

Određivanje boje

COLORIMETRIC DETERMINATION

Prof. dr **Mladen Biffl**
Šumarski fakultet — Zagreb

UDK 630*812.11: 630*829.1
Pregledni rad

Prispjelo: 11. travnja 1985.
Prihvaćeno: 24. srpnja 1985.

S a ž e t a k

Ukratko su izneseni osnovni pojmovi potrebni za razumijevanje mjerenja boje. Objasnjene su pojmovi tona, svjetline i zasićenosti boje, kromatičnost boje i aditivno miješanje boja. Iznesene su osnovne definicije i veličine sustava boja, prikazani su sustavi RGB, CIE 1931, CIE-UCS 1960, CIE 1976 $L^*a^*b^*$ i CIE 1976 $L^*u^*v^*$. U vezi sa sustavima boja obrađene su i osnove određivanja razlike boja.

Ključne riječi: mjerenje boja — dijagrami kromatičnosti — sustavi boja — razlika boja — određivanje razlike boja.

S u m m a r y

A brief abstract of basic concepts necessary for colour test comprehension has been made. The conception of hue, value, colour chromaticity and additive colour mixing have been explained. Fundamental colour system definitions and values have been presented; system RGB, CIE 1931, CIE-UCS 1960, CIE 1976 $L^*a^*b^*$ and CIE 1976 $L^*u^*v^*$ have been put forward. In relation to the colour systems the basic ideas on colour difference have been elaborated.

Key words: colour — colour test — chromaticity diagrams — colour systems — colour difference — colour difference determination. (J. J.)

1. UVOD

U praksi se često javlja potreba određivanja boje, jer se cijeli niz proizvoda koji se upotrebljavaju u svakodnevnom životu ocjenjuje prema boji, a neki i upotrebljavaju upravo zbog određene boje.

Određivanje boje dolazi do izražaja i u drvnoj industriji, gdje se tom faktoru poklanja premalo pažnje. To se odnosi kako na prirodnu boju drva, tako i na površinski obrađeno drvo, tj. na bojenje, lakiranje, močenje, pigmentno bijeljenje, izbjeljivanje i dr. Zato je važno da se neka boja definira jednoznačno, jer to omogućuje njezino određenost i omogućuje eventualnu reprodukciju. Pri tom treba razlikovati pojam boje, tj. psihički doživljaj izazvan fizičkim uzrokom — stimulusom i bojilo, tj. tvar pomoću koje se nešto boji, kojom se predmetima daje određena boja. Ta se dva pojma u životu i praksi često ne razlikuju, pa se za bojilo često upotrebljava riječ boja.

U ovom radu govori se o boji i mjerenju boja u praksi.

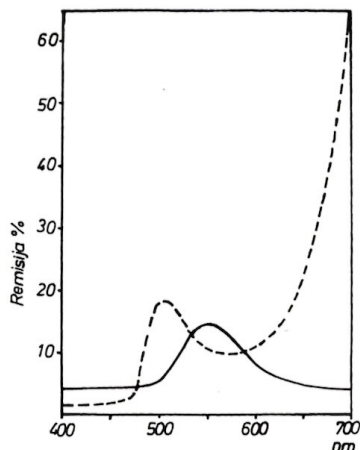
U nas se na toj problematici u drvnoj industriji radilo vrlo malo. Ipak na tom se području ističe rad B. Ljuljke [8].

2. OSNOVNI POJAM MJERENJA BOJE

2.1. *Općenito o boji*

Osjet boje registrira oko, a uzrokuje ga elektromagnetsko zračenje valnih duljina između 380 i 760 nm, koje se u odnosu na osjet boje naziva stimulus. Stimulus je određen ukupnom količinom energije koju oko prima u jedinici vremena (tokom zračenja) i njenom spektralnom raspodjelom, tzv. stimulusnom funkcijom. Spektralna raspodjela stimulusa određuje se uobičajenim spektrofotometrijskim postupcima. Tim se postupcima za obojena neprozirna tijela može odrediti spektralna reflektancija. Za obojeno prozirno tijelo određuje se spektralna transmitancija. Budući da samo metalne površine potpuno reflektiraju svjetlo, to je za druga čvrsta tijela, u kojih se svjetlo djelomično i asorbira, ispravnije govoriti o remitiranju svjetla i određivanju spektralne remitancije. Spektralna remitancija, reflektancija i transmitancija najčešće se izražavaju krivuljom, koja na apscisi ima vrijednosti valnih dužina svjetla (nm), a na ordinati (%) remitanciju, odnosno reflektanciju ili transmitanciju.

Spektralna raspodjela stimulusa dobije se množenjem spektralne reflektancije (transmitancije) sa spektralnom raspodjelom upadnog svjetla. Izračunavanjem za pojedine valne duljine dobije se krivulja stimulusne funkcije (slika 1).



Slika 1. Krivulja remitancije dvaju obojenih tijela (uz izvor svjetla C) koja imaju istu boju

Površina ispod krivulje predstavlja ukupni tok zračenja stimulusa za reflektirano svjetlo. Ukupni tok zračenja (Φ) dan je izrazom:

$$\Phi = \int_{380}^{700} E_0(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

gdje je $E_0(\lambda)$ tok zračenja upadnog svjetla za valnu duljinu λ , a $\rho(\lambda)$ spektralna reflektancija za valnu duljinu λ .

Iz usporedbe različitih bojenih osjeta proizlazi da među njima mogu postojati razlike samo u svjetlini, bojenom tonu i zasićenosti.

Svjetlina boje. Ljudsko oko ne registrira kao jednake iste količine energije iz različitih dijelova spektra. Onaj dio od ukupnog toka zračenja koji izaziva vizuelni osjet svjetline zove se svjetlosni tok. Ljudsko oko ima maksimalni osjet pri 550 nm, tj. u zelenom području spektra, i ako se on uzme jediničnim, spektralna je ovisnost osjeta dana krivuljom luminoziteta.

Svjetlina obojene površine određena je tokom svjetla koja se s nje reflektira (remitira).

Svjetlina neke površine (Y) određena je ploštinom ispod krivulje spektralne raspodjele reflektiranog svjetlosnog toka, a ta je ploština dana izrazom:

$$Y = \int_{380}^{700} \bar{y}_\lambda \cdot E_0(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

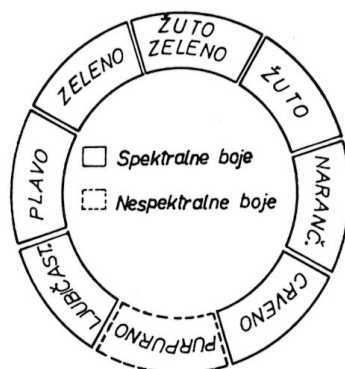
gdje je

\bar{y}_λ ordinata krivulje luminoziteta za valnu duljinu λ

$E_0(\lambda)$ tok zračenja upadnog svjetla za valnu duljinu λ

$\rho(\lambda)$ spektralna reflektancija za valnu duljinu λ

Bojeni ton je doživljaj promatrača uzrokovan svjetlom iz različitih dijelova spektra. Najkraće valne duljine vidljivog svjetla (oko 400 nm) ljudsko oko osjeća kao ljubičasti ton, a glavni tonovi prema većim valnim duljinama su plavi, zeleni, žuti i crveni. Te su boje uzrokovane monokromatskim spektralnim zračenjima i zovu se spektralne boje.



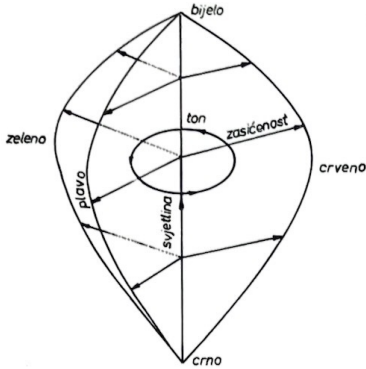
Slika 2. Krug bojenih tonova

Postoje i nespektralne boje, tzv. purpurne boje. Te boje opaža promatrač ako istovremeno opaža svjetlo s oba kraja spektra (ljubičasto i crveno). S purpurnim se bojama zatvara krug bojenih tonova (slika 2).

Zajedničkim se imenom spektralne i nespektralne boje zovu kromatske boje (za razliku od akromatskih boja — vidi kasnije).

Ukoliko u oko promatrača dolaze istovremeno zrake različitih valnih duljina, u određenim omjerima, može se dobiti cijeli niz različitih novih tonova.

Zasićenost boje ili čistoća boje određena je širinom spektralne krivulje. Što je spektralna krivulja uža, boja je zasićenija, a što je šira, boja je manje zasićena. Boje najveće zasićenosti su, dakle, monokromatske boje. Zasićenost se smanjuje i istovremenim promatranjem dviju boja. Zasićenost je to manja što su boje u krugu boja udaljenije. Postoje i takvi parovi boja čijim se miješanjem ne mijenja bojeni ton, nego čine nastalu boju samo manje zasićenom. Ti se parovi boja zovu komplementarnim (npr. plava i žuta, crvena i plavozelena), a posljedica miješanja tih boja u određenom omjeru je osjet potpunog odsustva zasićenosti bojom. Dobiju se boje bez bojenog tona, tj. bijela, siva ili crna. To su akromatske boje. Zasićenost akromatskih boja je nula, pa su one određene samo svojom svjetlinom. Pri reflektiranom svjetlu, akromatska boja sa svjetlinom nula zove se crna, a s najvećom svjetlinom bijela. Zasićenost neke boje može se osjetiti i odrediti samo njezinim uspoređivanjem s nekom drugom bojom.



Slika 3. Prikaz boja obojenih površina pomoću jednog trodimenzionalnog tijela

Budući su sve boje definirane tonom, svjetlinom i zasićenošću, to se svaka boja može geometrijski prikazati tim koordinatama unutar određenog tijela. Takvo jedno tijelo za obojene površine prikazano je na slici 3.

2.2. Mjerenje boja

Prilikom mjerenja boje ne mjeri se osjet, nego se uspoređuju stimuli ili određuje njihova spektralna raspodjela. Dvije boje, koje promatrač doživljava kao jednake, ne moraju imati iste stimulusne funkcije. Takve se boje zovu uvjetno jednake (metamerne), slika 1. U praksi se upravo zbog toga razloga radi s bojama kao psihičkim doživljajima, bez obzira na njihov spektralni sastav. Razumljivo, to ne može isključiti i mjerenje spektralnih karakteristika boje, koje su mjerljiva objektivna stvarnost. Određivanjem psihofizičkih parametara za osjete boja bavi se bojena metrika. Za svaku boju treba dakle dati i njezine karakteristične parametre. Već je spomenuto da su tri vrijednosti bitne za razlikovanje boja, to su: svjetlina, ton i zasićenost.

Određivanje osjeta boje praktički se svodi na brojčano određivanje tona, zasićenosti i svjetline boje. Pri tom se ne smije zaboraviti da svaki čovjek ima na neki bojeni sadržaj svoj osjet boje. Za određivanje boje postoje po E. Schrödingeru dva pristupa mjerenju: niža i viša metrika boje. Niža se metrika temelji isključivo na uspoređivanju jednakosti boja, tj. određivanju tona, zasićenosti i svjetline boje. Viša metrika boje bavi se uzajamnim odnosima među bojama: vrijednostima praga razlike boja, zatim uspoređivanjem tona, zasićenosti i svjetline između katkada različitih boja, mjerenjem razlike boje i sl.

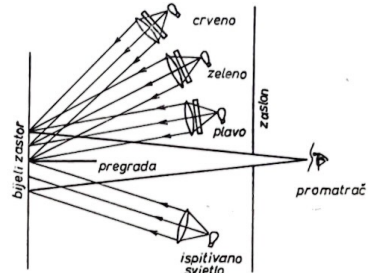
Princip psihofizičkog mjerenja boja osniva se na tri Grassmann-ova zakona.

Prvi zakon govori da se trima pogodno izabranim osnovnim stimulusima može imitirati bojeni osjet izazvan bilo kojim bojenim stimulusom, te da se svaki bojeni stimulus može imitirati samo jednom kombinacijom određenih osnovnih stimulusa. To znači da je svaku boju moguće okarakterizirati s tri broja, koji označuju u kojem omje-

ru treba aditivno pomiješati osnovne stimuluse da bi se dobila određena boja.

Po drugom zakonu, ako dva različita bojena stimulusa daju isti osjet boje, onda taj osjet ostaje jednak i kad se intenzitet zračenja obaju stimulusa, bez promjene spektralnog sastava, u istom omjeru promijeni. To znači da su kromatičnost boje (ton i zasićenost) i svjetlina međusobno nezavisni.

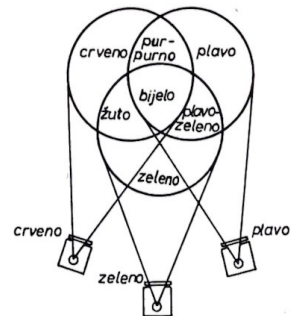
Treći zakon kaže da se dva stimulusa različitog spektralnog sustava, koja daju isti osjet boje, vladaju jednako i pri miješanju s nekim trećim stimulusom. Taj je zakon temelj moderne kolorimetrije, jer je po njemu bitan osjet boje, a ne njezin spektralni sastav.



Slika 4. Princip tristimulusnog kolorimetra

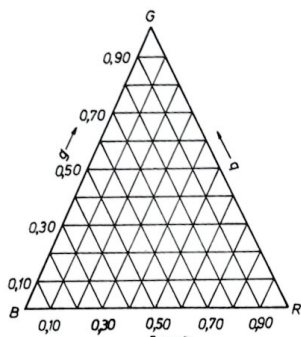
Dakle, bojeni ton i zasićenost (kromatičnost boje) može se dobiti određivanjem omjera triju osnovnih stimulusa pomoću tristimulusnog kolorimetra. Princip tristimulusnog kolorimetra prikazuje slika 4. Jedna polovina vidnog polja je osvijetljena snopom boje koja se određuje, a na drugu se polovinu projiciraju tri snopa svjetla osnovnih boja: crvene, modre i zelene.

Projekcijom triju snopova svjetla osnovnih boja dolazi do aditivnog miješanja boja, koje je prikazano na slici 5.



Slika 5. Aditivno miješanje boja

Promjenom fluksova snopova svjetla osnovnih boja može se dobiti određena boja, a njihove se relativne vrijednosti izmjere. Vrijednosti koje se dobiju služe za izračunavanje koordinata koje se mogu zatim unijeti u trokutni dijagram kromatičnosti (slika 6).



Slika 6. Dijagram kromatičnosti ili Maxwellov (istostranični) trokut

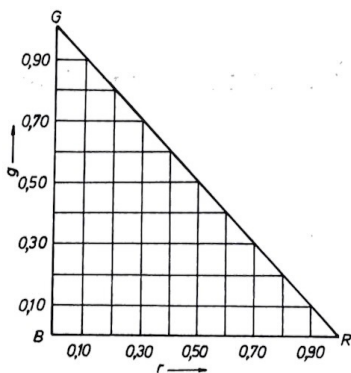
Vrijednosti fluksova snopova svjetla osnovnih boja, čijim se miješanjem dobiva zadana boja, odnosno izjednačenje vidnog polja kolorimetra, označene su za crveni stimulus s R, zeleni s G, a plavi s B.

Koordinate (r, g, b) izračunavaju se iz izraza:

$$r = \frac{R}{R + G + B}; \quad g = \frac{G}{R + G + B};$$

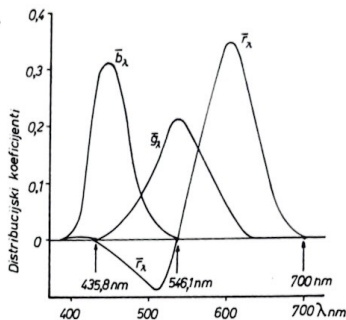
$$b = \frac{B}{R + G + B}.$$

Budući da je $r + g + b = 1$, to je u trokutni dijagram potrebno unijeti samo vrijednosti r i g. U tom slučaju dijagram je predstavljen pravokutnim trokutom, gdje su r i g apscisa i ordinata. (Slika 7).

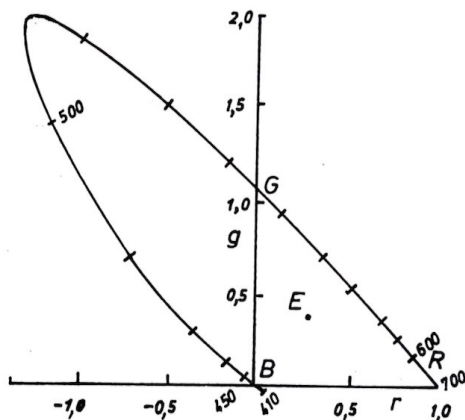


Slika 7. Dijagram kromatičnosti ili Maxwellov (pravokutni) trokut

Skale koordinata su takve da suma jednakih fluksova triju osnovnih stimulusa daje određenu akromatsku boju, npr. upotrijebljeno bijelo svjetlo. Da bi se dobilo bijelo svjetlo, potrebno je odrediti koje količine osnovnih boja treba zbrojiti. Izračunavanjem tzv. specifičnih koeficijenata boje za monokromatske boje cijelog spektra i njihovim grafičkim prikazom dobivaju se tzv. krivulje miješanja. Te krivulje prikazuje slika 8.

Slika 8. Krivulje miješanja za izoenergetski spektar za standardnog promatrača (CIE* 1931), koje su određene za definirani sustav RGB ($\lambda_R = 700$ nm, $\lambda_G = 546,1$ nm, $\lambda_B = 435,8$ nm)

U RGB sustavu se veći dio spektra i dio realnih boja nalazi izvan trokuta boja. Primjer je prikazan na slici 9.

Slika 9. Trokut boja RGB sustava ($\lambda_R = 700$ nm, $\lambda_G = 546,1$ nm, $\lambda_B = 435,8$ nm) sa spektrom boja i bijelom točkom E (za izoenergetsko svjetlo)

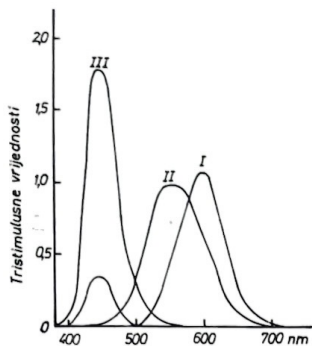
Zato je linearnom transformacijom konstruiran sustav u kojem se sve boje nalaze unutar trokuta boja. Osnovni stimulusi u tom sustavu imaju koordinate X, Y i Z.

Osnovne boje X, Y i Z ne postoje realno. Za osnovnu boju Y određena je takva krivulja miješanja koja se poklapa s krivuljom spektralne osjetljivosti oka.* Na taj se način svjetlina određuje samo jednom koordinatom boje (Y). Idealno bijeli uzorak ima svjetlinu $Y = 1$. Krivulje miješanja u sustavu XYZ prikazane su na slici 10.

To su standardne spektralne krivulje CIE** 1931. One definiraju spektralnu osjetljivost triju receptora oka CIE — standardnog promatrača s vidnim poljem 2°.

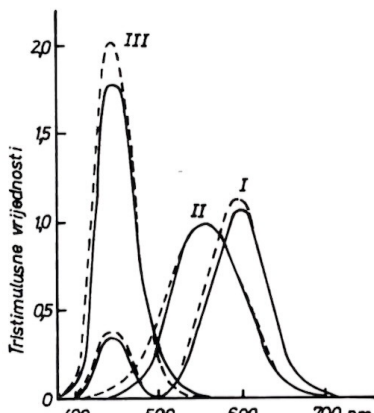
* Standardni promatrač ima maksimum osjeta svjetline pri ~ 550 nm, za luminaciju preko ~ 3 cdm⁻².

** CIE je kratica za Commission Internationale de l'Éclairage — Međunarodna komisija za rasvjetu.

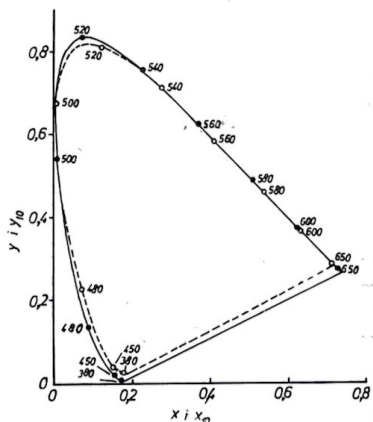


Slika 10. Krivulje miješanja CIE (1931) imaginarnih aditivnih primarnih boja: crvene (I), zelene (II) i plave (III)

U praksi je povoljnije da vidni kut bude veći od 2°. Zato je CIE predložila 1964. godine sustav u kojem je vidno polje standardnog promatrača 10° (»10°-promatrač«). Razlika standardnih krivulja mjerenja CIE za 2° i 10°, kao i odgovarajućih dijagrama kromatičnosti u nekim područjima nije neznatna (vidi slike 11 i 12), a ne postoji nikakva mogućnost preračunavanja iz jednog sustava u drugi.



Slika 11. Krivulja miješanja CIE imaginarnih primarnih boja za promatrača 2° (pune linije) i promatrača 10° (crtkane linije)



Slika 12. Dijagram kromatičnosti za sustav 2° (puna linija) i sustav 10° (crtkane linije)

Određene razlike postoje i za osnovne stimulse idealno bijelih uzoraka, ako se opažaju s 2° i 10°. To se vidi iz slijedeće tablice:

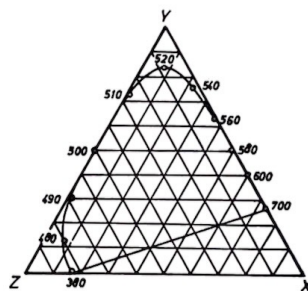
Izvor svjetla		2° promatrač	10° promatrač
C	X	98,07	97,28
	Y	100,00	100,00
	Z	118,22	116,14
D ₆₅	X	95,04	94,80
	Y	100,00	100,00
	Z	108,89	107,33

Koordinate kromatičnosti x, y, z u sustavu X, Y, Z imaju vrijednosti:

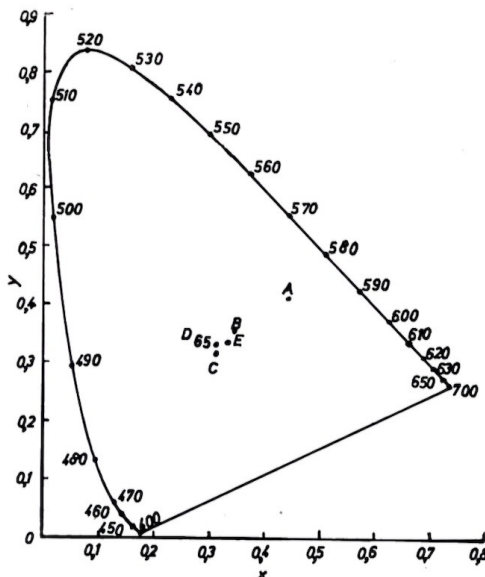
$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z};$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z};$$

Trokut boja na svojim vrhovima ima nerealne boje (X, Y, Z), a sadrži i boje spektra (slika 13).



Slika 13. Trokut boja sustava X, Y, Z



Slika 14. Projekcija trokuta boja sustava XYZ u ravninu xy

Projekcija tog trokuta boja u ravninu xy predstavlja dijagram kromatičnosti CIE 1931. To je standardni način prikazivanja boja (slika 14).

Na slici 14. su označene i točke kromatičnosti A, B, C, D₆₅ koje predstavljaju boje idealno bijelog uzorka osvijetljenog različitim izvorima svjetla (CIE ILL). Točka E je određena izoenergetskim svjetlom. Kromatičnost i temperatura boje nekih izvora svjetla su ove:

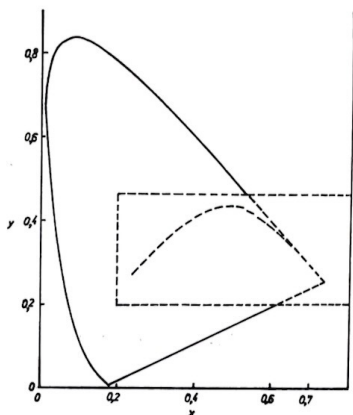
Izvor svjetla	X	Y	Temperatura boje (K)
CIE ILL A upadno svjetlo lampe	0,4476	0,4075	2850
CIE ILL B direktno sunčano svjetlo	0,3484	0,3516	4874
CIE ILL C srednje dnevno svjetlo	0,3101	0,3162	6774
CIE ILL D ₆₅ srednje dnevno svjetlo			
CIE ILL E izoenergetsko svjetlo	0,3333	0,3333	5400

Za kolorimetrijska mjerenja najčešće se koriste različite žarulje, obično u kombinaciji s raznovrsnim filterima. Porastom temperature izvora svjetla (crno tijelo) mijenjaju se i koordinate

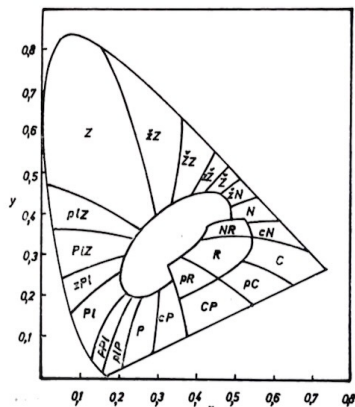
njegove boje u dijagramu kromatičnosti. To se najlakše može uočiti iz krivulje temperature boja ucrtane u dijagram kromatičnosti. Slike 15 i 16.

Kao bijelo svjetlo (akromatsko) u SAD se najčešće primjenjuje svjetlo B, a Z. Njemačkoj i Vel. Britaniji svjetlo C.

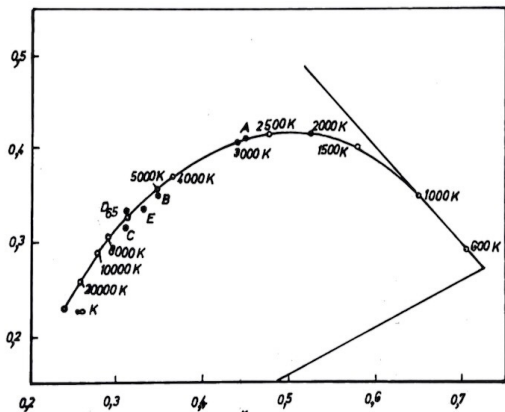
Boja se može definirati vrijednostima x, y, Y (valencija boje), a točke kromatičnosti za neko standardno osvijetljenje (A, B, C, D₆₅, E...) su referentne točke.



Slika 15. Krivulja temperatura boja u dijagramu kromatičnosti CIE 1931



Slika 17. Kellyeva karta boja za određivanje naziva boja svjetla



Slika 16. Krivulja temperatura boja (iz slike 15) s ucrtanim točkama A, B, C, D₆₅ i E.

Nazivi u dijagramu:

- pPl — purpurasto plavo
- Pl — plavo
- zPl — zelenkastoplavo
- PlZ — plavozeleno
- plz — plavkasto zeleno
- Z — zeleno
- žZ — žučkasto zeleno
- ŽZ — žutozeleno
- zŽ — zelenkasto žuto
- Ž — žuto
- žN — žučkasto narančasto
- N — narančasto
- NR — narančastoružičasto
- cN — crvenkastonarančasto
- R — ružičasto
- C — crveno
- pC — purpurastocrveno
- pR — purpurastoružičasto

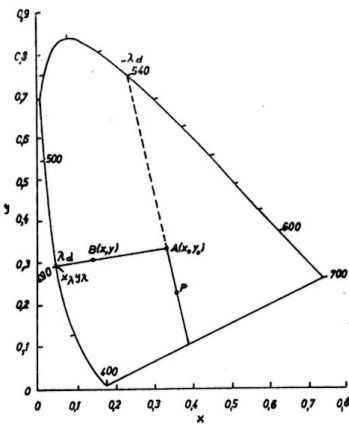
- CP — crvenopurpurno
- cP — crvenkastopurpurno
- P — purpurno
- pP — plavkastopurpurno

Za definiranje boja mogu se upotrijebiti i nazivi boja. Nazivi boja koji se upotrebljavaju za specifikaciju boja složeni su sustavno. Najviše naziva boja (preko 7000) navedeno je u knjizi A. Maerz i M. R. Paul: The Dictionary of Color, Mc Graw-Hill, New York, 1950.

K. L. Kelly je, koristeći ISCC—NBS* i Munsellov sustav te kolorimetrijske koordinate, razradio sustav koji omogućuje imenovanje boja na pet nivoa točnosti. U prva se dva nivoa boje mogu opisati nazivima, na trećem nivou se dodaju pridjevi, na četvrtom je identifikacija pomoću Munsellova atlasa — brojevima, dok se na petom nivou točnosti identificiraju spektrometrijski ili kolorimetrijski. Kellyev sustav boja je izrađen i za boje tijela i za obojena svjetla.

Samo poznavanje koordinata boje, bez ucrtavanja u dijagram kromatičnosti, ne daje neposrednu predodžbu o tonu i zasićenosti boje. Zato se pribjeglo brojčanom definiranju boje pomoću dominantne valne duljine i zasićenosti, tzv. Helmholtz-ovim mjernim brojevima.

Dominantna valna duljina (λ_d) odredi se tako da se u dijagram kromatičnosti (slika 18) ucrtaju koordinate odabrane bijele boje A (x_0, y_0) i određene boje B (x, y). Pravac povučen od točke A preko točke B siječe krivulju spektralnih boja u točki $x\lambda, y\lambda^{**}$, a ona odgovara valnoj duljini λ_d . To je dominantna valna duljina boje B i iznosi 490 nm. Za neku purpurnu boju (P) zraka iz točke A siječe liniju purpurnih boja, pa se u tom slučaju ne odredi λ_d nego valna duljina komplementarne boje, koja ima oznaku $-\lambda_d$ ili λ_k . Za boju P dominantna valna duljina je -540 nm.



Slika 18. Grafičko određivanje dominantne valne duljine i zasićenosti u dijagramu kromatičnosti

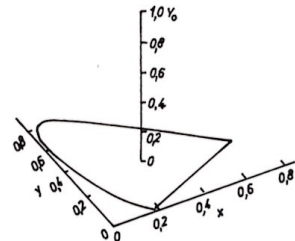
* ISCC — Inter—Society Colour Council
NBS — National Bureau of standards

** U ovom i narednim identičnim slučajevima λ je u funkciji indeksne oznake

Zasićenost boje (p) može se izračunati iz koordinata bijele boje (x_0, y_0), boje (x, y) i spektralne boje ($x\lambda, y\lambda$), prema relaciji:

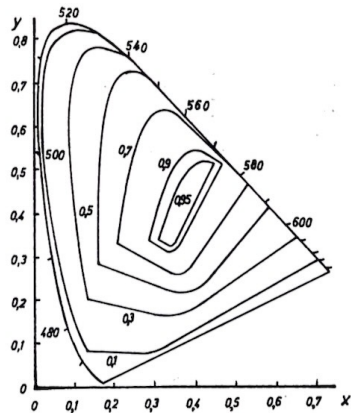
$$p = \frac{x - x_0}{x_\lambda - x_0} = \frac{y - y_0}{y_\lambda - y_0}$$

Boja je znači određena sa x, y, Y . Pomoću koordinata x, y, Y može se predstaviti prostorni koordinatni sustav. Apscisu i ordinatu takvog sustava predstavljaju vrijednosti x i y , tj. CIE 1931 dijagram kromatičnosti. Svjetlina boje je u tom sustavu prikazana aplikatom Y . Na pravcu Y , koji je okomit na ravninu x, y , nalaze se sve boje iste kromatičnosti, ali različite svjetline. Idealna bijela boja ima svjetlinu 1 (Y_0). Ona se nalazi na jediničnoj udaljenosti na pravcu Y , a iznad koordinata x, y izabranog izvora svjetla (A, B, C, D₆₅, E) (slika 19).



Slika 19. Trodimenzionalni prikaz mjernih brojeva boje (CIE)

Ostale boje imaju svjetlinu manju od 1, odnosno Y/Y_0 . Kolika je maksimalna svjetlina za boju određene kromatičnosti, najlakše se može predočiti odgovarajućom slikom (slika 20).



Slika 20. Maksimalne svjetline bojenog tijela (nefluorescentni materijal). Svjetlina ima vrijednosti od $Y = 0$ do $Y = 1,0$

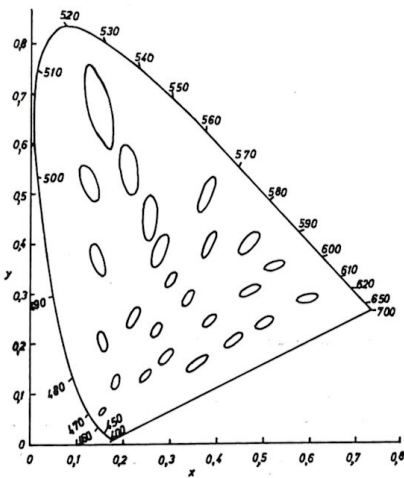
Izohipse predstavljaju boje jednake svjetline (Y/Y_0) te koje se zasićenosti boja mogu postići uz određenu svjetlinu. Iz dijagrama se vidi da plave boje mogu biti jako zasićene samo ako su tamne. I crvene boje mogu biti zasićene ako su tamne,

što više, crvene boje iznad svjetline 0,5 ne postoje. Žute i žutozelene boje mogu biti zasićene ako su svijetle.

2.3 Sustavi boja

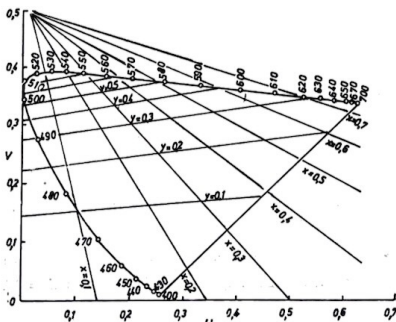
Sustav CIE 1931 je temelj kasnije predloženih sustava. Utvrđivanjem boja u CIE—1934 sustava došlo se do novih podataka i problema.

Također je bilo ispitano u kojim se granicama područja kromatičnosti boje može mijenjati, a da se promjena kromatičnosti ne može uočiti vizuelno. Takva su područja eksperimentalno utvrđena i imaju oblik elipsa, tzv. MacAdamove elipse, a prikazane su na slici 21 (elipse su deset puta povećane).



Slika 21. Subjektivno jednaka kromatičnost boja označena elipsama (10 × povećanim) u CIE 1931 dijagramu kromatičnosti. Rezultati za jednog promatrača (po MacAdamu).

U području jedne elipse ne postoji mogućnost razlikovanja kromatičnosti dviju boja. Te su elipse različitih veličina i orijentacija, što je nedostatak CIE—1934 sustava. Zbog taga je CIE



Slika 22. CIE—UCS 1960 dijagram kromatičnosti (u, v) u kojem je crtan koordinatni sustav CIE 1934 (x, y)

1960 preporučila takav sustav u kojem su elipse transformirane na povoljniji način, tj. da im je razlika u veličini i obliku manja.

2.31 CIE — UCS* 1960

U tom novom sustavu, CIE—1931 dijagram kromatičnosti projiciran je na odgovarajuću ravninu u prostoru tzv. projektivnim transformacijama, koje je otkrio MacAdam 1937. godine. Dijagram kromatičnosti CIE—UCS 1960 prikazuje slika 22.

U dijagramu na slici 22. ucrtane su i koordinate x i y. Nove koordinate dobivene navedenim transformacijama su »u« i »v«. U odnosu na koordinate x i y, nove koordinate dobiju se sljedećim računom:

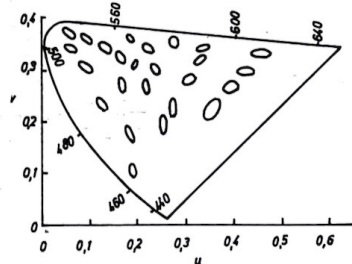
$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3};$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}$$

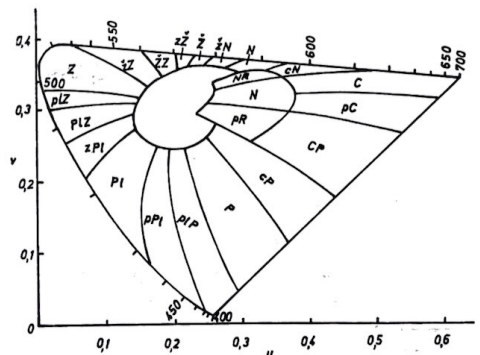
Povratne transformacije se izračunavaju po sljedećim formulama:

$$x = \frac{3u}{2u - 8v + 4};$$

$$y = \frac{2v}{2u - 8v + 4}$$



Slika 23. MacAdamove elipse u CIE—UCS 1960 sustavu

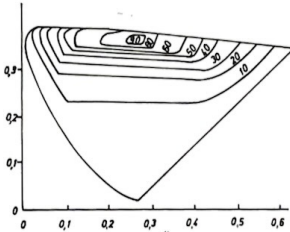


Slika 24. Raspored područja tonova u CIE—UCS 1960 dijagramu kromatičnosti za svjetla na tamnoj podlozi, središnji dio nije dobio ime (Kelly, 1943). Kratice naziva tonova kao uz sliku 17.

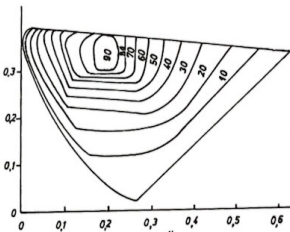
* UCS = Uniform Chromaticy Scale; 1960. je godina kada je službeno prihvaćena od CIE

Prednost toga novog dijagrama je u tome da je razlika u veličini elipsa mnogo manja kako se vidi na slici 23, a drugačiji je i raspored područja tonova boja kao što se vidi na slici 24.

Teorijske granice kromatičnosti za (nefluorescentne) boje pokazuju vrijednosti koje su dane na slikama 25. i 26.



Slika 25. Granice kromatičnosti u CIE—UCS 1960 sustavu za volframovu žarulju



Slika 26. Granice kromatičnosti u CIE—UCS 1960 sustavu za dnevno svjetlo

2.4 Određivanje razlike boja

Za industriju nije važno samo mjerenje boje nego, možda i više, mjerenje razlike boja. Nažalost, razlike boja na CIE—1931 dijagramu kromatičnosti ne mogu se mjeriti kao udaljenosti. Glavni je nedostatak tog dijagrama da nije ujednačen. Velika su područja u dijagramu zelena, dok je crveno, purpurno i plavo područje stisnuto na relativno male regije. Zbog daljih eksperimentalnih ispitivanja, koja mogu dovesti do razvoja savršenijeg koordiniranog sustava, CIE preporučuje privremenu upotrebu koordinatnog sustava koordinate u i v.

Prema koordinatama u i v definiraju se varijable U^* , V^* , W^* :

$$W^* = 25 Y^{1/3} - 17 \quad (1 \leq Y \leq 100)$$

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

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

gdje je

$$u = \frac{4 X}{X + 15 Y + 3 Z}$$

$$v = \frac{6 Y}{X + 15 Y + 3 Z}$$

Te su transformacije analogne onima koje su dane za u i v na x i y.

U navedenim izrazima koordinate u_0 , v_0 označuju vrijednosti izabranog definiranog akromatskog izvora svjetla. Te vrijednosti npr. iznose za izvor C: $u_0 = 0,20089$; $v_0 = 0,30726$

$$D: u_0 = 0,19779; v_0 = 0,31225$$

Razlika boja ($\Delta E_{CIE-UCS}$) može se odrediti na temelju promatranja jedne boje čije su koordinate $U_1^*V_1^*W_1^*$ i druge boje sa koordinatama $U_2^*V_2^*W_2^*$. Izračunavanje se vrši po jednadžbi:

$$\Delta E_{CIE-UCS} = [(U_2^* - U_1^*)^2 + (V_2^* - V_1^*)^2 + (W_2^* - W_1^*)^2]^{1/2} \quad (4)$$

odnosno

$$\Delta E_{CIE-UCS} = \sqrt{(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2} \quad (5)$$

Razlika boje izražena u CIE jedinicama je oko 4 do 5 puta veće od razlike koju može registrirati oko.

Osim navedenog postupka određivanja razlike boja postoje i drugi postupci, ali svaki ima svoju jedinicu razlike boje. Formule za razliku boje vrijeđaju samo za male razlike boje

2.41. CIE 1976 $L^*a^*b^*$ i CIE 1976 $L^*u^*v^*$

U literaturi od 1960—1975. je diskutirano o brojnim drugim predloženim formulama za izračunavanje razlike boja. Jedna od njih, ANLAB(40) bila je dobro prihvaćena, posebno u britanskoj tekstilnoj industriji. Mnogo kasnije, pojednostavnjena modifikacija te formule preporučena je po CIE. Ta modifikacija, nazvana CIE—1976 $L^*a^*b^*$ ili CIELAB (1976), preporučena je za opću upotrebu (tekstil, boje, plastika i dr.). Ta je formula preporučena prvenstveno za boje objekata.

Osim toga CIE je 1976 preporučila i formulu CIE $L^*u^*v^*$ ili CIELUV (1976). Ta formula je preporučena za označavanje razlike boja svjetala, u fotografiji, televiziji, grafičkom području, svuda gdje je od interesa kromatičnost boje.

CIE 1976 $L^*a^*b^*$ ima koordinate L, a i b. Izraz za razliku boja (ΔE^*_{ab}) je slijedeći:

$$\Delta E^*_{ab} = [(kL_2^* - kL_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2]^{1/2} \quad (6)$$

gdje sufixi 1 i 2 odgovaraju dvjema bojama; a k je konstanta koja obično ima vrijednost 1. Razlika boje je dakle

$$\Delta E^*_{ab} = [k(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (7)$$

gdje je

$$L^* = k_L (100 Y/Y_0)^{1/3} - k_0$$

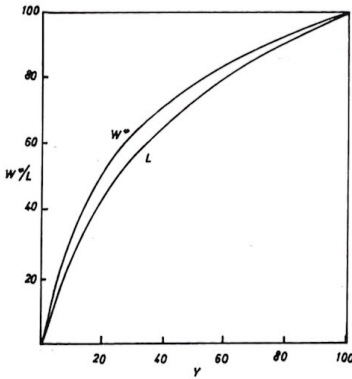
$$a^* = k_a (X/X_0)^{1/3} - k_a (Y/Y_0)^{1/3}$$

$$b^* = k_b (Y/Y_0)^{1/3} - k_b (Z/Z_0)^{1/3}$$

Konstante imaju obično vrijednosti: $k = 1$, $k_L = 25$, $k_0 = 16$, $k_a = 500$, $k_b = 200$, dok su X_0 , Y_0 , Z_0 koordinate boje (tristimulusne vrijednosti) upotrijebljenog izvora svjetla.

Razlog što je CIE 1976 $L^*a^*b^*$ prostor boja od velike važnosti je u tome što jednake udaljenosti između boja u svakom dijelu tog prostora boja predstavljaju približno jednake razlike opažanja. Dakle, on daje upotrebljivu mjeru za numeričko određivanje razlika boja.

Kao što se vidi iz navedenih jednadžbi, L je koordinata za svjetlinu i izračuna se iz standardne vrijednosti za Y. Kvalitativno, L odgovara koordinati W^* sustava CIE-UCS. Međutim, kvantitativno L i W^* koordinate svjetline pokazuju značajnu razliku za srednje vrijednosti od Y. Znači, kod jednakih standardnih vrijednosti za Y, rezultiraju različite vrijednosti za W^* i L, što se može vidjeti na slici 27.



Slika 27. Usporedba koordinata svjetline W^* i L

Koordinate a i b na sl. 28 tvore ravninu bojanih tonova, a u ishodištu koordinatnog sustava se nalaze nekromatske boje. To znači da vrijednosti za a i b mogu biti i pozitivne i negativne. Takav se sustav može prikazati prostorno. U tom su slučaju osi a i b apscisa i ordinata, a L aplikata (slika 28).



Slika 28. CIE 1976 $L^*a^*b^*$ sustav

Kad se dvije boje procijene koordinatama L, a, b, mogu se oduzimanjem odgovarajućih parova koordinata dobiti tri razlike ΔL , Δa i Δb . Prema tome da li su razlike prema zadanom uzorku po-

zitivne ili negativne, mogu se izvesti slijedeći kvalitativni zaključci:

Razlika	značenje razlike	
	pozitivne	negativne
ΔL	svjetlije	tamnije
Δa	crvenije	zelenije
Δb	žuče	plavije

Najveća korist tog sustava je u sposobnosti mjerenja ili vizualne procjene jednakih razlika boje u svjetlini, tonu i zasićenosti. ΔL jedinica je vizualno jednaka jednoj Δa jedinici, a ova je opet jednaka jednoj Δb jedinici. Ukupna razlika boja, ΔE_{ab}^* ili ukupna vizualna razlika boja izražena je već spomenutom formulom:

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (8)$$

Prema tome kakve su vrijednosti a i b, može se utisak boje zaključiti po slijedećoj shemi:

Polje (sl. 28)	Koordinate	Sadržaj boje
I.	+ a + b	žuta + crvena
II.	- a + b	zeleno + žuta
III.	- a - b	zeleno + plava
IV.	+ a - b	crvena + plava

Apsolutni iznos pronađenih razlika dopušta slijedeće procjene:

Razlika (ΔE_{ab}^*)	Procjena razlika boje
do 0,2	nije primjetljiva
0,2-0,5	vrlo slaba
0,5-1,5	slaba
1,5-3,0	jasna
3,0-6,0	vrlo jasna
60,0-12,0	jaka
preko 12,0	vrlo jaka

2.42 CIE 1976 $L^*u^*v^*$ sustav

Kako je već rečeno, taj je sustav pogodan za izračunavanje razlika boja u onim slučajevima kada je od važnosti razlika u kromatičnosti boja. Taj je sustav neznatno izmijenjen sustav CIE 1964.

Razlika boja je

$$\Delta E_{Luv}^* = [C (\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2}$$

Konstanta C ima obično vrijednost 1, a

$$L^* = 25 (100 Y/Y_0)^{1/3} - 16 \quad (1 \leq Y \leq 100)$$

$$u^* = 13 L^* (u - u_0)$$

$$v^* = 13 L^* (v - v_0)$$