvještaja i ostalih publikacija o znanosti, tehnologiji i umjetnosti u području svjetla i rasvjete.
4. Održavanje odnosa i tehničke interakcije sa ostalim međunarodnim organizacijama koje se bave pitanjima znanosti, tehnologije, standardizacije i umjetnosti u području svjetla i rasvjete.

Komisija je podijeljena na 7 divizija koje se bave određenim temama. Divizije 1 (vid i boja) i 8 (slikovna tehnologija) bave se pitanjima boje.

Komisija je osnovana 1913. godine u vrijeme kada je rasla komercijalna i tehnička promjena plinske rasvjete u električnu. Komisija je uključivala predstavnike iz svih zemalja koje su bile voljne sudjelovati. Rad komisije zaustavljen je početkom prvog svjetskog rata a nastavljen 1921. godine. [3]

Susreti komisije odvijaju se svake 3 godine a službeni jezici su francuski, njemački i engleski.

Danas komisiju čini 41 zemlja među kojima je i Hrvatska, a sjedište Komisije je u Beču, Austrija.

## 2.2 CIE standardni promatrač

Osjet boje je psihofizički doživljaj uzrokovan različitim podražajem – stimulusom koji osim o izvoru svjetla i karakteristikama objekta koji se promatra, uvelike ovisi i o psihološkim i fiziološkim uvjetima promatrača. Različiti ljudi određenu boju doživljavaju drugačije, stoga se pokušalo eksperimentalnim putem standardizirati kako prosječan čovjek vidi boju i brojučano ju prikazati. 1931. CIE je definirala pojam standardnog promatrača za kolorimetriju na osnovi eksperimenata koje su neovisno jedan o drugome provodili William David Wright 1928. i John Guild 1931. godine.

CIE 1931 2° standardni promatrač je pojam koji označava statistički podatak dobiven nizom mjerenja u kojima su sudjelovali ljudi dobrog vida i bez deformacije viđenja boja.

U eksperimentima je sudjelovalo dvadesetak osoba. Cilj je bio odrediti kako promatač ocijenjuje male vizualne razlike u boji.

Eksperimenti su koristili uređaj u kojem boja nastaje miješanjem osnovnih boja svjetala aditivnom sintezom za koju vrijede Grassmannovi zakoni [4]:

1. Trima prigodno izabranim osnovnim stimulusima može se imitirati osjet boje izazvan bilo kojim stimulusom boje. Svaki dani stimulus boje može se imitirati samo jednom kombinacijom određenih osnovnih stimulusa.

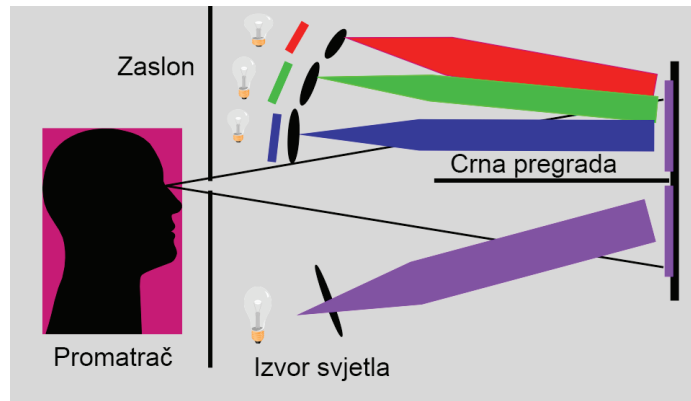
$$C = R_c(R) + G_c(G) + B_c(B) \quad (2.2.1)$$

2. Dva stimulusa različitog spektralnog sastava koji daju isti osjet boje vladaju se jednako i kod miješanja s nekim trećim stimulusom.

$$C_3(C_3) = C_1(C_1) + C_2(C_2) = [R_1 + R_2](R) + [G_1 + G_2](G) + [B_1 + B_2](B) \quad (2.2.2)$$

3. Daju li dva različita stimulusa boja isti osjet boje, taj osjet ostaje jednak i kad se intezitet zračenja oba stimulusa bez promjene spektralnog sastava promijeni u istom smjeru.

$$kC_3(C_3) = kC_1(C_1) + kC_2(C_2) \quad (2.2.3)$$



Slika 1. CIE standardni promatrač eksperiment

Izvor: [https://measurewhatyousee.files.wordpress.com/2014/10/screen\\_experiment.png](https://measurewhatyousee.files.wordpress.com/2014/10/screen_experiment.png)

Uređaj za promatranje sastojao se od bijele pozadine podjeljene na dva polja pomoću crne pregrade. Gornji dio bijele pozadine osvjetljavao se sa tri snopa svjetla (stimulusa). Snopovi su su bili svjetlo jedne valne duljine – monokromatski izvori. To su bili crveni ( $\lambda = 700\text{nm}$ ), zeleni ( $\lambda = 546.1\text{nm}$ ) i plavi ( $\lambda = 435.8\text{nm}$ ) snopovi. Te tri valne duljine predstavljaju primarne boje CIERGB prostora. Intezitet tih snopova svjetla definiran je njihovom svjetlinom ( $L$  - *luminance*) koja je prilagođena tako da odgovara svjetlini ispitivane boje. Kod crvenog svjetla inteziteta  $1\text{cd/m}^2$  zeleno svjetlo je  $4.5907\text{cd/m}^2$  te plavo  $0.0601\text{cd/m}^2$ .

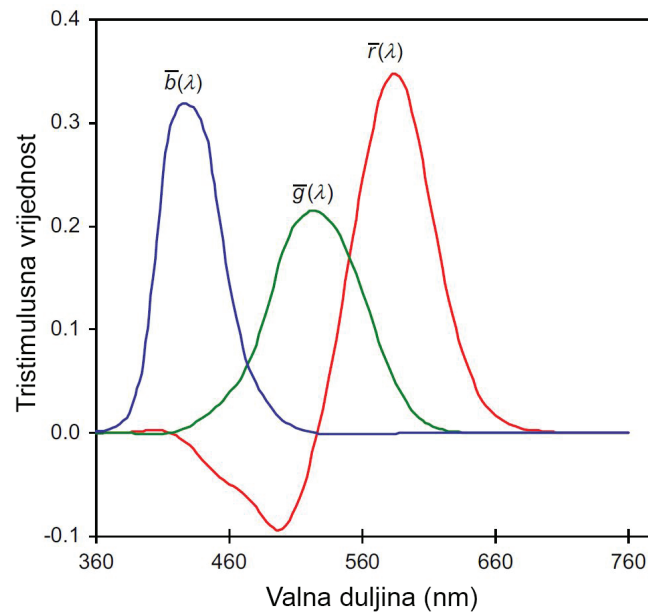
$$L = 1.000R + 4.5907G + 0.0601B \quad (2.2.4)$$

Donji dio bijele pozadine bio je osvjetljen svjetlom ispitivane boje. Promatrač je polja gledao kroz zaslon sa otvorom koji mu je davao kut gledanja od  $2^\circ$ . Kut od  $2^\circ$  izabran je jer se 1931. godine vjerovalo da su čunjići (fotoreceptorske stanice odgovorne za opažanje boja) u ljudskom oku smješteni u luku od  $2^\circ$  unutar fovee (područje najoštrijeg vida unutar žute pjege). Tijekom eksperimenta trebao je prilagoditi intezitet tri snopa svjetla da bi njihovim miješanjem dobio osjet ispitivane boje.

Rezultati eksperimenata su standardizirani te prezentirani sa tri krivulje  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  koje se nazivaju funkcije uspoređivanja boje (*color matching functions*) – distribucijske vrijednosti crvenog, zelenog i plavog svjetla koje miješanjem daju osjet određene boje.  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  vrijednosti opisuju relativnu energiju po valnim duljinama te definiraju osjetljivost oka CIE standardnog promatrača. Prema prvom Grassmannovom zakonu određena boja se dobije prema formuli:

$$I(\lambda) = \bar{r}(\lambda)(R) + \bar{b}(\lambda)(B) + \bar{g}(\lambda)(G) \quad (2.2.5)$$

Sa navedena tri snopa svjetla moguće je dobiti većinu ali ne sve boje vidljivog dijela spektra. Monokromatske boje spektra, tzv. čiste boje nije bilo moguće dobiti. Spektralna osjetljivost čunjića u ljudskom oku se preklapa pa monokromatski podražaji (stimulusi) nužno pobuđuju više od jednog čunjića. Da bi se dobilo čiste boje spektra trebalo je smanjiti zasićenje, što se postiglo dodavanjem poznatog izvora svjetla i na stranu polja ispitivane svjetlosti. Taj dodatni izvor svjetla uzrok je pojavi negativnih tristimulusnih vrijednosti kod krivulja spektralne osjetljivosti oka.



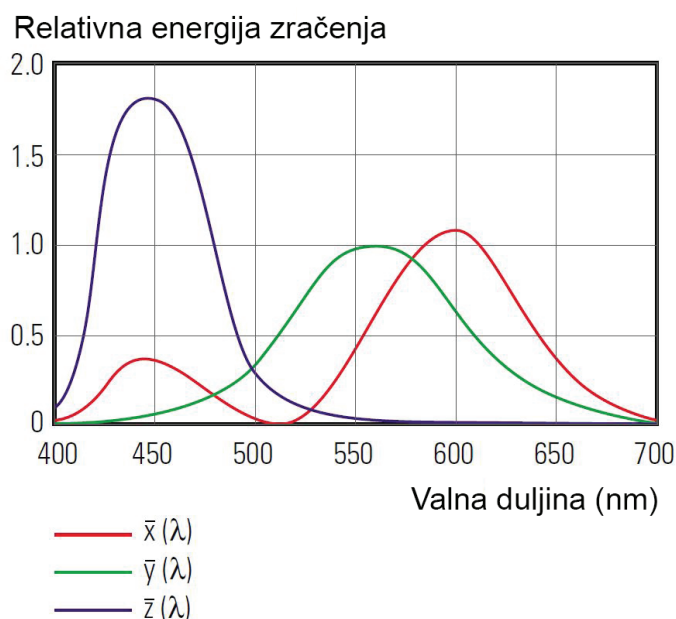
Slika 2. Krivulja spektralne osjetljivosti oka prikazana sa  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  i  $\bar{b}(\lambda)$  funkcijama  
Izvor: Allen E., Triantaphillidou S. (2011) *The manual of photography 10th edition*, Elsevier Ltd.

CIE je smatrala da negativne vrijednosti neće biti prihvaćene kao međunarodni standard pa su realne  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$ , vrijednosti pomoću matematičkih formula transformirane u teoretske vrijednosti  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  koje su imale veće zasićenje nego boje spektra.

$$\bar{x}(\lambda) = 0.49\bar{r}(\lambda) + 0.31\bar{g}(\lambda) + 0.20\bar{b}(\lambda) \quad (2.2.6)$$

$$\bar{y}(\lambda) = 0.17697\bar{r}(\lambda) + 0.81240\bar{g}(\lambda) + 0.01063\bar{b}(\lambda) \quad (2.2.7)$$

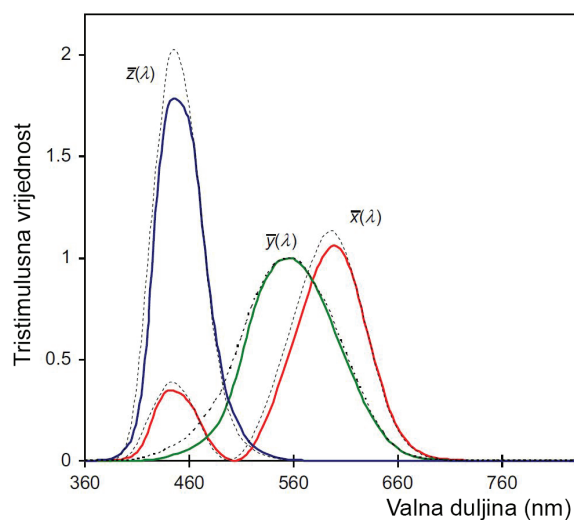
$$\bar{z}(\lambda) = 0.00\bar{r}(\lambda) + 0.01\bar{g}(\lambda) + 0.99\bar{b}(\lambda) \quad (2.2.8)$$



Slika 3. Krivulja spektralne osjetljivosti oka prikazana sa teorijskim  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  funkcijama

Izvor: Kipphan H., (2001). *Handbook of Print Media*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Ekperiment je ponovljen 1964. godine sa kutom gledanja od  $10^\circ$  čime je definiran CIE 1964  $10^\circ$  standardni promatrač. Ekperiment je ponovljen jer je zaključeno da su čunjići u oku smješteni u većem luku.



Slika 4. Usporedba krivulja spektralne osjetljivosti oka CIE 1931  $2^\circ$  i CIE 1964  $10^\circ$  standardnog promatrača

Izvor: Allen E., Triantaphillidou S. (2011). *The manual of photography 10th edition*, Elsevier Ltd.

## 2.3 CIE standardni *illuminati*

CIE je definirala spektar raspodjele energije zračenja različitih tipova bijelog svjetla i standardizirala vrste svjetlosti (rasvjete). Ta standardizirana vrsta svjetlosti naziva se *illuminat*.

*Illuminat A* - volframova žarulja temperature 2856K

*Illuminat B* - sunčevo svjetlo (podnevno) temperature 4874K

*Illuminat C* - rano dnevno svjetlo temperature 6774K

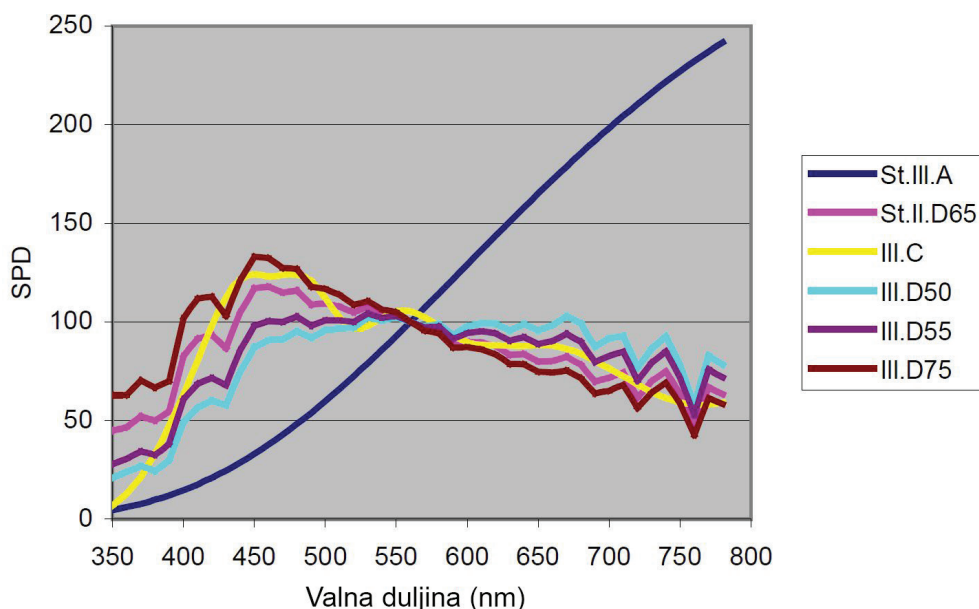
*Illuminati* serije D predstavljaju standarde za dnevno svjetlo različite namjene od kojih su u upotrebi najviše:

D65 - dnevno svjetlo temperature 6504K

D50 - dnevno svjetlo temperature 5000K (standardno dnevno svjetlo za grafičku industriju)

*Illuminat E* (*equal energy*) ne predstavlja stvarni izvor svjetla. To je teorijski *illuminat* "jednake energije". Ima konstantnu raspodjelu spektralne energije zračenja unutar vidljivog spektra. *Illuminat E* ima jednake XYZ tristimulusne vrijednosti te su njegove trikromatske koordinate  $x=y=1/3$ . U kolorimetriji koristi se za matematičke izračune.

*Illuminati* serije F predstavljaju standarde za fluorescentno svjetlo.



Slika 5. Krivulje raspodjele spektralne energije zračenja za neke CIE standardne illuminate

Izvor: Schanda J., (2007). *Colorimetry: understanding the CIE system*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey



### 3. CIE PROSTORI BOJA

#### 3.1 CIEXYZ prostor boja

CIEXYZ prostor boja baziran je na percepciji boje standardnog promatrača te je kao takav osnova za ostale CIE prostore boja. CIEXYZ prostor definiraju tri pozitivne hipotetske tristimulusne vrijednosti XYZ pomoću kojih se mogu prikazati sve boje vidljive ljudskim okom.

Y vrijednost definirana je tako da odgovara svjetlini boje. X i Z vrijednosti daju informaciju o boji ali ne odgovaraju njenom psihovizualnom osjetu (ton i zasićenje).

Jednake vrijednosti ( $X = Y = Z$ ) predstavljaju bijelu boju.

Boja se definira izrazom:  $C = \bar{x}(\lambda)X + \bar{y}(\lambda)Y + \bar{z}(\lambda)Z$  (3.1.1)

CIERGB prostor boja transformira u CIEXYZ prostor pomoću matrice [5]

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.768 & 892 & 1.751 & 748 & 1.130 & 160 \\ 1.000 & 000 & 4.590 & 700 & 0.060 & 100 \\ 0 & & 0.056 & 508 & 5.594 & 292 \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3.1.2)$$

##### 3.1.1. Određivanje XYZ tristimulusnih vrijednosti

Za određivanje tristimulusnih vrijednosti boje nekog uzorka potrebno je izmjeriti faktor refleksije R uzorka u uvjetima CIE standardizirane rasvjete i CIE standardizirane geometrije promatranja. XYZ tristimulusne vrijednosti izračunavaju se matematički:

$$X = k \int S(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (3.1.3)$$

$$Y = k \int S(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3.1.4)$$

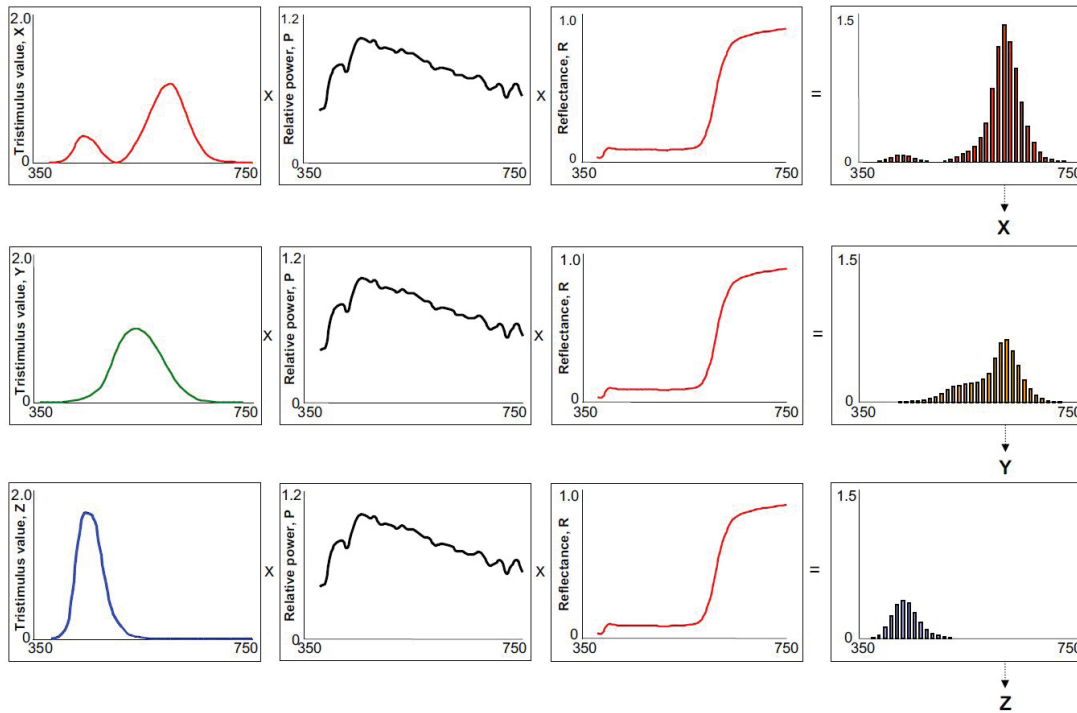
$$Z = k \int S(\lambda) R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3.1.5)$$

$$k = 100 / \int S(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3.1.6)$$

Raspon integrala je 380 - 780nm

$S(\lambda)$  predstavlja relativnu količinu energije koju zrači standardni izvor rasvjete u pojedinim dijelovima spektra.

$R(\lambda)$  predstavlja spektralnu refleksiju uzorka  
 $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ , i  $\bar{z}(\lambda)$  su teorijske funkcije uspoređivanja boja  
 $k$  - normalizacijska konstanta koja se koristi da bi raspon tristimulusnih vrijednosti bio 0 - 100, te  $Y$  za izvor svjetlosti bio 100.



Slika 6. grafički prikaz određivanja XYZ tristimulusnih vrijednosti

Izvor: Allen E., Triantaphillidou S. (2011) *The manual of photography 10th edition*, Elsevier Ltd.

### 3.2 CIE 1931 dijagram kromatičnosti

Da bi se vizualno prezentirao raspon boja koje može vidjeti prosječni čovjek CIE je definirala dvodimenzionalni prostor u kojem su ucrtane sve boje vidljive ljudskim okom. Boje stimulusa (podražaja) definirane su kromatskim koordinatama  $x$  i  $y$  koje se računaju iz XYZ tristimulusnih vrijednosti:

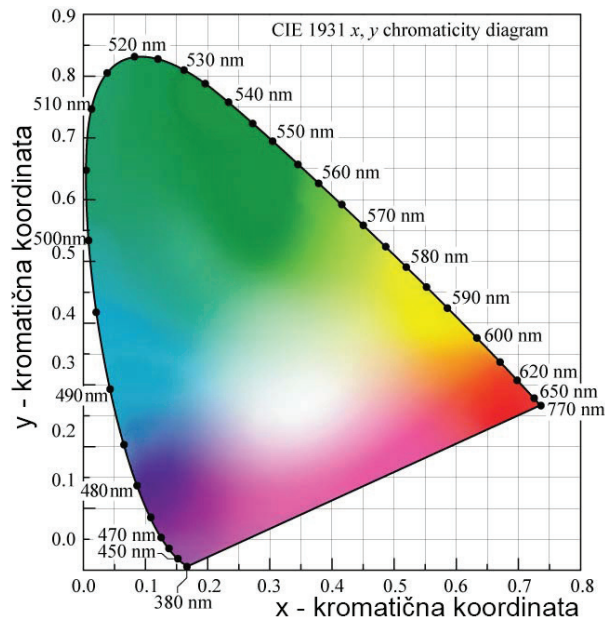
$$x = X / X + Y + Z \quad (3.2.1)$$

$$y = Y / X + Y + Z \quad (3.2.2)$$

$$z = Z / X + Y + Z \quad (3.2.3)$$

$x$ ,  $y$  i  $z$  su normalizirane vrijednosti ( $x + y + z = 1$ ) pa su za definiranje boje dovoljne dvije vrijednosti. Kromatske koordinate predstavljaju trodimenzionalni fenomen osjeta boje sa dvije varijable pa se za potpuno specifikiranje boje treba navesti i jedna od tristimulusnih vrijednosti. To je obično vrijednost  $Y$  koja odgovara svjetlini. Prostor definiran vrijednostima  $x$ ,  $y$  i  $Y$  naziva se CIE $xyY$  prostor boja.

Ucrtavanjem  $x$  i  $y$  koordinata u pravokutni koordinatni sustav dobije se dijagram oblika potkove:

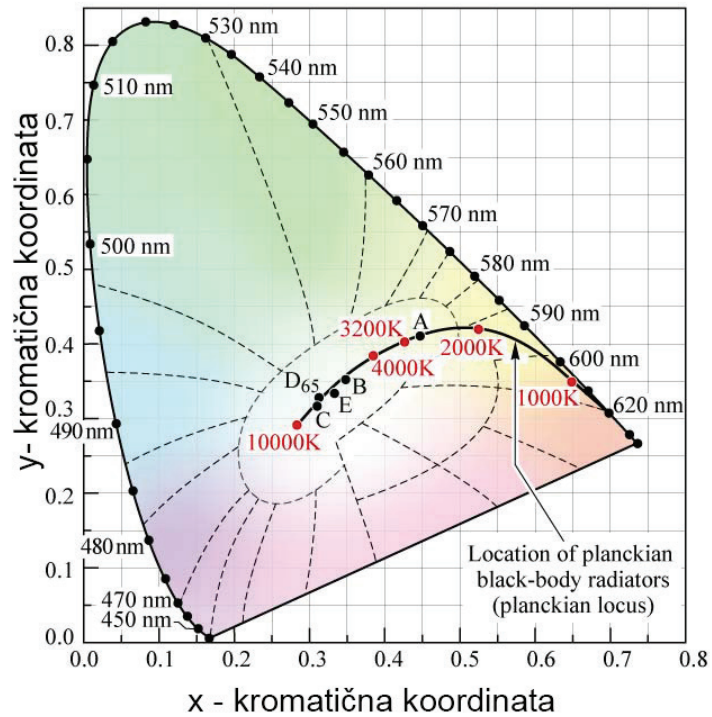


Slika 7. CIE xy dijagram kromatičnosti

Izvor: <http://tinyurl.com/qcbg4by>

Zaobljeni dio potkove, spektralna krivulja (*spectral locus*), definiran je kromatskim koordinatama spektralnih boja. Na slici su prikazane odgovarajuće valne duljine duž zaobljenog dijela potkove. Donja linija potkove naziva se purpurna granica (linija). Purpurna boja nije boja spektra, dobiva se miješanjem crvenog i plavog svjetla. Unutar potkove smještene su sve boje vidljive ljudskim okom.

Zasićenost boja pada od ruba potkove prema centru potkove do točke zasićenosti 0. Ta točka naziva se bijela ili akromatska točka i ovisi o vrsti *illuminata* koji se koristi. Promjena *illuminata* uzrokuje promjenu položaja bijele točke a time i promjenu položaja svih boja unutar potkove. U kolorimetriji za matematičke izračune koristi se teorijski *illuminat* E koji ima iste  $x$  i  $y$  koordinate koje iznose  $1/3$ .



Slika 8. Položaj CIE standardnih *illuminata* u CIE dijagramu kromatičnosti

Izvor: <http://tinyurl.com/njxfwg8>

Tablica 1. kromatske koordinate nekih od CIE standardnih *illuminata*

Illuminat	x	y
CIE illuminat E	0.33333	0.33333
CIE illuminat A	0.447 58	0.407 45
CIE illuminat D65	0.312 72	0.329 03
CIE illuminat D50	0.345 67	0.358 5
CIE illuminat D55	0.332 43	0.347 44
CIE illuminat D75	0.299 03	0.314 8
CIE illuminat C	0.310 06	0.460 89

### 3.2.1 Dominantna valna duljina i čistoća pobude

Dominantna valna duljina je valna duljina monokromatskog stimulusa koji aditivnim miješanjem u odgovarajućim omjerima sa specificiranim akromatskim stimulusom daje stimulus neke boje. [5]

Iz kromatskih koordinata  $x$  i  $y$  neke boje može se odrediti dominantna valna duljina  $\lambda_D$ . Dominantna valna duljina je sjecište spektralne krivulje i pravca koji ima početak u akromatskoj (bijeloj) točki te ide kroz točku koordinata  $x, y$ . Ako se sjecište nalazi na purpurnoj liniji tada se definira komplementarna valna duljina  $\lambda_C$  tako da se pravac produži u suprotnom smjeru.

Da bi se u potpunosti definirala kromatičnost boje potrebno je odrediti i čistoću pobude (*excitation purity*,  $p_e$ ). To je omjer udaljenosti točke ispitivane boje od bijele točke i udaljenosti od dominantne valne duljine. Za boju F na slici:

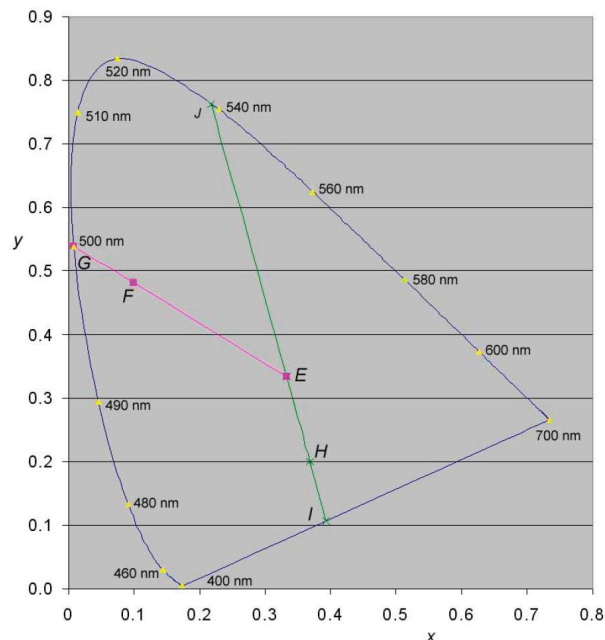
$$p_e = EF / EG = y_F - y_E / y_G - y_E \quad (3.2.1.1)$$

ili

$$p_e = EF / EG = x_F - x_E / x_G - x_E \quad (3.2.1.2)$$

$$\text{CIE je definirala i kolorimetrijsku čistoću: } (p_c): p_c = L_d / L_d + L_a \quad (3.2.1.3)$$

$L_d$  je svjetlina monokromatskog stimulusa,  $L_a$  je svjetlina akromatskog stimulusa [5]



Slika 9. Dominantna valna duljina u CIE dijagramu kromatičnosti

Izvor: Schanda J., (2007). *Colorimetry: understanding the CIE system*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey

### 3.2.2 Nedostaci CIE dijagrama kromatičnosti

Iako CIE dijagram kromatičnosti i danas ima svoju primjenu u kolorimetriji postoji nekoliko nedostataka:

CIE dijagram kromatičnosti konstruiran je više za mjerenje boje izvora svjetla nego za mjerenje boje objekta.

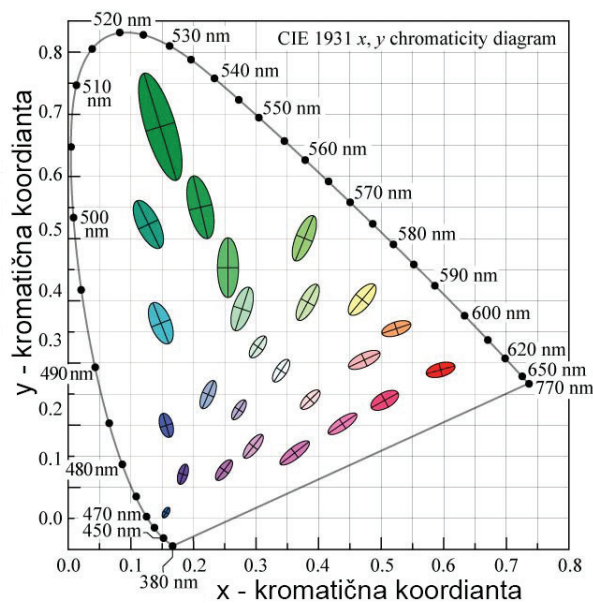
Položaj boje unutar tzv. potkove ovisi o izvoru svjetla - promjenom izvora mijenja se položaj bijele točke a time i položaj boja.

Vidljivi nedostak je da zelena boja unutar dijagrama zauzima mnogo više prostora u usporedbi s brojem zelenih boja koje ljudsko oko može razlikovati.

CIE dijagram kromatičnosti ne pokazuje potpuno kako boja izgleda jer je boja definirana u dvodimenzionalnom prostoru bez svojstva svjetline.

Jednaka udaljenost u dijagramu ne odgovara jednakim vizualnim razlikama.

1940-tih godina David MacAdam proučavao je ljudsku osjetljivost na vizualne karakteristike boja. Eksperiment je uključivao promjenu tona, zasićenja i svjetline boje dok promatrač nije uočio promjenu u odnosu na standardni uzorak. Ustanovilo se da je ljudsko oko osjetljivije na promjenu tona nego na promjenu svjetline. Rezultati eksperimenta ucrtani su u CIE dijagram kromatičnosti i imaju oblik elipsa koje se nazivaju MacAdamsove elipse. Unutar elipsa su boje koje ljudsko oko ne može razlikovati. Veličina elipsa je različita ovisno o položaju boje u dijagramu što dokazuje da dijagram kromatičnosti nije jedinstven nego svaka boja ima područje odstupanja. Na temelju MacAdamsovog istraživanja CIE je definirala nove jedinstvene (uniformne) prostore boja.

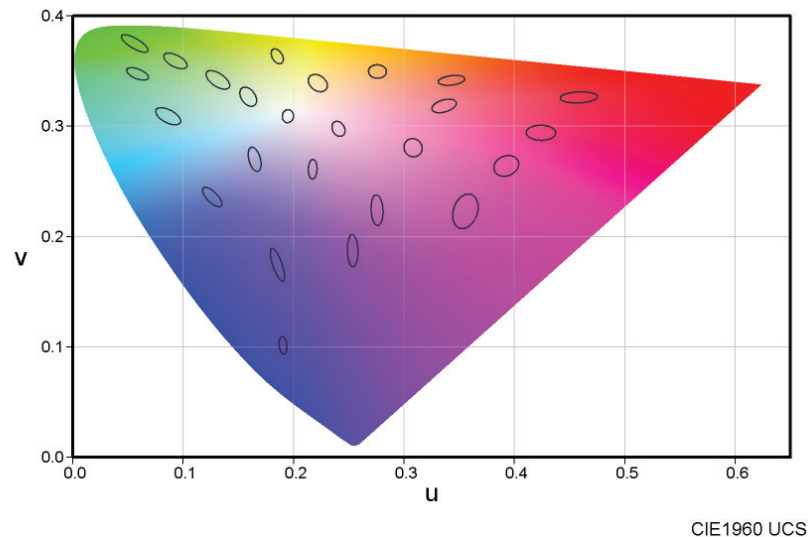


Slika 10. MacAdamsove elipse u CIE dijagramu kromatičnosti

Izvor: <http://tinyurl.com/oeabdtc>

### 3.3. CIE 1960 UCS dijagram i CIEU\*V\*W\* 1964 prostor boja

Na temelju MacAdamsovog i ostalih istraživanja znanstvenik Gunter Wyszecki je predložio te 1960. godine CIE prihvatila, novi dijagram kromatičnosti CIE UCS (*uniform chromaticity chart*) - dijagram uniformne kromatičnosti. U tom dijagramu razlika veličina elipsa manja je nego u CIE 1931 dijagramu kromatičnosti



Slika 11. CIE UCS dijagram i MacAdamsove elipse

Izvor: [http://zemax.up.n.seesaa.net/zemax/image/color\\_CIE1960.png?d=a0](http://zemax.up.n.seesaa.net/zemax/image/color_CIE1960.png?d=a0)

Koordinate UCS dijagrama su  $u$  i  $v$ . Računaju se iz kromatičnih koordinata  $x$  i  $y$  objekta.

$$u = 4x / (-2x + 12y + 3) \quad (3.3.1)$$

$$v = 6y / (-2x + 12y + 3) \quad (3.3.2)$$

Koordinate prostora boja opisuju se formulama:

$$U^* = 13W^* (u - u_0) \quad (3.3.3)$$

$$V^* = 13W^* (v - v_0) \quad (3.3.4)$$

$$W^* = 25Y^{1/3} - 17 \quad (3.3.5)$$

$u_0$  i  $v_0$  su vrijednosti za izvor svjetla (bijelu točku)  
Y je tristimulusna vrijednost (svjetlina) objekta  
 $W^*$  je varijabla svjetline,  $U^*$  i  $V^*$  su varijable kromatičnosti

### 3.3.1. Razlika boja u CIEUVW prostoru boja

Na temelju UCS dijagrama CIE je 1964. definirala prvu formulu za izračun razlika u boji. Numerička vrijednost koja predstavlja razliku između dvije boje označava se sa  $\Delta E$ . U pravilu, što je  $\Delta E$  manji to je manja razlika boja.

$$\Delta E_{\text{CIEUVW}} = [(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2]^{1/2} \quad (3.3.1.1)$$

Definirana je i druga formula koja je predstavljala male vizualne razlike između boja onako kako su razlike dvije susjedne boje prikazane u Munsellovom atlasu boja.

$$\Delta E_{\text{AN}} = [(0.23\Delta V_Y)^2 + (\Delta(V_X - V_Y))^2 + (0.4\Delta(V_Z - V_Y))^2]^{1/2} \quad (3.3.1.2)$$

V (*value*) - vrijednost svjetline u Munsellovom sustavu

Razvojem industrije rasla je i upotreba kolorimetrije u industriji. Dani izračuni za razlike u boji bili su komplicirani te se javila potreba za novim uniformnim prostorima boja. 1976. godine CIE je definirala dva nova prostora boja - CIELAB i CIELUV.



### 3.4. CIE 1976 L\*a\*b\* prostor boja

1976. CIE je definirala novi uniformni trodimenzionalni prostor baziran na CIEXYZ prostoru boja, Munsellovom sustavu boja te teoriji suprotnih parova boja.

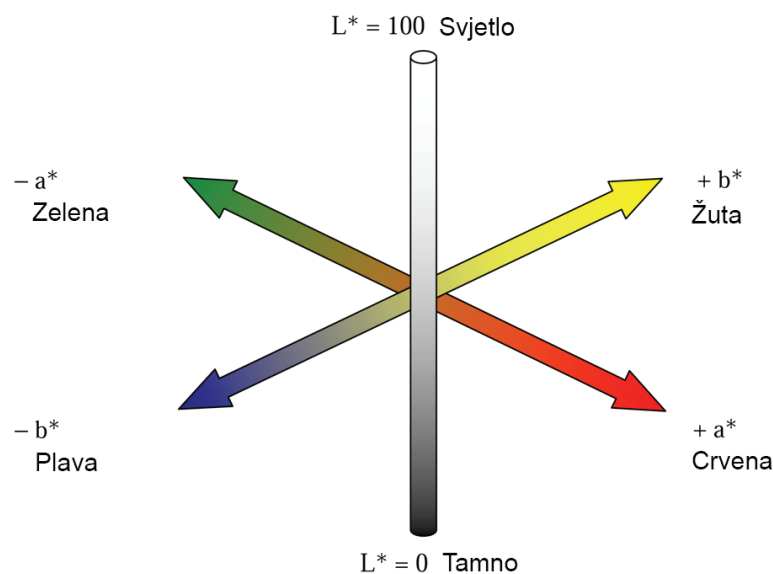
Munsell boje definira sa tri vrijednosti: ton, kromatičnost i svjetlina. U CIELAB prostoru boje su definirane sa tri osi: dvije kromatske osi  $a^*$  i  $b^*$  te akromatskom osi  $L^*$  (*luminance*) koja označava svjetlinu-  $L^* = 0$  je crno,  $L^* = 100$  je bijelo.

$a^*$  kromatska os ima orijentaciju crveno - zeleno. Pozitivna  $a$  os usmjerena je u smjeru crvenog stimulusa, a negativna  $a$  os usmjerena je u smjeru zelenog stimulusa.

$b^*$  kromatska os ima orijentaciju žuto - plavo. Pozitivna  $b^*$  os usmjerena je u smjeru žutog stimulusa a negativna  $b^*$  os usmjerena je u smjeru plavog stimulusa.

Ti parovi boja, zeleno - crveno i plavo - žuto odgovaraju parovima boja u teoriji suprotih procesa (*opponent color theory*) koja opisuje kako ljudsko oko vidi boje.

Centar kromatskih osi je akromatičan, pomicanjem od centra raste kromatičnost boja u CIELAB prostoru.

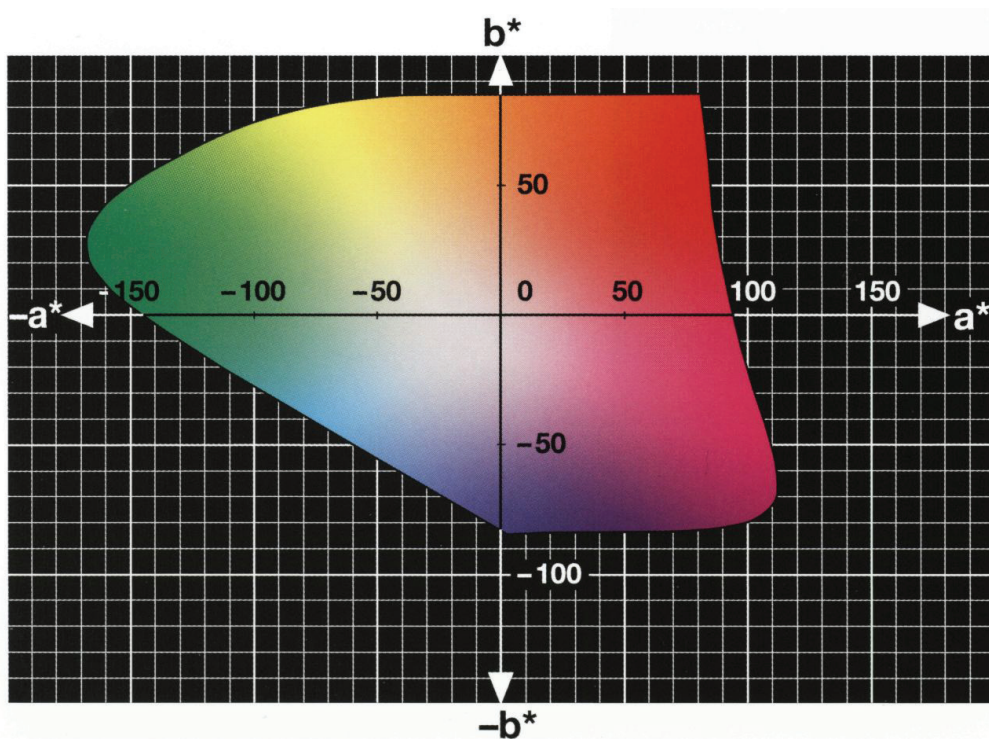


Slika 12. grafički prikaz CIELAB prostora boja  
<http://tinyurl.com/ogadmry>



Slika 13. CIELAB *solid*

Izvor: Kipphan H., (2001). *Handbook of Print Media*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg



Slika 14. CIE LAB presjek

Izvor: <http://www.az-print.com/FAQ/Heidelberg/img/Image371.jpg>

### 3.4.1. Transformacija XYZ tristimulusnih vrijednosti u L\*a\*b\* vrijednosti

Transformacija XYZ vrijednosti u L\*a\*b\* vrijednosti definirana je jednadžbama [5]:

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16 \quad (3.4.1.1)$$

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \quad (3.4.1.2)$$

$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \quad (3.4.1.3)$$

gdje su

$$f(X/X_n) = (X/X_n)^{1/3} \quad (3.4.1.4)$$

$$f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3} \quad (3.4.1.5)$$

$$f(Z/Z_n) = (Z/Z_n)^{1/3} \quad (3.4.1.6)$$

ako su  $f(X/X_n), f(Y/Y_n), f(Z/Z_n) > (24/116)^3$

$X_n, Y_n, Z_n$  su tristimulusne vrijednosti izvora svjetla.

Ako su omjeri  $f(X/X_n), f(Y/Y_n), f(Z/Z_n) \leq (24/116)^3$  tada vrijede formule:

$$f(X/X_n) = (841/108) (X/X_n + 16/116) \quad (3.4.1.7)$$

$$f(Y/Y_n) = (841/108) (Y/Y_n + 16/116) \quad (3.4.1.8)$$

$$f(Z/Z_n) = (841/108) (Z/Z_n + 16/116) \quad (3.4.1.9)$$

Razlog dvjema formulama za omjer tristimulusnih vrijednosti uzorka i izvora svjetla je taj što male vrijednosti svjetline  $L^*$  ne odgovaraju u potpunosti Munsellovoj skali svjetlini  $V$ . Kod vrijednosti  $Y = 0$  vrijednost  $L^*$  iznosi -16.

### 3.4.2. CIELch model boja

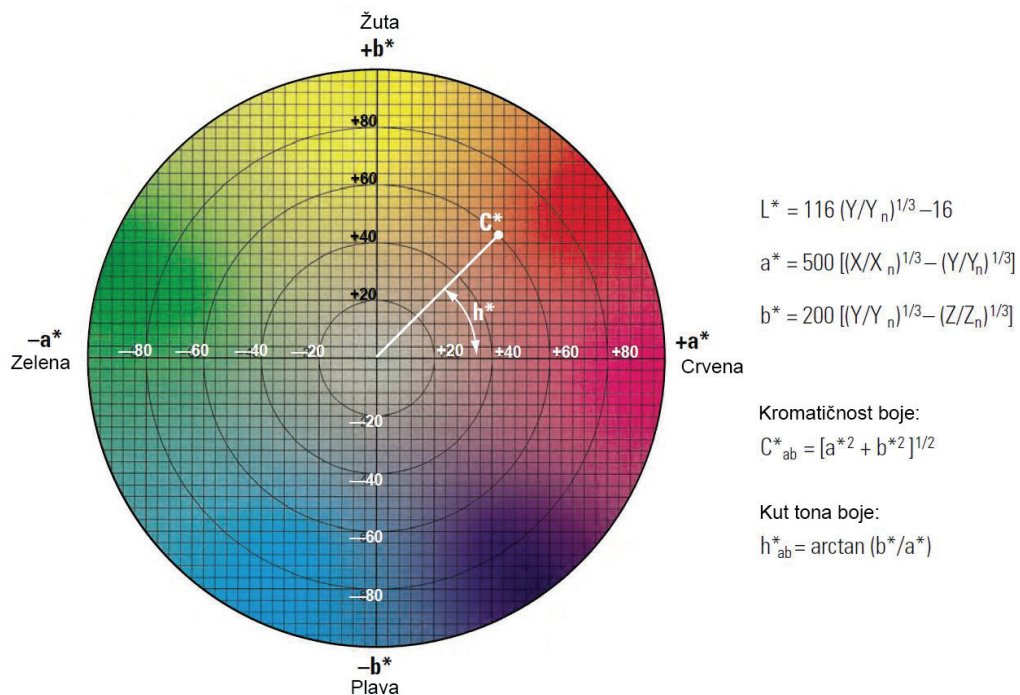
Iz CIELAB prostora u praksi se često boja opisuje u obliku Lch (*lightness, chroma, hue*) - svjetlina, kromatičnost, ton:

$$\text{svjetlina (lightness): } L^* = 116f(Y/Y_n) - 16 \quad (3.4.2.1)$$

$$\text{kromatičnost boje (chroma): } C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (3.4.2.2)$$

$$\text{kut tona boje: } h_{ab} = \arctan(b^*/a^*) \quad (3.4.2.3)$$

Kut boje leži između  $0^\circ$  i  $90^\circ$  ako su  $a^*$  i  $b^*$  koordinate pozitivne; između  $90^\circ$  i  $180^\circ$  ako je koordinata  $b^*$  pozitivna i koordinata  $a^*$  negativna; između  $180^\circ$  i  $270^\circ$  ako su  $a^*$  i  $b^*$  koordinate negativne te između  $270^\circ$  i  $360^\circ$  ako je koordinata  $a^*$  pozitivna i koordinata  $b^*$  negativna.



Slika 15. CIELAB krug boja

Izvor: Kipphan H., (2001). *Handbook of Print Media*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

### 3.4.3. Razlika boja u CIELAB prostoru boja

Razlika u boji dva uzorka (0 i 1) mjeri se u CIE standardnim uvjetima rasvjete i geometrije promatranja te je za CIELAB prostor dana jednadžbama [5]:

Razlika CIELAB koordinata:

$$\Delta L^* = L^*_1 - L^*_0 \quad (3.4.3.1)$$

$$\Delta a^* = a^*_1 - a^*_0 \quad (3.4.3.2)$$

$$\Delta b^* = b^*_1 - b^*_0 \quad (3.4.3.3)$$

$$\text{Razlika kromatičnosti: } \Delta C^*_{ab} = C^*_{ab,1} - C^*_{ab,0} \quad (3.4.3.4)$$

$$\text{Razlika u kutu tona: } \Delta h_{ab} = h_{ab,1} - h_{ab,0} \quad (3.4.3.5)$$

Ukupna razlika:

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (3.4.3.6)$$

ili u LCH obliku:

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*_{ab})^2 + (\Delta H^*_{ab})^2]^{1/2} \quad (3.4.3.7)$$

$$\Delta H^*_{ab} = 2(C^*_{ab,1} - C^*_{ab,0})^{1/2} \sin(\Delta h_{ab}/2) \quad (3.4.3.8)$$

CIE je nastavila poboljšavati formule za ukupnu razliku boja da bi se dobile preciznije vrijednosti te je definirala nove formule: CIE94, CMC i CIEDE2000.

CIEDE2000 formula:

$$\Delta E_{00} = ( (\Delta L^*/k_L S_L)^2 + (\Delta C^*/k_C S_C)^2 + (\Delta H^*/k_H S_H)^2 + R_T(\Delta C^*\Delta H^*/S_C S_H) )^{1/2} \quad (3.4.3.9)$$

$S_L, S_C, S_H$  su kompenzacijske vrijednosti za svjetlinu, kromatičnost i ton

$R_T$  - izraz za rotaciju tona

$k_L, k_C, k_H$  su korekcije koje se odnose na uvijete promatranja boja

### 3.5. CIE 1976 L\*u\*v\* prostor boja

Istodobno sa CIELAB prostoru CIE je 1976. prihvatila još jedan prostor boja. CIELUV prostor boja je u osnovi korigirani CIEUVW prostor. Razlike su u maloj promjeni u skali svjetline te promjeni kromatičnih koordinata ( $u'$ ,  $v'$ ).

$$u' = u \quad v' = 1.5v \quad (3.5.1)$$

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16 \quad (3.5.2)$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad (3.5.3)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad (3.5.4)$$

( $x_n$  vrijednosti odnose se na izvor svjetla)

$$\text{kromatičnost boje (chroma): } C_{uv}^* = (u^{*2} + v^{*2})^{1/2} \quad (3.5.5)$$

$$\text{kut tona boje: } h_{uv} = \arctan(u^*/v^*) \quad (3.5.6)$$

U CIELUV prostoru boju može se definirati i zasićenost boje ako se kromatičnost podijeli sa svjetlinom::

$$s_{uv} = C_{uv}^*/L^* = 13[(u' - u'_n)^2 + (v' - v'_n)^2]^{1/2} \quad (3.5.7)$$

Razlike boja računaju se na isti način kao i u CIELAB prostoru.

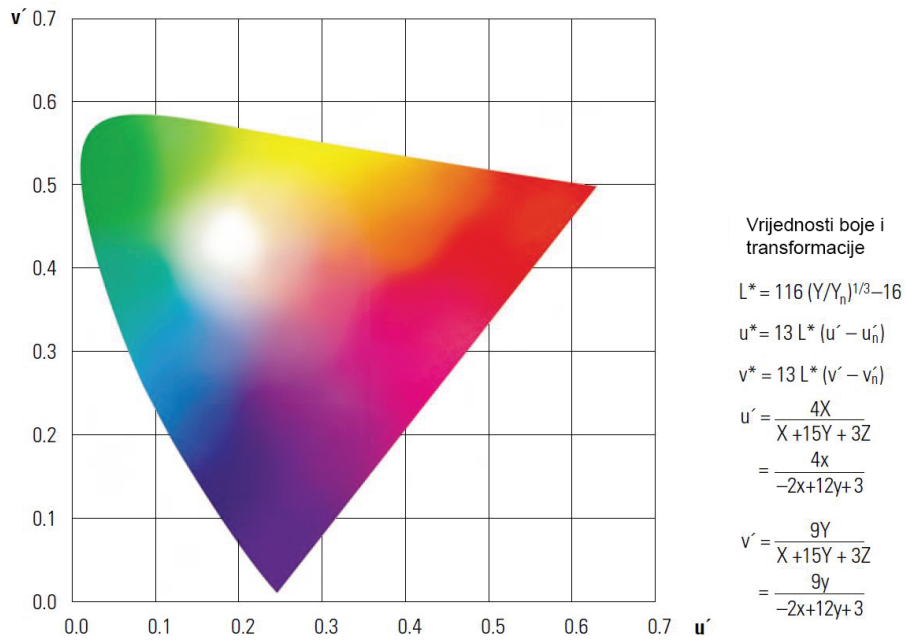
#### 3.5.1. Transformacija XYZ tristimulusnih vrijednosti u L\*u\*v\* vrijednosti

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16 \quad (3.5.1.1)$$

$$u' = 4X / X + 15Y + 3Z \quad (3.5.1.2)$$

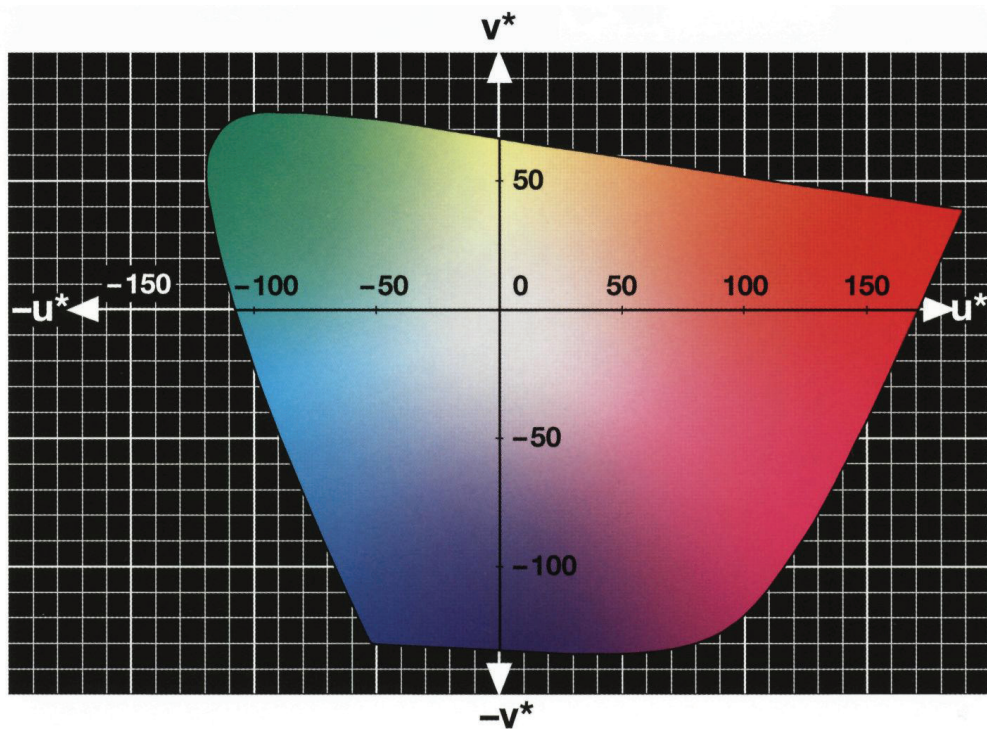
$$v' = 9Y / X + 15Y + 3Z \quad (3.5.1.3)$$





Slika 16. CIEu'v' dijagram kromatičnosti

Izvor: :Kipphan H., (2001). *Handbook of Print Media*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg



Slika 17. CIELUV presjek

Izvor: <http://www.az-print.com/FAQ/Heidelberg/img/Image376.jpg>

## 4. RGB PROSTORI BOJA

RGB prostor boja je prostor koji za prikaz boja koriste monitori, digitalne i video kamere, skeneri, televizijski uređaji.

RGB prostor boja temelji se na aditivnom RGB modelu. Definiran je sa tri primarne boje aditivne sinteze - crvenom, plavom i zelenom te tzv. bijelom točkom (set kromatskih koordinata koji definiraju bijelu boju).

Raspon boja (gamut) je podskup boja unutar određenog prostora boja. Danas je najraširenija upotreba rgb prostora boja koji se temelji na 24 bitnom modelu (8 bita po svakom od tri kanala) koji ima raspon od 16.7 milijuna boja.

### 4.1. Aditivna sinteza

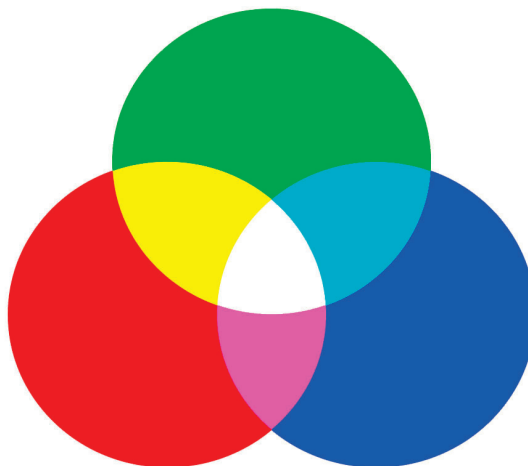
Aditivna sinteza (aditivno miješanje boja) temelji se na dodavanju pojedinih valnih duljina. Miješanjem tri snopa svjetlosti, crvenog, zelenog i plavog, moguće je dobiti širok raspon boja. Razlog tome je što spektralna osjetljivost čunjića u ljudskom oku odgovara crvenom, zelenom i plavom dijelu vidljivog spektra.

Zbrajanje valnih duljina crvene i plave svjetlosti daje osjet magenta boje.

Zbrajanje valnih duljina crvene i zelene svjetlosti daje osjet žute boje.

Zbrajanje valnih duljina plave i zelene svjetlosti daje osjet cijan boje.

Zbrajanje valnih duljina crvene, zelene i plave svjetlosti daje osjet bijele boje.



Slika 18. Princip aditivne sinteze



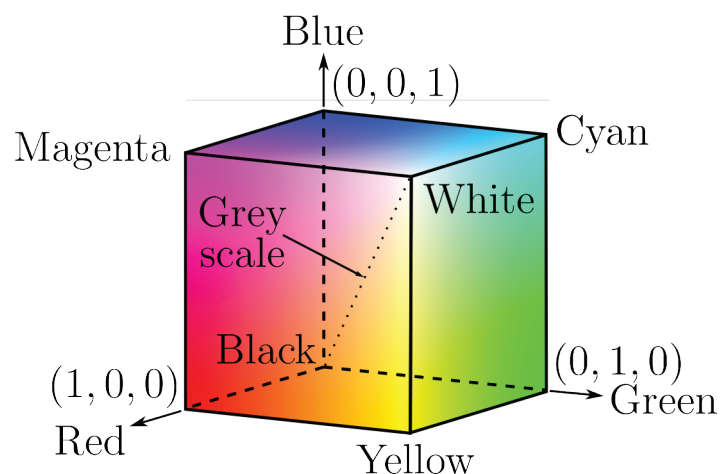
## 4.2. RGB model

Model boja je apstraktni matematički model koji boje opisuje setom brojeva.

Glavna svrha RGB modela je prikazivanje boja u elektroničkim sustavima. U grafičkoj industriji to su ulazni uređaji - digitalne kamere, skeneri te izlazni uređaji - monitori, ekrani mobilnih telefona, projektori.

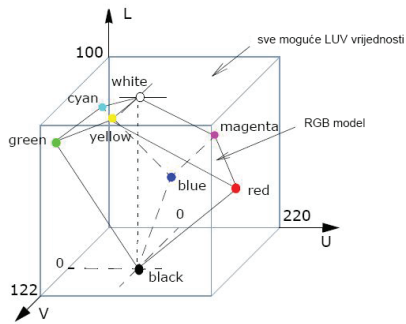
U RGB modelu boja se definira setom od tri broja koji označavaju koliko je primarne boje - crvene, zelene i plave uključeno u datu boju. Vrijednosti te tri komponente imaju raspon od nule do maksimalne vrijednosti koja ovisi o načinu numeričkog označavanja RGB modela. Ako su vrijednosti sve tri komponente 0 prikazuje se crna boja, ako su sve tri komponente maksimalne vrijednosti prikazuje se se bijela boja.

Vrijednosti mogu biti izražene u postocima (npr. za crvenu boju: 100%, 0%, 0%), decimalnim brojevima između 0 i 1 (1.0, 0.0, 0.0) te cijelim brojevima u rasponu  $2^n$ . Za 8 bita po kanalu to je 0 - 255 (255, 0, 0). Postoje i *high end* uređaji koji koriste 10, 16, 24, 32 48 ili 64 bitne kanale te se za njih koriste odgovarajuće vrijednosti.

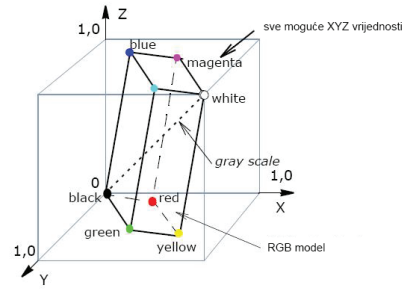


Slika 19. RGB kocka

Izvor: <https://miac.unibas.ch/SIP/02-Fundamentals-media/figs/rgb-colourcube.png>



Slika 20.a



Slika 20.b

Slika20.a RGB kocka unutar CIELUV prostora boja

Izvor: <http://tinyurl.com/oq7av96>

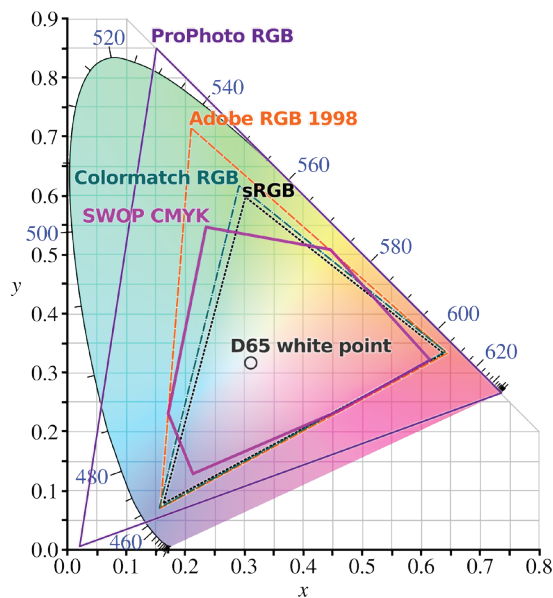
Slika 20.b RGB kocka unutar CIEXYZ prostora boja

Izvor: <http://tinyurl.com/pnux2ej>

### 4.3. Vrste RGB prostora boja

Postoji više RGB prostora koji se razlikuju po rasponu boja (gamut), bijeloj točki (izvor svjetla koji koristi prostor boja) te primarnim bojama.

Danas su najviše u upotrebi sRGB i AdobeRGB prostori.



Slika 21. Različiti RGB prostori boja unutar CIE dijagrama kromatičnosti

Izvor: <http://tinyurl.com/pjflb5h>

Tablica 2. Neki od RGB prostora boja

Prostor boja	Gamut	Bijela točka	Primarne boje					
			R		G		B	
			$x_R$	$y_R$	$x_G$	$y_G$	$x_B$	$y_B$
CIE 1931 RGB	široki	E	0.7347	0.2653	0.2738	0.7174	0.1666	0.0089
sRGB	CRT	D65	0.64	0.33	0.30	0.60	0.15	0.06
Apple RGB	CRT	D65	0.625	0.34	0.28	0.595	0.155	0.07
Adobe RGB 98	CRT	D65	0.64	0.33	0.21	0.71	0.15	0.06
Adobe Wide Gamut RGB	široki	D50	0.735	0.265	0.115	0.826	0.157	0.018
ProPhoto RGB	široki	D50	0.7347	0.2653	0.1596	0.8404	0.0366	0.0001

#### 4.4. sRGB prostor boja

sRGB prostor boja je standardni RGB prostor koji su 1996. godine razvili Microsoft i Hewlett Packard za korištenje na monitorima i internetu. Raspon boja sRGB prostora manji je u uspoređivanju sa ostalim RGB prostorima.

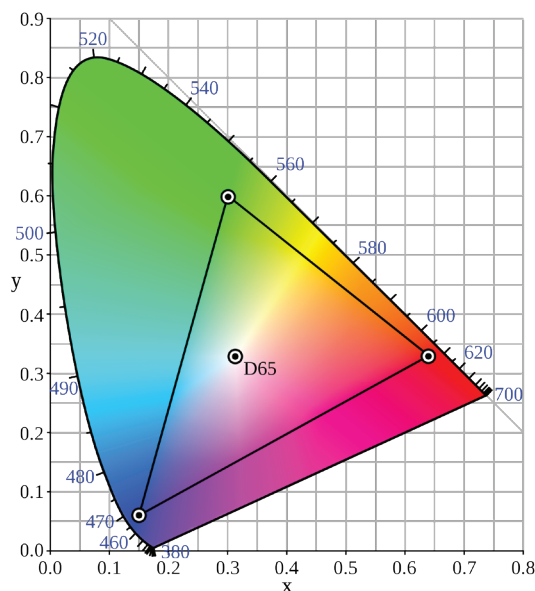
Primarne boje sRGB prostora u crvena zelena i plava sa kromatičnim koordinatama:

R:  $x = 0.64$ ,  $y = 0.33$ ,  $z = 0.03$ ;

G:  $x = 0.30$ ,  $y = 0.60$ ,  $z = 0.10$ ;

B:  $x = 0.15$ ,  $y = 0.06$ ,  $z = 0.79$ .

Bijela točka (CIE standardni *illuminat* D65):  $x = 0.3127$ ,  $y = 0.3290$ ,  $z = 0.3583$



Slika 22. sRGB prostor unutar CIE dijagrama kromatičnosti

Izvor: <http://tinyurl.com/nkn5edf>

#### 4.4.1. Transformacija XYZ tristimulusnih vrijednosti u sRGB vrijednosti

Prije transformacije XYZ trebaju se normalizirati na raspon 0.0 - 1.0 a zatim se preko matrice izračunaju linearne  $R_L G_L B_L$  vrijednosti: [6]

$$X_N = \frac{76.04 (X_{abs} - 0.1901)}{80 (76.04 - 0.1901)} = 0.0125313 (X_{abs} - 0.1901) \quad (4.4.1.1)$$

$$Y_N = \frac{Y_{abs} - 0.2}{80 - 0.2} = 0.0125313 (Y_{abs} - 0.2) \quad (4.4.1.2)$$

$$Z_N = \frac{87.12 (Z_{abs} - 0.2178)}{80 (87.12 - 0.2178)} = 0.0125313 (Z_{abs} - 0.2178) \quad (4.4.1.3)$$

$$\begin{bmatrix} R_L \\ G_L \\ B_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2406255 & -1.537208 & -0.4986286 \\ -0.9689307 & 1.8757561 & 0.0415175 \\ 0.0557101 & -0.2040211 & 1.0569959 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_N \\ Y_N \\ Z_N \end{bmatrix} \quad (4.4.1.4)$$

Ako su vrijednosti  $R_L G_L B_L \leq 0.0031308$  onda su RGB vrijednosti:

$$R = 12.92 R_L \quad (4.4.1.5)$$

$$G = 12.92 G_L \quad (4.4.1.6)$$

$$B = 12.92 B_L \quad (4.4.1.7)$$

Ako su vrijednosti  $R_L G_L B_L > 0.0031308$  onda su RGB vrijednosti:

$$R = 1.055 R_L^{(1/2.4)} - 0.055 \quad (4.4.1.8)$$

$$G = 1.055 G_L^{(1/2.4)} - 0.055 \quad (4.4.1.9)$$

$$B = 1.055 B_L^{(1/2.4)} - 0.055 \quad (4.4.1.10)$$

Dobivene vrijednosti imaju raspon 0 - 1. Da bi se dobile vrijednosti raspona 0 - 255 dobivene vrijednosti trebaju se pomnožiti sa 255 ( $2^8 - 1$ ).

## 4.5 AdobeRGB98 prostor boja

AdobeRGB98 prostor boja razvila je tvrtka Adobe Systems Inc. 1998. godine za upotrebu u programu Adobe Photoshop. Ovaj prostor boja obuhvaća gotovo sve boje koje se mogu reproducirati u CMYK prostoru printera. AdobeRGB98 prostor ima veći raspon boja od sRGB prostora, pogotovo u području zeleno-plavih boja.

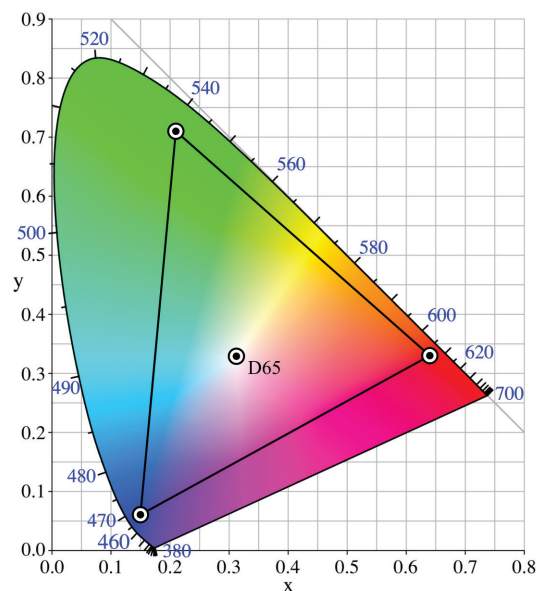
Primarne boje AdobeRGB98 prostora boja su crvena, zelena i plava sa kromatičnim koordinatama:

R:  $x = 0.6400, y = 0.3300$

G:  $x = 0.2100, y = 0.7100$

B:  $x = 0.1500, y = 0.0600$

Bijela točka (CIE standardni *illuminat* D65):  $x = 0.3127, y = 0.3290$



Slika 23. AdobeRGB98 prostor boja unutar CIE dijagrama kromatičnosti

<http://tinyurl.com/qa47cnv>

#### 4.5.1. Transformacija XYZ tristimulusnih vrijednosti u AdobeRGB98 vrijednosti

XYZ vrijednosti normaliziraju se prema formuli: [7]

$$X = \frac{(X_a - X_K) X_W}{(X_W - X_K) Y_W} \quad (4.5.1.1)$$

$$Y = \frac{(Y_a - Y_K)}{(Y_W - Y_K)} \quad (4.5.1.2)$$

$$Z = \frac{(Z_a - Z_K) Z_W}{(Z_W - Z_K) Y_W} \quad (4.5.1.3)$$

$X_a, Y_a, Z_a$  su vrijednosti za apsolutnu svjetlinu

$X_w, Y_w, Z_w$  su vrijednosti za bijelu točku

$X_K, Y_K, Z_K$  su vrijednosti za crnu točku

Transformacija normaliziranih XYZ vrijednosti vrši se preko matrice:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.04159 & -0.56501 & -0.34473 \\ -0.96924 & 1.87597 & 0.04156 \\ 0.01344 & -0.11836 & 1.01517 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4.5.1.4)$$

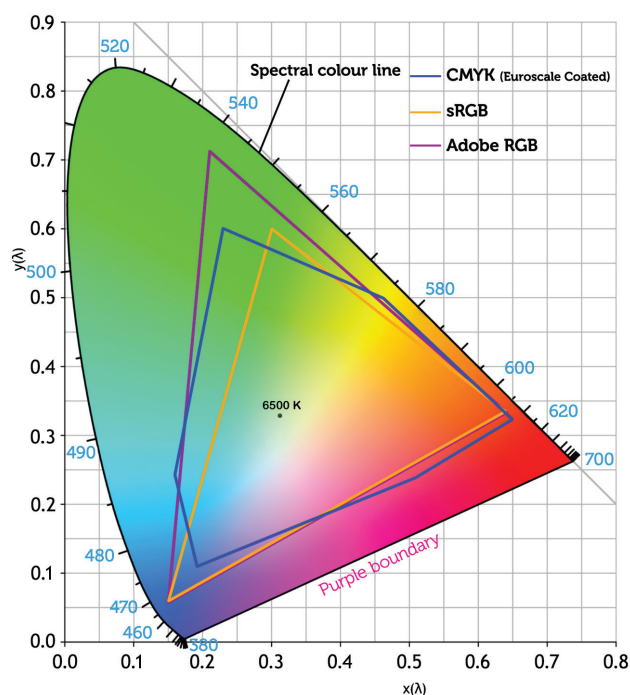
## 5. CMYK PROSTOR BOJA

CMYK prostor boja temelji se na suptraktivnom CMYK modelu. Taj prostor za reprodukciju boja koriste tiskarski strojevi i printeri. Kratica CMYK označava četiri primarne boje koje se koriste u tisku: cijan (C), magenta (M), žuta (Y) te crna (K) boja koja se koristi da bi se na otisku povećao kontrast, proširo raspon boja te smanjila potrošnja tzv. šarenih boja.

CMYK vrijednosti označavaju se postocima u rasponu 0 - 100% koji označavaju postotak pojedine komponente koja se koristi da bi se dobio osjet određene boje.

Npr. vrijednosti  $C = 100\%$ ,  $M = 0\%$ ,  $Y = 0\%$ ,  $K = 0\%$  govore da će se otisnuti čista cijan boja - cijan boja najveće moguće zasićenosti.

CMYK prostor boja manji je od RGB prostora što znači da tiskarski stroj ne može reproducirati sve boje koje može prikazati monitor. Za konverziju boja iz RGB u CMYK prostor koristi se sustav upravljanja bojom.



Slika 24. Usporedba CMYK i RGB prostora boja unutar CIE dijagrama kromatičnosti

Izvor: <http://tinyurl.com/ptf6p49>

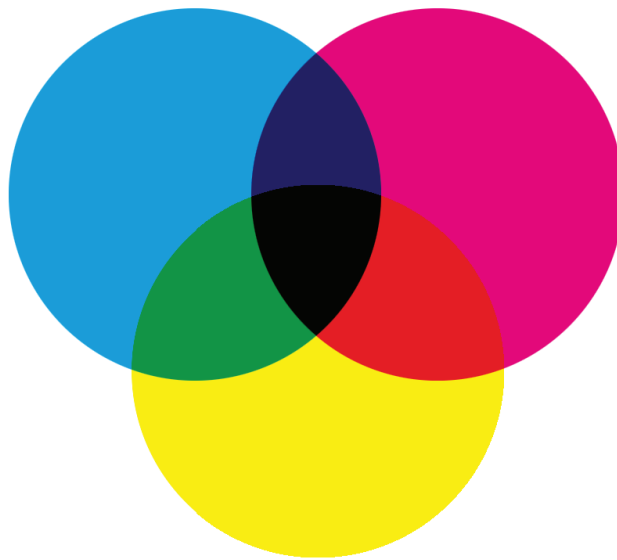
## 5.1. Suptraktivna sinteza

Suptraktivna sinteza (suptraktivno miješanje boja) temelji se na oduzimanju valnih duljina od bijele svjetlosti, odnosno na apsorpciji svjetlosti. Različitim stupnjem apsorpcije pojedinih valnih duljina moguće je ostvariti širok raspon različitih boja. Oduzimanje valnih duljina vrši se pomoću filtera.

Cijan (plavozeleni) filter apsorbira crveni dio spektra.

Magenta filter apsorbira zeleni dio spektra.

Žuti filter apsorbira plavi dio spektra.



Slika 25. Princip suptraktivne sinteze



## 6. SUSTAV UPRAVLJANJA BOJOM I PROSTORI BOJA

### 6.1. Sustav upravljanja bojom

Sustav upravljanja bojom (*color management system*) je način kontroliranja boje u digitalnom okruženju pomoću softwarea, hardwarea i sistemskih procedura. [8]

Internacionalni konzorcij za boje (*The International Color Consortium*) osnovalo je osam tvrtki 1993. godine sa ciljem stvaranja i standardizacije sustava za upravljanje bojom.

Izraz “sustav upravljanja bojom” u pravilu se koristi za sustave koji koriste međunarodne CIE sustave mjerenja boja. [9]

Sustav transformira podatke o boji iz jednog uređaja u drugi i time omogućava konzistentnost boje (ton, zasićenje, svjetlina) u cijelom radnom toku. Korištenje standardiziranog sustava za upravljanje bojom nužno je iz razloga što razni uređaji (digitalna kamera, skener, monitor, printer, tiskarski stroj) drugačije prikazuju boju. Prikaz boje na određenom uređaju ovisi o mogućnosti prikaza raspona boje (gamut). Raspon boja uređaja predstavlja dio prostora boja koji uređaj može prikazati. Neke boje prikazane na monitoru tiskarski stroj ne može reproducirati, dok neke boje koje tiskarski stroj može reproducirati ne mogu se prikazati na monitoru.

Ljudsko oko može raspoznati veći raspon boja nego što ga može prikazati bilo koji uređaj.

Savršeno usklađivanje boja na svim uređajima nije moguće ali sustav upravljanja bojom omogućava dobro usklađivanje boje reprodukcije s obzirom na boju originala.

Komponente sustava za upravljanje bojom su:

1. Referentni prostor boja (*Profile connection space, kratica PCS*)
2. Profili
3. Modul za upravljanje bojama (*color management module; color matching method; color manipulation model kratica CMM*)
4. Modeli za smještanje i usklađivanje boja (*rendering intents*)

## 6.1.2. Referentni prostor boja

Prostori boja mogu se podijeliti na dva osnovna tipa:

1. Prostor boja neovisan o uređaju: prostor boja u kojem će određeni parametri dati istu boju bez obzira koji se uređaj koristi za prikaz boje.

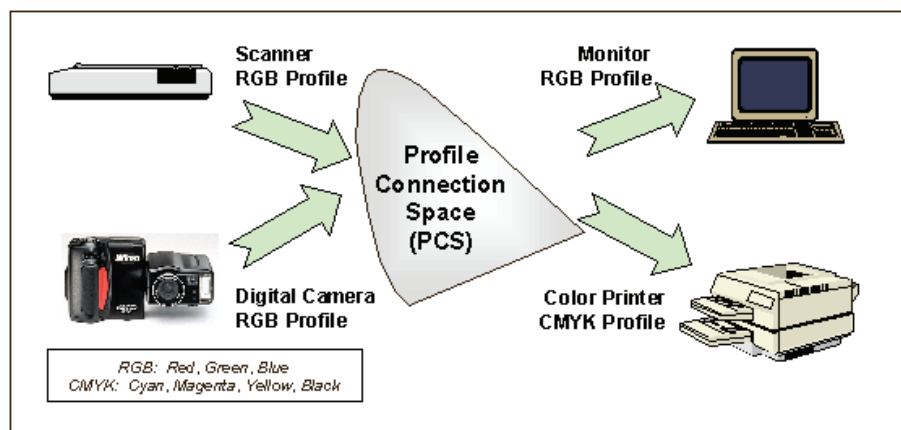
Primjer: CIE prostori boja: CIE XYZ, CIELAB, CIELUV

2. Prostor boja ovisan o uređaju: prostor u kojem prikazana boja osim o samim parametrima prostora boja ovisi i o specifikacijama uređaja koji se koriste za prikaz. Npr. boja definirana određenim setom parametara može se drugačije prikazivati na dva monitora iako su parametri isti. Taj problem se rješava korištenjem sustava za upravljanje bojom.

Primjer: RGB i CMYK prostori boja.

Referentni prostor boja (*PCS - Profile Connection Space*) je prostor boja neovisan o uređaju te služi kao poveznica između različitih uređaja i njihovih prostora boja. PCS se može opisati kao virtualna destinacija za ulazne vrijednosti i virtualni izvor za izlazne vrijednosti boje.

Većina sustava za upravljanje bojom kao referentni prostor koriste CIELAB prostor boja što je i definirano ISO standardom. CIELAB je vrlo velik prostor boja, sadrži sve boje koje možemo vidjeti. Prostori boja uređaja su mnogo manji što znači da je u CIELAB prostoru sadržano mnogo boja koje se ne mogu reproducirati.



Slika 26. Ilustracija referentnog prostora boja

<https://printcolormangement.files.wordpress.com/2012/09/pcs.gif>

### 6.1.3. ICC profili

Profil uređaja koristi se pri konverzaciji podataka o boji stvorenim u prostoru boja jednog uređaja u prostor boja drugog uređaja. ICC profil je datoteka koja povezuje prostor boja uređaja sa referentnim prostornom boja. Profil ugrađen u neku sliku omogućava prijenos te slike između različitih operativnih sustava i uređaja sa sigurnošću da će boje odgovarati bojama na originalnoj slici.

ICC specifikacija profila je danas međunarodni standard definiran ISO standardnom ISO 15076-1:2010. [10]

Profil daje značenje brojčanim RGB ili CMYK vrijednostima. RGB i CMYK prostori su ovisni o uređaju što znači da će njihove iste vrijednosti na različitim uređajima dati različitu boju. Profil ne mijenja te vrijednosti nego “govori” uređaju koju boju predstavlja taj set vrijednosti.

Profili mogu biti jednosmjerni i dvosmjerni ovisno o tome da li ih CMM konvertira iz prostora uređaja u PCS i iz PCS-a u prostor uređaja.

Profili se mogu podijeliti u tri kategorije:

1. ulazne profili (*input profile*) - za ulazne uređaje: digitalne kamere, skenere. Ulazni profili su jednosmjerni profili. Ulazni profili koriste RGB prostore boja.

2. sustavne profile (*display profile*) - CRT i LCD monitori. Sustavni profili su dvosmjerni profili. Sustavni profili koriste RGB prostore boja.

3. izlazni profili (*output profile*) - za izlazne uređaje: tiskarski strojevi, printeri. Izlazni profili su dvosmjerni profili jer se koriste i za prikaz već konvertiranih datoteka u izlazni prostor boja na monitoru. Izlazni profili koriste CMYK prostor boja.

Profili se koriste u parovima: izvorni (*source*) i odredišni (*destination*) profil. Tim izrazima označavaju se privremene uloge profila. Kod konverzije boja između digitalne kamere i monitora, profil digitalne kamere je izvorni profil a profil monitora je odredišni profil. U daljnoj konverziji između monitora i printera, profil monitora je izvorni a profil printera odredišni profil.

ICC profili podržavaju više prostora boja - prostore boje bazirane na CIEXYZ prostoru boja, RGB i CMYK prostore boja.

#### 6.1.4. Modul za upravljanje bojama

Modul za upravljanje bojom (CMM) je softvare koji vrši matematičke izračune potrebne za konvertiranje vrijednosti boje iz izvornog profila, preko referentnog prostora boja, u određeni profil koristeći podatke o boji iz tih profila. Profil ne sadrži sve definicije referentnog prostora boja za sve moguće kombinacije jer bi tada datoteka profila zauzimala mnogo memorije. Modul radi na principu interpolacije - konstruira nove podatke unutar raspona poznatih podataka. Kako će CMM vršiti potrebne matematičke izračune ovisi o postavkama modela za smještanje i usklađivanje boja (rendering intents).

#### 6.1.5. Modeli za smještanje i usklađivanje boja (rendering intents)

Uređaji koji se koriste za reprodukciju boja imaju određeni opseg (gamut) boja koji mogu reproducirati. Ulazni uređaji obično imaju veći gamut od izlaznih uređaja. Boje koje se ne mogu reproducirati na određenom izlaznom uređaju smatraju se 'izvan gamuta' i potrebno ih je zamjeniti nekim drugim bojama. Ta metoda naziva se mapiranje gamuta. [4]

ICC je definirao četiri načina mapiranja gamuta na koji se mogu uskladiti boje:

1. Perceptualno usklađivanje (*Perceptual Rendering Intent*) - sve boje prostora ulaznog uređaja ravnomjerno se komprimiraju da bi stale u prostor boja izlaznog uređaja.

2. Relativno kolorimetrijsko usklađivanje (*Relative Colorimetric Rendering Intent*) - mijenjaju se samo boje izvan gamuta (tzv. *clipping*), boje unutar gamuta ulaznog i izlaznog uređaja ostaju nepromjenjene. Boje koje su izvan gamuta izlaznog uređaja, mapiraju se u najbliže boje iste svjetline a različitog zasićenja.

3. Apsolutno kolorimetrijsko usklađivanje (*Absolute Colorimetric Rendering Intent*) - sve boje unutar gamuta ulaznog i izlaznog uređaja ostaju nepromjenjene. Boje koje su izvan gamuta izlaznog uređaja, mapiraju se u najbliže boje različitog zasićenja.

4. Saturacijsko usklađivanje (*Saturation Rendering Intent*) - boje izvan gamuta izlaznog uređaja mapiraju se u najbliže odgovarajuće boje istog zasićenja, svjetlina i ton mogu se promjeniti.

## 7. ZAKLJUČAK

Želja da se boje koje ljudsko oko može raspoznati objektivno i što preciznije brojčano prikažu dovela je do postojanja većeg broja prostora boja od kojih su neki od osnovnijih obrađeni u ovom završnom radu. Unatoč tome ne postoji idealno uniforman prostor boja. Oni prostori koji danas nazivamo uniformnima to su samo približno (CIELAB, CIELUV). Udaljenost između dvije boje u prostoru približno odgovara percipiranoj udaljenosti.

Brojčano kasificiranje razlike između dvije boje, npr. standarda i reproducirane boje je razvojem formula za određivanje ukupne razlike između boja postalo sve preciznije te danas ima veliku primjenu u grafičkoj industriji.

I na kraju, danas prostori boja imaju veliku primjenu u digitalnom svijetu - digitalne kamere, računala, mobilni telefoni, printeri, tiskarski strojevi, svaki sa svojim prostorom boja, razmjenjuju između sebe slikovne datoteke sa velikom sigurnošću da reproducirana boja odgovara originalnoj boji što omogućava prostor boja koji povezuje sve te informacije - referentni prostor boja kao dio sustava upravljanja bojom.

## 8. LITERATURA

1. Kuehni Rolf G., (2003). *Color space and its divisions : color order from antiquity to the present*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
2. \*\*\* <http://www.cie.co.at/> datum pristupa: 4.08.2015
3. Sean F. Johnston S.F., (2001). *A History of Light and Colour Measurement - Science in the Shadows*, Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia
4. Knešaurek N., Predavanja iz kolegija Kvalitativne metode ispitivanja reprodukcije boja dostupna na: [http://fotoproceni.grf.unizg.hr/media/Predavanja%20-%20Kvalitativne%20metode%20ispitivanja%20reprodukcije%20boja\\_2014.pdf](http://fotoproceni.grf.unizg.hr/media/Predavanja%20-%20Kvalitativne%20metode%20ispitivanja%20reprodukcije%20boja_2014.pdf)
5. Schanda J., (2007). *Colorimetry: understanding the CIE system*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
6. \*\*\* <http://www.color.org/chardata/rgb/sRGB.pdf> datum pristupa 20.08.2015
7. \*\*\* <http://www.adobe.com/digitalimag/pdfs/AdobeRGB1998.pdf> datum pristupa 20.08.2015
8. Sharma A., (2004). *Understanding Color Management*, Delmar Thomson Publishing, Clinton Park NY
9. Fraser B., Murphy C., Bunting F., (2005). *Real world color management, second edition - industrial strength production techniques*, Peachpit Press, Berkeley CA
10. \*\*\* <http://www.color.org/index.xalter> 4.08.2015
11. Allen E., Triantaphillidou S. (2011). *The manual of photography 10th edition*, Elsevier Ltd.
12. Kipphan H., (2001). *Handbook of Print Media*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg