



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI  
FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU



# Kolorni vid i njegove anomalije

- stručni rad -

Mentori:

Prof. dr Olivera Klisurić

Doc. dr Dr Otto Barak

Kandidat:

Ana Lazarević

Novi Sad, 2014.

## Sadržaj

<b>UVOD</b>	3
OSNOVNA ANATOMIJA LJUDSKOG OKA	4
Očna jabučica	5
Pomoćni organi oka	6
Vidni putevi	7
Mrežnjača	8
Fotoreceptori	10
Fotohemija kolornog vida čepićima	13
ELEKTROMAGNETNI SPEKTAR	14
KOLORNI VID	15
Percepcija boja	15
TRIHORMATSKA TEORIJA BOJA	16
Istorijska razmatranja	16
Monohromazija	16
Dihromazija	19
Trihromazija	20
Komplementarna kolorna teorija	23
Moderni modeli kolornog viđenja	23
CIE SISTEM SPECIFIKACIJE BOJA	25
CIE dijagram hromatičnosti boja	27
ANOMALIJE KOLORNOG VIDA	29
Klasifikacija	29
Nasleđivanje slepila za boje	31
STANDARDNI TESTOVI ZA KOLORNI VID	32
Upotreba Išiharinih tablica	37
<b>EKSPERIMENTALNI DEO</b>	39
<b>REZULATATI</b>	45
<b>ZAKLJUČAK</b>	45
<b>LITERATURA</b>	47
<b>OPTOMETRIJSKI KARTONI</b>	48

## 1. UVOD

Razlikovanje boja u današnje vreme je neophodno za razvoj i obavljanje određenih stručnih poslova kao što su na primer dizajneri, oglašivači koji koriste „boje“ da bi njihovi proizvodi bili što privlačniji i prihvaćeniji od strane tržišta. Takođe je neophodno u mnogim delatnostima kao što su kozmetička industrija, tekstilna industrija, industrija automobila, prehrambena industrija itd. Ljudi sa daltonizmom ne mogu biti efikasni kao osobe sa dobrim raspoznavanjem boja. Osobe sa nekom vrstom daltonizma mogu predstavljati opasnost za sebe a i za druge učesnike u saobraćaju (ne raspoznavanje boja svetla semafora, stop svetla...). Zatim kod teškog razlikovanja boja dresova, stvara teškoće kod bavljenja sportom ili praćenja sportskih događaja.

Anomalije u viđenju boja mogu biti urođene ili simptomatska zbog nekog drugog ozbiljnijeg problema: dijabetes, multipla skleroza, alkoholizam, pojedini lekovi, trovanja mogu dovesti do ove pojave. Iz tih razloga, testovi za otkrivanje slepila za boje su u širokoj upotrebi od strane profesionalaca iz zdravstvene zaštite i ljudskih resursa.

Prihvaćen pristup za otkrivanje slepila za boje pretežno kod crveno-zelenog daltonizma su Išiharine tablice i američke optičke pseudo-izohromatske slike. Ostale metode za određivanje tipa i težine daltonizma koriste se Najdžel anomaloskop (*Nigel anomalescope*) ili Farnsvort-Munsel test (*Farnsworth-Munsell*) test koji zahtevaju veštog ispitivača i visoko baždarene uređaje.

Veoma je zanimljivo napomenuti da neki ljudi čak i nisu svesni da su slepi za određene boje. Ipak, rano otkrivanje ovih anomalija može olakšati izbor profesionalne karijere, jer u određenim zanimanjima je potrebno precizno poklapanje boja. Ova situacija je navela neke autore da uvedu „skrining“ vidljivosti boja posebno za dečake u srednjim školama.

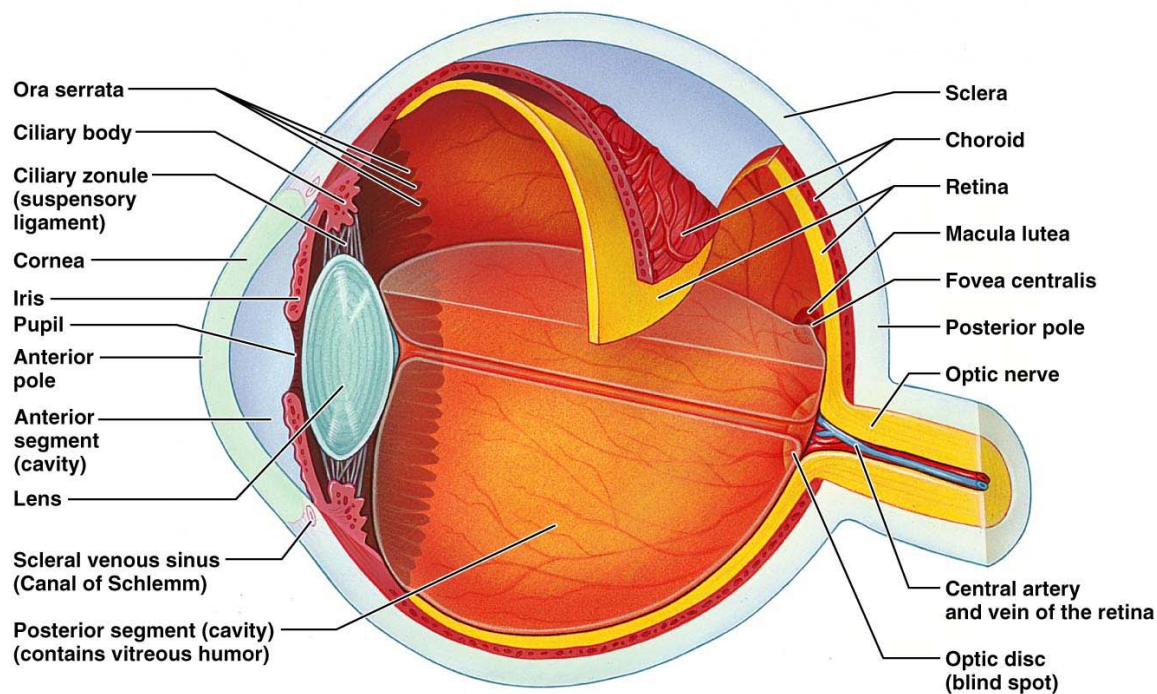
Međutim, za decu od 3 godine, boja se koristi u svakodnevnom životu. U školi se koristi kao sredstvo da se pomogne u indentifikaciji novih objekata, slova, brojeva, geometrijskih figura...

Za dalje razumevanje kako mi to vidimo boje, kako ih razlikujemo, koje je odgovoran za viđenje boja, koje su anomalije, potrebno je da se podsetimo koje su sve strukture oka odgovorne za prolazak informacija do centra za vid u moždanoj kori.

## 2. OSNOVAN ANATOMIJA LJUDSKOG OKA

Čulo vida, jedan od najvažnijih kanala prijema informacija iz spoljnog sveta kod čoveka (preko oka čovek prima oko 90% svih informacija iz spoljnog sveta), predstavlja biološki sistem koji se sastoji iz više funkcionalnih celina. Ove funkcionalne celine takođe predstavljaju podsisteme koji, svaki na svoj način, učestvuju u složenom procesu stvaranja optičke slike okoline. Čulo vida možemo podeliti na tri osnovna podsistema, odnosno, na tri osnovne funkcionalne celine:

- ◆ **Očna jabučica** (*Bulbus oculi*), koja vrši prijem i fokusiranje svetlosnog nadražaja (snopa elektromagnetnih talasa), da bi ga zatim na mrežnjači u odgovarajućem procesu pretvorila u električne signale;
- ◆ **Pomoćne strukture** oka (*Structurae oculi accessoriae*), koje imaju prvenstveno ulogu da zaštite očnu jabučicu i da omoguće normalno odvijanje svih onih složenih funkcija, koje su neophodne u procesu viđenja;
- ◆ **Vidni putevi**, koji spajaju očnu jabučicu, odnosno mrežnjaču očne jabučice, sa vidnim centrima u mozgu i na taj način vrše ulogu prenosioca električnih impulsa, prethodno stvorenih na mrežnjači, u odgovarajuće centre moždane kore, gde se električni nadražaj pretvara u vizuelni osećaj.



Slika 1. Jednostavna struktura oka

## Očna jabučica

Očna jabučica (*Bulbus oculi*) je smeštena u prednjem delu koštane očne duplje. Okružena je svojim mišićima i masnim delom očne duplje. Ona ima oblik neprovidne lopte čiji je prednji deo više ispupčen od zadnjeg. Očna jabučica ima veoma složen sastav u koji ulaze:

1. omotači očne jabučice (spoljna ili fibrozna opna, srednja ili sudovna opna i unutrašnja opna) i
2. sadržaj očne jabučice.

**1. Spoljna ili fibrozna opna očne jabučice** (*Tunica fibrosa bulbi*) je čvrsta fibrozna opna, koja štiti unutrašnjost oka i pruža otpor tzv. intraokularnom pritisku, koji deluje unutar očne jabučice. Takođe, ona služi i za pripajanje očne jabučice mišićima koji su odgovorni za njeno pokretanje. Sastoji se od rožnjače (*cornea*) i beonjače (*sclera*).

- ◆ **Rožnjača** predstavlja manju, prednju petinu spoljne očne jabučice. Providna je jer kroz nju ulazi svetlost u unutrašnjost oka pa nema ni krvnih ni limfnih sudova. Ima ulogu konveksno-konkavnog sočiva koje prelama i konvergira zrake. Rožnjača ima oblik odsečka lopte (kalote) te joj se razlikuju prednja - konveksna i zadnja - konkavna strana.
- ◆ **Beonjača** čini preostale četiri petine spoljne opne očne jabučice. To je čvrsta, nerastegljiva, beličasta i neprozirna opna oblika lopte presečene u prednjem delu gde se uvlači periferna ivica rožnjače. Osim ovog otvora, u beonjači se nalaze i drugi manji otvori koji služe za prolaz krvnih sudova, kanalića za regulisanje unutaročnog pritiska i živaca.

**2. Srednja ili sudovna opna očne jabučice** (*Tunica vasculosa bulbi*) leži između beonjače i mrežnjače i ima veoma važnu ulogu u ishrani očne jabučice, a posebno mrežnjače. Sastoji se iz tri dela: dužice (*iris*), cilijarnog dela (*corpus ciliare*) i sudovnjače (*choroidea*).

- ◆ **Dužica** ima ulogu dijafragme oka, jer reguliše količinu svetlosti koja ulazi u unutrašnjost oka kroz otvor – zenicu (*pupilla*), koja se nalazi u središnjem delu. Zenica se pomoću dva glatka mišića može sužavati ili širiti refleksno u zavisnosti od količine svetlosti koja stiže u oko.
- ◆ **Cilijarno telo** predstavlja srednji i najdeblji deo sudovne opne i nalazi se između dužice i sudovnjače. Stvara očnu vodicu i ima ulogu pri akomodaciji oka, koja se vrši pomoću cilijarnog mišića. Ima oblik trostranoprizmatičnog prstena, šireg napred nego pozadi.
- ◆ **Sudovnjača** predstavlja zadnji deo srednje opne očne jabučice. Njena ispupčena spoljna površina je neravna usled prisustva krvnih sudova i živaca u kapilarnom prostoru. Izdubljena unutrašnja površina sudovnjače je glatka i prirasla uz pigmentni sloj mrežnjače.

**3. Unutrašnja opna očne jabučice** (*Tunica interna bulbi*) se sastoji iz dva funkcionalno i morfološki različita sloja: pigmentnog sloja (*stratum pigmenti*) i mrežnjače (*retina*).

- ◆ **Pigmentni sloj** unutrašnje opne očne jabučice oblaže unutrašnju površinu dužice, cilijarnog tela i sudovnjače. Sastoji se iz jednoslojnog epitela, čije su ćelije ispunjene pigmentom. Zadatak mu je da spreči refleksiju svetlosti sa unutrašnje strane beonjače, tj. da je apsorbuje.
- ◆ **Mrežnjača** je deo unutrašnje opne očne jabučice čija je unutrašnja površina u kontaktu sa prozračnim sadržajem očne jabučice, a spoljna površina je pigmentnim slojem odvojena od sudovne opne očne jabučice. Mrežnjača se sastoji iz tri dela: dužični deo mrežnjače, cilijarni deo mrežnjače i optički ili vidni deo mrežnjače. Ova tri dela imaju različitu građu i značaj. Dužični i cilijarni deo mrežnjače su veoma tanki, sastavljeni su iz jednog sloja ćelija i nemaju fotoreceptivnu sposobnost te su nazvani slepi deo mrežnjače (*pars caeca*).

Vidni deo mrežnjače (*pars optica*) predstavlja najvažniji deo oka koji učestvuje u procesu viđenja. To je deblji sloj veoma složene građe i predstavlja jedini deo mrežnjače osposobljen za prijem svetlosnih nadražaja i njihovo pretvaranje u električne signale, zahvaljujući fotoreceptorskim ćelijama koje se u njemu nalaze. Električni signali se zatim šalju optičkim nervom do mozga.

**4. Sadržaj očne jabučice.** Unutrašnjost očne jabučice ispunjena je providnim delovima bez krvnih sudova. Veći deo unutrašnjosti, zadnje dve trećine očne jabučice zauzima staklasto telo (*corpus vitreum*). Ono naleže na mrežnjaču na čitavoj njenoj površini, a napred je ograničeno očnim sočivom. Osim što naleže na mrežnjaču i sprečava njeno nabiranje, obezbeđuje i njenu ishranu, a propušta i prelama svetlosne zrake. Očno sočivo (*lens*) je smešteno iza dužice, a ispred staklastog tela. Ima oblik bikonveksnog prozračnog sočiva, koje prelama svetlosne zrake i stvara na mrežnjači oštru obrnutu sliku predmeta. Ispred sočiva dužica deli prostor ispunjen očnom vodicom (*Humor aquosus*) na prednju i zadnju komoru. Očna vodica je bistra, bezbojna tečnost koja ispunjava obe komore i zajedno sa staklastim telom održava stalan intraokularni pritisak.

### **Pomoćni organi oka**

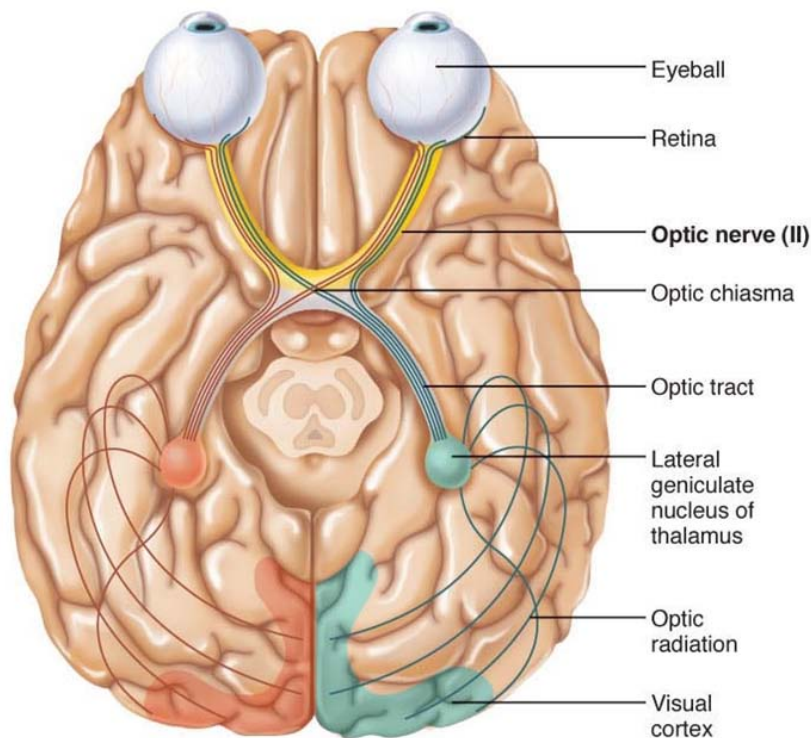
Pomoćni organi oka (*Organa oculi accessoria*) su:

- ◆ Mišići očne jabučice (*Masculi bulbi*), koji pomeraju očnu jabučicu u svim pravcima i usmeravaju oba oka u istom pravcu; ima ih šest i to četiri prava i dva kosa, od kojih su po dva uvek antagonisti.
- ◆ Fascije očne duplje (*Fasciae orbitalis*) su: a) Tenonova čaura, tanka čvrsta fibrozna opna u kojoj očna jabučica slobodno rotira bez pomeranja unazad; b) Mišićne fascije, tanki fascijalni omotači koji mišiće pokretače očne jabučice spajaju sa Tenonovom čaurom; c) Orbitalna pregrada, četvrtasta savitljiva ploča koja s preda nepotpuno zatvara ulazni otvor orbite i ulazi u sastav fibroznog sloja očnih kapaka.

- ◆ Obrve (*Supercilium*) su kožno-mišićni nabori koji u vidu luka leže iznad gornjih očnih kapaka i štite oči od znoja koji se sliva niz čelo.
- ◆ Očni kapci (*Palpebrae*) spreda pokrivaju otvor očne duplje i njen sadržaj; treptanjem raspoređuju suze i time ispiraju i vlaže rožnjaču.
- ◆ Vežnjača (*Tunica conjunctiva*) je glatka, sjajna i providna sluzokožna opna koja pokriva prednji deo očne jabučice i zadnju stranu oba očna kapka vezujući ih zajedno te odatle i potiče njen naziv.
- ◆ Periorbita (*Periorbita*) je tanka pokosnica očne duplje, koja pokriva njene koštane zidove.
- ◆ Masno telo orbite (*Corpus adiposum orbitae*) je polutečno masno tkivo koje ispunjava prazan prostor između koštanih zidova očne duplje i organa smeštenih u njoj. Takođe, olakšava pokrete očne jabučice.
- ◆ Suzni pribor (*Apparatus lacrimalis*) izlučuje i sprovodi suze. Sastoji se od suzne žlezde i odvodnih organa suza.

### Vidni putevi

Vidni putevi imaju ulogu da sprovode optički nadražaj od fotoreceptornih ćelija mrežnjače do moždane kore u okcipitalnom režnju, gde se vrši interpretacija vidnih nadražaja. U sastav vidnih puteva ulaze: optički živac, hijazma (ukrštanje očnih živaca), optički trakt, optička radijacija. Završavaju se u primarnom vizuelnom korteksu.



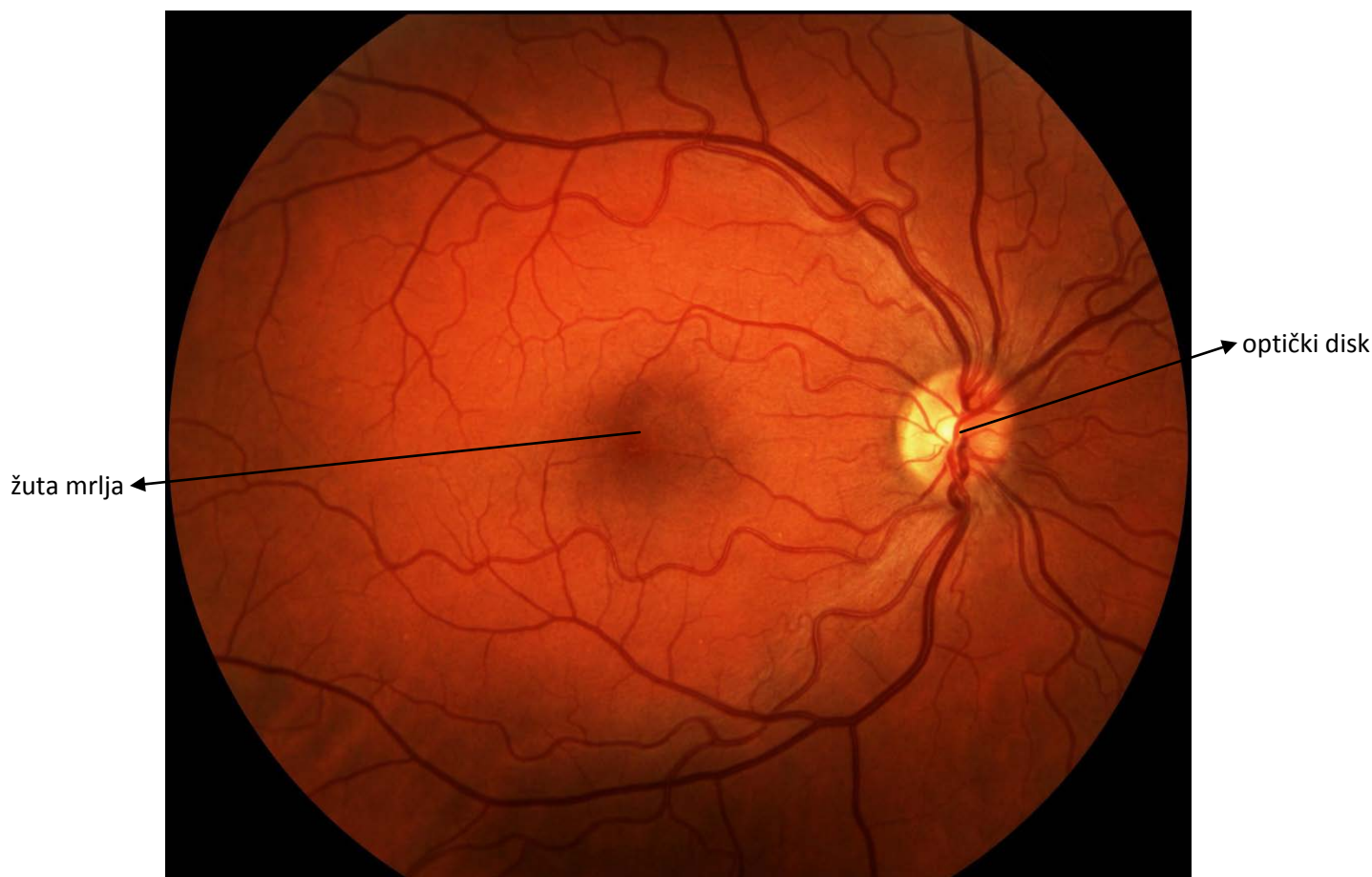
Slika 2. Vidni putevi

## Mrežnjača

Kao što smo videli u delu o anatomiji oka, optički deo mrežnjače je jedini deo oka osetljiv na svetlost. Njegova uloga je da pretvara svetlosnu sliku u električne signale, koji preko aksona (delova vidnog živca) putuju do mozga. Pretvaranje svetlosnih u električne signale odvija se u neuroepitelnim ćelijama, koje predstavljaju sastavni deo optičkog dela mrežnjče.

Optički deo mrežnjače je potpuno providan i ružičaste je boje. Ta boja potiče od specifične supstancije nazvane vidni purpur (rodopsin) koja se nalazi u neuroepitelnim ćelijama. Rodopsin je osetljiv na svetlost i na njoj se degeneriše, a u mraku se regeneriše.

Pomoću oftalmoskopa se može detaljno pregledati očno dno na kojem se nalaze: glava vidnog živca (optički disk) koja je slepa mrlja u vidnom polju. Ona je žućkaste boje, jasnih granica sa centralno postavljenim levkom krvnih sudova, gde ulaze *a. centralis retine*, a izlaze *v. centralis retine*. Na površini mrežnjace se nalaze takođe i termalni ogranci i kapilari centralne retinalne arterije koje su odgovorne za ishranjivanje unutrašnjih slojeva retine. Takođe se nalaze vene koje su tamnije i šire u odnosu na arterije koje su blede žućkaste i uže.

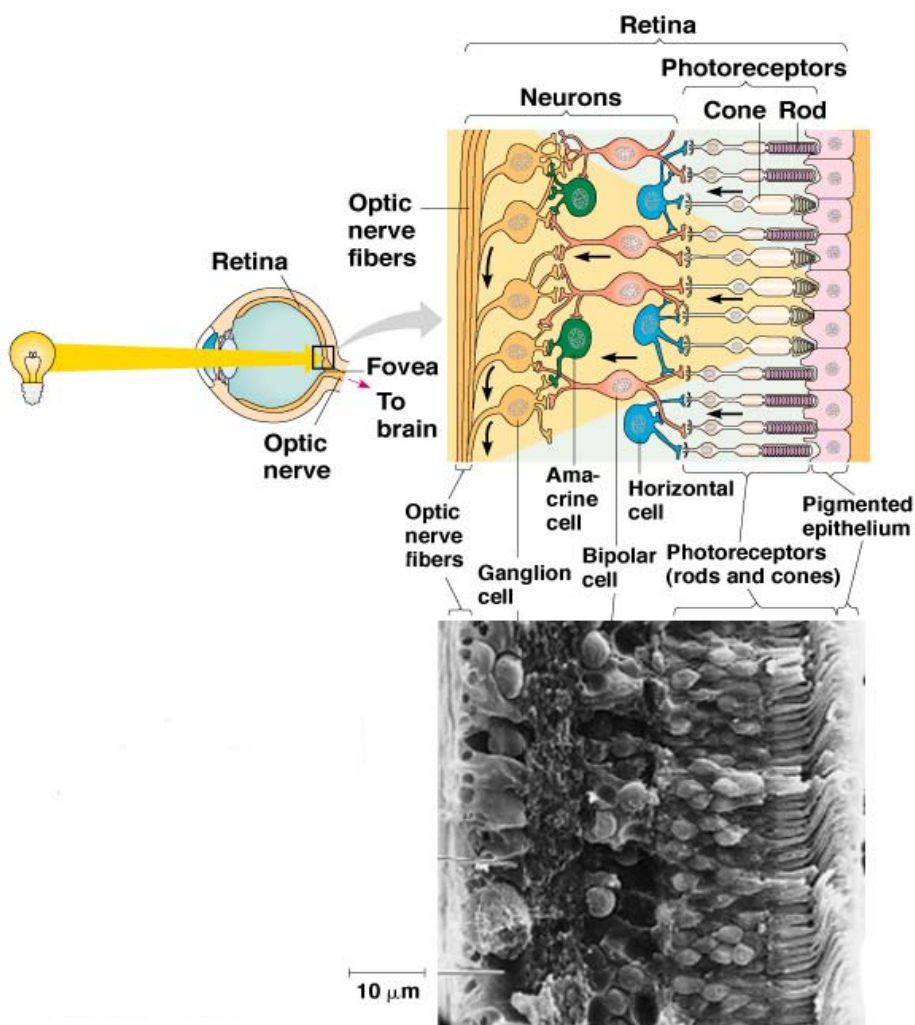


Slika 3 . Očno dno



Žuta mrlja (*Macula lutea*) koja je jače pigmentovana od okoline retine, bez krvnih sudova, nalazi se u centru mrežnjače i zauzima površinu manju od 1 kvadratnog milimetra. Centralna foveja, samo 0,3 mm u prečniku u potpunosti se sastoji od čepića. U fovealnom predelu su krvni sudovi, ganglijske ćelije, unutrašnji sloj jedara i pleksiformni slojevi pomereni u stranu, tako da ne leže direktno na vrhu čepića i time dozvoljava neometan prolazak svetlosti do njih.

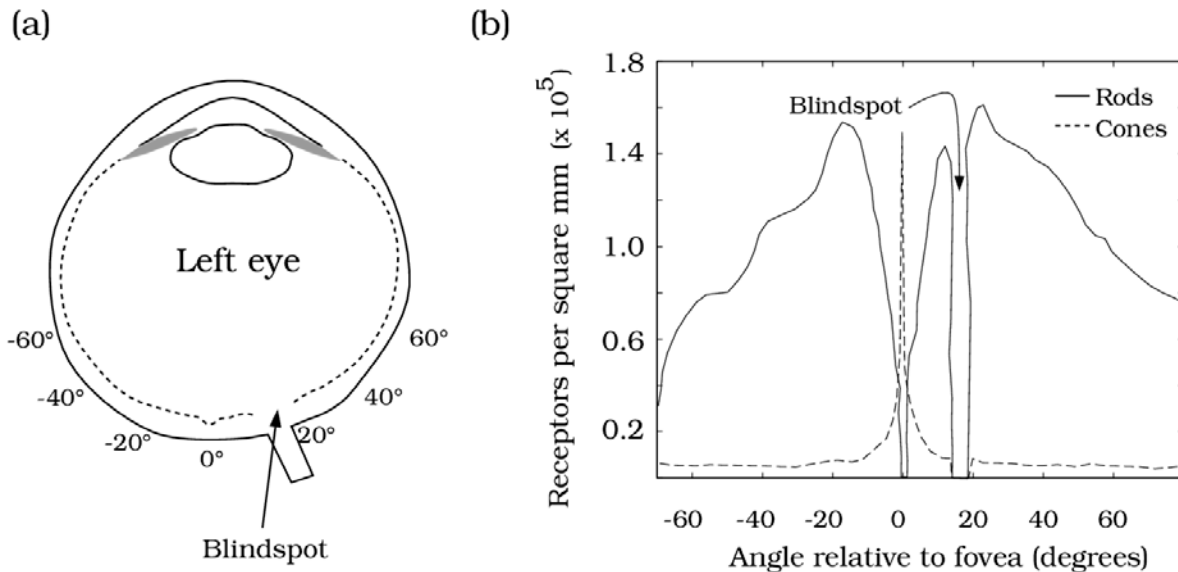
Optički deo mrežnjače se sastoji iz pet osnovnih slojeva: fotoreceptori (štapići i čepići); horizontalne ćelije - koje prenose signale horizontalno u spoljašnjem pleksiformnom sloju sa štapića i čepića na bipolarnu ćeliju; bipolarnu ćeliju koje prenose signale vertikalno sa štapića, čepića i horizontalnih ćelija do ganglijskih i amakrinih ćelija; amakrine ćelije - prenose signale automatski sa bipolarnih ćelija na ganglijske ćelije; ganglijske ćelije - prenose izlazne signale od retine kroz optički nerv do mozga (slika 4).



Slika 4. Slojevi retine

## Fotoreceptori

Štapići i čepići su simetrično raspoređeni u svim pravcima od vidne linije, sem u slepoj mrlji (slika 8.28). Njihova međusobna distribucija je različita. U samom centru – centralnoj jamici nalaze se samo čepići u velikom broju, da bi se sa udaljavanjem od centra njihov broj drastično smanjivao. Broj štapića je najveći na oko 20° od centra. Slepa mrlja se nalazi između 10° i 20° od centra u pravcu spoljnog dela oka.

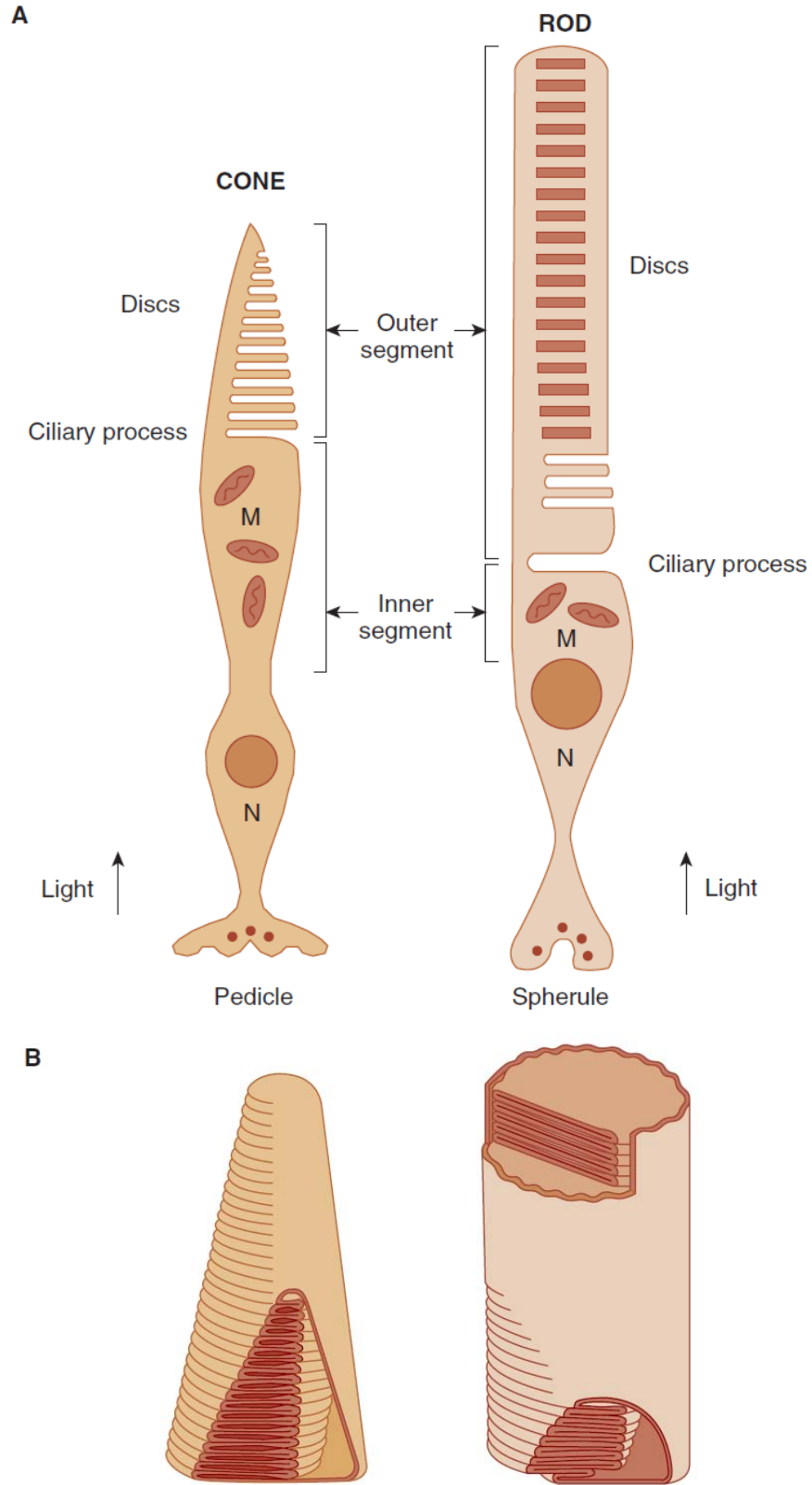


Slika 5. Distribucija čepića i štapića na retini

Spoljašnji segment čepića je kupast. Štapići su uži i duži od čepića, ali to nije uvek slučaj. U perifernim delovima mrežnjače štapići su 2-5  $\mu\text{m}$  u prečniku, dok su čepići 5-8  $\mu\text{m}$  u prečniku, a u centralnom delu retine, u foveji, čepići su tanji i imaju prečnik samo 1,5  $\mu\text{m}$ . Funkcionalni delovi fotoreceptora: 1) spoljašnji segment, 2) unutrašnji segment, 3) jedro, 4) sinaptičko telo. U spoljašnjem segmentu nalazi se fotohemijska supstanca osetljiva na svetlost. Kod štapića je to rodopsin, a kod čepića jedna od tri „kolorne“ fotohemijske supstance, koje se obično zovu obojeni pigmenti i koji funkcionišu indentično kao i rodopsin, osim razlike u spektralnoj osetljivosti.

Kod čepića i štapića u spoljašnjem segmentu se nalazi veliki broj diskova (u svakom štapiću i čepiću i do 1000 diskova). Taj disk predstavlja uvrnutu policu ćelijske membrane.

Kolorni pigment i rodopsin su konjugovani proteini, koji su ugrađeni u membrane diskova u obliku transmembranskih proteina. Koncentracija tih fotosenzitivnih pigmenata u diskovima čini približno 40% ukupne mase spoljašnjeg segmenta.



Slika 6. (A) Izgled štapića (desno) i čepića (levo). Jedro je obeleženo sa N, a mitohondrije sa M. (B) Šematski prikaz spoljašnjeg segmenta kod čepića i štapića.

Unutrašnji segment štapića i čepića sadrži citoplazmu sa citoplazminim organelama. Veoma su značajne mitohondrije koje igraju značajnu ulogu u obezbeđivanju energije za funkciju fotoreceptora. Sinaptičko telo je deo štapića i čepića koje ih povezuje sa neuronima, horizontalnim i bipolarnim ćelijama. Pigmentni sloj mrežnjače - melanin (crni pigment) sprečava odbijanje svetlosti unutar očne jabučice. Bez melanina bi se svetlosni zraci odbijali u očnoj jabučici u svim pravcima i izazvali difuzno osvetljenje mrežnjače, tako da ne bi bilo normalnog kontrasta između tamnih i svetlih tačaka koji je potreban za stvaranje jasnih slika. Pigmentni sloj skladišti velike količine A vitamina koji je važan prekursor fotosenzitivnih hemijskih supstanci štapića i čepića.

Rodopsin ili vidni purpur je spoj proteina skotopsina i karotinoidnog pigmenta retinala, zapravo posredi je vrsta retinala nazvana 11-cis-retinal. Cis-oblik je veoma bitan jer se samo taj oblik može spojiti sa skotopsinom i dati rodopsin. Kada dođe do apsorpcije svetlosne energije od strane rodopsina, počinje njegova razgradnja koja traje ni dve sekunde. Sve je to uzrokovano fotoaktivacijom elektrona u retinalnom delu rodopsina, što trenutno izaziva promenu cis-oblika retinala u all-trans oblik, koji još uvek ima istu hemijsku građu kao i cis-oblik, ali ima različitu konformaciju. All-trans-retinal počinje da se odvaja od skotopsina jer se više ne uklapa sa reaktivnim mestima na tom proteinu.

Neposredni proizvod je batorodopsin, koji predstavlja delimično razgrađen spoj all-trans-retinala i skotopsina. Pošto je batorodopsin nestabilan on se za nekoliko nanosekundi razgradi u lumirodopsin. Zatim se u toku mikrosekundi razgradi u metarodopsin I i za oko milisekundu u metarodopsin II, gde se mnogo sporije (sekunde) pretvara u završne proizvode: skotopsin i all-trans-retinal.

Prvi stadijum ponovnog stvaranja rodopsina je pretvaranje all-trans-retinala u 11-cis-retinal. Jednom kada se 11-cis-retinal stvori, on se automatski ponovo spaja sa skotopsinom i tako se obnavlja rodopsin. Stvoreni rodopsin je stabilan spoj, sve dok ponovo ne započne njegova razgradnja usled apsorpcije svetlosne energije.

Vitamin A igra veliku ulogu u stvaranju rodopsina. Vitamin A se nalazi u citoplazmi štapića i u pigmentnom sloju mrežnjače. Tako da je vitamin A uvek dostupan za stvaranje novog retinala kada je to potrebno. Kada postoji višak retinala u mrežnjači, on se pretvara nazad u vitamin A i na taj način smanjuje količinu pigmenta osetljivog na svetlost mrežnjače. Neke osobe imaju nedostatak vitamina A i tada se kod takvih ljudi javlja tzv. „noćno slepilo“ jer je količina svetlosti u toku noći mala da omogući odgovarajuće viđenje. Uzrok tome je što nema dovoljno vitamina A potrebnog za stvaranje odgovarajuće količine retinala i rodopsina.



Slika 7. Noćno slepilo (sredina slike), leva i desna strana slike pokazuju kako normalna osoba vidi noću.

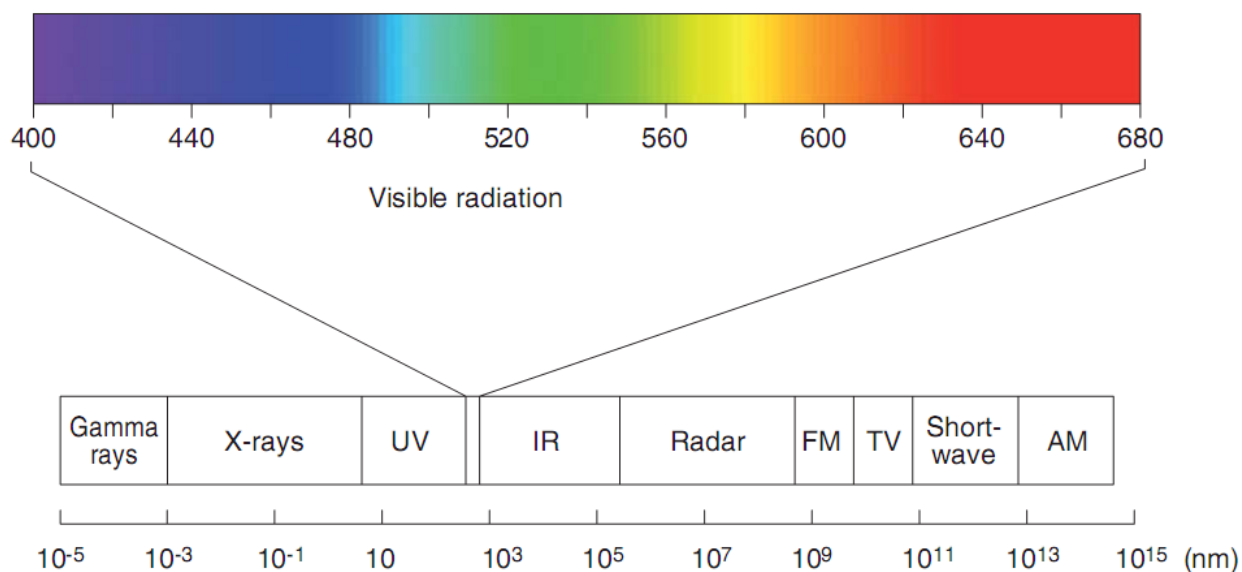
### Fotohemija kolornog vida čepićima

Pigmenti osetljivi na boje u čepićima su kombinacija retinala i fotopsina. U jednoj vrsti čepića se nalazi jedan od tri vrste kolornih pigmenata što omogućava selektivnu osetljivost na različite boje: plavu, zelenu i crvenu. To bi značilo da pigment u ove tri vrste čepića pokazuje maksimum apsorpcije svetlosti talasnih dužina koje su osetljive za svaki tip čepića, što objašnjava mehanizam kojim mrežnjača razlikuje boje (445, 535 i 570 nm).

<u>Upoređivanje osobina štapića i čepića</u>		
štapići	čepići	komentar
Ove ćelije su mnogo osetljivije na svetlo i dobro funkcionišu pri slabom svetlu (skotopsko viđenje)	Manje osetljiviji na svetlo, ali dobro funkcionišu pri jakom svetlu (fotopsko viđenje)	
Samo jedna vrsta štapića se nalazi na retini i može da apsorbuje sve talasne dužine vidljive svetlosti; više fotopigmenata	Tri vrste čepića se mogu naći na retini. Jedna vrsta je osetljiva na plavu svetlost, druga na zelenu, treća na crvenu svetlost; manje fotopigmenta	Štapići ne mogu da razdvoje detalje i granice predmeta kao ni boju
120 miliona štapića	6 miliona čepića	
Skoncentrisani u perifernoj mrežnjači	Skoncentrisani u makuli	Štapića nema u foveji
Slaba temporalna rezolucija	Dobra temporalna rezolucija	
Spor odgovor, dugačko vreme integracije	Brz odgovor, kratko vreme integracije	
Ahromatski	Hromatski	
Fotohemijaska supstanca : rodopsin	Jedna od tri fotohemijske supstance koje se nazivaju obojeni pigmenti	

## ELEKTROMAGNETNI SPEKTAR

Elektromagnetni talasi u prirodi imaju širok opseg frekvencija, odnosno talasnih dužina (slika 8). Dijapazon svih talasnih dužina predstavlja spektar elektromagnetnog zračenja. U spektru se izdvajaju pojedine oblasti koje imaju određene nazive zavisno od načina nastajanja i osobina koje pokazuju u interakciji sa sredinom kroz koju prolaze (slika 30).



Slika 8. Elektromagnetni spektar

Najmanju talasnu dužinu, najvišu frekvenciju i najveću energiju imaju gama-zraci (slika 8). Najčešće nastaju kvantnim prelazima u jezgrima atoma. Posle gama-zraka dolaze rendgenski (ili X) zraci, koji nastaju pri interakciji brzih elektrona sa orbitalnim elektronima i jezgrima atoma elemenata višeg rednog broja. Veće talasne dužine i niže frekvencije od X-zraka imaju ultraljubičasti (UV) zraci, posle kojih dolazi vidljivi deo spektra koji ima najuži opseg ( $\lambda \cong 400 - 700 \text{ nm}$ ). To je jedini deo ukupnog spektra elektromagnetnog zračenja koji može da registruje ljudsko oko. Vidljivi zraci nastaju kvantnim prelazima elektrona u elektronskom omotaču atoma i molekula.

Sa daljim povećanjem talasnih dužina vidljivi deo spektra prelazi u infracrveno (IC) zračenje, koje intenzivno emituju zagrejana tela pa se često naziva i toplotno zračenje. Elektromagnetni spektar se nastavlja talasima koji nastaju u oscilatornim električnim kolima. Dele se na ultrakratke (UKT), kratke (KT), srednje (ST) i duge (DT) talase (radiotalase).

Granice između pojedinih vrsta elektromagnetnog zračenja nisu oštre, već dolazi do prekrivanja u prelaznim oblastima. To dolazi otuda što talasna dužina nije jedina karakteristika određenog zračenja, već i način dobijanja, upotreba, osobine koje ispoljavaju u interakciji sa sredinom kroz koju prolaze itd. Belo svetlo je „mešavina“ boja više monohromatskih svetlosti, koja se može dokazati u ogledima poput Njutnovog experimenta sa prelamanjem svetlosti kroz prizmu gde je razdvojio belu svetlost na sedam boja, a može se i sresti u prirodi u fenomenima poput formiranja duge. Crna je potpuno odsustvo svetlosti, tako da ljudski mozak ne prima nikakav signal prilikom gledanja u crnu boju.



*Slika 9. Njtn razlaže belu svetlost pomoću prizme.*

## **KOLORNI VID**

### **Percepcija boja**

Sposobnost razlikovanja boja otkrivena je kod mnogih vrsta. Najverovatnije se razvila kod primata pri razmatranju konkurentske prednosti majmuna da otkrivaju i biraju jestivo tropsko voće i lišće (Osorio and Vorobyev, 1996). Hromatski kontrast (kao i fotometrijski kontrast) pruža nam mogućnost prepoznavanja i lokalizacije predmeta koji bi u suprotnom bili teško uočljivi na pozadini na kojoj se nalaze i prema tome doprinose našim vizuelnim mogućnostima.

Percepcija boja naširoko je istraživana tokom dva poslednja veka. Pronalasci u ovom polju daju nam poučan primer kako psihofizika, anatomija, neuropsihologija i molekularna genetika mogu biti upotrebljeni i međusobno povezani kako bi poboljšali razumevanje osnovnih bioloških mehanizama. Dosta od onoga što je naučeno poseduje važne kliničke implikacije.

## TRIHROMATSKA TEORIJA BOJA

### Istorijska razmatranja

„Boja“ je percepcija uslovljena talasnom dužinom. Pri promeni talasne dužine stimulusa, njegova boja se takođe menja. Koji su fiziološki mehanizmi koji predstavljaju temelj veze između talasne dužine i boje? Raniji istraživači tvrdili su da je svaka boja određena čepićem koji je osetljiv na tu boju. S obzirom da ljudski rod poseduje sposobnost percepcije više hiljada boja to bi značilo da su hiljade različitih čepića neophodni u svim delovima mrežnjače. Uzevši u obzir druge karakteristike stimulusa, koje moraju biti kodirane i ograničene mogućnosti mrežnjače ovo je neprihvatljivo.

Godine 1802. Tomas Jang (*Thomas Young*) je predložio alternativni model za percepciju boja. Prema njegovim rečima:

Kako je skoro nemoguće da svaka osetljiva tačka mrežnjače sadrži neograničen broj čestica, od kojih svaka ima sposobnost savršenog sklada vibracija sa svakim mogućim talasom, neophodno je pretpostaviti da je broj ograničen; na primer na tri osnovne boje...i da se svaka od ovih čestica može pokrenuti manje ili više prisilno talasima koji se manje ili više razlikuju od savršenog sklada. Svaki osetljivi filament nerva može se sastojati od tri dela, gde svaki odgovara jednoj od osnovnih boja. (MacAdam, 1970, 51).

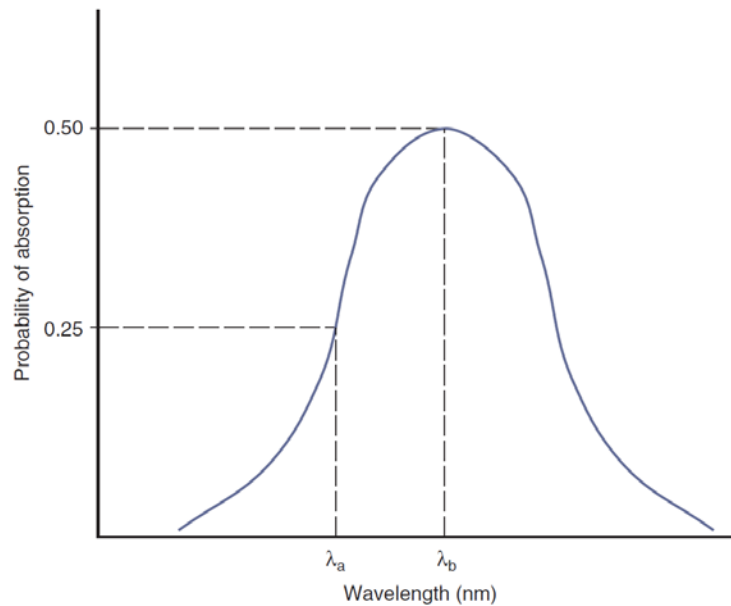
Iako je terminologija zastarela, Jang je formulisao teoriju na osnovu koje se zasniva moderna nauka o percepciji boja. Postulirao je da je informacija o boji određena ograničenim brojem čepića, možda tri, i da relativne aktivnosti ovih različitih vrsta čepića određuju boju. Teorija koja otelotvoruje ovo i srodne koncepte se naziva **trihromatska teorija**. Dosta toga što je podržava dolazi od psihofizičkih eksperimenata povezivanja boja, tj. naše sledeće teme.

### Monohromazija

Kao prvi korak ka razumevanju trihromatske teorije, saznajmo zašto osoba sa samo jednim fotopigmentom ne poseduje sposobnost razlikovanja boja. Ova osoba se smatra da boluje od *monohromazije*. Slika 10. prikazuje apsorpcioni spektar hipotetičkog fotopigmenata za takvu jednu osobu. Ovaj spektar prikazuje verovatnoću upijanja (apsorpcije) kvanta svetlosti (fotona) kao funkcije



talasne dužine. Na primer, foton talasne dužine  $\lambda_b$  ima 50% šanse da bude apsorbovan, a foton talasne dužine  $\lambda_a$  ima samo 25% šanse za apsorpciju.

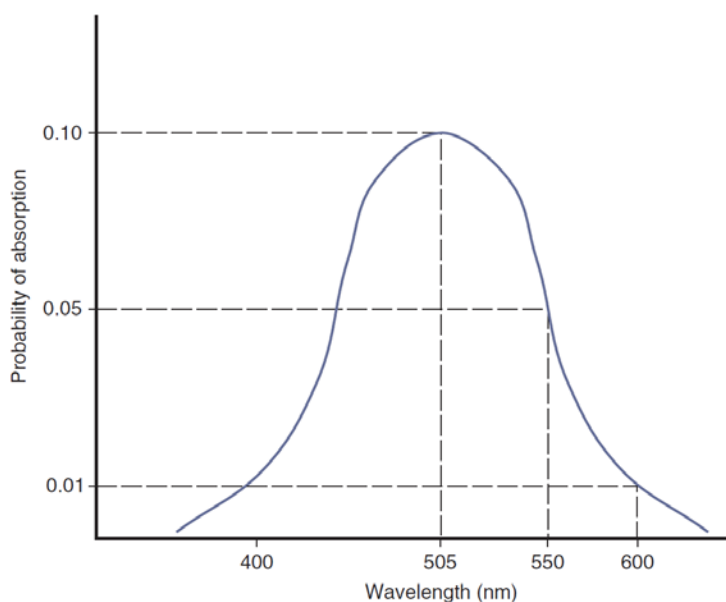


Slika 10. Apsorpcioni spektar fotopigmentakod osobe sa monohromacijom

Važno je zapamtiti da kada fotopigment apsorbuje foton svetlosti to ne određuje talasnu dužinu tog fotona. Sve informacije koje se tiču talasne dužine su izgubljene, a to je tzv. princip invarijantnosti.

Da li osoba koja ima samo jedan fotopigment može da razlikuje dve talasne dužine? Na ovo pitanje se može odgovoriti posmatranjem slike 10. koja ilustruje dva snopa svetlosti talasnih dužina  $\lambda_a$  i  $\lambda_b$ . Pretpostavimo da svaki snop svetlosti 100 fotona. S obzirom da su verovatnoće apsorpcije ove dve talasne dužine različite, svaki od snopova će biti različito apsorbovan. Za  $\lambda_a$  verovatnoća apsorpcije je 0,25, što proizvodi 25 apsorpcija. Za snop sa talasnom dužinom  $\lambda_b$ , verovatnoća od 0,50 proizvodi 50 kvantnih apsorpcija. Prema tome snop  $\lambda_b$  proizvodi duplo više kvantne apsorpcije što znači da će se interpretirati kao svetliji. Drugim rečima, ako ovoj osobi pokažemo dva snopa svetlosti, jedan sa talasnom dužinom  $\lambda_a$  a drugi sa  $\lambda_b$ , osoba će razliku u boji interpretirati kao razliku u osvetljenosti. Analizirajmo ovo malo detaljnije. Šta se dešava ako bismo duplirali intenzitet snopa koji sadrži  $\lambda_a$  tako da sada emituje 200 fotona, ne menjajući intezitet za  $\lambda_b$ ? Posledica ovoga je 50 kvantnih apsorpcija za svaku talasnu dužinu. S obzirom da oba snopa proizvode isti efekat na vizuelni sistem, ne mogu se razlikovati. Ovaj primer pokazuje da osoba koja poseduje jedan fotopigment ne može da razlikuje talasne dužine snopova jer se intenzitet različitih talasnih dužina može korigovati tako da izgledaju isto. Ovo je uslov monohromazije. Individua nije u stanju da uopšte razlikuje boje- on ili ona nema

sposobnost razlikovanja objekata samo na osnovu talasnih dužina. Iako znamo da osobe sa monohromatskim vidom nemaju sposobnost razlikovanja zasnovanoj na talasnoj dužini, one bi mogle poprilično dobro da tačno odrede boje. Uzmimo u obzir potpunu ahromatopsiju, gde imamo samo štapiće. Rodopsin koji se nalazi u štapićima dostiže vrhunac do 507 nm. Recimo da pokažemo ovoj osobi tri snopa svetlosti, kao što je prikazano na slici 11. gde svaki od njih sadrži 5000 fotona svetlosti, i kažemo njemu ili njoj da je jedan snop plavo-zelene, drugi žute, a treći crvene boje. Pacijentu sa apsolutnom ahromatopsijom, snop od 505 nm će se učiniti svetao, snop od 570 nm tamniji, a snop od 600 nm će izgledati mutno. Ako bismo tražili od individue da dodeli boje snopovima svetlosti, ona ili on će verovatno to ispravno uraditi.



	<b>505 nm</b>	<b>550 nm</b>	<b>600 nm</b>
Broj emitovani fotona	5000	5000	5000
Broj apsorbiranih fotona	500	250	50

Slika 11.

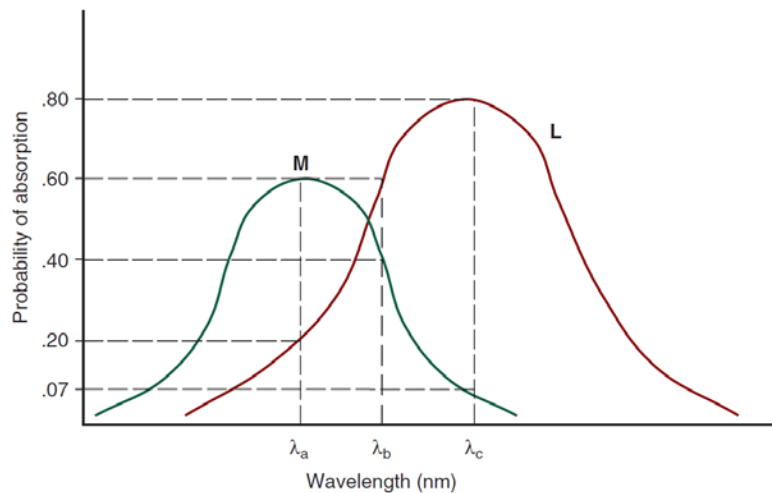
Šta se ovde dešava? Ukratko, pacijent sa monohromazijom koristi količinu svetlosti kako bi odredio boje. Celog života, ova osoba primećivala je da druge osobe vide mutne objekte kao crvene a svetle objekte kao zelene. Prema tome, ona ili on je naučio da određuje boje na osnovu njihove sjajnosti. Ukoliko ih suočimo sa prirodnim objektima, poput jabuka i banana, zadatak određivanja boja se može olakšati ukoliko su tu prisutne neke aluzije kao što je oblik voća.

Da li neko sa apsolutnom ahromatopsijom može da razlikuje boje? Ne postoji jednostavan odgovor na ovo pitanje. Uostalom, ne mogu biti siguran da vi i ja primećujemo iste boje kada posmatramo crveni

paradajz. Ipak, znamo da ljude sa monohromatskim vidom možemo zavarati ukoliko prilagodimo intenzitet stimulusa: oni nemaju sposobnost razlikovanja stimulusa samo na osnovu talasne dužine.

## Dihromazija

Posmatrajmo raspored fotopigmenta na slici 12. Individua ima dva fotopigmenta, M i L, koja dostižu vrhunac na različitim talasnim dužinama i poseduju apsorpcione spektre koji se preklapaju u većem delu spektra. U narednoj analizi ustanovićemo da li ova osoba ima sposobnost razlikovanja boja na osnovu talasnih dužina. Pretpostavimo da su osobi prikazana dva snopa svetlosti sa  $\lambda_a$  i  $\lambda_b$  talasnim dužinama. On ili ona treba da prilagode intenzitet kod  $\lambda_b$  tako da oba snopa deluju identično.



Slika 12.

Ako osoba može da “ujednači” ove dve talasne dužine, on ili ona ne poseduje sposobnost razlikovanja na osnovu talasnih dužina. Ipak, ako osoba ne uspe da “ujednači” ova dva snopa svetlosti, on ili ona poseduju sposobnost razlikovanja koja je zasnovana samo na talasnoj dužini.

Proučavajući sliku 12. jasno je da nije moguće prilagoditi intenzitet kod  $\lambda_b$  tako da je identičan  $\lambda_a$ . To je zbog toga što ne postoje dva intenziteta dva svetlosna snopa sa talasnim dužinama  $\lambda_a$  i  $\lambda_b$  za koje M i L apsorbuju isti broj fotona. Bez obzira koliko su intenziteti ova dva snopa prilagođeni, nikad nemaju isti efekat na vizuelni sistem. Oni se razlikuju i to, pre svega, zbog različitih talasnih dužina.

Sada obratimo pažnju na situaciju na slici 12, u ovom slučaju ako opet imamo dva snopa svetlosti, jedan snop talasne dužine  $\lambda_b$ , a drugi je mešavina talasnih dužina  $\lambda_a$  i  $\lambda_c$ . Osoba može da kontroliše intenzitet svake talasne dužine, nezavisno od drugih talasnih dužina. Na primer, on ili ona mogu da prilagode

intenzitet od  $\lambda_c$  ne menjajući intenzitet za  $\lambda_a$  ili  $\lambda_b$ . S obzirom na ovu situaciju, da li će osoba moći da prilagodi intenzitete različitih talasnih dužina tako da snop sa leve strane bude identičan snopu sa desne strane? Bolje rečeno, da li se intenzitet različitih talasnih dužina može prilagoditi tako da svaki snop svetlosti proizvede isti broj kvantnih absorpcija kod pigmenta M i L? Pažljiva analiza slike 12. pokazuje da je zaista moguće za osobu da prilagodi intenzitete tako da svaki snop ima isti efekat na vizuelni sistem.

Tabela 1.

$\lambda_a$ i $\lambda_c$				$\lambda_b$			
emitovano	talasna dužina	apsorbovano		emitovano	talasna dužina	apsorbovano	
		M	L			M	L
300	$\lambda_a$	180	60	500	$\lambda_b$	200	300
300	$\lambda_c$	20	240				
<b>UKUPNO</b>		200	300	<b>UKUPNO</b>		200	300

Svaki snop sadrži 200 kvantnih absorpcija kod fotopigmenta M i 300 kod L. Sa tačke gledišta subjekta, ova dva snopa svetlosti, koji se fizički razlikuju, izgledaju identično. Dva stimulusa koja izgledaju identično, ali su fizički različiti nazivaju se metameri.

Prethodno opisana individua boluje od dihomazije. Ove osobe mogu u određenoj meri da razlikuju boje, ali ograničeno. Snop  $\lambda_a$  uvek izgleda drugačije u odnosu na snop  $\lambda_b$ ; ipak, snop  $\lambda_b$  može se prepoznati kroz određenu kombinaciju  $\lambda_a$  i  $\lambda_c$ . Bolje rečeno, uzevši u obzir bar 3 talasne dužine, podeljene u dva snopa, osoba sa dihomatskim vidom poseduje sposobnost prilagođavanja relativnih intenziteta talasnih dužina tako da dva snopa deluju identično.

### Trihromazija

Dobro je poznato da većina ljudi ima trihromatski vid. Principi na kojima je zasnovana trihromazija su isti kao i kod dihomazije, sa razlikom u tome da postoje tri, a ne dva fotopigmenta sa apsorpcionim spektrima koji se poklapaju. Opšte prihvaćena grupa čepića spektara za ljude sa normalno trihromazijom data je na slici 13. Ove krive su zasnovane na podacima iz različitih eksperimenalnih pristupa.

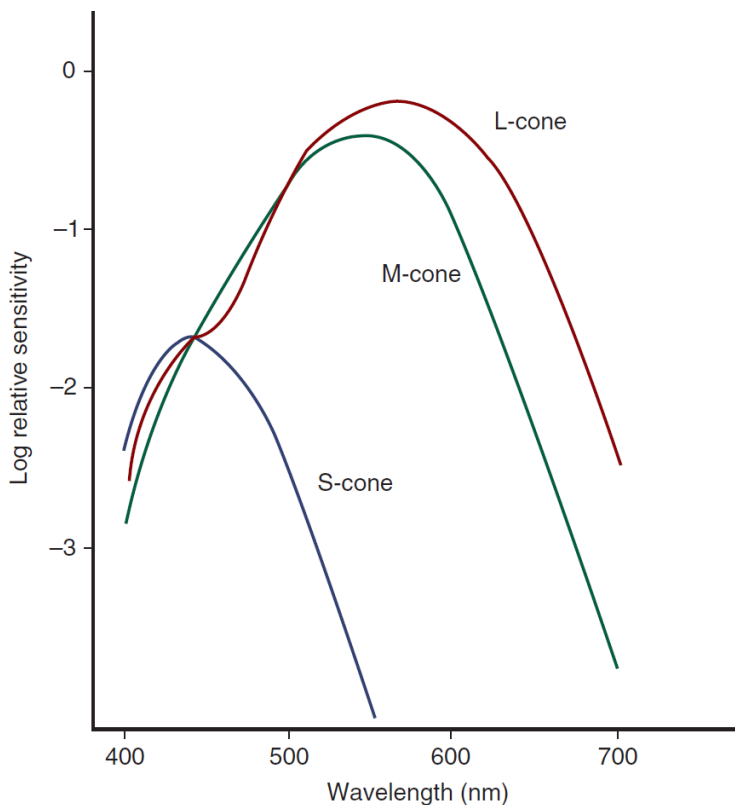
Pojava o postojanju tri osnovne boje je već odavno poznata u fizici. Kada se jedna bela površina osvetli zelenim svetlom, površina će se prikazivati u zelenoj boji. Ako se pak osvetli plavim, biće plava, dok će se crvenim svetlom prikazivati kao crvena površina. No, ako se deo površine osvetli i crvenim i zelenim svetlom, ona će se prikazivati kao žuta. Sličan rezultat se postiže i na retini i nervnom delu čula vida, ali mehanizmi su nešto drugačiji. Danas je već dokazano postojanje tri različita čepića za tri osnovne boje.

Razlika između ovih receptora ispoljava se u sadržaju različitih fotopigmenata, jodopsina i u njihovom rasporedu. Ovi čepići imaju i svoja imena, koje su dobili po talasnoj dužini koju primaju. **L-čepići** primaju crvenu boju (**Long** ~560 nm), **M-čepići** zelenu (**Medium** ~530 nm), a **S-čepići** plavu boju (**Short** ~430 nm). U ovim čepićima nalaze se fotopigmenti, jodopsini, koji primaju različite talasne dužine svetlosti, odnosno apsorbuju različite boje. L-čepići sadrže **eritrolab** (*erythrolabe*) za crvenu boju, M-čepići **hlorolab** (*chlorolabe*) za zelenu boju, a S-čepići **cijanolab** (*cyanolabe*) za plavu boju. Ranije su se ovi fotopigmenti nazivali po bojama koje primaju, ali to može da odaje pogrešan utisak da su u stanju da primaju samo pojedine vrednosti talasnih dužina. Danas se zna, da ovi fotopigmenti zapravo apsorbuju određene opsege talasnih dužina, koje se nalaze oko jedne centralne maksimalne vrednosti za tri osnovne boje. U tabeli su dati fotopigmenti sa pikom talasne dužine i opsegom talasnih dužina koje primaju.

Tabela 2. Karakteristike tri različita čepića

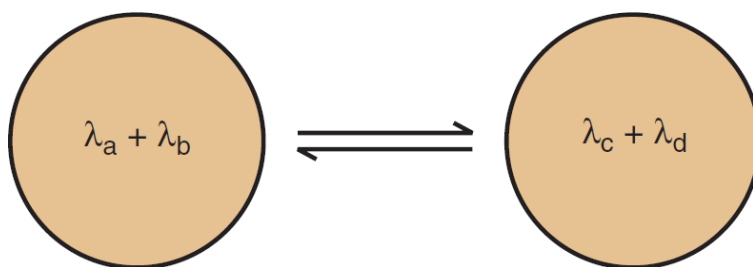
Čepić	Fotopigment	Pik osetljivosti (nm)	Opseg osetljivosti (nm)
S	Cyanolabe (plavi)	426	400-530
M	Chlorolabe (zeleni)	530	400-680
L	Erythrolabe (crveni)	555	400-700

Nećemo detaljno analizirati sposobnosti razlikovanja talasnih dužina u trihromaziji. Međutim, trebalo bi da bude očigledno da možemo i u ovom slučaju da proširimo te principe koji su razvijeni tokom našeg istraživanja dihromazije. Ako to uradimo, zaključićemo da osobe sa trihromazijom poseduju sposobnost razlikovanja talasnih dužina koja, mada ograničena, je superiornija u odnosu na one sa dihromazijom.



Slika 13.

Definišimo trihromaziju: uzevši bar 4 talasne dužine, podeljene u dva snopa, osoba sa trihromatskim vidom je sposobna da prilagodi relativne intenzitete ovih talasnih dužina tako da dva snopa deluju identično. Primer je prikazan na slici 14.. Dva snopa deluju jednako jer proizvode isti broj kvantne apsorpcije za svaku od tri fotopigmenata. Oni su metameri.



Slika 14.

Za tri talasne dužine podeljene u dva snopa osoba sa dihromazijom može da „ujednači“ snopove, dok osoba sa trihromazijom ne može. Ovo pokazuje superiorno razlikovanje boja u trihromaziji. Međutim, postoje ograničenja pri trihromatskom vidu: ukoliko su date 4 talasne dužine podeljene u dva snopa, osoba sa trihromatskim vidom moći ce da „ujednači“ snopove.

## **Komplementarna kolorna teorija**

Krajem XIX veka, nemački fiziolog Ewald Hering (*Ewald Hering*) došao je do veoma značajnih observacija vezanih za percepciju boja (Hering 1920/1964). On je zabeležio da crvenu i zelenu ne zapažamo istovremeno, stoga se oznaka crveno-zelena ne koristi. Boje su ili crvena ili zelena, nikako ne oba. To isto važi za plavu i žutu. Ove dve nijanse se ne uočavaju istovremeno i zbog toga ne upotrebljavamo oznaku plavo-žuto. Hering je takođe uočio da hromatični stimulus izaziva naknadne slike koje nastaju zbog komplementarnih boja. Tako npr. crveni stimulus izaziva zelenu naknadnu sliku, a plavi žutu naknadnu sliku. Ova i još mnoga opažanja, navela su Heringa da predloži komplementarnu kolornu teoriju, koja se zasniva na teoriji da je boja procesirana kroz bipolarne kanale koje je nazvao crveno-zeleni i plavo-žuti kanali. „Bipolarnost“ se odnosi na to da u bilo kojoj situaciji kanal može da kodira samo jednu od komplementarnih boja. Npr. crveno-zeleni kanal u jednom trenutku je sposoban da kodira ili crvenu ili zelenu, nikako obe boje simultano. Isto važi i za plavo-žute kanale.

Heringova teorija je mnogo godina bila zanemarivana i nije svatama ozbiljno, jer je pogrešno izneo teoriju rekavši da je u našem vizuelnom sistemu prisutna supstanca koja može da pokrene samo zelenu ili crvenu, i druga supstanca koja pokreće ili plavu ili žutu. Ova teorija se smatrala nerealnom i zbog toga što je trihromatska teorija u to vreme bila prihvaćena od strane velikih naučnika i uspevala je da objasni većinu onoga što se znalo o percepciji boja. Tokom prve polovine XX veka, smatrano je da trihromatska teorija i komplementarna kolorna teorija nisu kompatibilne, ali se na kraju ispostavilo da su obe teorije istinite u svojim osnovnim aspektima.

## **Moderni modeli kolornog viđenja**

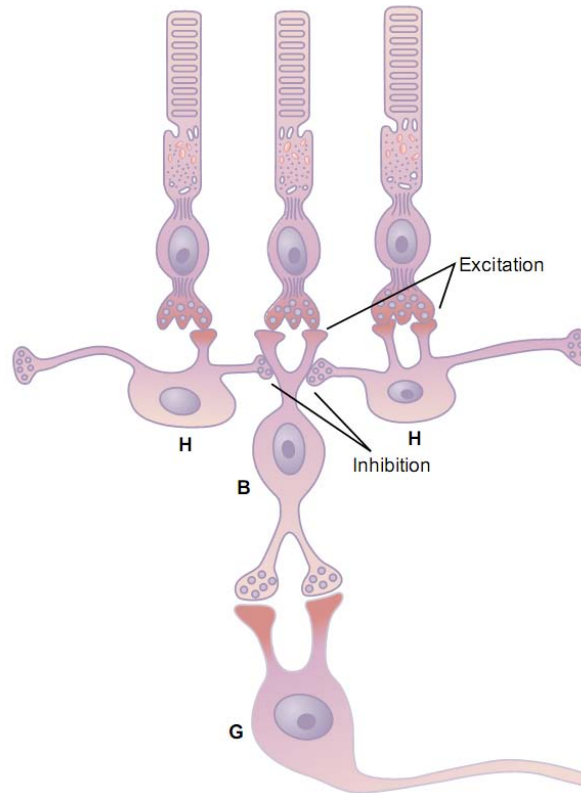
Iz dosadašnje diskusije o kolornom vidu možemo izvesti dve činjenice:

1. kolorni vid je trihromatski
2. komplementarni procesi su veoma značajni u kodiranju informacije o boji

Trihromatska teorija nam govori o tome da su tri vrste čepića dovoljne da se razlikuju boje, ali nam ne objašnjava na koji način je informacija o bojama kodirana u nervnom sistemu. Tri vrste čepića su inervisane tako da stvaraju specijalne komplementarne neurone.

Na slici 15. se vidi tipičan raspored međusobnog povezivanja ćelija u retini i proces međusobne ekscitacije i inhibicije.

Jedna ganglionska ćelija može biti stimulisana od nekoliko ili samo jednim čepićem. Kada sva tri tipa čepića – crveni, plavi i zeleni – stimulišu istu ganglionsku ćeliju signal koji prolazi kroz ganglionsku ćeliju je isti za sve tri boje spektra i taj signal nam ne pomaže u određivanju boje. Takav signal zovemo i “beo”.



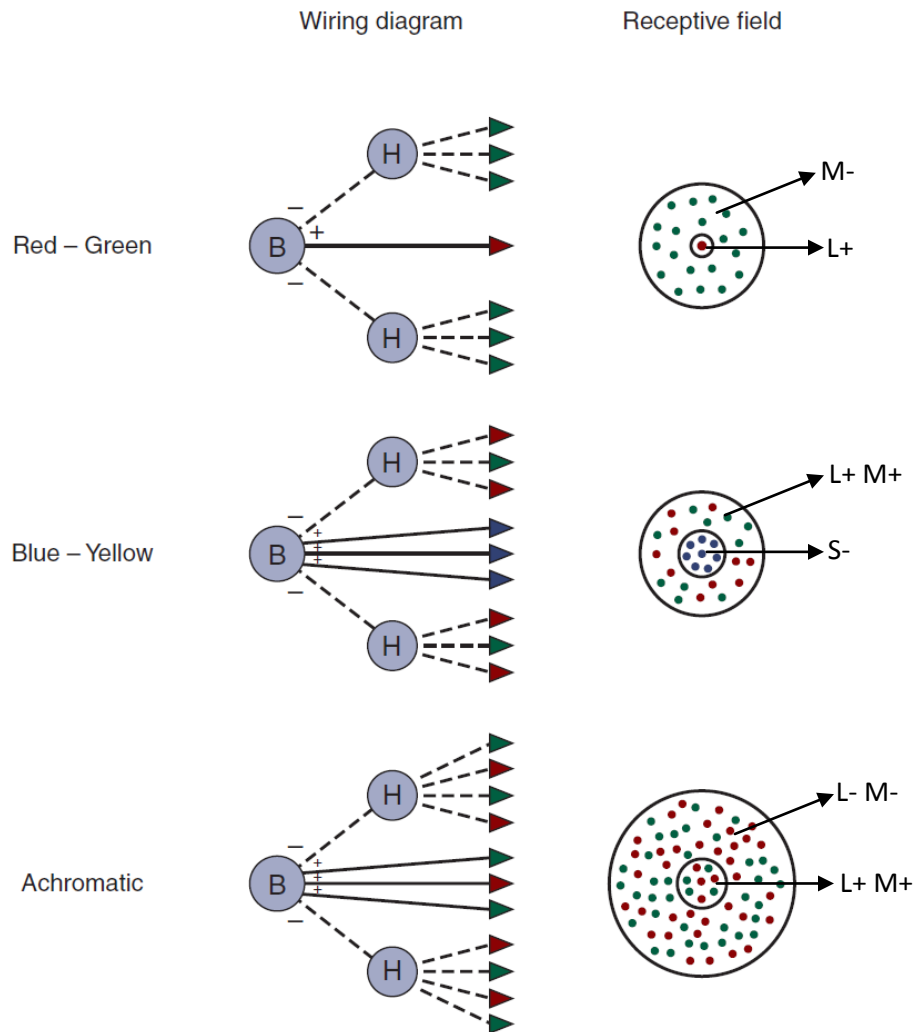
Slika 15. Tipičan raspored čepića, horizontalnih ćelija, bipolarnih ćelija i ganglionskih ćelija (B-bipolarne ćelije; H-horizontalne ćelije; G-ganglionske ćelije) i ekscitacija i inhibicija među njima.

Već smo rekli da su neke ganglionske ćelije ekscitovane samo jednim čepićem određenog tipa, ali su inhibisane čepićima drugog tipa (to je slučaj kod crvenih i zelenih čepića kada crveni čepić ekscituje, a zeleni inhibira). Isti tip recipročnog efekta se dešava kod plavih čepića koji ekscituju i kombinacije crvenih i zelenih čepića koji inhibiraju (oba ova tipa čepića su ekscitovani žutom bojom), što daje recipročni proces ekscitacije i inhibicije za plavu i žutu boju.

Registrowanje informacija kod trihromatske teorije koja uključuje kolornu komplementarnost je šematski ilustrovana na slici 16. L i M čepići suprotstavljajući se jedni drugima formiraju L-M komplementarne ćelije. Ove ćelije se nekad zovu i crveno-zelene ćelije. S čepići suprotstavljajući se L i M čepićima formiraju S-(L+M) komplementarne ćelije koje se zovu i plavo-žute komplementarne ćelije. Ahromatske komplementarne ćelije sumiraju impulse sa L i M čepića. Na slici 16. inhibitorne sinapse su obeležene sa -, a ekscitatorne sa +. Za crveno-zelene komplementarne ćelije samo jedan L čepić doprinosi ekscitaciji centra receptivnog polja dok je inhibitorna okolina receptivnog polja inhibirana inputima sa mnogobrojnih M čepića. Kod plavo-žutih komplementarnih ćelija ekscitaciju centra receptivnog polja formiraju imputi sa S čepića, dok zajedno M i L čepići inhibiraju periveriju receptivnog polja. Ahromatske



ćelije formiraju i M i L čepići koji ekcituju centar i inhibiraju periferiju receptivnog polja što i centru i okolini daje istu spektralnu osetljivost i čini ćelije monohromatskim.

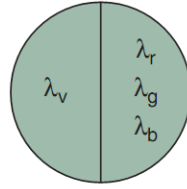
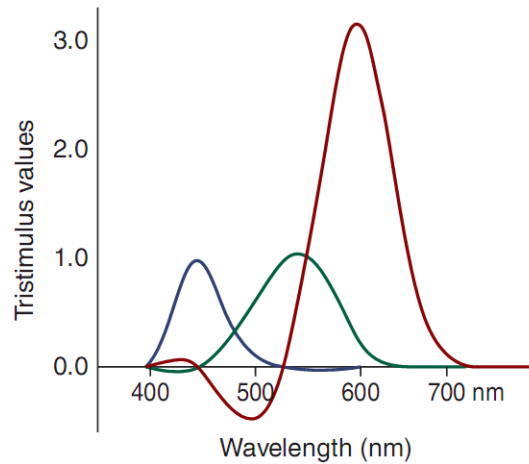


Slika 16. B-bipolarne ćelije; H-horizontalne ćelije

Važnost ovog komplementarno kontrastnog kolornog mehanizma je u tome da retina na ovaj način počinje da razlikuje boje, odnosno specifikacija boja počinje na retini i nije u potpunosti funkcija mozga.

### CIE SISTEM SPECIFIKACIJE BOJA

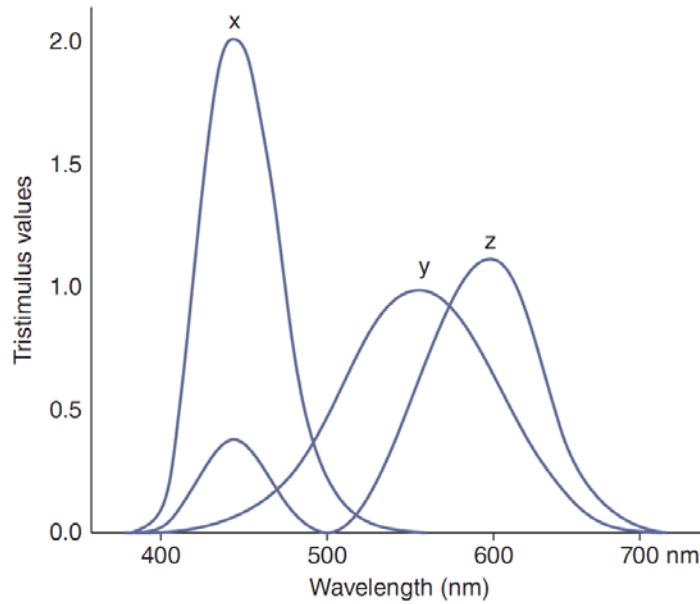
CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) je razvio sistem za specifikaciju podražaja boje koji je preporučan za upotrebu 1931. godine. Najvažniji princip koji je omogućio ovaj razvoj je aditivno mešanje boje. Dakle, svaki podražaj boje može se izjednačiti aditivnom kombinacijom tri prikladno odabrana primara (slika 17).

**A****B**

Slika 17. A. U R,G,B sistemu talasna dužina  $\lambda_v$  je određena aditivnom kombinacijom tri prikladno odabrana primara ( $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ ). B. Funkcija kolornog podudaranja za RGB sistem.

Odavno je prepoznato da količina ili intenzitet primara potrebnih da se postigne jednak podražaj u odnosu na neku boju, predstavljaju specifikaciju te boje. Količina (intenziteti) primara korištenih pri postizanju nekog podražaja nazivaju se tropodražajne vrednosti. Pri određivanju tropodražajnih vrednosti u praksi se koristi bipartitni kolorimetar. Kod takvog uređaja posmatrač gleda bipartitno polje (polje podeljeno na dva dela). Na jednom delu polja prikazan je svetlosni podražaj; Na drugom delu polja je prikazana aditivna kombinacija primara. Posmatrač podešava intenzitet svakog od tri primara dok posmatrač nije u stanju razlikovati dva polja. Kada se ujednačenost polja postigne očitaju se tropodražajne vrednosti s kolorimetra. Sa slike 17. se vidi da je za specifikaciju neke boje ponekad potrebno odabrati i negativnu vrednost određenog primara. U konkretnom slučaju prikazanom na slici 17. to bi značilo da se određena količina  $\lambda_r$  mora dodati direktno  $\lambda_v$ , a ne u polje sa kombinacijom primara. Da bi se ovo izbeglo dizajniran je CIE sistem.

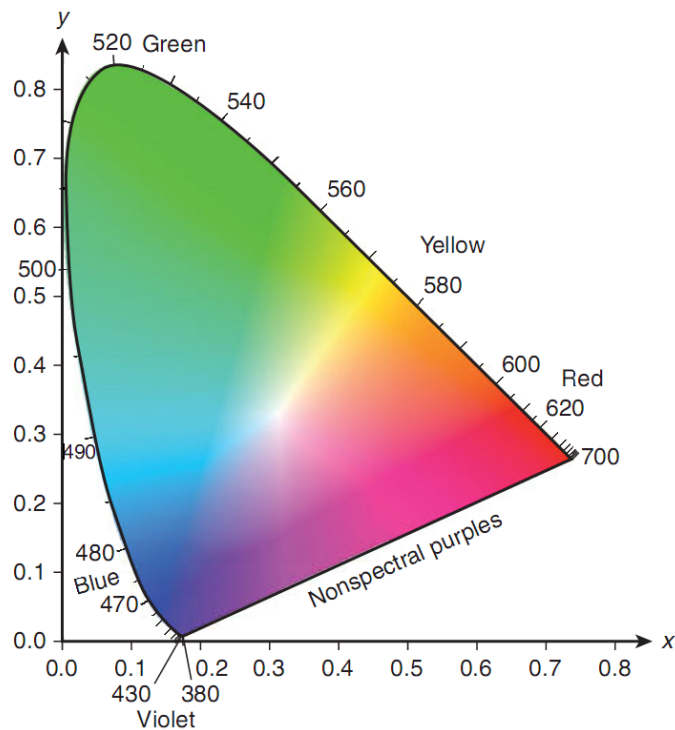
Kod CIE sistema primari R, G i B su matematički transformisane u odgovarajuće funkcije tri imaginarna primara koje zovemo X, Y i Z (slika 18) i tako su izbegnute negativne vrednosti primara.



Slika 18. Odgovarajuće kolor funkcije za imaginarne primare X, Y i Z koje su matematičke transformacije R, G i B.

### CIE dijagram hromatičnosti boja

CIE dijagram hromatičnosti boja prikazuje relativnu količinu imaginarnih primara potrebnu za bilo koju realnu boju (slika 19). Na dijagramu hromatičnosti boja imamo prevođenje tropodražajnih vrednosti u koordinate hromatičnosti.



Slika 19. CIE dijagram hromatičnosti boja. Bilo koja boja u prirodi se može predstaviti na dijagramu hromatičnosti.

Relacija koja povezuje tropodražajne vrednosti i koordinate hromatičnosti je sledeća (tropodražajne vrednosti su prikazane velikim slovima, dok su hromatične koordinate prikazane malim slovima):

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

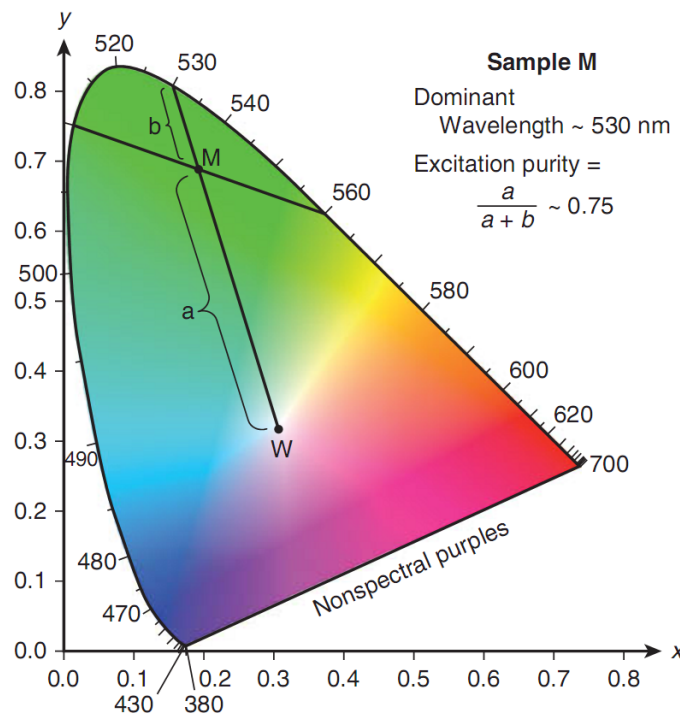
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

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

gde je:

$$x + y + z = 1$$

Kako je suma koordinata hromatičnosti jednaka uvek 1, onda ukoliko znamo dve koordinate lako određujemo i treću. Dijagram hromatičnosti boja prikazuje samo x i y koordinatu, dok se z koordinata izračunava. Gama svih boja koje se mogu ostvariti u prirodi sadržana je unutar linije oblika potkovice i ravne linije koja spaja krajeve te potkovice (slika 20).



Slika 20.

Ako želimo da smestimo neku boju u dijagram hromatičnosti to radimo na sledeći način: neka je to boja koja u sebi sadrži istu količinu talasnih dužina 510 nm i 560 nm povežemo ove dve tačke linijom na dijagramu. Boja koju tražimo se sada nalazi tačno na sredini povučene linije i označena je slovom M na slici 20. Da bismo odredili talasnu dužinu tražene boje dovoljno je da tačku M povežemo sa tačkom W koja prezentuje belu boju. Povučenu duž produžimo do preseka sa vrhom dijagrama i dobijamo tzv.

dominantnu talasnu dužinu tražene boje. Još jedan parametar koji nazivamo ekscitaciona čistoća može se odrediti sa dijagrama hromatičnosti. Ekscitaciona čistoća tačke M je data kao odnos  $a/a+b$  (slika 20).

## ANOMALIJE KOLORNOG VIDA

Aproksimativno 4,5 % populacije ima neki vid anomalije što se tiče kolornog viđenja (Purkinje et. al, 1979). Najčešće anomalije kolornog viđenja su naslednog karaktera, one nisu progresivne i ne predstavljaju pretnju vidu, ali mogu imati jak uticaj na obavljanje određenih poslova, uključujući i probleme oko obavljanja školskih aktivnosti. Kolorne anomalije koje nisu naslednog karaktera nazivaju se stečene. Iako su veoma retke, ovaj tip anomalije može biti jako dijagnostičko sredstvo za pronalaženje drugih bolesti.

### Klasifikacija

Tabela 2. sadrži klasičnu klasifikaciju anomalije kolornog vida, koja se deli u dve generalne grupe: DIHROMATE I ANOMALNE TRIHROMATE.

	crveno-zeleni defekti		plavo-žuti defekti
fotopigmentni status	Protan defekt	Deutan defekt	Tritan defekt
dihromacija	protanopija	deuteranopija	tritanopija
Trihromatska anomalija	Trihromatska protanopija (protanomalija)	Trihromatska deuteranopija (deuteranomalija)	Trihromatska tritanopija (tritanomalija)

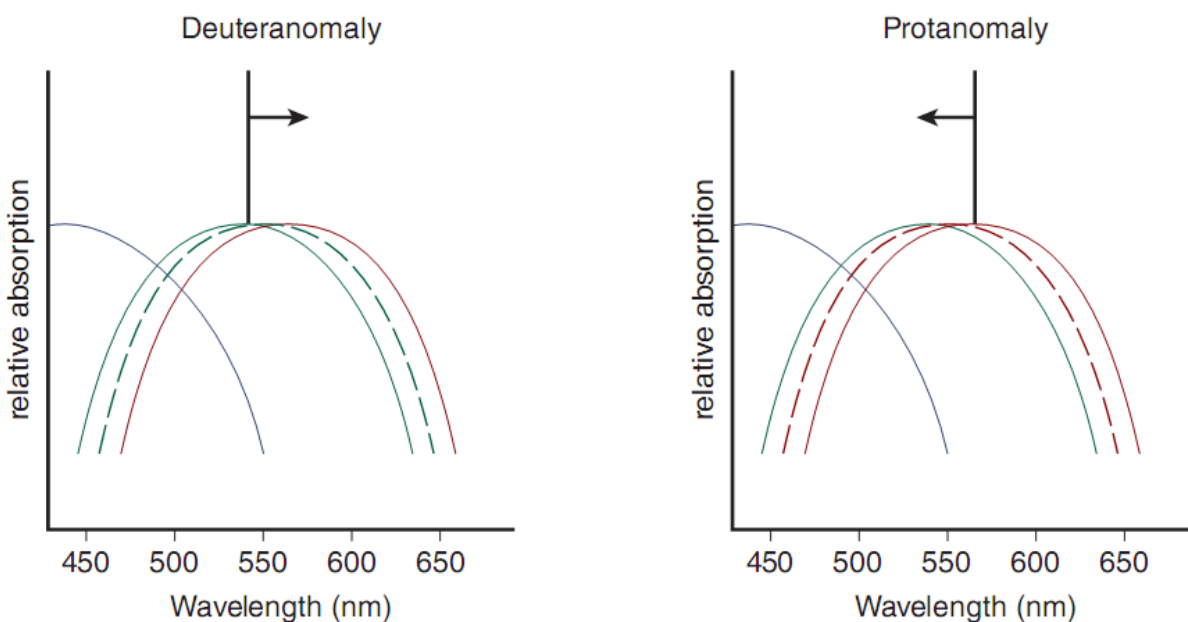
Kada u oku nedostaje jedna grupa čepića, ta osoba nije u stanju da razlikuje neke boje od drugih. Osobe, kod kojih su funkcionalne sve tri vrste čepića, nazivaju se **trihromatima**. **Dihromati** su osobe kod kojih nedostaje jedan od tri receptora. Najčešće govorimo o crveno-zelonom slepilu za boje, kada usled nedostatka ili crvenih ili zelenih čepića, osoba nije u stanju da razlikuje ove dve boje (slika 21). Osoba koja nema crvene čepiće, naziva se **protanop**, njen ukupni vidni spektar je zbog nedostatka ovih čepića znatno skraćen u području velikih talasnih dužina. Osoba koja je slepa za zelenu boju zbog nedostatka zelenih čepića zove se **deuteranop**. Kada neko nema plave čepiće, govorimo o **tritanopiji**, koja se javlja izuzetno retko.



Slika 21. Osobe koje ne razlikuju crvenu i zelenu boju ne uočavaju crvene plodove na zelenom drvetu

Crveno-zeleno slepilo za boje je genetska bolest, koja se skoro isključivo javlja kod muškaraca (8% muškaraca, 0.05% žena), a prenose je žene. Geni na X-hromozomu kodiraju odgovarajuće L- i M-čepiće. Ipak, kod žena gotovo nikad ne nastaje slepilo za boje, zbog toga što je drugi X-hromozom ima normalne gene za čepiće. Muškarci međutim, imaju samo jedan X-hromozom (drugi polni hromozom je Y), tako da ako gen koji kodira odgovarajuće čepiće nedostaje, nastaje slepilo za boje.

Kod anomalne dihomacije tri fotopigmenta su prisutna, ali apsorpcioni spektar jednog od fotopigmenata je dislociran (slika 22). Kod deuteranomalne trihomacije, M spektar je izmešten ka dužim talasnim dužinama, nasuprot tome kod protanomalne trihomacije, L spektar je izmešten ka kraćim talasnim dužinama. Rezultat dislokacije ovih fotopigmenata je kolorna diskriminacija. Što je veća dislokacija pigmenata to je veća kolorna anomalija.



Slika 22. Pojednostavljeni apsorpcioni spektar za anomalnu trihomaciju kod deuteranomaliije, spektar M-čepića je izmešten dužim dalasnim dužinama, dok je kod protanomaliije, spektar L-čepića premešten bliže kraćim talasnim

dužinama. „Puna“ kriva pokazuje normalnu poziciju apsorpcionog spektra čepića, a „isprekidana“ kriva pokazuje lokaciju izmeštenih spektara.

Protano, deuterano i tritanopija se odnose na pogođene fotopigmente. Individualac kojeg zahvati jedna od ove tri kategorije može imati ili dihromaciju ili anomalnu trihromaciju. Npr. protan anomalija može biti ili protanopija ili protanomalska trihromacija. Ako nedostaje eritolab, osoba ima dihromaciju, preciznije protanopiju. A ako je L apsorpcioni spektar dislociran, osoba ima anomalnu trihromaciju (trihromatska protanopija) Isto tako osoba sa deuto anomalijom može imati deuteranopiju ili trihromatsku deuteranopiju.

### **Nasleđivanje selpila za boje**

Uglavnom je nasledno stanje, koje se manifestuje mnogo češće kod muškaraca nego kod žena. Muškarci poseduju samo po jednu kopiju gena na X hromozomu (hemizigotnost) pa se i recesivna mutacija odmah izražava u fenotipu. Kod žena je neophodno prisustvo mutacije na oba X hromozoma, tj. na oba alela iz para da bi se bolest manifestovala. Žena (heterozigot), fenotipski normana, ali ipak prenosilac bolesti na mušku decu.

Primer ukrštanja:

*Obolela žena i zdrav muškarac:*

-sinovi-oboleli

-ćerke- zdrave; one su heterozigotni prenosioци (imaju jedan očev X i jedan majčin X\* hromozom)

*Bolestan muškarac i zdrava žena:*

-Sva su deca zdrava, ali su ćerke heterozigotni prenosioци

*Zdrava majka koja je heterozigotni prenosilac i bolesni muškarca:*

-obolela i zdrava deca u donosu 1:1

Dakle, sinovi od oca ne mogu naslediti oboljenje, jer od oca dobijaju Y hromozom. Bolesne majke svoje X\* hromozome sa recesivnom mutacijom prenose i ćerkama i sinovima, s tim što sinovi oboljevaju, a ćerke ne jer imaju još jedan X hromozom sa normalnim genom. Da bi žesko dete obolelo, potrebno je da oba roditelja imaju X hromozom sa mutacijom.

Jedna od bolesti koja je uslovljena recesivnm genom na X hromozomu je daltonizam.

Osnovni tipovi daltonizma:

1. Protanopija – nedostatak receptora za crvenu boju
2. Protanomaliја – smanjena osetljivost receptora za crvenu svetlost

3. Deuteranopija – nedostatak receptora za zelenu svetlost
4. Deuteranomaliya – smanjena osetljivost receptora za zelenu svetlost
5. Tritanopija – nedostatak receptora za plavu svetlost
6. Tritanomaliya – smanjena osetljivost receptora za plavu svetlost
7. Akromazija (sva tri receptora oštećena, dok su funkcionalni samo štapići zaduženi za noćni vid),
8. Monokromazija (jedan tip receptora ispravan) – potpuno slepilo za boje.



*Slika 23. Kako određeni daltonisti vide boje*

### **STANDARDNI TESTOVI ZA KOLORNI VID**

Postoje četiri osnovne metode za dijagnostike poremećaja kolornog vida, njegovih vrsta, podvrsta i stepena samih oštećenja, tj. anomalnog koeficijenta (AQ):

1. metoda denominacije ili imenovanja;
2. metoda komparacije ili uspoređivanja;
3. metoda diskriminacije ili odvajanja;
4. metoda egalizacije ili izjednačavanja



### 1. Metoda denominacije ili imenovanja ponuđenih boja

Metoda denominacije ili imenovanja obavlja se s pomoću specijalnih svetiljki s filterima određenih boja, a ispitanik određuje ponuđenu boju. Posebnim mehanizmom moguće je stvoriti uslove koji postoje u stvarnom svetu, kao što su uslovi smanjene vidljivosti. Posebne svetiljke, tzv. lanterne, koje se upotrebljavaju za ispitivanja kolornog vida u vojsci, mornarici, željeznici, vazduhoplovstvu, a prema potrebi i u saobraćaju, služe za ispitivanje kolornog vida u otežanim uslovima rada. Veliki im je nedostatak što one zapravo ne mogu dijagnostikovati kolorni poremećaj ni njegovu težinu, već trijažiraju kandidate koji se dobro snalaze s obojenim signalnim uređajima. Osim u fotopskim uslovima, moguće je sprovesti ispitivanje i u skotopskim uslovima.

### 2. Metoda komparacije ili uspoređivanja ponuđenih boja

Metoda komparacije ili uspoređivanja ponuđenih boja upotrebljava Holmgrinove (*Holmgreen*) smotuljke vune ili obojene papiriće raznih boja, koje se danas gotovo ne upotrebljavaju. Onaj koji ispituje izdvaja jedan smotuljak uzorka određene boje, a ispitanik iz preostale hrpice vunica izdvaja smotuljke iste ili slične boje. Ispitivanje se može izvoditi i s pomoću raznobojnih okruglih pločica ili piona različite zasićenosti, a ispitanikov zadatak je da poređa sve obojene pione, stavljajući ih uz onaj prethodni koji mu je po boji najbliži. Tu pripada mali Fransvrt (*Farnsworth*) test panel D-15 i veliki Hju-Fransvrt-Munselov (*Hue-Farnsworth-Munsell*) test 100. Na tom su načelu napravljene modifikacije test *40 Hue Lanthony* i *Farbtest 28 Hue red*. U posebne dijagrame ili šeme unosi se redosled kojim je ispitanik poređao pione i na osnovu tog zapisa zaključuje se postoji li poremećaj kolornog vida i koje je vrste.

### 3. Metoda diskriminacije ili odvajanja ponuđenih boja

Metoda diskriminacije ili odvajanja služi se pseudoizohromatskim tablicama. Najčešće se upotrebljavaju pseudoizohromatske tablice po Išihari (*Ischihara*) i Stilingu (*Stilling*). Na ovim tablicama, tj. pločicama, nalaze se tačke raznih veličina i boja, koje su poređane tako da osoba s poremećenim kolornim vidom ne raspoznaje zadate brojeve, slova ili likove. Ove su tablice izuzetno pogodne za odabir i brzi skrining velikog broja ispitanika, a pripadaju grupi pigmentnih testova. Naziv pseudoizohromatske tablice potiče od toga što su ove tačke razne boje, ali su iste zasićenosti ili saturacije (svojstva boje vezana za čistoću same boje, pri čemu ona nije mešana s drugim bojama), tako da osoba s poremećenim kolornim vidom vidi različite boje kao istu boju (pseudoizohromija), tj. dobija lažan utisak da je posredi ista boja pa tako ponuđeni broj, slovo ili lik ne može razlikovati i imenovati.

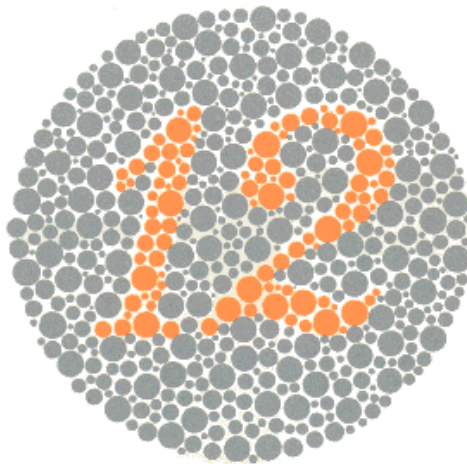
#### 4. Metoda egalizacije ili izjednačavanja ponuđenih boja

Metoda egalizacije ili izjednačavanja s Nagelovim anomaloskopom, starog tipa I ili novijeg tipa II spektralni je test, tj. test s obojenom svetlima. Uz Nagelov anomaloskop II, koji se danas najviše upotrebljava i smatra se najpouzdanijim aparatom za testiranje kolornog vida, pogotovu kad su u pitanju urođene dishromatopsije crveno-zelenog tipa, upotrebljavaju se i anomaloskopi novije generacije kao što su *Oculus Heidelberg* anomaloskop, *Tomey all color* anomaloskop, koji mogu dijagnosticirati i kolorni poremećaj plave-žute boje. Slični stari aparati (kolorimetri) koji više nisu u upotrebi zbog slabije verifikacije pojedinih kolornih poremećaja su: *Gilles-Archer* test, *Edrigrme-Green* i *Beyne* svjetiljka.

Od svih testova danas se najviše upotrebljavaju Išihara tablice. Budući da ih preporučuje i Internacionalni oftalmološki kongres, a i u ovom radu smo ih koristili za testiranje kolornog vida ispitanika, ovdje će biti detaljnije objašnjene.

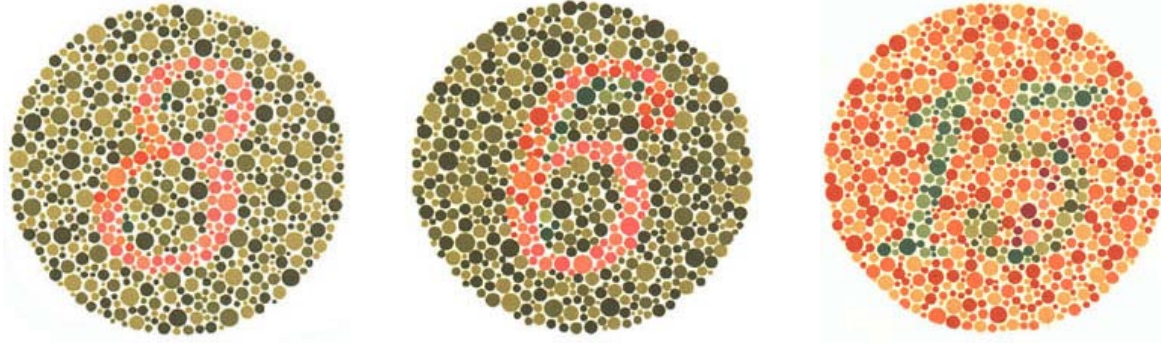
One sadrže početnu tablicu iza koje slede četiri serije tablica većeg ili manjeg broja, kod kojih sistematizacija mora biti savršeno poznata.

**I tablica.** Čitaju je svi ispitanici, normalni trihromati i dishromati.



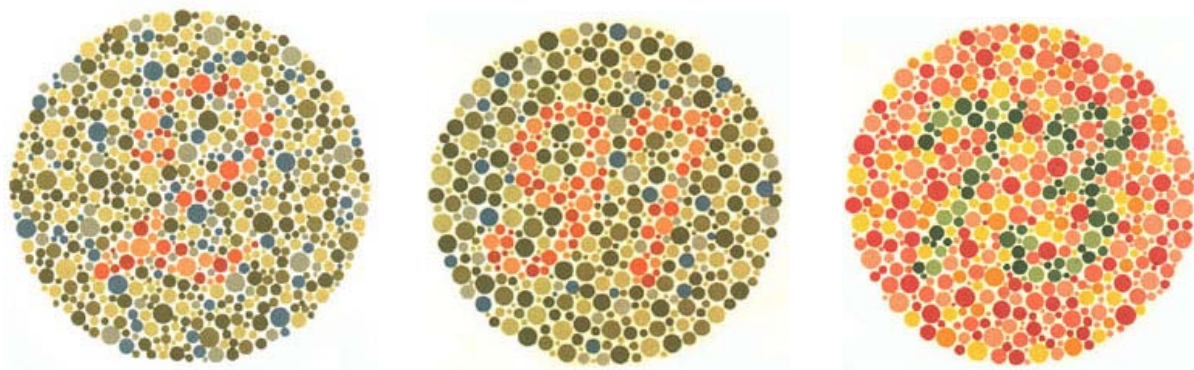
**I serija (od 2. do 9. tablice)**

Ovu seriju različito čitaju normalni trihromati i dishromati (protani i deutani odgovaraju na isti način).



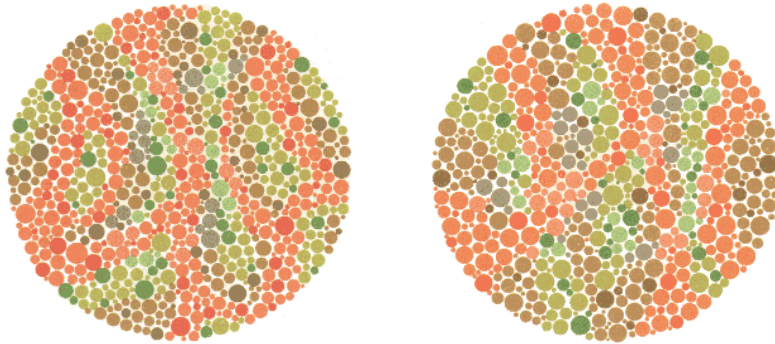
**II serija (od 10. do 17. tablice)**

Nju čitaju samo normalni trihromati, jer su obojeni konfeti-tačkice zajedno s podlogom tako napravljeni da izazivaju pometnju kod crvenih i zelenih dishromata.



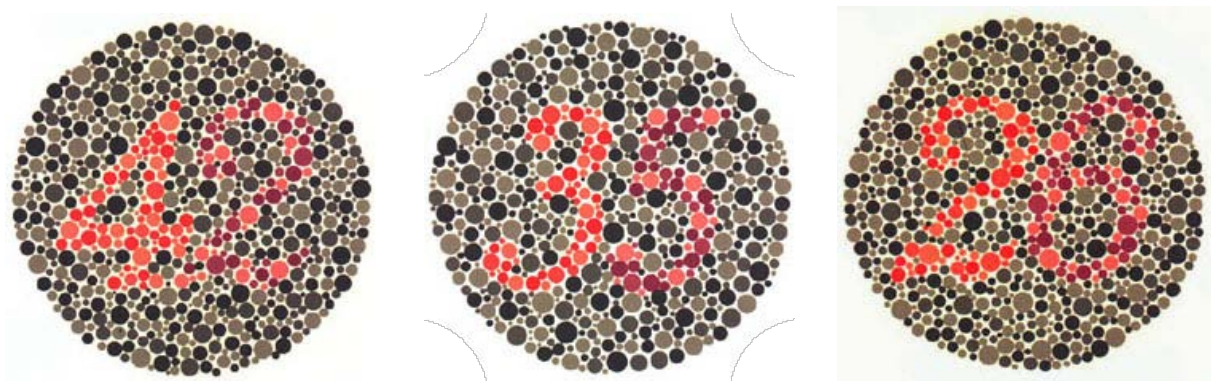
### III serija (od 18. do 21. tablica)

Ova serija sadrži ploče na kojima dishromati razlikuju brojke, a normalni trihromati ih ne vide.



### IV serija (od 22. do 25. tablice)

Ova serija omogućava tačnije razlikovanje pojedinih dishromatopsija, tj. je li kolorni poremećaj u crvenoj ili zelenoj boji. Svaka tablica sadrži dve brojke različite boje (crvenu i ljubičastu) na sivoj podlozi. Protana zbunjuje crvenilo prve brojke sa sivom podloge. On čita samo drugu brojku. Deutan, obrnuto, čita samo prvu brojku, jer on ne razlikuje ljubičastu boju kojom su obojeni konfeti druge brojke.



Neka izdanja ovih tablica su u redukovanom obliku po 14 ili povećana na 38 tablica, a glavne karakteristike tablica u serijama su zadržane. Postoje tablice prilagođene za decu i analfabeete. Test se

izvodi tako što je ispitanik okrenut leđima prozoru, tablice se drže na udaljenosti od 50-100 cm, a dopušteno vreme čitanja tablica iznosi 4-6 sekundi.

### **Upotreba Išiharinih tablica**

1. Svaki subjekat, bilo sa normalnim ili poremećenim viđenjem boja, broj "12" će tačno pročitati. Ova tablica je prvenstveno napravljena kao objašnjenje subjektu za dalje prepoznavanje tablica.
2. Subjekt bez oboljenja će normalno pročitati "8", a oni sa crveno-zelenim nedostatkom "3".
3. Subjekt bez oboljenja će normalno pročitati "5", a oni sa crveno-zelenim nedostatkom "2".
4. Subjekt bez oboljenja će normalno pročitati "29", a oni sa crveno-zelenim nedostatkom "70".
5. Subjekt bez oboljenja će normalno pročitati "74", a oni sa crveno-zelenim nedostatkom "21".
6. Broj "2" lak za prepoznavanje osobama bez poremećaja za boje, dok je osobama sa crveno-zelenim nedostatkom nejasan.
7. Osobe sa kolornim anomalijama imaće poteškoće u praćenju putića.
8. Osobe sa normalnim kolornim raspoznavanjem i one sa blagim crveno-zelenim poremećajem će videti broj "96", dok će osobe sa protanopijom i potpunom protanomlaliom videti samo "6", a deuteranopi i osobe sa potpunom deuteranomaliom samo "9".
9. Osobe sa normalnim kolornim raspoznavanjem i one sa blagim crveno-zelenim poremećajem će videti broj "35", dok će osobe sa protanopijom i potpunom protanomlaliom videti samo "5", a deuteranopi i osobe sa potpunom deuteranomaliom samo "3".
10. U pronalaženju krivudavih linija, osoba sa normalnim viđenjem će pratiti i ljubičastu i crvenu liniju. Kod protanopije i potpune protanomaliije samo je ljubičasta linija jasna, a kod blage protanomaliije obe linije je mogu da se prate, ali ljubičasta više. Kod deuteranopije i kod potpune deuteranomaliije samo je moguće pratiti crvenu liniju, a u slučaju blage deuteranomaliije obe linije mogu da se prate, ali je lakše pratiti crvenu.

Tabela pokazuje odgovore za svaku tablicu (normalna osoba, osoba sa crveno-zelenim poremećajem, osobe sa totalnim slepilom za boje)

<b>Broj tablica</b>	<b>Normalna osoba</b>	<b>Osoba sa crveno-zelenim poremećajem</b>				<b>Osobe sa totalnim slepilom</b>
1	12	12				12
2	8	3				X
3	5	2				X
4	29	70				X
5	74	21				X
6	2	X				X
7	<i>može da prati</i>	X				X
		<b>Protan</b>		<b>Deutan</b>		
		<b>totalna</b>	<b>blaga</b>	<b>totalna</b>	<b>blaga</b>	
8	96	6	9 (6)	9	9 (6)	
9	35	5	3(5)	3	3(5)	
10	može da prati obe linije	ljubičasta	ljubičasta (crvena)	Crvena	Crvena (ljubičasta)	X

Obeležije „x“ označava da se data tablica ne može protumačiti. Brojevi i boje u zagradama označavaju da se one mogu protumačiti i pratiti ali da nisu najjasnije.

## EKSPERIMENT

### *Da li naočare za sunce sa UV filterima utiču na kolorni vid?*

Naočare za sunce obavezno treba da sadrže A i B UV filtere koji štite od štetnih sunčevih zraka. Boja na filterima naočara treba da prija onome koji ih nosi. Kako se sunčeva svetlost širi u svim pravcima, ona se i reflektuje sa ravnih površina kao što su asfalt ili voda i takva horizontalna svetlost stvara odbljesak koji onemogućava jasno raspoznavanje boja i oštar vid. Stoga treba koristiti naočare predviđene da takve probleme neutrališu. Posebno je važno da zatamnjena sočiva (sunčane naočari, sočiva sa raznim filterima) imaju zaštitni UV filter, posebno ako je apsorpcija UV zračenja manja od apsorpcije vidljivog dela spektra u sočivu - širenje zenice oka radi ulaska svetlosti ima za posledicu primanje veće doze UV zračenja. UV filter treba da zaustavi svo zračenje ispod 360 nm i da eventualno samo malo oslabi vidljivi deo spektra. Za UV filtre se najčešće koriste oksidi Ce, Ti, Fe.

Proces eksperimenta:

1. Za potrebe experimenta korišćene su lšiharine tablice i sunčane naočare sa UV zaštitom.
2. Ispitaniku se prvenstveno utvrđuje moguća dioptrija.
3. Ukoliko ispitanik ima refraktivnu grešku, korigujemo je odgovarajućim korektivnim staklima.
4. Test se prvo radi bez naočara sa UV filterima, zatim sa njima.
5. Upoređuju se rezultati oba testa, zapisuje moguća razlika u odgovorima.

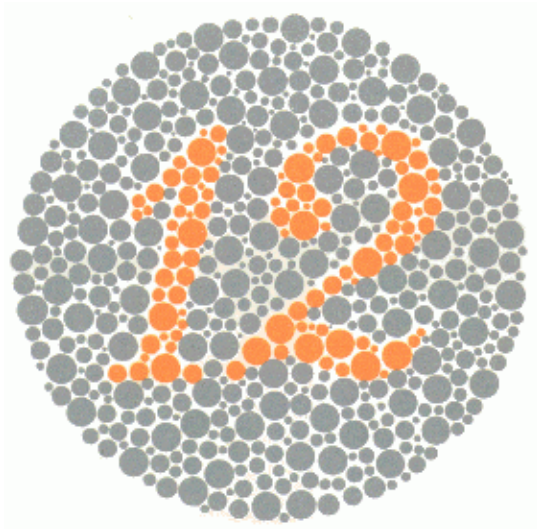
## Izgled testa koji je korišćen za otkrivanje daltonizma

### Ispitivanje kolornog vida:

#### IŠIHARINE ISOHROMATSKE TABLICE – upotreba

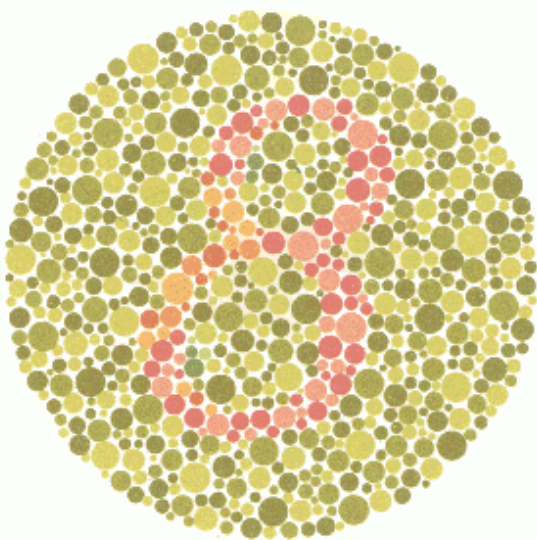
Pokušajte da indentifikujete broj koji je sakriven ili da protumačite ako postoji neki putić, koliko ih ima i mogu li se ispratiti? Za svaku sliku izdvojite oko 5 sekundi, zatim zaokružite jedan od tri ponuđena odgovora.

1)



- a) 12
- b) 13
- c) *nema broja*

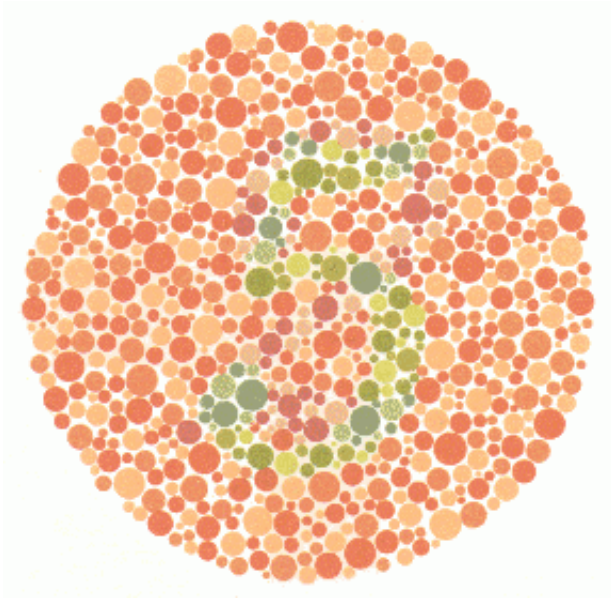
2)



- a) 3
- b) 8
- c) 6

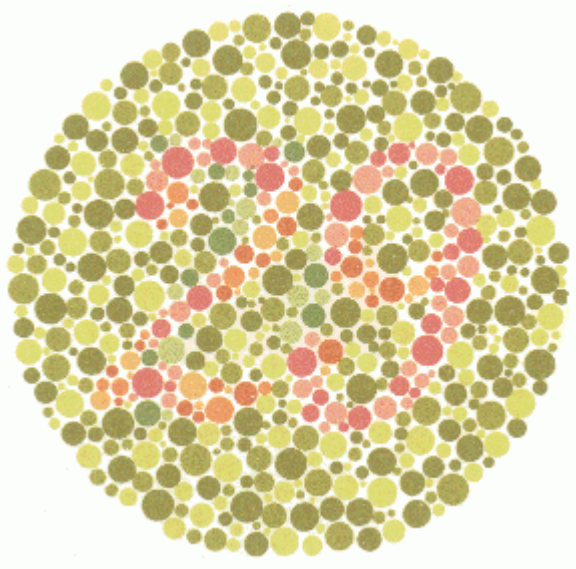


3)



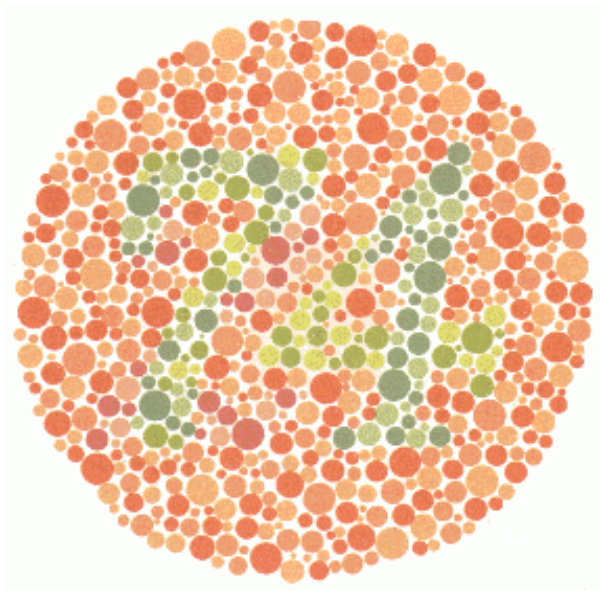
- a) 6
- b) 5
- c) 2

4)



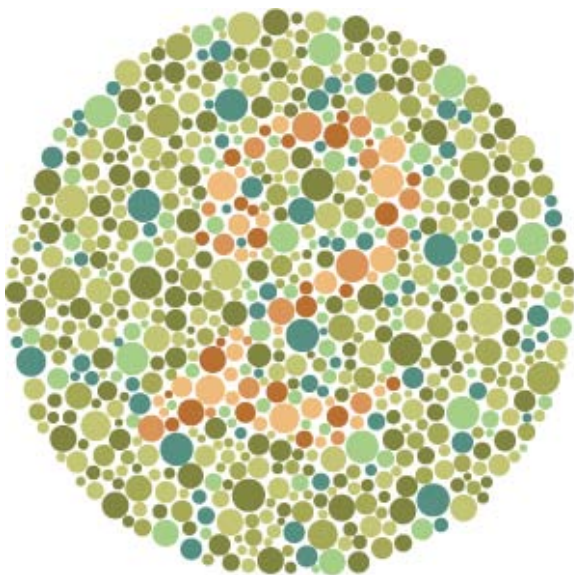
- a) 70
- b) 26
- c) 29

5)



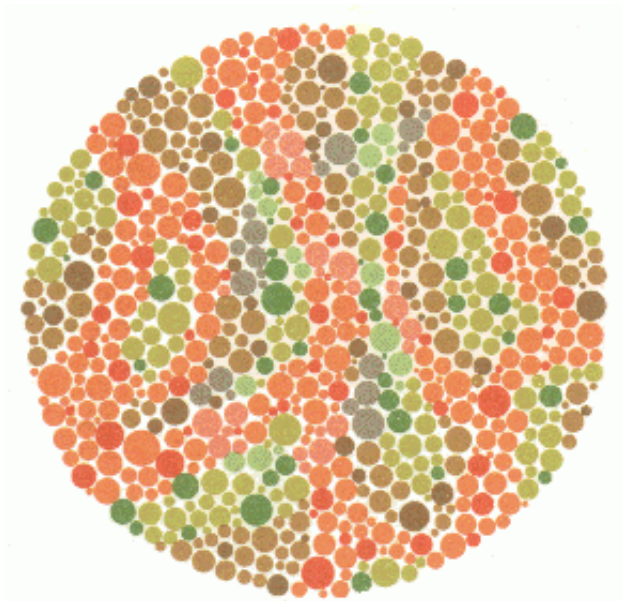
- a) 71
- b) 74
- c) 21

6)



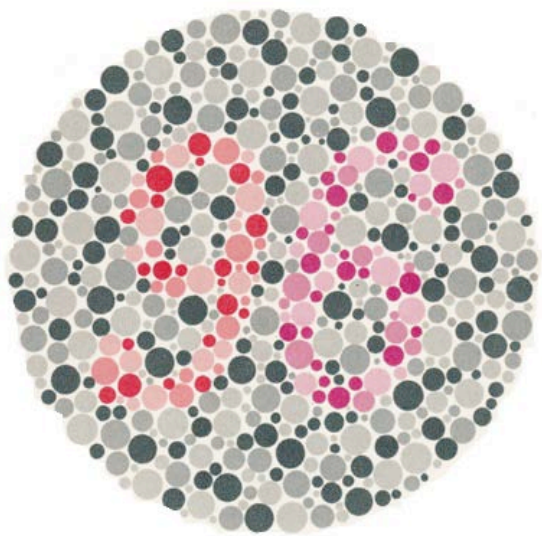
- a) *nema broja*
- b) 2
- c) 5

7)



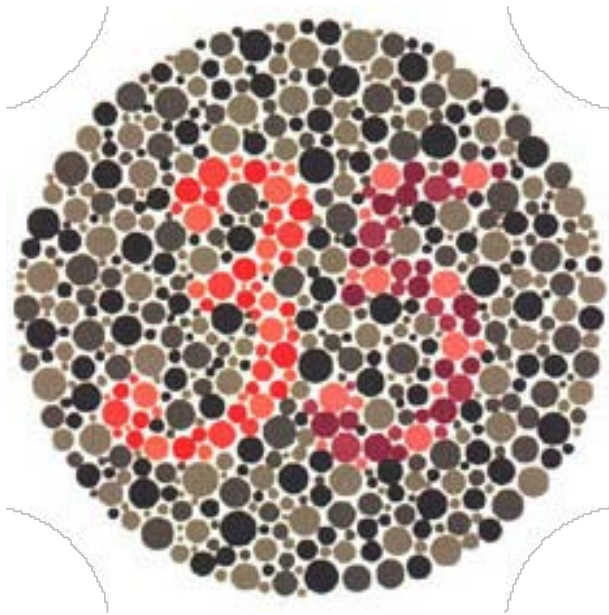
- a) 21
- b) 74
- c) /

8)



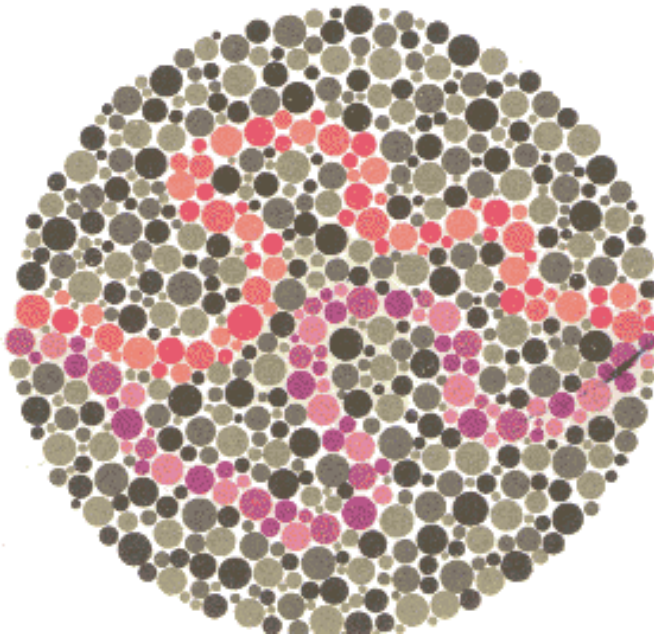
- a) 6
- b) 96
- c) 9

9)



- a) 5
- b) 35
- c) 3

10)



- a) crveni put
- b) ljubičasti put
- c) i crveni i ljubičasti

## REZULTATI

**Ukupno ispitanika : 50**

**Starosna grupa: 18-25 godina**

**Mušskog pola : 25**

**Ženskog pola: 25**

***Od 25 ispitanika muškog pola***, samo dvojica ispitanika imaju crveno-zeleni poremećaj, dok ostali sa i bez naočara sa UV filterima daju potpuno iste odgovore. Jedan od njih ima refraktivnu grešku O.D.= + 0.50; O.S.= + 0.50. Sa svojim korektivnim staklima zadatu tablicu pod rednim brojem 3, gde se nalazi broj 5, ispitanik čita kao 2, takođe tablicu pod rednim brojem 5, gde se nalazi tablica 74, ispitanik čita kao 21. Sa naočarima sa UV filterom daje iste odgovore.

Ispitanik bez refraktivne greške tablicu pod rednim brojem 2, gde se nalazi broj 8, čita kao broj 3, takođe tablicu pod rednim brojem 4, gde se nalazi broj 29, ispitanik čita kao broj 70. Tablicu pod rednim brojem 6, gde se nalazi broj 2, ispitanik odgovara da nema broja. Sa naočarima sa UV filterima daje iste odgovore.

***Od 25 ispitanika ženskog pola***, samo je jedan ispitanik ima daltonizam, dok ostali sa i bez naočara sa UV filterima daju potpuno iste odgovore.

Zadatu tablicu pod rednim brojem 5, gde se nalazi broj 74, ispitanik čita kao 71, takodje tablicu pod rednim brojem 6, gde se nalazi broj 2, ispitanik odgovara da nema broja na slici. Sa naočarima sa UV filterima daje iste odgovore.

## ZAKLJUČAK

Cilj ovog ispitivanja bio je da otkrijemo da li naočare za Sunce sa UV filterima imaju bilo kakav uticaj na procenu boja. Na osnovu odgovora osoba sa normalnim viđenjem boja i sa nekim oblikom daltonizma zaključujemo da nemaju nikakav uticaj. Daltonisti i sa i bez naočara za Sunce isto vide boje. Kao što smo napomenuli na početku, daltonisti predstavljaju opasnost kako za sebe tako i za okolinu. Osobe koje dobro raspoznaju boje mogu, na primer, sa veće udaljenosti da vide koje je svetlo upaljeno na semaforu ili da uoče stop svetla. Česte su saobraćajne nesreće u kojima je uzrok nepravilno uočavanje boja. Kako bi se to izbeglo, danas postoje korektivna stakla sa posebnim slojem kroz koji prilikom prolaska svetlosti, spektar svetlosti se menja na taj način da kod daltonista izaziva sličan nadražaj kao kod osoba sa pravilnim razlikovanjem boja. Korišćenjem ovakvih stakala, postiže se da osobe sa daltonizmom vide i one nijanse koje ranije nisu.



## LITERATURA

1. Steven H. Schwartz, Visual Perception, The McGraw-Hill Companies, New York, 2010
2. Klisurić Olivera, Barak Otto, Skripta „Fiziološka optika“, 2010.
3. Selig Hecht & Cornelis D. Verrijp, Intermittent Stimulation by Light, Columbia University, New York, 1933
4. Professor Emeritus of the University of Tokyo; Concise Edition Kanehara & Co., LTD. Tokyo, Japan; Ishihara Instructions-The series of Plates Designed as a test for Color Deficiency
5. Michael E. Mercer, Suzanne C. Drodge, Mary L. Courage, Russell J. Adams, Vision Research, 2014
6. Andres Iregren, Marlene Andersson, Per Nylén, Color Vision and Occupational Chemical exposures, National Institute for Working life, SE-112 79 Stockholm Sweden, 2002
7. Stanković; O. Litričin; M. Blagojević; M. Danić, Oftamologija, udžbenik za studente medicine, Beograd-Zagreb, 1975
8. Joel Pokorny and Vivianne Smith, Eye Disease and Color defects, Eye research laboratories, University of Chicago 939 East 57-th Street, U.S.A, Copyright 1986
9. Rogošić V, et al. DEFECTIVE COLOUR VISION, Arh Hig Rada Toksikol 2003;54:141-144