Fizika svjetlosti, percepcija boje i sustav vrednovanja boje u tekstilu

Bošnjak, Ivona

Undergraduate thesis / Završni rad

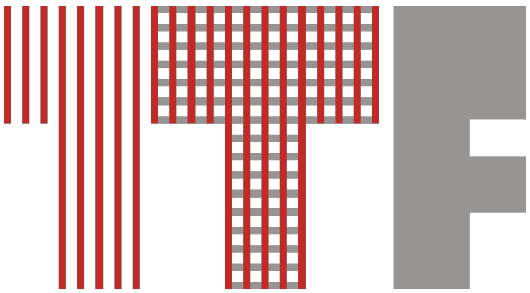
2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Textile Technology / Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:201:734702

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Textile Technology University of Zagreb - Digital Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

TEKSTILNO – TEHNOLOŠKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

Fizika svjetlosti, percepcija boje i sustav vrednovanja boje u tekstilu

IVONA BOŠNJAK

Zagreb,rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

TEKSTILNO – TEHNOLOŠKI FAKULTET

ZAVOD ZA TEMELJNE PRIRODNE I TEHNIČKE ZNANOSTI

Fizika svjetlosti, percepcija boje i sustav vrednovanja boje u tekstilu

ZAVRŠNI RAD

Mentor: doc. dr. sc. Karlo Lelas

Student: Ivona Bošnjak

Broj indeksa: 9991-IDTO

Zagreb,rujan 2018.

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Karlu Lelasu na uloženom vremenu, stručnim savjetima i podršci pruženoj tijekom izrade ovog Završnog rada.

Veliko hvala mojoj obitelji i prijateljima na razumijevanju i potpori tijekom dosadašnjeg školovanja.

ZAVRŠNI RAD

NAZIV STUDIJA: Tekstilno-tehnološki fakultet

NAZIV SMJERA: Industrijski dizajn tekstila i odjeće

BROJ INDEKSA: 9991-IDTO

STUDENT: Ivona Bošnjak

MENTOR: dr. sc. Karlo Lelas, docent

ČLANOVI POVJERENSTVA:

1. **dr. sc. prof. Željko Šomođi, presjednik komisije**
2. **doc. dr. sc. Karlo Lelas, član**
3. **dr. sc. izv. prof. Martinia Ira Glogar, član**
4. **dr. sc. prof. Goran Hudec, zamjenik člana**

SADRŽAJ ZAVRŠNOG RADA:

Stranica

Slika

Tablica:

Literaturne reference:

OBRANA RADA: Zagreb, rujan 2018.

SAŽETAK RADA

Teme ovog završnog rada su fizika svjetlosti, interakcija svjetlosti i oka, percepcija boje, matematičko vrednovanje boje i psihologija boje.

Ovaj završni rad daje kvalitativni uvod u složenu tematiku vrednovanja boje i prostora boje. Prostora boje ima jako puno, mi smo se zadržali na osnovnim prostorima boje, a to su CIE RGB 1931 i CIE XYZ prostori boje, te razmatrajući povijest njihovog nastanka i veze među njima, kvalitativno smo objasnili temeljne pojmove i principe kolorimetrije. Također, upoznali smo CIELAB prostor boje, koji se koristi u mnogim primjenama i u tekstilu, definirali smo njegovu vezu sa standardnim CIE XYZ prostorom i napisali računalni kod u MATLAB-u koji vrši pretvorbu iz CIE XYZ prostora u CIELAB prostor boje. Na kraju smo se kratko osvrnuli i na psihologiju boje.

SADRŽAJ

UVOD 1

1.FIZIKA SVJETLOSTI 2

2. VREDNOVANJE BOJE……...7

2.1.Vrednovanje boje i prostori boje 7

2.2. Doživljaj boje..... 7

2.3. Krivulje standardnog promatrača..... 12

2.4. Koordinate kromatičnosti 19

2.5. CIELAB sustav vrednovanja boje 23

2.6. Pretvorba CIEXYZ koordinata u CIELAB koordinate koristeći MATLAB

3. PSIHOLOGIJA BOJE…….…….....29

3.1. Psihologija boje kao terapija……...30

3.2 Terapija bojama…….…... 30

3.3 Psihologija i djelovanje pojedinih boja…….…...31

ZAKLJUČAK..... 34

LITERATURA 35

UVOD

Boja je psihofizički osjet koji nastaje kad svjetlost međudjeluje sa okom i preko oka sa živčanim sustavom. Boja je stvar čovjekove percepcije, nije svojstvo svjetlosti same po sebi, nego je psihički doživljaj izazvan fizičkim svojstvima (valna duljina, energija, frekvencija) svjetlosti koja "pada" na oko. Različiti ljudi istu svjetlost mogu doživjeti različito, odnosno vidjeti/doživjeti drukčiju boju iako je svjetlost koja dolazi do njih ista. Zbog toga se javlja potreba za definiranjem i numeričkim vrednovanjem boje da bi se moglo jasno i nedvosmisleno komunicirati npr. u industriji, tehnici, tekstilu, umjetnosti i slično. Znanost koja se bavi brojčanim vrednovanjem, tj. matematičkim opisom boje na osnovu mjerenja s mjernim uređajima, naziva se kolorimetrija.

Upravo zato što je boja stvar čovjekove percepcije, u kolorimetriji postoji mnogo dogovorenih standarda, konvencija i definicija. U tom mnoštvu pojmova se nije lako snaći, ali sve ih povezuju dobro definirani matematički formalizam, fizika svjetlosti, fiziologija oka i brižljivo izvršeni eksperimenti. U ovom završnom radu ćemo se upoznati sa temeljnim pojmovima fizike svjetlosti i osnovama procesa međudjelovanja svjetlosti i oka, koji vodi na doživljaj boje kod čovjeka. Opisat ćemo eksperimente koji su doveli do stvaranja standarda u kolorimetriji i upoznati osnovne pojmove kolorimetrije kao što su: krivulje standardnog promatrača (funkcije podudaranja boje), tristimulus vrijednosti, prostori boje, ton boje, zasićenost, svjetlina i mnogi drugi. Definirat ćemo CIE RGB 1931, CIE XYZ i CIELAB prostore boje te objasniti njihovu primjenu i veze među njima. Koristeći programski paket MATLAB napisat ćemo računalni kod koji pretvara vrijednosti CIE XYZ prostora boje u CIELAB prostor boje. Ukratko ćemo se osvrnuti na psihološke učinke boje.

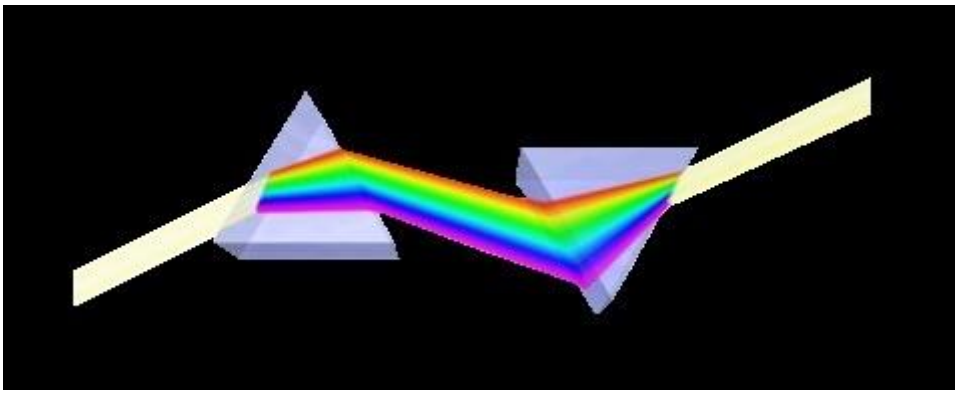
1.FIZIKA SVJETLOSTI

Ljudi su istraživali svjetlost i s njom povezane fenomene još od pamtivijeka. Na području Indije, Mezopotamije, Egipta, Grčke nađene su leće koje datiraju iz prvog tisućljeća prije Krista [1], što ukazuje da su narodi na tim područjima već tada imali neka osnovna znanja o optici i razvijali su teorije o tome što svjetlost jest. Povijest istraživanja svjetlosti je zanimljiva i bogata, ali u ovom završnom radu ćemo se samo kratko osvrnuti na povijesno razdoblje u kojem su se formirale prve znanstvene spoznaje o svjetlosti, koje su i danas važeće i znanstveno prihvaćene, a to je razdoblje od 17. stoljeća do danas. Isaac Newton je sredinom 17. stoljeća [1] demonstrirao kako se bijela svjetlost (Sunčeva svjetlost) na prizmi razlaže na spektar boja (dugine boje), eksperiment je shematski prikazan na slici 1.



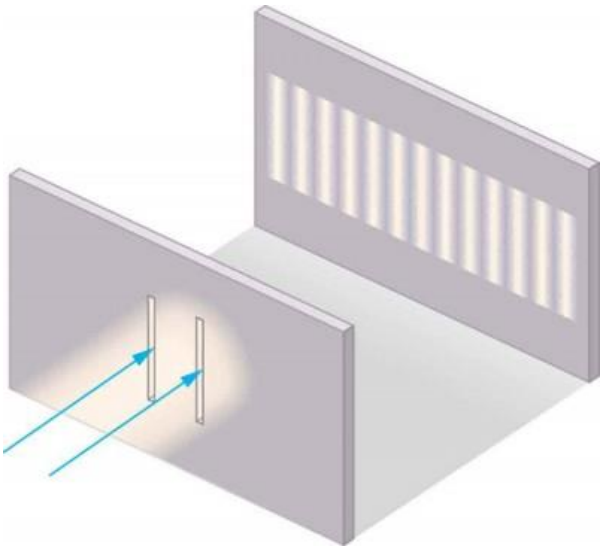
Slika 1. Bijela svjetlost pada na prizmu i zbog toga što indeks loma staklene prizme ovisi o valnoj duljini, bijela svjetlost se razlaže na obojene svjetlosti. Slika je preuzeta sa [2].

Također je pokazao da se postavljanjem druge prizme spektar boja može ponovo dati bijelu svjetlost, što je shematski prikazano na slici 2.



Slika 2. Nakon prolaska kroz prvu prizmu bijela svjetlost se razložila na obojene svjetlosti, da bi se zatim nakon prolaska kroz drugu prizmu obojene svjetlosti ponovno pomiješale u bijelu svjetlost. Slika je preuzeta sa [3].

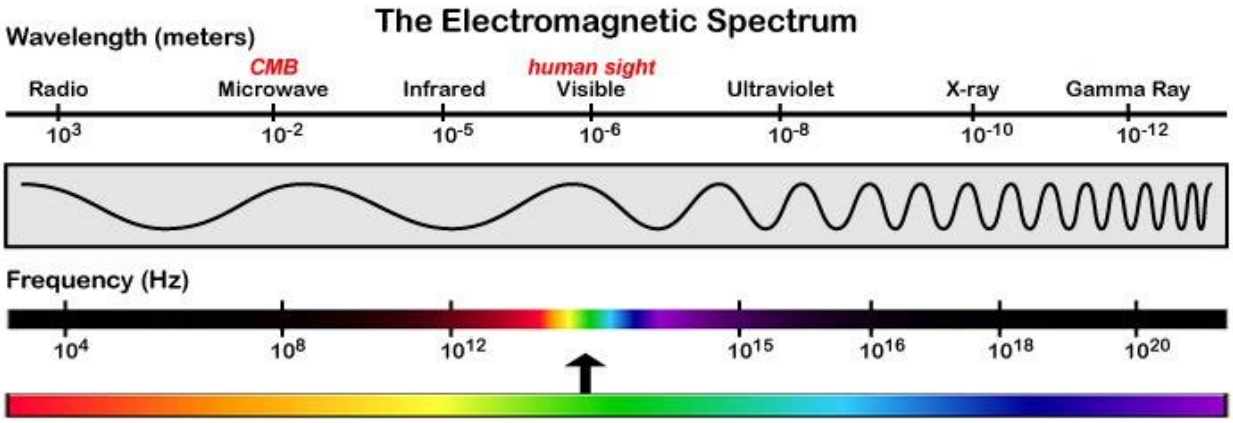
Newton je u tim eksperimentima pokazao da se tzv. bijela svjetlost (zapravo dnevna Sunčeva svjetlost) sastoji od svjetlosti svih boja te da ju je moguće razložiti na svjetlost različitih boja te ponovo spojiti u bijelu svjetlost. Newton je smatrao da je svjetlost čestične prirode tj. da je zraka svjetlosti snop čestica svjetlosti, mada je bio svjestan nekih problema te teorije, npr. nije pomoću čestične teorije svjetlosti mogao objasniti fenomen parcijalne refleksije [4]. Da svjetlost ima valnu prirodu prvi je dokazao Thomas Young 1801. god. koristeći eksperiment s dvije pukotine [1]. U tom eksperimentu svjetlost prolazi kroz dvije pukotine i na zastoru se formira tzv. interferencijska slika tj. na nekim mjestima na zastoru formiraju se izrazito svijetle pruge dok na nekim mjestima svjetlosti uopće nema tj. formiraju se tamne pruge, što je shematski prikazano na slici 3.



Slika 3. Shematski prikaz eksperimenta koji prikazuje valnu prirodu svjetlosti. Snop svjetlosti pada na dva proreza (pukotine), na zastoru iza proreza nastaje interferencijski uzorak karakterističan za valne pojave. Slike je preuzeta sa [5].

Interferencija je fenomen karakterističan za valne pojave, kao npr. valove na vodi, valove zvuka i slično, zbog tog eksperimenta je valna teorija svjetlosti prevladala nad Newtonovom čestičnom teorijom.

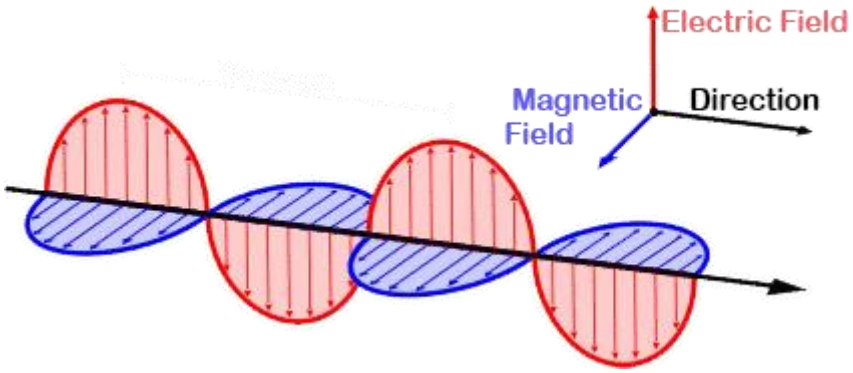
Vidimo da su početkom 19. stoljeća ljudi znali mnogo o svjetlosti, dokučili su zakone geometrijske i valne optike, znali su i da brzina svjetlosti u vakuumu iznosi 300 000 km/s, ali zapravo nisu znali što je to što titra u valovima svjetlosti i kojeg su porijekla valovi svjetlosti. Sredinom 19. stoljeća škotski fizičar James Clerk Maxwell radio je na sistematiziranju i matematičkom objedinjavanju ukupnog znanja o elektricitetu i magnetizmu tog vremena. Došao je do tzv. Maxwellovih jednadžbi koje su opisivale sve poznate fenomene vezane uz elektricitet i magnetizam, ali su i omogućile da Maxwell matematički pokaže da se električno i magnetsko polje mogu širiti kroz prostor kao valovi, a kad je izračunao brzinu tih valova dobio je upravo 300 000 km/s što je odgovaralo poznatoj brzini svjetlosti. To je navelo Maxwella da zaključi da je svjetlost zapravo elektromagnetski val, što je njemački fizičar Heinrich Hertz i eksperimentalno pokazao krajem 19. stoljeća [1]. Dakle ono što nazivamo svjetlost i što percipiramo osjetom vida je zapravo jedan mali dio spektra elektromagnetskih valova, a elektromagnetski valovi nastaju ubrzanim gibanjem nabijenih čestica (titranjem naboja), kako je pokazano u Maxwellovim jednadžbama. Spektar elektromagnetskih valova je shematski prikazan na slici 4.



Slika 4. Shematski prikaz elektromagnetskog spektra. Na gornjoj crnoj liniji su predstavljene valne duljine, a na donjoj obojenoj liniji frekvencije, na dnu je izvučen i uvećan vidljivi dio spektra, koji zapravo zauzima mali dio ukupnog elektromagnetskog spektra. Slike je preuzeta sa [6].

Kao i svi drugi valovi, elektromagnetski valovi imaju valnu duljinu λ i frekvenciju f, vidljivi dio spektra odgovara području valnih duljina od 380nm do 750nm, to je na slici 4 područje valnih duljina (*wavelength*) reda veličine 10^{-6}m (što odgovara 100-tinama naonometara) ispod natpisa *human sight* (ljudski vid) na slici 4. Ako idemo u lijevo od vidljivog dijela spektra tj. prema većim valnim duljinama ulazimo u infracrveno područje, koje odgovara npr.

elektromagnetskim valovima topline koju ljudsko tijelo zrači, te valove ne možemo vidjeti, ali ih možemo osjetiti kao toplinu, ako idemo prema još većim valnim duljinama ulazimo u područje mikrovalova pa zatim u područje radio valova. Ako idemo u desno od vidljivog dijela spektra tj. prema manjim valnim duljinama ulazimo u ultraljubičasto područje pa zatim u područje rentgenskih zraka te nakraju u područje tzv. gama zraka. Dakle, ono što smo navikli zvati svjetlost je samo jedan mali dio cijelog spektra elektromagnetskih valova koji percipiramo osjetom vida, ali zapravo mogli bi reći da su svjetlost i npr. mikrovalovi u mikrovalnoj pećnici, elektromagnetski valovi koji se pojavljuju u TV i radio prijenosu, rentgensko zračenje, gama zračenje, elektromagnetski valovi kojima se koristimo u komunikaciji mobitelima i bežičnom internetu i slično. Svi elektromagnetski valovi nose u sebi električna i magnetska polja koja titraju međusobno okomito i okomito na smjer širenja vala, kao što je prikazano na slici 5., zato kažemo da su elektromagnetski valovi transverzalni valovi (titranje vala je okomito na smjer širenja vala).



Slika 5. Elektromagnetski val nosi u sebi električno polje (crveni vektori) i magnetsko polje (plavi vektori), vektori električnog i magnetskog polja su međusobno okomiti i okomiti na smjer širenja vala, tako da je elektromagnetski val transverzalni val. Slika je preuzeta sa [7].

Maxwellove jednadžbe i teorija elektromagnetskih valova objašnjavaju mnoštvo fenomena vezanih uz elektricitet, magnetizam i svjetlost. Temelj su gotovo sve tehnologije koju danas koristimo, ali time nisu obuhvaćena sva svojstva prirode svjetlosti. Krajem 19 stoljeća bio je poznat tzv. fotoelektrični efekt kojeg je eksperimentalno otkrio Hertz [1]. Taj efekt je proturječio teoriji elektromagnetskih valova i tadašnjim spoznajama o valnoj prirodi svjetlosti. Einstein je 1905. god. objasnio fotoelektrični efekt tako što je svjetlost shvatio kao roj čestica bez mase, a koje imaju energiju E i impuls p određen frekvencijom tj. vrijedi:

$$E = hf \quad p = hc/f,$$

gdje je $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$Js Planckova konstanta, a $c = 3 \cdot 10^{8}$m/s je brzina svjetlosti [8]. Čestice svjetlosti nazivamo fotonima. Einsteinovo objašnjenje fotoefekta je odigralo bitnu ulogu u stvaranju kvantne fizike, koja u sebi objedinjuje valnu i čestičnu prirodu svjetlosti i materije. Vrlo pojednostavljeno, mogli bi reći da se svjetlost u nekim pojavama ponaša kao val,

a u nekima kao snop čestica. Glavna poruka ovog kratkog uvoda je da su bitne karakteristike elektromagnetskih valova valna duljina i frekvencija, te da je naš osjet vida osjetljiv na jedan mali dio cjelokupnog spektra tj. elektromagnetske valove valne duljine od 380nm do 750nm percipiramo kao svjetlost. Također, možemo reći i da je ljudsko oko osjetljivo na čestice svjetlosti (fotone) u rasponu energija od 1,65eV (crveni fotoni valne duljine 750nm) do 3,26eV (ljubičasti fotoni valne duljine 380nm). Gdje je elektronvolt (eV) jedinica za energiju prikladna za procese u atomskoj fizici i optici, a za odnos elektron volta i Joula vrijedi $1\text{eV} = 1{,}6021 \cdot 10^{-19} J$. Odnos energije fotona i valne duljine svjetlosti je dan relacijom:

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

Ta relacija nam govori da što je manja valna duljina svjetlosti veća je energija pripadnih fotona, odnosno što je veća valna duljina svjetlosti manja je energija pripadnih fotona. Tako da su npr. plavi fotoni energičniji od crvenih fotona i imaju veći impuls. Za potpuno razumijevanje međudjelovanja svjetlosti i oka potrebna je valna i čestična teorija svjetlosti, zato smo se ukratko osvrnuli na jednu i drugu prirodu svjetlosti.

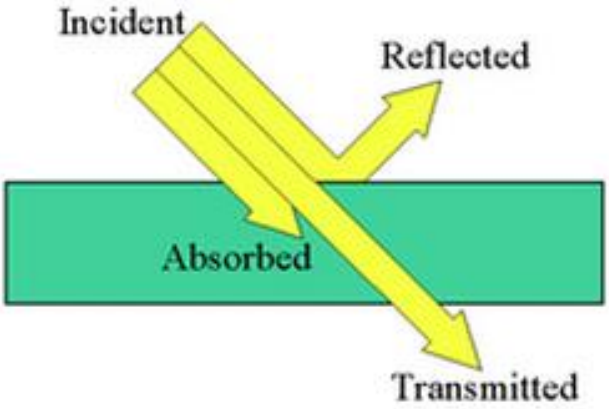
2.VREDNOVANJE BOJE

2.1.Vrednovanje boje i prostori boje

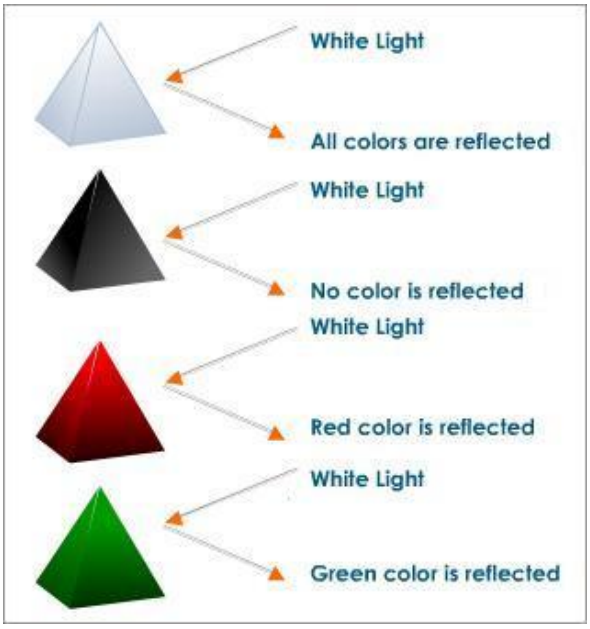
Boja je psihofizički osjet koji nastaje kad svjetlost međudjeluje sa okom i preko oka sa živčanim sustavom. Boja je stvar čovjekove percepcije, nije svojstvo svjetlosti same po sebi, nego je psihički doživljaj izazvan fizičkim svojstvima (valna duljina, energija, frekvencija) svjetlosti koja "pada" na oko. Različiti ljudi istu svjetlost mogu doživjeti različito, odnosno vidjeti/doživjeti drukčiju boju iako je svjetlost koja dolazi do njih ista [9]. Zbog toga se javlja potreba za definiranjem i numeričkim vrednovanjem boje da bi se moglo jasno i nedvosmisleno komunicirati npr. u industriji, tehnici, tekstilu, umjetnosti i slično. Znanost koja se bavi brojčanim vrednovanjem, tj. matematičkim opisom boje na osnovu mjerenja s mjernim uređajima, naziva se kolorimetrija. Također, prostori boje, koji proizlaze iz mjerenja i definiranje boje, su neophodni za rad svih ekrana u boji kao npr. kod računala, mobitela i slično, što ćemo objasniti kasnije u ovom radu.

2.2. Doživljaj boje

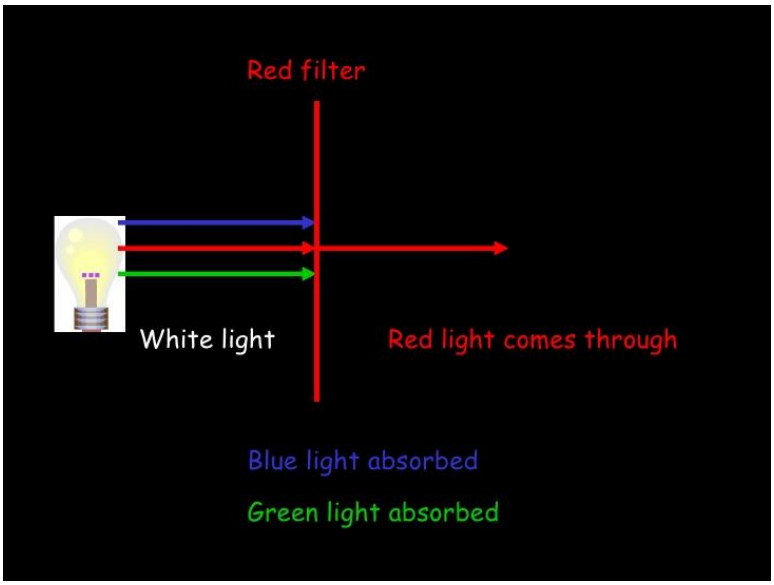
Sada ćemo objasniti kako nastaje doživljaj boje. Zamislimo da promatramo nekakav predmet na kojeg pada sunčevo svjetlo. Sunčevo svjetlo u sebi ima zastupljene sve valne duljine vidljivog dijela spektra elektromagnetskih valova, odnosno sve spektralne boje, a njihov zbir predstavlja "bijelo" svjetlo. Svjetlo koje pada na predmet se dijelom reflektira od predmeta, dijelom se absorbira u predmetu, a dijelom prolazi kroz predmet odnosno transmitira, kao što je shematski prikazano na slici 6, s tim da je na tom prikazu upadna, reflektirana i transmitirana svjetlost predstavljena žutom bojom, općenito ne mora vrijediti da reflektirana i transmitirana svjetlost ostaju iste boje kao upadna svjetlost, jer se zapravo u reflektiranoj i transmitiranoj svjetlosti može narušiti zbir boja bijele svjetlosti te reflektirana i transmitirana svjetlost sadržavaju neki manji dio vidljivog spektra te dovode do doživljaja boje kod promatrača, kao što je shematski prikazano na slikama 7 i 8, a bit će detaljnije objašnjeno kasnije u tekstu. Ovdje smo za primjer govorili o sunčevoj svjetlosti kao o bijeloj svjetlosti, ali isto vrijedi i za bilo koji drugi izvor svjetlosti koji emitira tzv. bijelu svjetlost, koja može biti više ili manje slična sunčevom spektru, kao npr. svjetlost kućne žarulje, o tim detaljima nešto kasnije u tekstu.



Slika 6. Upadna *(incident*) svjetlost se dijelom reflektira na predmetu (*reflected*), dijelom apsorbira *(absorbed*), a dijelom prolazi kroz predmet tj. transmitira (*transmitted*). Slika preuzeta sa [10].



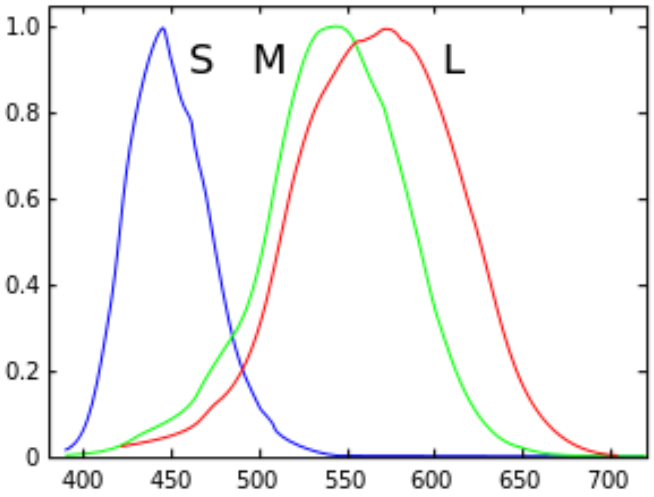
Slika 7. Shematski prikaz kako je refleksija povezane sa doživljajem boje nekog predmeta. Ovisno o refleksiji promatrač može vidjeti predmet kao bijeli (sve valne duljine se reflektiraju), crni (nema refleksije, odnosno sve valne duljine se apsorbiraju), crveni (reflektira se valna duljina koja odgovara crvenoj boji) ili zeleni (reflektira se valna duljina koja odgovara zelenoj boji). Slika je preuzeta sa [11].



Slika 8. Shematski prikazuje apsorpciju i transmisiju svjetla. Na predmet, filter, upada bijelo svjetlo iz umjetnog izvora, plavi i zeleni dio spektra se apsorbiraju, a crveni dio spektra transmitira. Ako je predmet/filter postavljen između promatrača i izvora svjetla, promatrač doživljava filter crvenim. Slika je preuzeta sa [12].

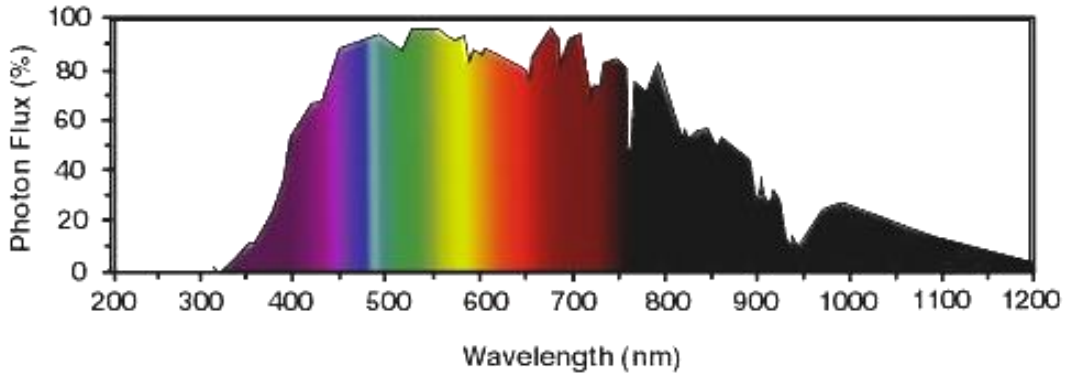
Prema danas prihvaćenoj teoriji vizualizacije, u ljudskom oku postoje dvije vrste fotoosjetljivih elemenata: štapići i čunjići [9]. Oni pretvaraju svjetlosnu energiju u električnu, odnosno u živčane impulse koji se šalju mozgu i odgovorni su za doživljaj boje. Štapići su u oku razmješteni prema izvanjskom rubu mrežnice i osjetljivi su na niske svjetlosne razine (npr. noćni vid), neosjetljivi su na boje te su odgovorni za doživljaj svjetline boje. Čunjići su odgovorni za doživljaj tona boje tj. pomoću njih vidimo npr. da je nešto crveno, nešto zeleno itd., te pomoću njih razlikujemo boje. Čunjići su koncentrirani na malom središnjem prostoru mrežnice oka, žutoj pjegi.

Pošto su čunjići odgovorni za doživljaj boje, malo ćemo detaljnije opisati tipove čunjića. U oku postoje tri tipa čunjića, koje nazivamo dugi (L-*long*), srednji (M-*medium*) i kratki (S-*short*) po valnim duljinama za koje imaju maksimalnu osjetljivost. Dugi (L) čunjići imaju maksimalnu osjetljivost za elektromagnetske valove valne duljine 565nm, srednji (M) čunjići imaju maksimalnu osjetljivost na 530 nm, dok kratki (S) čunjići imaju maksimalnu osjetljivost na 435nm. Krivulje osjetljivosti čunjića u ovisnosti o valnoj duljini su prikazane na slici 9. Često ih se naziva i po boji na koju su najosjetljiviji, tako da se L čunjići nazivaju crveni čunjići, M su zeleni čunjići, a S plavi čunjići. Teorija doživljaja boje na osnovu tri tipa čunjića se naziva trikromatska teorija.

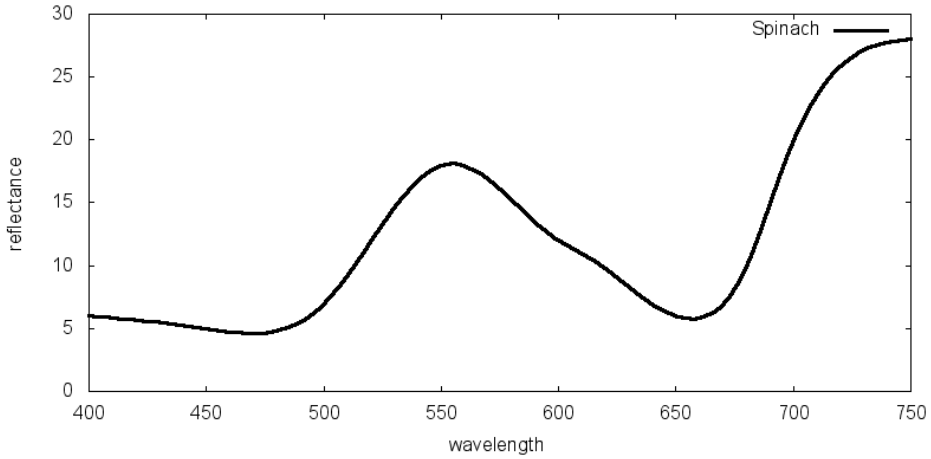


Slika 9. Na vertikalnoj osi je osjetljivost tri tipa čunjića normalizirana tako da je maksimalna osjetljivost svake krivulje jednaka jedinici, na horizontalnoj osi su valne duljine u nanometrima. Slika je preuzeta sa [13].

Uzimajući u obzir dosad napisano, sada ćemo objasniti zašto npr. list špinata vidimo kao zelen. Kad list špinata obasja sunčevo svjetlo (spektar sunčevog svjetla je prikazan na slici 10.), dio tog svjetla je apsorbiran i zagrijava list tj. ide u toplinu, a dio se reflektira, spektar refleksije lista špinata je dan na slici 11. Vidimo da se maksimum refleksije u vidljivom dijelu spektra najvećim dijelom preklapa sa krivuljom koja odgovara zelenim (M) čunjićima sa slike 9, zato list doživljavamo kao zelen. Refleksija sa špinata raste u infracrvenom području za valne duljine veće od 700nm, ali u tom području su čunjići neosjetljivi, tako da taj dio elektromagnetskih valova ne doprinosi doživljaju boje.



Slika 10. Prikaz spektra sunčevog svjetla (bijele svjetlosti) za vrijeme vedrog ljetnog dana. Slika je preuzeta sa [14].



Slika 11. Refleksija sunčevog svjetla sa lista špinata u postocima u ovisnosti o valnoj duljini u nanometrima. U vidljivom dijelu spektra najviše se reflektiraju valne duljine oko 550nm, što odgovara zelenom području i time se najviše pobuđuju zeleni (M) čunjići. Slika je preuzeta sa [15].

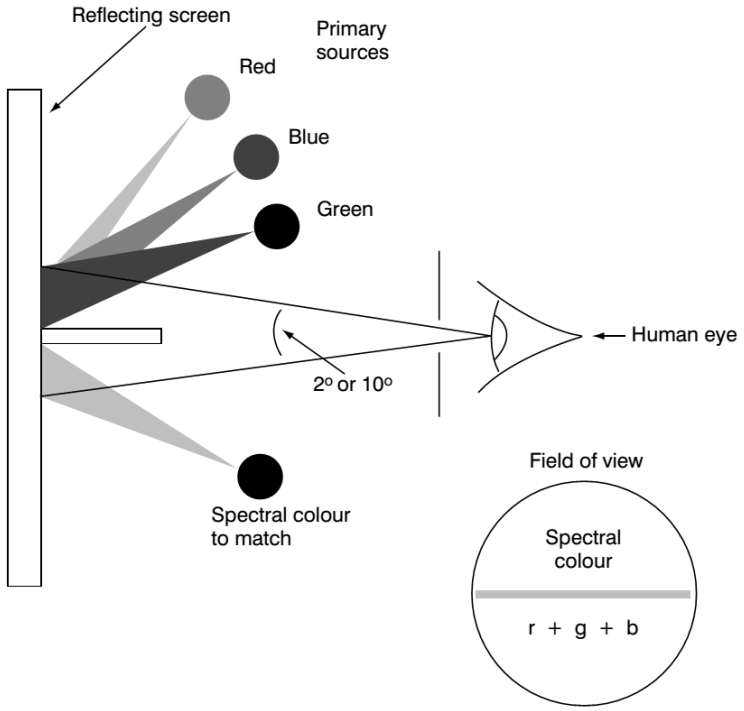
Svjetlost reflektirana sa lista špinata pobuđuje, stimulira, sva tri tipa čunjića, ukupni doživljaj boje je zelena boja, ali u specifičnosti zelene boje špinata sudjeluju i crveni i plavi čunjići. Mogli bi reći da oko svojim sustavom čunjića spektralnu distribuciju svjetla reflektiranog sa špinata svodi na tri broja, od kojih svaki govori koliko je pojedini tip čunjića stimuliran. Svaki od ta tri broja bi bio integral po valnim duljinama produkta funkcije osjetljivosti pojedinog tipa čunjića i spektra svjetla koje upada na oko, pošto je osjetljivost čunjića teško mjeriti to se u praksi ne radi, već se mjere tzv. *color matching functions* odnosno funkcije podudaranja boje koje ćemo upoznati u idućem potpoglavlju, a u hrvatskoj literaturi se nazivaju krivulje standardnog promatrača. Naravno, špinat koristimo samo kao primjer, to vrijedi za spektralnu distribuciju svjetla sa bilo kojeg objekta kojeg promatramo. Ta tri broja koja govore koliko je pojedini tip čunjića stimuliran, definiraju koju boju doživljavamo i njih mozak dalje procesira. U ovom radu nećemo ulaziti u detalje teorije suprotnih procesa (Heringova teorija), i zonske teorije viđenja boja koja objedinjuje teoriju suprotnih procesa i trikromatsku teoriju [9], jer za razumijevanje prostora boje i njihove primjene to nije neophodno, ono u čemu se sve teorije slažu je da se doživljaj boje može svesti na tri broja i to će biti polazište za razumijevanje postupka mjerenja i vrednovanja boje.

Važno je primijetiti da različite spektralne distribucije svjetlosti mogu dovesti do istog doživljaja boje ukoliko imaju isti ukupni učinak na čunjiće, tako da nam npr. nekakav zeleni list i zeleno auto mogu izgledati kao da imaju istu zelenu boju, iako je zapravo spektar svjetla koje s njih dolazi do nas različit. Upravo zato možemo npr. i na ekranu koji ima crvene, zelene i plave piksele vidjeti žutu boju, jer je moguće pomoću crvene, zelene i plave svjetlosti iskonstruirati spektar koji će stimulirati čunjiće kao spektar žutog svjetla.

2.3. Krivulje standardnog promatrača

Sredinom 19 stoljeća Hermann Grassmann je otkrio da je, u određenim granicama, bilo koji doživljaj boje moguće postići miješajući tri obojana svjetla dobro definiranih valnih duljina, ako se ni jedno od tih obojanih svjetala ne može dobiti miješajući preostala dva [16]. Ta tri obojana svjetla, miješanjem kojih dobijemo doživljaj drugih boja, a koja su linearno nezavisna u smislu da ni jedno od njih ne možemo dobiti miješajući druga dva, nazivamo primarne boje. Tako da svakom doživljaju boje možemo pridružiti tri broja koja nam govore koliki je intenzitet svjetla svake od primarnih boja potreban da, miješajući ih, postignemo željenu boju. Inspirirani Grassmannovim spoznajama i rezultatima, krajem 1920-tih engleski znanstvenici David Wright i John Guild [16] su neovisno jedan o drugome provodili eksperimente s ciljem otkrivanja objektivnog načina mjerenja i vrednovanja boje, eksperiment je shematski prikazan na slici 12. Eksperiment se sastoji u tome da se jedno polje podijeli na dva dijela pregradom, jedan dio polja se osvijetli referentnim svjetlom dobro definirane valne duljine koje daje doživljaj neke spektralne boje, a drugi dio polja se osvijetli sa svjetlom tri primarna izvora i promatrač podešava intenzitete primarnih izvora svjetla dok ne postigne slaganje doživljaja tri primarne boje na jednoj strani polja sa referentnom bojom na drugoj strani polja (vidi sliku 12.). Kut promatranja je bio 2 stupnja, što je u kasnijim pokusima promijenjeno na kut promatranja od 10 stupnjeva [17].

Kao primarne boje Guild je koristio plavu svjetlost valne duljine 435.8nm, zelenu svjetlost valne duljine 546.1nm i crvenu svjetlost valne duljine 700nm. Wright je koristio druge primarne boje, odnosno druge izvore primarne svjetlosti, ali njihovi rezultati su kasnije usklađeni i objedinjeni. Postupak se ponavlja za sve valne duljine vidljivog dijela spektra da bi dobili krivulje standardnog promatrača (*color matching functions*) koje nam govore koji intenziteti svjetla primarnih boja su potrebni da njihovim miješanjem dobijemo neku željenu spektralnu boju. Pod spektralnom bojom mislimo na boju koju daje svjetlo dobro definirane valne duljine tj. monokromatsko svjetlo, u aproksimaciji bi mogli reći svjetlo jedne valne duljine. Standardni promatrač je hipotetski čovjek sa zdravim vizualnim sklopom i predstavlja prosjek odgovora na podražaje crvenog, zelenog i plavog svjetla (stimulusa). Krivulje standardnog promatrača su prikazane na slici 13.



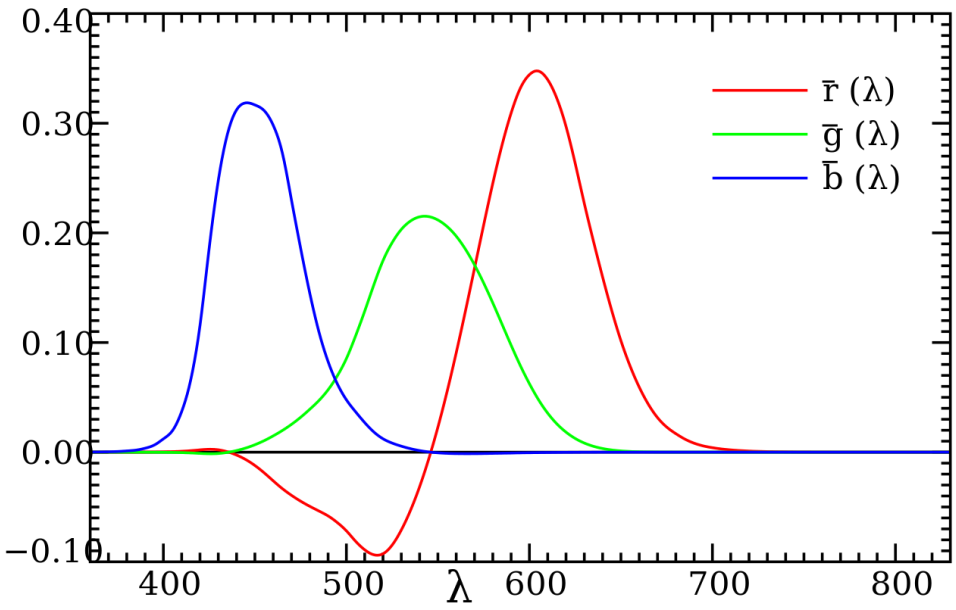
Slika 12. Shematski prikaz eksperimenta kojim se određuju krivulje standardnog promatrača. Slika je preuzeta iz [17].

Guild je taj eksperiment proveo sa sedam promatrača, a Wright je proveo eksperiment sa deset promatrača i drugim izborom primarnih boja tako da se njegove krivulje standardnog promatrača nisu slagale sa krivuljama predstavljenim na slici 13. koje je dobio Guild [16], ali njihovi rezultati su matematički objedinjeni i 1931.god. CIE (*Commission Internationale de l' Eclairage*) međunarodna komisija za standardizaciju svjetla je na osnovu njihovih rezultata definirala standarde mjerenja i vrednovanja boja, o čemu ćemo još podrobnije pisati u ostatku teksta.

Krivulje standardnog promatrača sa slike 13. nam kažu da vrijedi sljedeća relacija:

$$C(\lambda) = \bar{r}(\lambda)[R] + \bar{g}(\lambda)[G] + \bar{b}(\lambda)[B].$$

Ta relacija nam govori da se spektralno svjetlo boje C i valne duljine λ podudara sa mješavinom tri primarna svjetla [R]-crvenim, [G]-zelenim i [B]-plavim u "količinama" $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda)$ i $\bar{b}(\lambda)$, a brojeve $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda)$ i $\bar{b}(\lambda)$ za danu valnu duljinu nazivamo spektralne tristimulus vrijednosti i možemo ih pročitati iz krivulja standardnog promatrača sa slike 13.



Slika 13. Krivulje standardnog promatrača nam govore koliku "količinu" (vertikalna os) crvene svjetlosti valne duljine 700nm, zelene svjetlosti valne duljine 546.1nm i plave svjetlosti valne duljine 435.8nm treba pomiješati da bi dobili doživljaj boje isti kao za monokromatsku svjetlost određene valne duljine (horizontalna os u nanometrima). Vidimo da "količina" svjetla može biti i negativna, o tome više u tekstu. Slika je preuzeta sa [18].

Sada ćemo ukratko objasniti zašto ne govorimo o intenzitetu nego o "količini" svjetla kod spektralnih tristimulus vrijednosti. Intenzitet je fizička osobina svjetla, neovisna o promatraču, govori o energiji koju svjetlost pronese kroz neku površinu u jedinici vremena, tj. fizikalna jedinica intenziteta je W/m^2. Oko ima osobinu da svjetlosti različitih valnih dužina, a istog intenziteta, ne doživljava jednako svijetlima, npr. ako promatramo izvore zelene svjetlosti i plave svjetlosti koji imaju iste intenzitete, zeleni izvor će nam izgledati puno svjetliji tj. "jači". Taj efekt je uzet u obzir prilikom određivanja krivulja standardnog promatrača i brojevi koji su na vertikalnoj osi na slici 13. ne govore direktno koliki su intenziteti primarnih svjetala, ali se iz njih reskaliranjem krivulja standardnog promatrača ti intenziteti mogu dobiti. U ovom završnom radu nećemo ulaziti u te detalje, jer nam je cilj kvalitativno razumijevanje, kvantitativno razumijevanje sa svim detaljima nadilazi okvire završnog rada, a i za konačan cilj razumijevanja tristimulus vrijednosti i prostora boje to nije potrebno, kao što ćemo vidjeti dalje u tekstu.

Što znače negativne "količine" npr. crvenog svjetla tj. negativne vrijednosti crvene krivulje na slici 13.? Znatan dio spektralnih boja nije moguće reproducirati miješanjem tri primarna svjetla odnosno tri primarne boje. Ako pogledamo valnu duljinu od 500nm na slici 13. vidimo da za tu valnu duljinu crvena krivulja ima vrijednost oko -0.08, dok plava i zelena krivulja imaju pozitivne vrijednosti oko +0.07, dakle kao da u miješanju tri primarna svjetla dodajemo

negativno crveno svjetlo, a "količina" svjetla ne može biti negativna. Radi se o tome da u eksperimentu opisanom na slici 12. promatrači nisu mogli postići slaganje boje referentnog spektralnog svjetla sa tri pomiješana primarna svjetla, tada su jedno od primarnih svjetala morali dodati na stranu polja sa referentnim spektralnim svjetlom, dakle pomiješati spektralno svjetlo i jedno primarno svjetlo na jednoj strani promatranog polja, a na drugoj strani polja pomiješati preostala dva primarna svjetla dok doživljaji boje na jednoj i drugoj strani promatranog polja ne budu isti [17]. To što smo upravo rekli opisuje sljedeća relacija:

$$C(\lambda) + \bar{r}(\lambda)[R] = \bar{g}(\lambda)[G] + \bar{b}(\lambda)[B]$$

Gornja relacija nam govori da se mješavina spektralnog svjetla određene valne duljine i crvenog primarnog svjetla podudara sa mješavinom zelenog i plavog primarnog primarnog svjetla. Tu relaciju možemo napisati kao:

$$C(\lambda) = \bar{g}(\lambda)[G] + \bar{b}(\lambda)[B] - \bar{r}(\lambda)[R]\ ,$$

kao da spektralno svjetlo te valne duljine ima negativnu spektralnu tristimulus vrijednost za crveno primarno svjetlo. Time smo opisali što su spektralne tristimulus vrijednosti koje određuju spektralne (monokromatske) boje i kako se do njih dolazi.

Kako odrediti tristimulus vrijednosti koje određuju boju nekog objekta? Kad promatramo neki objekt do našeg oka ne dolazi dominantno jedna valna duljina, kao u slučaju spektralnih boja, nego cijelo mnoštvo valnih duljina. Svaki objekt ima karakterističan spektar valnih duljina elektromagnetskih valova koji se sa njega reflektiraju i dolaze do našeg oka, taj spektar će ovisiti o spektru izvora svjetlosti koja obasjava objekt i koeficijentu refleksije tog objekta. Ako je spektar izvora svjetlosti koja obasjava objekt opisan funkcijom $E(\lambda)$, a koeficijent refleksije objekta opisan funkcijom $R(\lambda)$, tada je doživljaj boje objekta određen tristimuls vrijednostima R, G, B po relacijama [17]:

$$R = k \sum_{\lambda=360nm}^{740nm} E(\lambda)R(\lambda)\bar{r}(\lambda)$$

$$G = k \sum_{\lambda=360nm}^{740nm} E(\lambda)R(\lambda)\bar{g}(\lambda)$$

$$B = k \sum_{\lambda=360nm}^{740nm} E(\lambda)R(\lambda)\bar{b}(\lambda)$$

Konstanta k je normalizacijska konstanta. Ako boju objekta označimo sa C, možemo reći da je isti doživljaj boje objekta moguće postići ako pomiješamo R −crvenog primarnog svjetla, G − zelenog primarnog svjetla i B −plavog primarnog svjetla tj. vrijedi relacija:

$$C = R[R] + G[G] + B[B].$$

Dakle za tristimulus vrijednosti boje objekta koristimo velika slova R, G, B , to su brojevi koje dobijemo preko gornjih relacija sa sumacijama i koji nam govore koje su količine primarnih svjetala potrebne za stvaranje doživljaja boje C, dok sa $[R], [G], [B]$ označavamo primarna svjetla.

Sad možemo vidjeti da normalizacija krivulja standardnog promatrača, kao i konstanta normalizacije koja se pojavljuje u relacijama za tristimuluse nisu važne za kvalitativno razumijevanje postupka mjerenja i vrednovanja boje. Kad imamo nekakav objekt čiju boju želimo mjeriti i tu informaciju prenijeti nekome, ono što moramo definirati je kojim izvorom svjetlosti smo obasjali taj objekt tj. moramo znati spektar izvora $E(\lambda)$ i koeficijent refleksije tog objekta $R(\lambda)$, to je ono što mjerimo, a krivulje $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda)$ i $\bar{b}(\lambda)$ su standardizirane tj. jednom izmjerene i uzete kao standard, isto vrijedi i za konstantu normalizacije k, samo treba specificirati koji standard koristimo. Krivulje koje smo prikazali na slici 13. su CIE 1931 RGB krivulje standardnog promatrača i osnova su CIE 1931 RGB prostora boje. Prostora boje ima jako puno, ovisno o izboru primarnih boja i namjeni, ali prije nego definiramo standardni prostor boje objasnit ćemo zašto uopće govorimo o prostoru boje. Ako pogledamo relaciju:

$$C = R[R] + G[G] + B[B],$$

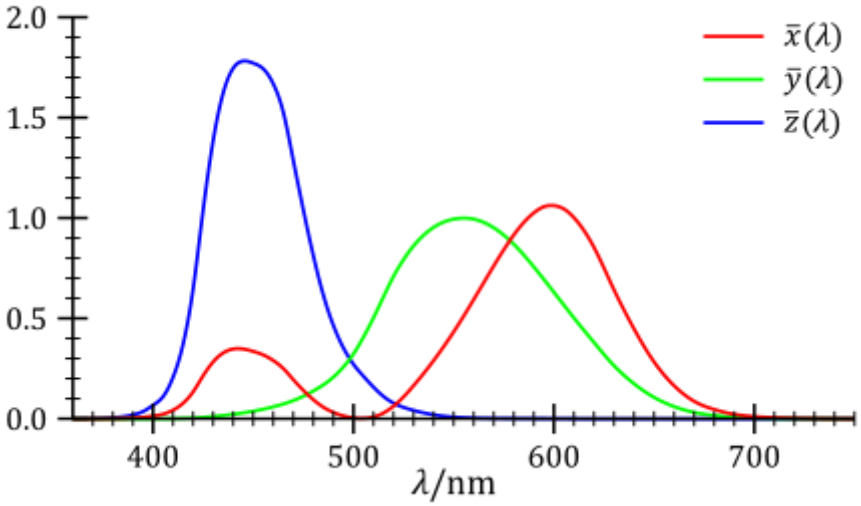
ona je matematički ekvivalentna zapisu vektora kao što je npr. vektor položaja u prostoru:

$$\vec{r} = x \cdot \vec{\imath} + y \cdot \vec{\jmath} + z \cdot \vec{k},$$

u toj relaciji imamo skalarne komponente (brojeve) x, y, z koje nam govore koliko da se pomaknemo u smjeru x osi, y osi, z osi, a jedinični vektori $\vec{\imath}$, $\vec{\jmath}$, $\vec{k}$ imaju iznos jedan i nose informaciju o smjeru. Boju C možemo shvatiti kao vektor koji ima skalarne komponente R, G, B i jedinične vektore $[R]$, $[G]$, $[B]$. Dakle svaku boju možemo shvatiti kao vektor u prostoru određenom primarnim bojama koje predstavljaju jedinične vektore tog prostora. Za jedinične vektore je bitno da ni jedan od jediničnih vektora ne možemo prikazati kao kombinaciju druga dva (linearna nezavisnost), a primarne boje zadovoljavaju upravo taj zahtjev, tako da je analogija potpuna. Također, ako znamo komponente vektora u nekom prostoru, možemo napraviti transformaciju tog vektora u drugi prostor definiran drugim jediničnim vektorima, ta transformacija se definira preko matrice transformacije i na taj način grana matematike koja se zove linearna algebra ulazi u svijet boja. Boje su vektori, upravo to je omogućilo Guildu da objedini svoje i Wrightove rezultate iako su koristili različite primarne boje. Guild je napravio matričnu transformaciju i pokazao da su rezultati koje je Wright dobio na svojih deset

promatrača u izvrsnom slaganju sa rezultatima koje je on dobio sa sedam promatrača, iako su koristili različite primarne boje [17]. Dakle standardi kolorimetrije počivaju na rezultatima eksperimenta shematski prikazanog na slici 12. sa ukupno sedamnaest promatrača i linearnoj algebri!

Krivulje standardnog promatrača koje definiraju CIE 1931 RGB prostor su imale neke praktične manjkavosti, jedna od njih su negativne spektralne tristimulus vrijednosti. U želji da sve tristimulus vrijednosti budu pozitivne i da prostor boje obuhvati sve realne boje (boje koje se mogu doživjeti) CIE 1931 RGB prostor je matematički transformiran u CIE XYZ prostor koji služi kao opće prihvaćeni standard za vrednovanje boja. Na slici 14. su prikazane krivulje standardnog promatrača koje su dobivene matematičkom transformacijom $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ krivulja.



Slika 14. Spektralne krivulje standardnog promatrača koje definiraju CIE XYZ prostor boje. Slika je preuzeta sa [19].

Prostor boje CIE XYZ je definiran imaginarnim primarnim bojama, dakle primarnim bojama koje se ne mogu postići u realnosti, one su matematički artefakti matrične transformacije i njima pridružene krivulje standardnog promatrača ne odgovaraju ni jednom realnom promatraču, ali služe kao standard za određivanje boje i uvijek ih se može inverznom matričnom transformacijom povezati sa realnim primarnim bojama RGB prostora ili bilo kojeg drugog prostora. Dakle CIE XYZ je jedan posebno matematički konstruiran prostor boje, koji nema manjkavosti prostora boje koji se temelje na realnim primarnim bojama, koji ne mogu obuhvatiti sve boje koje se pojavljuju u prirodi i imaju negativne tristimulus vrijednosti ("negativne količine" primarnog svjetla su potrebne u prostorima sa realnim primarnim bojama). U CIE XYZ prostoru boje, tristimulusi su definirani relacijama [17]:

$$X = k \sum_{\lambda=360nm}^{740nm} E(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)$$

$$Y = k \sum_{\lambda=360nm}^{740nm} E(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)$$

$$Z = k \sum_{\lambda=360nm}^{740nm} E(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)$$

Dakle za doživljaj boje C nekog objekta vrijedi:

$$C = X[X] + Y[Y] + Z[Z],$$

dakle, isto kao prije imamo standardizirane krivulje $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$, ali koje su dobivene matematičkim putem iz izmjerenih $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ krivulja, i konstantu normalizacije k, a moramo znati spektar izvora svjetlosti kojim obasjavamo objekt i moramo znati koeficijent refleksije objekta (to određujemo mjerenjem na konkretnom objektu) da bi odredili tristimuls vrijednosti X, Y, Z koje onda možemo iskomunicirati s bilo kim, bilo gdje, ako želimo da reproduciraju tu boju.

Matrična veza između CIE 1931 XYZ i CIE 1931 RGB prostora je [16]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{b_{21}} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \frac{1}{0.176{,}97} \begin{bmatrix} 0.490\,00 & 0.310\,00 & 0.200\,00 \\ 0.176\,97 & 0.812\,40 & 0.010\,63 \\ 0.000\,00 & 0.010\,00 & 0.990\,00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

.

Slična matrična transformacija postoji između bilo koja dva prostora boje. Prostori boje su posebno važni za rad kamera, računala, mobitela i sličnih uređaja, npr. svaki ekran u boji ima tri primarna svjetla pomoću kojih boja piksele (točke ekrana), dakle ekran radi u prostoru boje koji je definiran njegovim primarnim svjetlima/bojama. Kad želimo reproducirati nešto grafički na našem računalu, programi za obradu slike moraju vršiti matrične transformacije slične gornjoj relaciji da bi podatke koji su snimljeni u jednom prostoru boje računalo moglo reproducirati u svom prostoru boje. Matrice su jezik kojim računala “misle”.

2.4. Koordinate kromatičnosti

Boje su predstavljene tristimulus vrijednostima kao točke u 3D prostoru (tri koordinate X, Y, Z) i kao takve ih nije lako vizualizirati. Jedan način da pojednostavnimo vizualizaciju boja je da zanemarimo intenzitet/svjetlinu boje tj. da tamno crvenoj i svjetlo crvenoj pridodamo istu brojčanu vrijednost. Ono što ostaje od boje kad joj oduzmemo svjetlinu nazivamo kromatičnost. Koordinate kromatičnosti x, y, z se računaju iz tristimulus vrijednosti X, Y, Z po relacijama:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

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

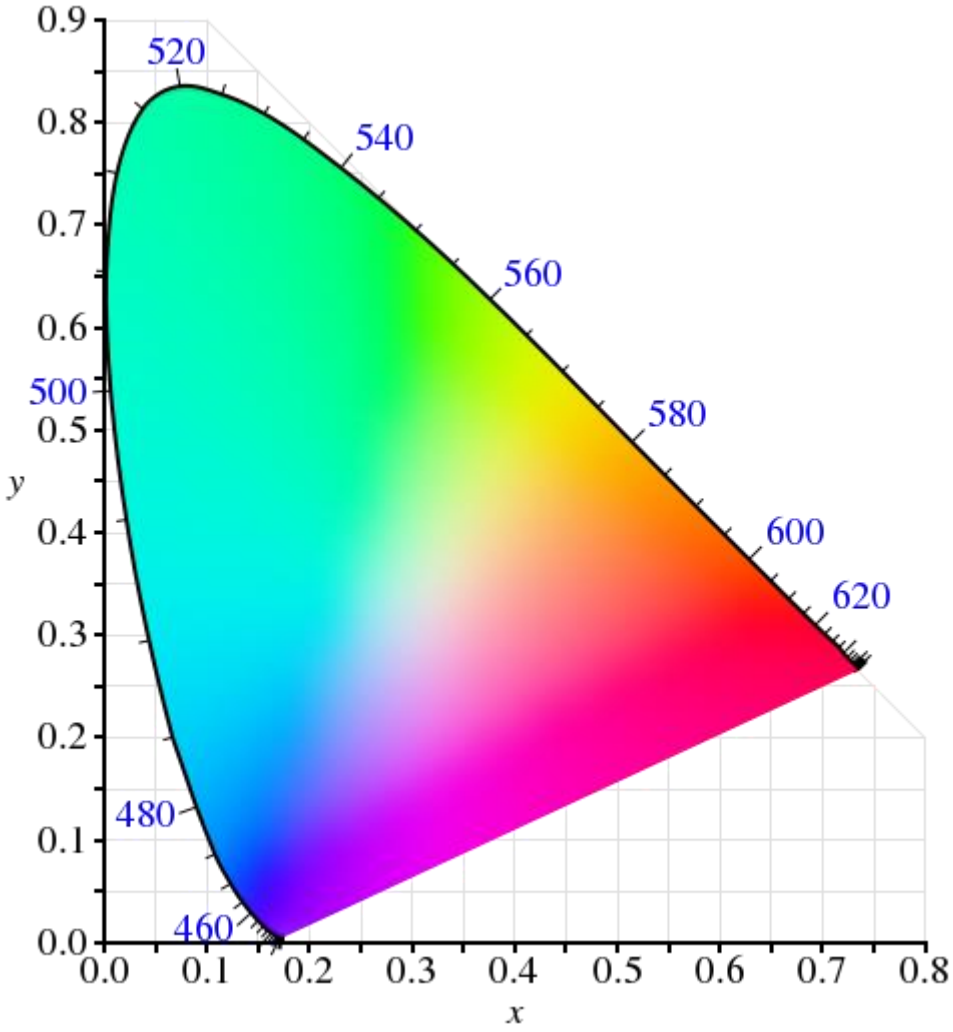
Samo su dvije koordinate kromatičnosti od tri linearno nezavisne jer vrijedi:

$$x + y + z = 1$$

Ako odaberemo x i y kao linearno nezavisne, koordinatu z dobijemo preko relacije:

$$z = 1 - x - y$$

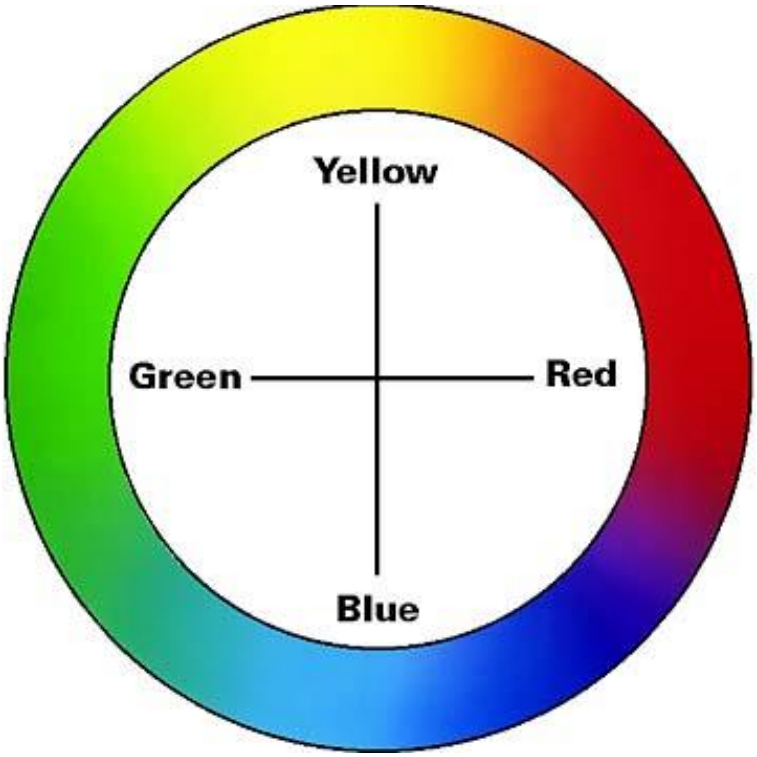
Koordinate kromatičnosti definiraju 2D prostor u kojem možemo vizualizirati boje [9]. Kada svim bojama nekog prostora boje pridružimo koordinate kromatičnosti dobijemo dijagram kromatičnosti tog prostora, a zbog svog specifičnog izgleda takav dijagram se naziva potkova boje, za CIE 1931 XYZ prostor boje dijagram kromatičnosti je prikazan na slici 15.



Slika 15. Dijagram kromatičnosti – Potkova boje. Rub dijagrama čine spektralne boje (monokromatske boje, valne duljine su u nanometrima), a unutar dijagrama su nespektralne boje koje su smjesa svjetlosti raznih valnih duljina. Slika je preuzeta sa [20].

Koordinate kromatičnosti x, y daju informaciju o tonu - H (*hue*) i zasićenosti – C (*chroma*) boje.

Ton boje (*hue*, oznaka H) je atribut vizualnog doživljaja boje na osnovi kojeg pojedinu boju definiramo kao crvenu, plavu, zelenu itd., prema dominantnoj valnoj duljini u spektru svjetla te boje [9]. Kromatske boje (šarene boje, zapravo sve boje osim akromatskih tj. crne, sive i bijele) su svi tonovi boja raspoređeni u zatvoreni krug boja od 0 do 360 stupnjeva. Vrijednost tona boje se čita u krugu boje obrnuto od kazaljke na satu, ton boje je kut u kružnom prostoru boje (krugu boje), kao što je prikazano na slici 16., crvena boja ima ton H=0 stupnjeva, žuta boja ima ton H=90 stupnjeva, narančasta ima ton H=45 stupnjeva itd. Ton boje ne govori ništa o intenzitetu svjetla boje, odnosno npr. tamna crvena i svijetla crvena mogu imati isti ton, ton boje ne sadrži informaciju o intenzitetu, ton nam govori o identitetu boje, kaže nam koja je boja crvena, koja zelena itd.



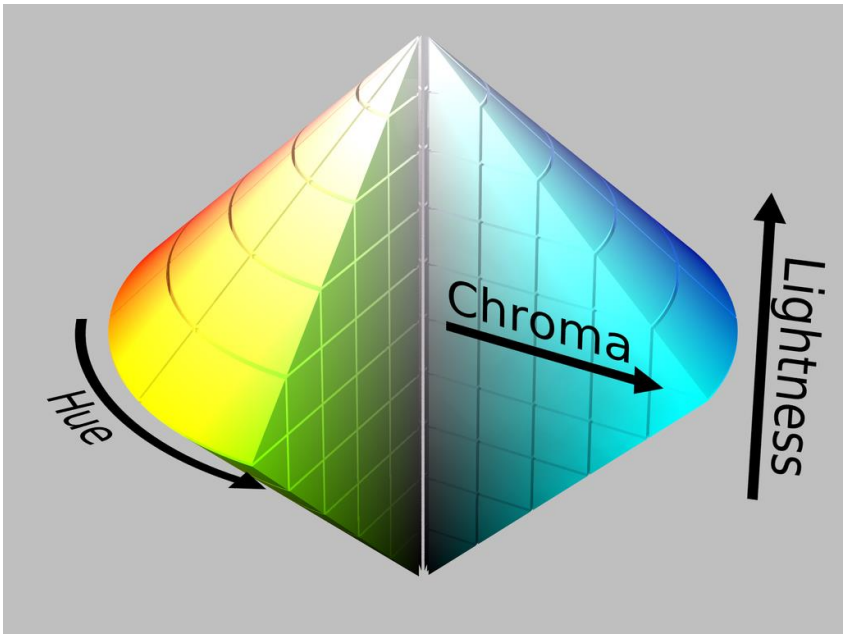
Slika 16. Krug boje, ton boje je kut kojeg čitamo obrnuto od kazaljke na satu npr. crvena je na nula stupnjeva, žuta na 90 stupnjeva, zelena na 180 stupnjeva, plava na 270 stupnjeva, narančasta na 45 stupnjeva itd. Svi tonovi boja su zastupljeni na krugu boje. Slika je preuzeta sa [21].

Zasićenost boje (*chroma*, oznaka C) nam ukazuje na proporciju udjela čiste boje u ukupnom vizualnom doživljaju boje [9]. Mogli bi reći da zasićenost (kromatičnost) govori u kojoj je mjeri čista boja pomiješana sa bijelom, sivom ili crnom. Zasićenost boje je na krugu boje predstavljena udaljenošću od središta kruga, odnosno što je boja dalje od središta to je veća zasićenost tj. boja je "čišća", kao što je prikazano na slici 17. Na slici 17. vidimo krug boje, u središtu je udio kromatskih boja mali pa prevladava siva boja tj. kako idemo prema središtu zasićenost boje se smanjuje, a kako se udaljavamo od središta boja postaje zasićenija, tako da dalje od središta i na rubovima kruga imamo jasno vidljive boje. Na slici 16. nismo pokazali puni krug boje, nego samo isječak jer smo govorili samo o tonu boje koji je predstavljen kutom (zanemarili smo zasićenost), na slici 17. vidimo primjer punog kruga boje, vidimo da i udaljenost od središta (zasićenost) i kut (ton) definiraju boju.



Slika 17. Krug boje . Kao i prije, vidimo da se različite boje nalaze na različitim kutovima što definira ton boje, a udaljenost od središta kruga nam govori o zasićenosti (kromatičnosti) boje, boje dalje od središta su zasićenije ("čišće") tj. što smo dalje od središta manji je udio akromatskih boja (bijele, sive i crne). Slika je preuzeta sa [22].

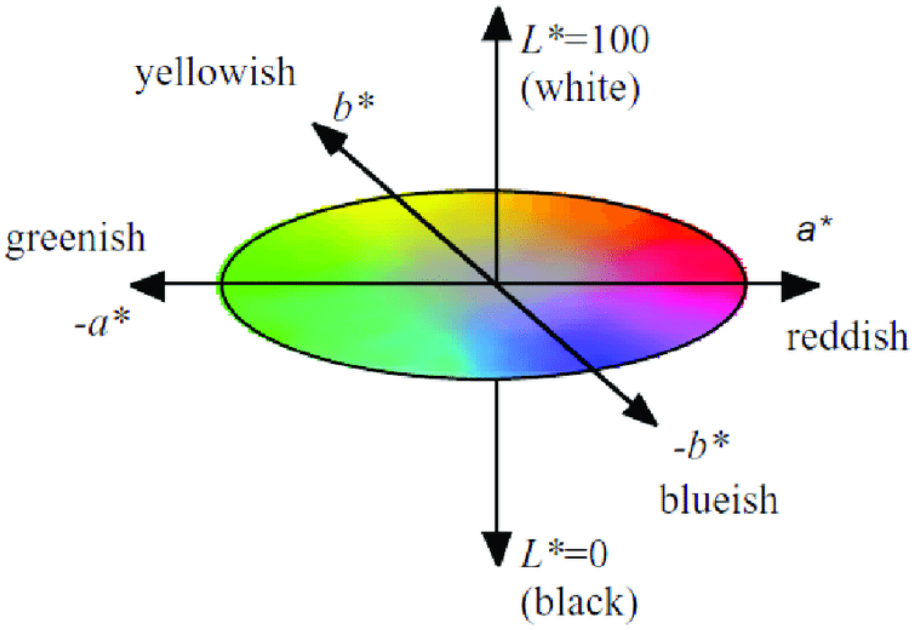
Koordinate kromatičnosti su ton i zasićenost, one boju prikazuju u dvodimenzionalnom prostoru i ništa ne govore o intenzitetu svjetlosti boje, za potpun opis boje potreban je još jedan atribut vizualnog doživljaja, a to je svjetlina (*lightness,* oznaka L). Svjetlina je atribut vizualnog doživljaja koji opisuje sličnost boje s nizom akromatskih boja, od crne preko sive do bijele [9]. Svjetlina se mijenja od 0 svjetlosnih stupnjeva (bezdimenzionalna jedinica) za apsolutno crno do 100 svjetlosnih stupnjeva za apsolutno bijelo i govori nam koliko je neka boja svijetla ili tamna, odnosno slična bijeloj ili crnoj boji. Svjetlina (*lightness*) se grafički prikazuje okomito na krug boje kojeg čine ton (*hue*) i zasićenost (*chroma),* kao što je shematski prikazano na slici 18. Na slici 18. svjetlina raste od dole prema gore, geometrijsko tijelo koje je formirano dodavanjem svjetline na ton i zasićenost je u ovom shematskom prikazu dvostruki stožac (općenito ne mora bit, kao što ćemo vidjeti u idućem poglavlju), u donjem vrhu dvostrukog stošca boje su sličnije crnoj, kako svjetlina raste (prema gore) boje su sličnije sivoj i u gornjem vrhu su sličnije bijeloj.



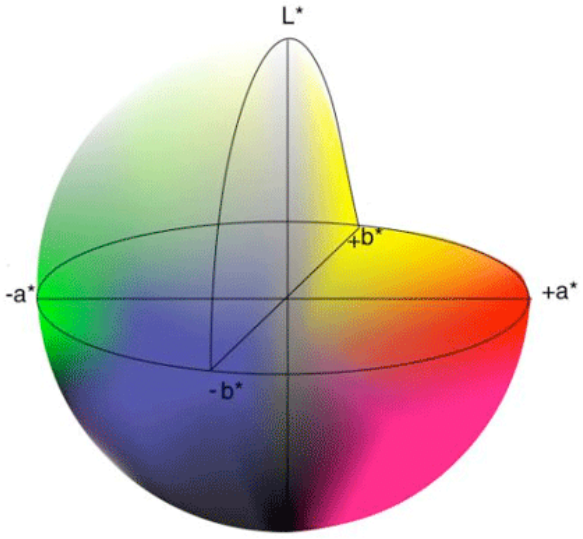
Slika 18. Shematski prikaz sva tri atributa vizualnog doživljaja boje: tona (*hue*), zasićenosti (*chrome*) i svjetline (*lightness*). Slika je preuzeta sa [23].

2.5. CIELAB sustav vrednovanja boje

Organizacija CIE je 1976. god. kao najprihvatljiviji sustav za brojčano vrednovanje boja standardizirala tzv. CIELAB sustav , koji se koristi i u tekstilu [9]. CIELAB prostor se sastoji od osi svjetline L^* , te osi a^*i b^* koje daju koordinate boje (ton, zasićenost). Osi tog sustava su prikazane na slici 19. CIELAB prostor je trodimenzionalan (tri osi), ali na slici 19. opet imamo samo prikazan dvodimenzionalni krug boje na nekoj vrijednosti svjetline ($L^* = 50$) , jer ne možemo na dvodimenzionaloj plohi (papiru/ekranu) grafički prikazati trodimenzionalni lik ispunjen bojom, što bi zapravo odgovaralo svim točkama CIELAB prostora. Često se CIELAB prostor shematski prikazuje kao sfera ispunjena bojom kao na slici 20. s tim da su promjene boje kvalitativno u skladu sa promjenama tona, zasićenosti i svjetline, također, na slici 20. jedan dio sfere je izbačen (“isječen”) da bi mogli vizualizirati promjene tona, zasićenosti i svjetline u sferi.



Slika 19. CIELAB sustav. Koordinate a^* i b^* definiraju ton i zasićenost boje, a koordinata duž osi L^* definira svjetlinu boje. Slika je preuzeta sa [24].



Slika 20. Trodimenzionalni shematski prikaz CIELAB sustava. Slika je preuzeta sa [25].

Prostori boje su trodimenzionalni i nije ih lako vizualizirati, ali ono što je bitno je da su njihove koordinate dobro definirane i svi su međusobno povezani i povezani sa standardnim CIEXYZ prostorom koji obuhvaća sve boje i njegovim tristimulus vrijednostima, tako da boju možemo dobro definirati i prenijeti informaciju nekom drugom koju boju želimo postići i slično.

Veza CIELAB koordinata a^*, b^*,L^* i CIEXYZ tristimulus vrijednosti X, Y, Z dana je sljedećim matematičkim relacijama [9]:

$$L^* = 116 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

$$a^* = 500 \cdot \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right]$$

$$b^* = 200 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right]$$

gdje je

$$f(x) = \begin{cases} (x)^{\frac{1}{3}}\ , & za\ \ x\ > 0{,}008856 \\ 7{,}787 \cdot x + 16/116\ , & za\ \ x\ \leq 0{,}008856 \end{cases}$$

U gornjim relacijama, X_n, Y_n, Z_nsu standardizirane tristimulus vrijednosti za referentnu bijelu boju. Ako odaberemo CIEXYZ funkcije podudaranja boje (spektralne krivulje standardnog promatrača) sa kutom gledanja od 10 stupnjeva i izvor svjetla D_{65}, iznose $X_n = 94{,}81\ , Y_n = 100\ , Z_n = 107{,}3$.

Jednom kad dobijemo koordinate u CIELAB sustavu, možemo izračunati ton boje koristeći relaciju :

$$h^0 = arctg(b^*/a^*)$$

Relacija iznad nam govori da je ton boje kut u ravnini koju razapinju osi a^* i b^* , čitamo ga u smjeru obrnutom od kazaljke na satu, te vrijedi $h^0 = 0^0$ za crvenu boju, $h^0 = 90^0$ za žutu, $h^0 = 180^0$ za zelenu i $h^0 = 270^0$ za plavu, ostale boje imaju vrijednosti kuta između tih.

Zasićenost C^* dobivamo po Pitagorinom poučku: $C^* = \sqrt{a^* + b^*}$

Vidimo da zasićenost (*chroma*-kromatičnost) zapravo predstavlja udaljenost od osi svjetline, odnosno od središta kruga boje.

Ako mjerenjem neke boje dobijemo CIEXYZ tristimulus vrijednosti $X, Y\ i\ Z$, koristeći gornje relacije možemo izračunati koordinate te boje u CIELAB sustavu. U idućem poglavlju ćemo prezentirati računalni kod koji u programskom paketu MATLAB provodi taj račun.

3. Pretvorba CIEXYZ koordinata u CIELAB koordinate koristeći MATLAB

Ovdje iznosimo računalni program, napravljen u MATLAB-u, koji preračunava CIEXYZ koordinate u CIELAB koordinate. Možemo staviti brojeve po izboru, mi smo tu uzeli za primjer tristimulus vrijednosti koje odgovaraju crvenoj boji.

```
%definiraj CIEXYZ koordinate
X=32.4
Y=21.44
Z=13.79
%standardne vrijednosti za referentnu bijelu, izvor D65
Xn=94.81;
Yn=100;
Zn=107.3;
%izraèunaj potrebne omjere
omjerX=X/Xn;
omjerY=Y/Yn;
omjerZ=Z/Zn;
%izraèunaj funkcije f(x) za sluèajeve kad su omjeri <ili> od 0.008856
if omjerX>0.008856
omjerX=omjerX^(1/3);
end
if omjerX<=0.008856
omjerX=7.787*omjerX+16/116;
end
if omjerY>0.008856
omjerY=omjerY^(1/3);
end
if omjerY<=0.008856
omjerY=7.787*omjerY+16/116;
end
if omjerZ>0.008856
omjerZ=omjerZ^(1/3);
end
if omjerZ<=0.008856
omjerZ=7.787*omjerZ+16/116;
end
%izraèunaj CIELAB koordinate
%svjetlina
L=116*omjerY-16
%koordinate kromatièwhen
a=500*(omjerX-omjerY)
b=200*(omjerY-omjerZ)
%izraèunaj ton boje i zasiæenost
h=atand(b/a)
C=sqrt(a^2+b^2)
```

Rezultat izvršenja tog kod-a je:

L*= 53.4277

a* = 50.3122

b* = 18.7735

h = 20.4625

C* = 53.7006

Provjerili smo rezultat u literaturi [9], slaganje je izvrsno.

4.PSIHOLOGIJA BOJE

Boje na nas psihološki djeluju na različite načine, ali neki ljudi boje vole više ili manje, dok neke boje uopće ne vole. S obzirom na to da boje u velikoj mjeri utječu na nas i predstavljaju svojevrsnu neverbalnu komunikaciju te su prisutne u svakom prostoru, mediju, odnosno u svakom segmentu našeg života, s bojom je potrebno eksperimentirati. U svijetu vizualnog komuniciranja boja ima nezaobilazno mjesto, one komuniciraju i s obzirom na to bitno je znati što one znače te koja su njihova pozitivna i negativna značenja kako bi mogli pravilno komunicirati. Psihologija boja je dio psihologije koji se bavi proučavanjem emocija i reakcija promatrača na određene boje. Ljudi različito reagiraju na određene boje i one izazivaju različite ljudske emocije, raspoloženja i ponašanja.

Ne zna se od kada točno ljudi razlikuju boje, ali se pretpostavlja da još u nomadska vremena te da su prvo žene razvile sposobnost razlikovanja boja zbog toga jer su sakupljale bobice i hranu za obitelj dok su muškarci lovili, te su morale naučiti raspoznavati otrovan plod od jestivog. No filozofi prije naše ere su započeli sa istraživanjem boja. Boja je oduvijek očaravala ljude i kao takva bila je misterij u mnogim kulturama, no, iako je svaka civilizacija prepoznavala boje, određivanje boje imenom bilo je vrlo ograničeno, pa su tako mnoge civilizacije definirale samo crnu i bijelu, koje su najčešće određene kao svijetla i tamna boja. Aristotel je u četvrtom stoljeću p.n.e. definirao boje, odnosno definirao je žutu i plavu kao „primarne boje“ [26]. Te primarne boje doveo je u suprotnu vezu pa je njihovo značenje bilo: sunce-mjesec, muškarac-žena, širenje-sužavanje, voda-vatra, zemlja-zrak, te je ubrzo nakon prvih postavki značenja boja, boje usporedio sa četiri elementa: s vatrom, vodom, zemljom i zrakom. Aristotelove principe definiranja boja umjetnici širom svijeta su skoro dvije tisuće godina primjenjivali iste, sve dok u 17. stoljeću poznati fizičar Newton nije postavio generalnu teoriju o bojama.

Modernu generalnu teoriju o bojama dao je Sir Isaac Newton 1672., otkrio je da se iz bijele svjetlosti može dobiti cijeli spektar boja, a otkriće je ustanovio tako da je bijelu svjetlost propustio kroz prizmu i izlazna svjetlost je bila rastavljena na spektar [27]. Ljudsko oko sposobno je razlikovati 200 monokromatskih boja, a u žutoj boji gdje je naše oko najosjetljivije mogu se detektirati razlike od 0,1 nm, pa se tako može uočiti da je doživljaj boje proces koji se odigrava u mozgu. Ulaskom svjetlosti u oko, optičkim živcima signal putuje u mozak i stvara se doživljaj boje. Boja ne postoji, boja je samo osjećaj. Johannes Wolfgang von Goethe nije se slagao sa Newtonovom interpretacijom boja. Usprkos tome što je Newtonov eksperiment sa prizmom dokazao da se svijetlost dijeli na sastavne boje. Smatrao je da ako je Newton u pravu, bijelo svijetlo bi se trebalo podijeliti u svim okolnostima. Kada je sam uperio bijelo svijetlo na zaslon, primijetio je da je u središtu slike i dalje bijela, dok se ostale boje pojavljuju na rubovima. To ga je odvelo do Aristotelove ideje da je plava prva vidljiva boja u mraku, dok je žuta prva vidljiva boja po danu. Dok je Newtonova teorija znanstveno potvrđena, Gothe-a je više zanimao psihološki učinak boje. Vjerovao je da je važno pratiti

ljudsku reakciju na podražaj boje, što je ujedno i bio početak današnje psihologije boja. U drugom dijelu devetnaestog stoljeća tempo razumijevanja boja se drastično ubrzava. Škotski fizičar James Clerk Maxwell, 1872.godine razvio je grafikon u obliku trokuta iz njegovog istraživanja o elektromagnetskoj teoriji svjetlosti [28]. Za primarne boje je uzeo crvenu, plavu i zelenu te vjerovao da se iz tih boja, miješanjem, mogu dobiti sve druge boje u trokutu. Njegova trokutasta shema je temelj *Commission Internationale de l`Eclairage* (CIE), kromatski graf koji se i danas koristi za mjerenje i određivanje svjetlosti. U kasnom dvadesetom stoljeću Anders Hard, Gunnar Tonquist i Lars Sivik stvorili su sustav prirodnih boja (NCS) koji se uglavnom temelji na Heringovoj teoriji kako ljudi doživljavaju boje. U dvadesetom stoljeću interes o boji sve više raste te je umijeće korištenja boje u terapeutske svrhe današnja svakodnevnica liječnika.

4.1. Psihologija boje kao terapija

Daleko u prošlosti, drevni ljudi su pridodavali boji jednak značaj kao i zraku koji su udisali. Okruženi zelenim oceanima, plavim nebom, crvenim eruptivnim vulkanima i zlatnim sunčevim zrakama, asocirali su boje striktno s preživljavanjem. Narančasti i crveni odsjaj na horizontu značili su zalazak sunca, a time i povratak svojim skloništima. Crvena bobica u grmlju značila je zrelo voće spremno za obrok. Primitivan čovjek je, pored kreiranja oružja i posuđa, veliku pažnju pridodavao crtanju. Najpoznatija nalazišta crteža iz tog vremena su unutrašnjosti špilja u Francuskoj –Lasacaux, i u Španjolskoj –Altamira. Te špilje sadržavaju ostatke realnih crteža životinja koje datiraju do 15 000 godina pr.Kr. Crteže su sačinjavali bizoni, nosorozi, jeleni, konji, veprovi, i vukovi. Ljudi su bili rijetko prikazivani i najčešće u jednostavnim grafičkim oblicima. Komunikacija crtežima mogla bi se smatrati početkom grafičke komunikacije. Daljnjim razvojem čovječanstva razvijala se mašta, izražavali su svoje ideje kroz arhitekturu, upravu, zakon i religiju, formirala su se civilizirana društva. Nadišli su svoje slikarske sposobnosti i počeli dizajnirati pomoću tkanina, metala, gline, krede i poludragog kamenja.

4.2. Terapija bojama

Odavno je poznata različitim kulturama diljem svijeta - od sjevernoameričkih Indijanaca do Indije i Kine. Prvi način liječenja bojama (koje su oblik elektromagnetske energije vidljivog svjetla) bila je upotreba sunčeva svjetla (helioterapija). Blagodati terapije bojama ključne su u našem biološkom sustavu. Većini enzima, hormona i vitamina svjetlo je nužno kako bi bili aktivni. Primjer je učinak sunčeve svjetlosti na sintezu vitamina D, bez koje to ne bi bilo moguće, kao i funkcija mnogih enzima, pa i onih odgovornih za liječenje žutice kod novorođenih beba, koje se izlažu plavom svjetlu kao terapijskoj metodi. Švicarski psiholog Luescher 40-ih godina prošloga stoljeća razradio je testove za otkrivanje mentalnog i fizičkog stanja ljudi, polazeći od njihovih reakcija na određene boje [29]. Svojim istraživanjima potvrdio je utjecaj svjetlosti i boja na autonomni živčani sustav, žlijezde i metabolizam općenito. Koristeći se bojama u dijagnostičke svrhe, a kasnije i kao terapiju, dr. Luescher nije otkrio ništa novo, jer je liječenje bojama dio tisućljetne povijesti većine drevnih kultura.

Koliko nam je svjetlo važno, svjedoči podatak kako su u predjelima zemlje gdje klima broji manje sunčanih dana česta depresivna stanja. Kako bi se tome doskočilo, u posljednje vrijeme se u tim sredinama sve češće koristi rasvjeta temeljena na cjelovitom svjetlu ("ott" tehnologija, po Johnu N. Ott-u). Terapija bojama provodi se usmjeravanjem svjetlosti različitih boja prema određenim centrima u tijelu radi uspostave ravnoteže. Koža prepoznaje boju, apsorbira je i preko specifičnih biokemijskih receptora prenosi stimulaciju kroz tijelo. U terapijskom smislu, boje se sve češće koriste u tretiranju alergija, upala, reumatskih bolova, migrene, hormonalnih smetnji i psihičkih tegoba, poput stresa, tjeskobe, umora, depresije, nesanice i strahova. Boje mogu stimulirati, normalizirati ili djelovati umirujuće.

4.3. Psihologija i djelovanje pojedinih boja

Crna boja apsorbira cijeli spektar boja. Često se koristi kao simbol prijetnje i zla, ali je također popularna kao pokazatelj snage i elegancije. Crna boja je u mnogim kulturama povezana sa žalosti, ali isto tako primjer je formalnosti i sofisticiranosti. Crna je izvrsna tehnička boja i usko je povezana sa sofisticiranim visoko tehnološkim tržištem. Nadopunjuje ostale boje te im pomaže da se istaknu. Ljudi koji volje crnu boju mogu biti skloni pesimističnom i melodramatičnom pogledu na svijet. Također su skloniji depresiji. U dizajnu, crna ostavlja utisak prefinjenosti, misterioznosti i elegancije.
SIMBOLIKA: sofisticiranost, elegancija, zavodljivost, misterija, glamur, sigurnost, emotivna stabilnost, opasnost…
Bijela boja predstavlja čistoću, neutralnosti, svijetla, zaštite i nevinost. Bijela boja označava sve i ništa u isto vrijeme. Odgovarajuća je boja za dobrotvorne organizacije jer je simbol anđela i dobrote. Bijela je najprodavanija boja, pogotovo u kombinaciji sa drugim bojama. Ljudi koji vole bijelu boju imaju snažne moralne nazore, pedantni su i precizni. U dizajnu, bijela je povezana sa profesionalizmom i poslovnošću.
SIMBOLIKA: čistoća, jednostavnost, higijena, efikasnost, sterilnost, hladnoća, elitizam, mladost, blagost…
Siva boja je između bijele i crne boje. Povezuje se s tehnologijom, strojevima i gradskim okruženjem. Može podsjećati na mudrost i sigurnost, a isto tako može izgledati ljutito. Može i izazvati osjećaj tuge i sjete. Ovu boju preferiraju osobe koje se svjesno ograđuju od vanjskih utjecaja. To su izrazito oprezni i racionalni ljudi koji se najbolje osjećaju kad su neprimjetni i u sjeni jer tada stvari drže, najlakše, pod kontrolom. U dizajnu se koristi kao idealna podloga za ekemente koje želimo istaknuti. Komplementarna je sa narančastom i ta kombinacija predstavlja jednu od najuspješnijih, ostavlja utisak ekskluzivnosti.
SIMBOLIKA: rafiniranost, mudrost, postojanost, zrelost, kompromis, monotonija…
Crvena boja je topla boja koja pobuđuje snažne osjećaje. Najčešće je asocirana sa ljubavlju, toplinom i udobnošću. S druge strane, može djelovati agresivno. Noseći crvenu drugima smo

privlačniji i šarmantniji. Crvena je povezana sa energijom, opasnosti, snagom i ljubavlju. Također je boja koja potiče apetit te povećava krvni tlak. U prirodi crvena može pokazivati opasnost poput crvenih otrovnih bobica. Ljudi koji vole crvenu boju su temperamentni i puni samopouzdanja. U dizajnu i umjetnosti crvena se koristi kao akcentna, sporedna, da bi na nešto stavili naglasak ili ostavili poseban utisak. Velike površine crvene mogu prezasititi prostor.
SIMBOLIKA: snaga, toplina, energija, uzbuđenje, strast, brzina, opasnost, stimulacija, muževnost, prkos, agresija, napor, pritisak, vizualni napor…
Plava boja je hladna boja koja podsjeća na osjećaj smirenosti i spokoja. Često je opisivana kao mirna, sigurna i uredna. Može i potaknuti osjećaj tuge ili rezerviranosti. Plava se često koristi za dekoriranje ureda jer je dokazano da su ljudi koji su okruženi tom bojom produktivniji. Utjecaj plave može smanjiti tjelesnu temperaturu i puls. Također, djeluje jako ugodno i opuštajuće na ljude. Plava je smatrana muževnom bojom, iako ju vole i žene. Svijetloplava je povezana sa zdravljem i liječenjem dok tamnoplava predstavlja dubinu, znanje, moć i ozbiljnost. Ljudi koji vole plavu znaju zaraditi novac i odrediti cilj u životu. Plava se koristi u reklamiranju proizvoda i usluga povezanih sa čistoćom i visoko tehnoloških proizvoda. Ponekad ju je potrebno izbjegavati i to u slučaju reklamiranja hrane i pića. Plava smanjuje apetit i djeluje odbojno kao hrana jer gotovo da i ne postoji prirodno plava jestiva biljka. U umjetnosti i u dizajnu je naročito popularna.
SIMBOLIKA: povjerenje, pouzdanost, prefinjenost, smirenost, realnost, odanost, sigurnost, misaonost, pripadnost, opuštenost, profesionalizam…
Zelena boja je hladna boja koja predstavlja rast, svježinu, plodnost i zdravlje. Pomaže otkloniti stres, najugodnija je oku te pomaže kod liječenja. Zelena boja ima emocionalnu povezanost sa sigurnošću no ponekad implicira pomanjkanje iskustva. Negativno je povezana s mučninom, bolešću i otrovanjem te sa neprirodnim fenomenima i različitim efektima. Puno ljudi voli zelenu boju. Ti ljudi su socijalni te se dobro prilagođavaju okolini. U umjetnosti i dizajnu je veoma zahvalna ali ne treba pretjerivati sa velikim obojenim površinama. Idealno se kombinira sa crvenom i narančastom.
SIMBOLIKA: priroda, svježina, zdravlje, hladnoća, rast, razvijanje, bogatstvo, novac, balans, sigurnost, stabilnost…
Narančasta boja je energična boja koja daje osjećaj uzbuđenja, entuzijazma i topline. Topla je boja koja se često koristi za reklame. Lakša je za oko od žute boje, ali opet nije toliko agresivna kao crvena. Narančasta boja poznata je kao boja koja pojačava apetit te se zato može često vidjeti u restoranima ili blagovaonicama. Jako je efektna za reklamiranje hrane i igračaka. Najdraža je boja druželjubivih i osjećajnih osoba. Također su veseli, zabavni i prijateljski raspoloženi. Odlično se kombinira sa sivom i zelenom a ove kombinacije se često koriste kao osnovne boje korporativnog identiteta.
SIMBOLIKA: sunce, ljeto, toplina, zanimljivost, postojanost, pozitivne vibracije, energija, egzotika, jug…
Žuta boja je svijetla boja toplog tona. Često je opisivana kao topla i vesela. Ujedno je i

najnapornija za oči, ako smo dugo izloženi njenoj prisutnosti. Žuta može također stvoriti osjećaj frustracije i ljutnje. Iako je smatranja veselom bojom, ljudi će najvjerojatnije izgubiti živce u žutim prostorijama. U prirodi žuta znači zagrijavanje te su često otrovne životinje prošarane žutom bojom. Žuta u kombinaciji sa crnom znak je upozorenja. Često je okarakterizirana i kao dječja boja te se koristi u dječjim reklamama koje su povezane sa razbibrigom. Ljudi koji vole žutu boju izrazito su društveni, optimistični i duhoviti. Vole je inteligentniji ljudi kao i ljudi sa duševnim poremećajima.
SIMBOLIKA: emotivnost, optimizam, sigurnost, prijateljstvo, samopoštovanje, kreativnost, iracionalnost, energija, tradicionalnost, spiritualnost
Ljubičasta boja je simbol bogatstva i plemića. Također predstavlja duhovnost, mudrost i ljubav. U prirodi se ne pojavljuje baš često, a može se pojaviti u nekom egzotičnom obliku. Svijetlo ljubičasta se smatra ženstvenom bojom dok tamno ljubičasta može biti depresivna. Također može djelovati kao simbol kreativnosti, a isto tako i žaljenje, smrt i mučninu. Ljubičasta je omiljena boja maštovitih, originalnih i kreativnih ljudi. Jako su šarmantni, ali teško održavaju odnose sa drugim ljudima. Često je vole i umjetnici te ljudi skloni umjetnosti.
SIMBOLIKA: uzvišenost, spiritualnost, dostojanstvo, visok položaj, poštovanje, otmjenost, luksuz, imućnost, prefinjenost…
Smeđa boja je topla boja koja daje osjećaj udobnosti i sigurnosti. No bez obzira što daje osjećaj pripadnosti isto tako, smeđa se smatra ružnom i odbojnom bojom. Ljudi koji vole smeđu boju žele izgledati starije kad su mladi i mlađe kad su stari. Njihov jak osjećaj odgovornosti može dovesti do paranoičnosti. Više ljudi ne voli smeđu boju nego što je voli. Prije će ju odabrati ljudi sa psihičkim problemima i koji su nestrpljivi. U umjetnosti i dizajnu se koristi u umjerenim količinama. Asocira na nešto jestivo…
SIMBOLIKA: ozbiljnost, toplina, podrška, oslonac, težina i nedostatak humora, manjak sofisticiranosti…
Roza boja je, u biti, svijetlo crvena i povezana je sa romantikom i ljubavi. Dokazano je da ima smirujući efekt, ali samo za vrijeme početnog izlaganja boji. Roza je jako ženstvena boja te predstavlja suosjećanje. Voljenje roze boje primijećeno je kod ljudi koji nemaju volje za rad. Ona predstavlja mladost i traženje puta u životu. Roza boja ne ostavlja jak dojam i ona se ili voli ili ne voli. U dizajnu se koristi kako bi se izrazila nježnost i smirenost. komplementarna je boji ljudske kože, tako da djeluje nenapadno i prirodno.
SIMBOLIKA: mekoća, sigurnost, ženstvenost, fizička smirenost, ljubav, seksualnost, nježnost, inhibicija…

ZAKLJUČAK

Boje su svugdje oko nas, uzimamo ih zdravo za gotovo, živimo s bojama, pridajemo im značenja i uživamo u njihovoj ljepoti, ali njihovo mjerenje, standardiziranje i vrednovanje su složen i matematički zahtjevan proces. U ovom radu smo se upoznali sa temeljnim pojmovima vezanim za mjerenje i vrednovanje boje, odnosno sa temeljnim pojmovima kolorimetrije. Objasnili smo što su tristimulus vrijednosti, prostori boje, koja je njihova fizikalna i matematička osnova i primjena. Upoznali smo CIE RGB 1931 prostor boje, koji je početak priče o standardiziranju boja i s njim povezan CIE XYZ prostor boje koji je prihvaćen kao svjetski standard u kolorimetriji. CIE XYZ prostor obuhvaća sve boje koje čovjek može percipirati, ali u primjenama se koriste drugi prostori boje pa smo definirali i opisali CIELAB prostor, koji se koristi i u tekstilu. Napisali smo računalni program koji vrši pretvorbu CIE XYZ koordinata u CIELAB koordinate, koristeći MATLAB. Na kraju smo se ukratko osvrnuli na psihološke učinke boje, jer pored mjerenja, matematike i svega ostalog, boja je prvenstveno doživljaj koji ostavlja utisak, impresiju, na našu psihu. U prilog tome stavljamo za kraj Van Goghovu impresiju zvjezdane noći (slika 21.).



Slika 21. Zvjezdana noć, Van Gogh. Slika je preuzeta sa [30] .

LITERATURA

[1] Ivan Supek : Povijest fizike, Školska knjiga, Zagreb, 2004.

[2] Image credit: *The Dark Side of the Moon*, Pink Floyd, 1973

[3]https://colourmanagement.wordpress.com/2013/11/05/isaac-newtons-prism-theory/

[4] Richard Feynman: Qed strange theory of light and matter, Princeton University Press, 2006.

[5]https://courses.lumenlearning.com/austincc-physics2/chapter/27-3-youngs-double-slit-experiment/

[6] http://www.gcestudybuddy.com/using-word-documents/electromagnetic-spectrum

[7]https://physics.stackexchange.com/questions/376486/relationship-between-electromagnetic-wave-and-photon

[8] Višnja Henč-Bartolić, Petar Kulišić: Valovi i optika, Školska knjiga, Zagreb, 2004.

[9] Đurđica Parac- Osterman: Osnove o boji i sustavi vrednovanja,II. Izdanje, Zagreb, 2013.

[10] https://etorg.blog/2011/05/02/light-day-1/

[11] https://training.tutorvista.com/content/physics/physics-ii/dispersion/opaque-objects.php

[12] https://www.slideshare.net/ormesbyscience/filters-1041412

[13] https://en.wikipedia.org/wiki/Cone_cell#/media/File:Cones_SMJ2_E.svg

[14] http://photobiology.info/introduction.html

[15]https://medium.com/hipster-color-science/a-beginners-guide-to-colorimetry-401f1830b65a

[16] Hugh S. Fairman, Michael H. Brill, Henry Hemmendinger: How the CIE 1931 Color-Matching Functions Were Derived from Wright–Guild Dana, 1998.

[17] Arthur D. Broadbent: Basic Principles of Textile Coloration, 2001.

[18] https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space

[19] https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space#Tristimulus_values

[20] https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space#Tristimulus_values

[21] https://www.pcimag.com/articles/83293-understanding-color-communicaton

[22] https://medium.theuxblog.com/basics-of-color-theory-83abc55ce94b

[23] https://en.wikipedia.org/wiki/HSL_and_HSV

[24] https://www.researchgate.net/figure/Illustration-CIELAB-color-space_fig4_258452774

[25] https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1799

[26] https://eprints.grf.unizg.hr /1856/

[27] https://ara.srce.hr/index.php/record/view/128431

[28]https://repozitorij.unin.hr/islandora/object/unin:1056/preview

[29] https://www.wish.hr/ucinkovita-terapija-bojama/

[30] https://en.wikipedia.org/wiki/The_Starry_Night