



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
GRAFIČKO INŽENJERSTVO I DIZAJN



Neda Milić

---

# Model optimizacije slike za korisnike sa poremećajima viđenja boja

---

-doktorska disertacija-

Novi Sad, 2016.

*Istraživanja realizovana u okviru disertacije su potpomognuta sredstvima  
Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije u okviru Projekta tehnološkog razvoja  
(broj 35027) "Razvoj softverskog modela za unapređenje znanja i proizvodnje u  
grafičkoj industriji".*

# IZJAVA

*Ja, Neda Milić, izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da ova doktorska disertacija predstavlja isključivo rezultate mog rada u saradnji sa mentorom, da se temelji na mojim naučno-stručnim saznanjima i istraživanjima i da se oslanja na popisanu i navedenu literaturu.*

*Izjavljujem da nijedan deo ove doktorske disertacije nije napisan na nedozvoljen i neetičan način, preuzimanjem ili prepisivanjem iz bilo kojeg necitiranog rada, tuđih dela ili rezultata, koji bi bio u suprotnosti sa akademskom moralnošću.*

*Autorska prava svih rezultata i elemenata koji su dobijeni u doktorskoj disertaciji pripadaju Departmanu za grafičko inženjerstvo i dizajn odnosno Fakultetu tehničkih nauka kao pravnom licu.*

*Izjavljujem da su istovetne štampana i elektronska verzija doktorske disertacije.*

*Izjavljujem da sam saglasna da se doktorska disertacija može staviti na trajan uvid u elektronskom obliku.*

---

*Potpis kandidata*



## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР:</b>	
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>	
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска публикација
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација
Аутор, <b>АУ:</b>	МСц Неда Милић
Ментор, <b>МН:</b>	Проф. др Драгољуб Новаковић
Наслов рада, <b>НР:</b>	Модел оптимизације слике за кориснике са поремећајима виђења боја
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски
Земља публиковања, <b>ЗП:</b>	Република Србија
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	А.П. Војводина
Година, <b>ГО:</b>	2016
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Ауторски репринт
Место и адреса, <b>МА:</b>	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страница/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	11/235/86/8/61/9/6
Научна област, <b>НО:</b>	Графичко инжењерство и дизајн
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Графичко инжењерство и дизајн
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	перцепција боја, поремећаји виђења боја, дигитална обрада слике, опсег боја
<b>УДК</b>	
Чува се, <b>ЧУ:</b>	У библиотеци Факултета техничких наука у Новом Саду
Важна напомена, <b>ВН:</b>	
Извод, <b>ИЗ:</b>	Предмет дисертације јесте оптимизација дигиталне слике када ограничење није везано за начин репродукције већ за самог посматрача, односно оптимизација опаженог квалитета дигиталне слике од стране особа са поремећајима виђења боја. Предложени модел оптимизације слике побољшава дистинкцију боја и опсег боја слике за кориснике са различитим тежинама поремећаја виђења боја уз очување природности слике. Методолошки оквир испитивања, који укључује квантитативну анализу рачунарских симулација, анализу <i>eye-tracking</i> података и субјективно оцењивање побољшања опаженог квалитета тест слика, даје систематичну и поуздану верификацију ефектности предложених метода адаптације боја слике.
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	
Датум одбране, <b>ДО:</b>	
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник: др Бранко Милосављевић, редовни професор
	Члан: др Лидија Мандић, ванредни професор
	Члан: др Гојко Владић, доцент
	Члан: др Мирослав Зарић, доцент
	Члан, ментор: Др Драгољуб Новаковић, редовни професор

Потпис ментора



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :		
Identification number, <b>INO</b> :		
Document type, <b>DT</b> :	Monographic Publication	
Type of record, <b>TR</b> :	Textual material, printed	
Contents code, <b>CC</b> :	Ph.D. thesis	
Author, <b>AU</b> :	MSc Neda Milić	
Mentor, <b>MN</b> :	Prof. Ph.D. Dragoljub Novaković	
Title, <b>TI</b> :	Image optimization model for users with colour vision deficiencies	
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian	
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian	
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia	
Locality of publication, <b>LP</b> :	A.P. Vojvodina	
Publication year, <b>PY</b> :	2016	
Publisher, <b>PB</b> :	Author's reprint	
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6	
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	11/235/86/8/61/9/6	
Scientific field, <b>SF</b> :	Graphic engineering and design	
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Graphic engineering and design	
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	colour perception, colour vision deficiencies, digital image processing, gamut	
<b>UC</b>		
Holding data, <b>HD</b> :	The Library of the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad	
Note, <b>N</b> :		
Abstract, <b>AB</b> :	The subject of the thesis was the digital image optimization when an observer represents the main image reproduction limitation or, in other words, the optimization of the perceived image quality by individuals with colour vision deficiencies. The proposed image optimization model enhances colour distinction and gamut for users with different severities of colour-blindness while preserving the image naturalness. The used methodological framework, including a quantitative analysis of computer simulations, an analysis of eye-tracking data and a subjective evaluation of the perceived image quality, provides systematic and reliable effectiveness verification of the proposed colour adaptation methods.	
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :		
Defended on, <b>DE</b> :		
Defended Board, <b>DB</b> :		
President:	Branko Milosavljević, Ph.D., full professor	Menthor's sign
Member:	Lidija Mandić, Ph.D., associate professor	
Member:	Gojko Vladić, Ph.D., assistant professor	
Member:	Miroslav Zarić, Ph.D., assistant professor	
Member, Mentor:	Dragoljub Novaković, Ph.D., full professor	

# ZAHVALNICA

*Mere colour,  
unspoiled by meaning, and unallied with definite form,  
can speak to the soul in a thousand different ways.*  
**Oskar Vajld**

*Posebnu zahvalnost izražavam mentoru rada dr Dragoljubu Novakoviću, redovnom profesoru Fakulteta tehničkih nauka, na savetima, poverenju i podršci u realizaciji doktorske disertacije, ali i od prvog dana školovanja na Departmanu za grafičko inženjerstvo i dizajn.*

*Osećam izuzetnu zahvalnost i prema podršci profesora dr Branka Milosavljevića, redovnog profesora Fakulteta tehničkih nauka, tokom celokupnih doktorskih studija.*

*Zahvalnost dugujem i profesoru dr Sunčici Zdravković, redovnom profesoru Filozofskog fakulteta, na stručnim savetima pri izradi ove disertacije.*

*Hvala kolegama sa departmana na razumevanju, pomoći i prijateljstvu od samog početka mog "GRID putovanja".*

*Zahvaljujem se porodici, prijateljima i Viktoru koji su uvek i bezuslovno uz mene.*

*I za kraj, zahvaljujem se svim ispitanicima sa poremećajima viđenja boja čija dobra volja da izdvoje vreme i energiju za ispitivanje i konstruktivne kritike je dala ovoj disertaciji smisao.*

# REZIME

*Poremećaj viđenja boja predstavlja funkcionalni poremećaj, prevashodno uzrokovan naslednim faktorom, koji se manifestuje redukovanom ili potpuno izgubljenom sposobnošću diskriminacije boja. Problem istraživanja predstavlja rešavanje pitanje pristupačnosti vizuelnih informacija kodiranih bojom za populaciju sa poremećajima viđenja boja.*

*Pregled i analiza nedostataka prethodnih istraživanja koja definišu metode poboljšanja slike za potrebe korisnika sa poremećajima viđenja boja, tzv. metode daltonizacije, kao i brojnost ciljne grupe (preko 200 miliona korisnika) ukazuju na aktuelnost „potrage“ za novim metodom daltonizacije koji će optimalno kompenzovati anomalnu percepciju boja i za novim načinima njegove implementacije u digitalnom okruženju.*

*Sadržajno-nezavisni metodi daltonizacije ne uzimaju u obzir gamut slike niti prostornu distribuciju konfuznih boja na slici. Usled toga, sadržajno-nezavisno mapiranje boja ne osigurava, u opštem slučaju, razlikovanje boje od strane korisnika sa PVB. Moguće su situacije da početni problem bude rešen, ali da se kreira novi konfuzni par sa drugom bojom ili da se inicijalno različite boje mapiraju u neraspoznavajuću kombinaciju.*

*Sadržajno-zavisni metodi daltonizacije podrazumevaju kompleksnije i računski zahtevnije obrade slike kod kojih nova boja piksela zavisi od ostalih boja slike i/ili njegove lokacije. Iako daju pouzdaniju diferencijaciju obojenih elemenata slike, ovi metodi su pretežno fokusirani samo na ozbiljne, dihromatske poremećaje tako da često rezultuju neumerenim promenama boja i neprirodnom slikom.*

*Osnovni cilj istraživanja jeste definisanje modela optimizacije slike prilagođenog tipu i težini poremećaja viđenja boja, kao i vrsti sadržaja slike. Svrha modela je korekcija boja konfuznih, problematičnih segmenata slike koje PVB korisnici opažaju kao isto obojene uz istovremeno očuvanje prirodnosti slike ograničavanjem oblasti dozvoljenog modifikovanja boja. Ovim se postiže balans adaptacije slike tako da rezultujuće boje budu dovoljno različite jedna od druge, ali da ne odstupaju previše od inicijalnih vrednosti. U okviru definisanog modela predloženi su sledeći metodi poboljšanja slike (metodi daltonizacije): tipski, težinski i univerzalni.*

*Metodološki okvir ispitivanja, koji uključuje kvantitativnu analizu računarskih simulacija, analizu eye-tracking podataka i subjektivno ocenjivanje poboljšanja opaženog kvaliteta test slika, daje sistematičnu i pouzdanu verifikaciju efektivnosti predloženih metoda adaptacije boja slike.*

*Kvantitativnom analizom računarskih simulacija potvrđeno je da tipska daltonizacija poboljšava hromatski diverzitet slike i povećava broj različitih boja slike za osobe sa različitim težinama poremećaja. Težinska adaptacija je najefektivnija u slučaju korisnika sa blagim do umerenim poremećajem jer optimalno koristi njihovu diskriminaciju boja približnu normalnom trihromatskom raspoznavanju boja. Na taj način su uzeti u obzir zanemareni anomalni trihromatski tipovi koji predstavljaju tri četvrtine svih slučajeva poremećaja viđenja boja.*

*Dobijeni rezultati objektivne eye-tracking evaluacije potvrđuju da ispitanici sa poremećajima viđenja boja tačnije i brže tumače vizuelne informacije kodirane bojom i nakon tipske i nakon težinske daltonizacije.*

*Dobijeni rezultati subjektivne evaluacije potvrđuju da težina poremećaja utiče na procenu poboljšanja opaženog kvaliteta slike, gde korisnici sa blažim poremećajem bolje ocenjuju težinsku daltonizaciju u poređenju sa korisnicima sa ozbiljnim poremećajem. Takođe je otkriveno i da sadržaj slike utiče na ocenu preferencije- u slučaju slika prirodnih scena ispitanici preferiraju težinsku daltonizaciju, a u slučaju veštačkih slika tipsku daltonizaciju koja daje bolji hromatski kontrast.*

**Ključne reči:** *percepcija boja, poremećaji viđenja boja, digitalna obrada slike, opseg boja*



# ABSTRACT

*Colour vision deficiency is a functional disorder, predominantly genetic, manifested with reduced or complete loss of colour discrimination ability. The research objective is to resolve the accessibility issue of visual information encoded with colour for the population with colour vision deficiencies.*

*Considering the shortcomings of previous image enhancement methods for colour deficient observers, so-called daltonization methods, as well as the prevalence of the target population (over 200 million users), there is still an open search for a new daltonization method that optimally compensates weak colour discrimination and new ways for its implementation in a digital environment.*

*The content-independent daltonization methods do not take into account the image content and the spatial distribution of confusing colours in images. As a result, content-independent colour mapping does not assure colour differentiation by colour deficient observers. This way, it often happens that recolouring solves the initial problem, but creates a new confusing pair or, even worse, colours that are clearly different can be remapped into indistinguishable combinations.*

*The content-dependent daltonization methods include more complex and computationally demanding image processing where the final pixel value depends on other image colours and/or its location. Although providing more successful differentiation of coloured elements, these methods are usually focused only on severe, dichromatic deficiencies causing problems with exaggeratedly changed colours and unnatural results.*

*The primary research objective is to define an image optimization model, customised for different types and severities of colour deficiency and different image content. The purpose of proposed image adaptation is to correct confusingly coloured image segments that users with anomalous colour vision perceive as the same while preserving the image naturalness by restricting, for each colour, an area of admissible remapping. This achieves a recolouring balance where resulting colours are made sufficiently distinctive from each other but do not deviate too much from the initial values.*

*Within the defined model, the following image enhancement methods (daltonization methods) have been proposed: enhancement based on the deficiency type, enhancement based on the deficiency severity and universal enhancement.*

*The used methodological framework, including quantitative analysis of computer simulations, analysis of eye-tracking data and subjective evaluation of the perceived image quality, provides systematic and reliable effectiveness verification of the proposed colour adaptation methods.*

*Quantitative analysis of computer simulations confirmed that the type-based daltonization enhances the chromatic diversity and number of discernible colours in an image for users with different severities of colour deficiencies. The severity-based daltonization is the most effective in the case of mild to moderate deficiencies since it optimally uses their colour discrimination, which is close to normal trichromatic vision. This way, ignored anomalous trichromatic users, representing three-quarters of all colour vision deficiencies cases, are included.*

*The results of objective eye-tracking evaluation confirmed that subjects with colour deficiencies retrieve information from visual content coded with colour more accurately and with lower response times after both type-based and severity-based daltonization.*

*The subjective evaluation confirmed that the severity of colour deficiencies affects the assessment of the image quality improvement, where users with mild deficiencies better evaluate the severity-based daltonization compared to users with more severe deficiency. It was also revealed that the image content affects the choice of preference — the severity-based daltonization is preferred in case of natural scene images while the type-based daltonization provides better chromatic contrast for the artificial images.*

**Keywords:** *colour perception, colour vision deficiencies, digital image processing, colour gamut*

# PREDGOVOR

*Blessed are the “naive”, those who do not know anything about colour in a so-called scientific meaning — for them colour is no problem. Colour is as self-evident as most other things and phenomena in life, like night and day, up and down, air and water.*

*And all seeing humans know what colour is. It constitutes, together with form, our visual world.*

*I have earlier used the analogy with St. Augustine’s sentence about time: “Everybody knows what time is — until you ask him to explain what it is.” It is the same with colour.*

**Lars Sivik**

Poremećaj viđenja boja predstavlja redukovanu sposobnost diskriminacije nekih ili svih boja kao posledicu potpunog odsustva ili delimične disfunkcije fotoreceptora u oku posmatrača.

Anomalije kolornog vida uzrokuju probleme različitog nivoa ozbiljnosti — od sitnih frustracija do situacija koje ugrožavaju bezbednost. Potvrđene teorije anomalnog viđenja boja pokazuju da poremećaji viđenja boja utiču na percepciju svih delova spektra, odnosno predstavljaju više od ustaljene ideje o nerazlikovanju crvene i zelene.

Danas postoje različiti softverski alati za simulaciju ovih poremećaja koji nam omogućavaju da spoznamo percepciju daltonista. Osim što podižu svest o poremećajima viđenja boja, simulacije pomažu dizajnerima vizuelnih informacija da izbegnu upotrebu problematičnih kombinacija boja. Na osnovu simulacija i utvrđivanja setova konfuznih boja mogu se definisati metodi digitalne obrade slike koji prilagođavaju sadržaj slike tako da individue sa anomalnom percepcijom boja mogu razlikovati više detalja, odnosno mogu videti sadržaj slike što približnije prosečnom posmatraču. Ovakva adaptacija slike se uobičajeno naziva *daltonizacija* i predstavlja kompleksan i još uvek aktuelan problem jer ne postoji jedinstveni metod poboljšanja slike optimalan za sve primene i sve grupe daltonista.

Da bismo razumeli osnovnu ideju od koje se krenulo pri definisanju modela optimizacije slike za korisnike sa poremećajima viđenja boja, čiji opseg boja predstavlja podskup opsega boja prosečnog posmatrača, možemo napraviti sledeću analogiju:

*Opseg boja monitora manji je od opsega boja koje može opaziti prosečan posmatrač u prirodi. Kada posmatra sliku na prosečnom monitoru, korisnik ne primećuje da je uskraćen za hiljade boja u reprodukciji scene iz prirode. Međutim, ako vidi tu sliku istovremeno na monitoru većeg gamuta- postaće svestan razlike i preferiraće prikaz slike na tom monitoru. Na isti način osobe sa poremećajima viđenja boja većinu vremena nisu svesne boja koje su im uskraćene, ali pozitivno doživljavaju promenu slike koja rezultira povećanim opsegom boja.*

*Budući da četiri petine opaženih informacija iz okoline usvajamo upravo putem vizuelne percepcije, a boja predstavlja krucijalno merilo kvaliteta slike, tehnologija reprodukcije slike će se razvijati sve dok se ne dođe do idealnog slučaja — dok se ne „uhvate“ na monitoru sve boje koje posmatrač može opaziti. Analogno tome, idealna daltonizacija slike bila bi ona koja maksimalno koristi ograničeni gamut daltoniste.*

# Spisak slika

<b>Slika 1.1.</b> Primer neadekvatno kodirane vizuelne informacije u infografici (izvor: BBC news, <a href="http://www.bbc.com/news/">http://www.bbc.com/news/</a> ): a. originalna infografika, b. percepcija infografike od strane osoba sa poremećajem viđenja boja (vrsta poremećaja: deuteranopija)	3
<b>Slika 1.2.</b> Šema kodiranja odziva čepića (L,M,S) u oponentne kanale (WS, RG, YB) i funkcije spektralnih odziva oponentnih kanala u slučaju prosečnog trihromatskog posmatrača- jedan ahromatski, crno-beli (WS), i dva hromatska, crveno-zeleni (RG) i žuto-plavi (YB)	7
<b>Slika 2.1.</b> Primeri parova boja problematičnih za distinkciju za osobe sa protanopskim poremećajem	10
<b>Slika 2.2.</b> Šema nasleđivanja crveno-zelenih poremećaja viđenja boja uzrokovanih mutacijom na X hromozomu (crvena: osoba sa PVB, plava: osoba bez PVB, crveno-plava: osoba "nosilac" PVB)	13
<b>Slika 2.3.</b> Raspored egzona normalnih i mutiranih gena L i M fotopigmenata	14
<b>Slika 2.4.</b> Funkcije spektralne osetljivosti čepića: a. normalna trihromazija, b. protanopija (nedostatak L čepića), c. deuteranopija (nedostatak M čepića), d. tritanopija (nedostatak S čepića)	17
<b>Slika 2.5.</b> Simulacija dihromatskog opažanja (Bretelov-Vienot-Molon metod): a. originalni krug tonova boja i simulacije percepcije: b. protanopa, c. deuteranopa, i d. tritanopa	17
<b>Slika 2.6.</b> Funkcije spektralnih osetljivosti čepića: a. normalna trihromazija, b. protanomaliya (anomalni L čepići), c. deuteranomaliya (anomalni M čepići), d. tritanomaliya (anomalni S čepići)	19
<b>Slika 2.7.</b> Pomeranje funkcija oponentnih kanala u slučaju: a. protanomaliye i deuteranomaliye, b. tritanomaliye	20
<b>Slika 2.8.</b> Simulacija protanomalske percepcije (Mačadov metod): a. originalni krug tonova boja i percepcija protanomala sa pomerajem u funkciji spektralne osetljivosti L čepića od: b. 8 nm, c. 12 nm i d. 20 nm	20
<b>Slika 2.9.</b> Simulacija deuteranomalske percepcije (Mačadov metod): a. originalni krug tonova boja i percepcija deuteranomala sa pomerajem u funkciji spektralne osetljivosti M čepića od: b. 8 nm, c. 12 nm i d. 20 nm	21
<b>Slika 2.10.</b> Simulacija tritanomalske percepcije (Mačadov metod): a. originalni krug tonova i percepcija tritanomala sa pomerajem u funkciji spektralne osetljivosti S čepića od: b. 8 nm, c. 12 nm i d. 20 nm	21
<b>Slika 2.11.</b> Projekcija stimulusa boje na dihromatski gamut (osenčene poluravni) u LMS prostoru. Dihromatska verzija datog stimulusa C se nalazi projekcijom na određenu poluravan u pravcu paralelnom nedostajućem odzivu čepića: a. protanopija (C-Cp  L osa), b. deuteranopija (C-Cd  M osa), c. tritanopija (C-Ct  S osa)	24
<b>Slika 2.12.</b> Projekcija stimulusa boje na dihromatski gamut (osenčena ravan) u LMS prostoru pod pretpostavkom anuliranja nedostajućeg odziva čepića: a. protanopija (C-CP  L osa; CP=(O,M,S)), b. deuteranopija (C-CT  M osa; CD=(M,O,S)), c. tritanopija (C-CT  S osa; CT=(L,M,O))	25

<b>Slika 2.13.</b> Filter za simulaciju dihromatskih PVB u softveru Adobe PhotoShop (opcija View/Proof Setup→ Color Blindness- Protanopia Type ili Color Blindness-Deuteranopia Type)	29
<b>Slika 2.14.</b> Primer daltonizacije: a. lšiharina tablica, b. deuteranopska simulacija, c. slika nakon daltonizacije, d. deuteranopska verzija nakon daltonizacije	33
<b>Slika 2.15.</b> Primer daltonizacije: a. prirode sa crveno-zelenom konfuznom kombinacijom, b. slika nakon daltonizacije, c. protanopska simulacija, d. protanopska verzija slike nakon daltonizacije, e. opseg hromatičnosti (2D) i svih boja (3D) protanopa u slučaju početne slike, f. hromatski opseg (2D) i svih boja (3D) protanopa u slučaju slike nakon daltonizacije	34
<b>Slika 2.16.</b> Primeri daltonizacije (Vischeck Daltonize filter): a. originalna slika (početne vrednosti parametara bez promena na slici: Pa kanal= 1, PL kanal=0, Pb kanal=0), b. simulirana deuteranopska verzija, c. slika nakon prve daltonizacije (Pa kanal=1, PL kanal=0.5, Pb kanal =1.2), d. deuteranopska verzija nakon prve daltonizacije, e. slika nakon druge daltonizacije (Pa kanal=1, PL kanal=0, Pb kanal=1.3), f. deuteranopska verzija nakon druge daltonizacije	36
<b>Slika 2.17.</b> Problem mapiranja boja sa sadržajno-nezavisnim Chrome Daltonize algoritmom: a. šema boja, b. protanopska verzija inicijalne šeme, c. šema nakon daltonizacije i d. protanopska šema nakon daltonizacije. RGB vrednosti šeme boja su: C1(155,155,35), C2(73,165,35), C3(100,227,113), C4(90,112,187), C5(76,36,91) i C6(159,25,90).	38
<b>Slika 2.18.</b> Primer daltonizacije sa Koterinim metodom (2012): a. inicijalna slika, b. protanopska verzija inicijalne slike, c. slika nakon daltonizacije i d. protanopska verzija slike nakon daltonizacije	40
<b>Slika 2.19.</b> Rezultat daltonizacije koristeći SOM metod (Ma et al, 2009): a. originalna slika, b. protanopska verzija slike, c. 'originalne boje' šeme vektora i njihove verzije u novom prostoru i d. slika nakon daltonizacije opažena na isti način od strane svih: trihromata, protanopa i protanomala	44
<b>Slika 2.20.</b> Geometrijska ilustracija koraka obrade: a. proračun dihromatskih verzija (c1' do c4') za boje c1 do c4, b. pronalaženje pravaca vab koji maksimiziraju gubitak kontrasta, c. projekcija originalnih boja na ravan definisanu sa vab i osom svetline i d. rotacija projektovanih boja oko L ose dok se ne poravnaju sa dihromatskom gamutskom ravni	45
<b>Slika 2.21.</b> Rezultat daltonizacije korišćenjem Mačadovo-Oliveira metoda (2009): a. originalne slike, b. deuteranopske simulacije originalnih slika, c. slike nakon daltonizacije koje se opažaju na isti način od strane normalnih trihromata, deuteranomala i deuteranopa	46
<b>Slika 2.22.</b> Demonstracija Eye Pilot softverskog alata: a. izdvajanje segmenta slike obojenog selektovane bojom, b. izdvajanje segmenta slike obojenog selektovanim imenom boje	47
<b>Slika 4.1.</b> Model optimizacije slike sa personalizovanim pristupom za korisnike sa PVB	55
<b>Slika 4.2.</b> Hromatski opseg prema Bretel-Vienot-Molon modelu za: a. protanopiju, b. deuteranopiju i c. tritanopiju	58
<b>Slika 4.3.</b> Hromatski opseg prema Mačado-Oliveira modelu za protanomaliju sa pomerajem L čepića od: a. 4 nm, b. 8 nm, c. 12 nm, d. 16 nm i e. 20 nm	61

<b>Slika 4.4.</b> Hromatski opseg prema Mačado-Oliveira modelu za deuteranomaliiju sa pomerajem M čepića od: a. 4 nm, b. 8 nm, c. 12 nm, d. 16 nm i e. 20 nm	62
<b>Slika 4.5.</b> Hromatski opseg prema Mačado-Oliveira modelu za tritanomaliju sa pomerajem S čepića od: a. 4 nm, b. 8 nm, c. 12 nm, d. 16 nm i e. 20 nm	63
<b>Slika 4.6.</b> Aproksimacija normalizovane psihometrijske sigmoidalne funkcije jednostavnom stepenastom funkcijom (Flata & Gutwin, 2011)	65
<b>Slika 4.7.</b> Izgled tablice za procenu individualnog PVB: izgled tablice za određivanje individualne pozicije R primara na protanopskoj liniji konfuzije u: a. početnom koraku i b. poslednjem koraku	66
<b>Slika 4.8.</b> Nizovi kalibracionih tablica	67
<b>Slika 4.9.</b> Šema određivanja diskriminacionih granica i personalizovanog opsega boja	69
<b>Slika 4.10.</b> Projektovanje stimulusa boje na dihromatski gamut u CIE31 xy hromatskom dijagramu. Dihromatska verzija date hromatičnosti se nalazi kao presek linije konfuzije i linije gamuta. Linije konfuzije se spajaju u specifičnoj tački konvergencije: a. protanopija P(0.7635,0.2365), b. deuteranopija D (1.40,-0.40), c. tritanopija T(0.1748,0.00)	70
<b>Slika 4.11.</b> Projektovanje stimulusa boje na dihromatski gamut u CIE76 uv hromatskom dijagramu. Dihromatska verzija date hromatičnosti se nalazi kao presek linije konfuzije i linije gamuta. Linije konfuzije se spajaju u specifičnoj tački konvergencije: a. protanopija P(0.68,0.50), b. deuteranopija D(1.22,-0.78), c. tritanopija T(0.26,0.00)	71
<b>Slika 4.12.</b> Primer diskriminacionih elipsi za normalno trihromatsko i dihromatsko viđenje boja u CIE u'v' dijagramu hromatičnosti (Milić et al, 2015a)	73
<b>Slika 4.13.</b> Eksperimentalno merene diskriminacione elipse CIE76 uv dijagramu posmatrača sa: a. normalnom trihromatskom percepcijom, b. protanopskom percepcijom (kongenitalno stanje), c. deuteranopskom percepcijom (kongenitalno stanje), d. tritanopskom percepcijom (stečeno stanje) i e. blagim anomalnim trihromatskim poremećajem (Mollon & Regan, 2000)	74
<b>Slika 4.14.</b> Simulacija protanopske percepcije pod različitim iluminantima: a. inicijalna test karta ECI2002 Random Layout (bela tačka D65). Simulacija protanopske percepcije test karte pod iluminantima: b. D65-6500K, c. F11-4000K, i d. A-2856K (Milić et al, 2011)	76
<b>Slika 4.15.</b> Promena hromatskog opsega usled promene iluminanta D65 u F11 i A u slučaju protan i deutran percepcije različitog stepena (pomeraji anomalnih čepića od 4, 12 i 20 nm) predstavljena u CIE a-b ravni (hromatski diverzitet) (Milić et al, 2014)	77
<b>Slika 4.16.</b> Upporedno poređenje opsega boja usled promene iluminanta (crvena: A, žuta: F11, plava: D65) za: a. protanopiju i b. deuteranopiju; Upporedno poređenje opsega boja usled promene svetline okruženja (plava: D65, prosečno svetlo (average); zelena: D65, tamno) za: c. protanopiju i d. deuteranopiju	78
<b>Slika 4.17.</b> Grafička prezentacija koraka predloženog metoda daltonizacije	79
<b>Slika 4.18.</b> Postupak evaluacije personalizovane simulacije. Posmatraču je prvo prezentovana test slika u trajanju od 1s. Slika je zatim smenjena sa praznim ekranom, a nakon toga su ispitaniku istovremeno prikazane u nasumičnom rasporedu tri verzije slike (originalna slika, personalizovana simulacija i dihromatska simulacija)	82
<b>Slika 4.19.</b> Postupak ispitivanja evaluacije daltonizacije. Posmatraču je prvo prezentovano uputstvo u trajanju od 15s. Slika je zatim smenjena sa pripremnim ekranom, a nakon toga je ispitaniku u trajanju od 15s prikazana metro mapa sa test bojom u gornjem levom uglu, a njegov zadatak je bio da isprati pogledom liniju obojenu zatom bojom. Nakon N test mapa, usledilo je M sličnih zadataka sa razlikom da je test uzorak boje bio prikazan prethodno	85

mapi u trajanju od 3s. Poslednji zadatak je praćenje pogledom spirale u cilju provere kalibracije eye-tracking opreme	
<b>Slika 4.20.</b> Procedura praćenja pogleda (eye-tracking) u zadatku traženja metro linije	89
<b>Slika 4.21.</b> Primer rezultata ispitanika koji pokazuju ozbiljniji deutan poremećaj (suma greške 252)	91
<b>Slika 5.1.</b> Grafička prezentacija tipskog poboljšanja distinkcije boja. Primer oblasti dozvoljenog kretanja [ai, bi] za centar boje segmenta ci i za set centara boja [a, b] (Milić et al, 2015a)	98
<b>Slika 5.2.</b> Tipska adaptacija centara boja u distinktno indeksirane boje u cilju povećanja hromatskog diverziteta ( $c1 \rightarrow c1 D$ , $c2 \rightarrow c2$ , $c3 \rightarrow c3 D$ )	100
<b>Slika 5.3.</b> Rezultati tipske daltonizacije na primeru slike prirode sa crveno-zelenim konfuznim sadržajem za protan tip poremećaja	101
<b>Slika 5.4.</b> Opseg boja i dominantne boje protanskih verzije originalne slike pre: a. blag protan PVB (8 nm), b. umeren protan PVB (12 nm) i c. ozbiljan protan PVB (20 nm); i nakon tipske daltonizacije: d. blag protan PVB (8 nm), e. umeren protan PVB (12 nm) i f. ozbiljan protan PVB (20 nm)	102
<b>Slika 5.5.</b> Grafička prezentacija težinskog poboljšanja distinkcije boja	103
<b>Slika 5.6.</b> Težinska adaptacija centara boja u distinktno indeksirane boje u cilju povećanja hromatskog diverziteta ( $c1 \rightarrow c1 D$ , $c2 \rightarrow c2$ , $c3 \rightarrow c3 D$ )	104
<b>Slika 5.7.</b> Opseg boja i dominantne boje od: a. originalne slike, b. blage protan percepcije (8 nm), c. ozbiljne protan percepcije (20 nm); i verzija nakon daltonizacije: d. originalne slike, e. blage protan percepcije PVB (8 nm) i f. ozbiljne protan percepcije PVB (20 nm)	105
<b>Slika 5.8.</b> Opseg boja i dominantne boje protanskih verzije originalne slike pre: a. blag protan PVB (8 nm), b. umeren protan PVB (12 nm) i c. ozbiljan protan PVB (20 nm); i nakon udružene daltonizacije: d. blag protan PVB (8 nm), e. umeren protan PVB (12 nm) i f. ozbiljan protan PVB (20 nm)	106
<b>Slika 5.9.</b> Grafička prezentacija univezalnog poboljšanja distinkcije boja sa primerom oblasti dozvoljene redistribucije svetline za centar segmenta [Li max, Li min]	107
<b>Slika 5.10.</b> Univerzalna adaptacija centara boja u distinktno indeksirane boje u cilju povećanja kontrasta svetline ( $c1 \rightarrow c1 D$ , $c2 \rightarrow c2 D$ )	108
<b>Slika 5.11.</b> Opseg boja i dominantne boje protanskih verzije originalne slike nakon univerzalne daltonizacije: a. blag protan PVB (8 nm), b. umeren protan PVB (12 nm) i c. ozbiljan protan PVB (20nm)	108
<b>Slika 5.12.</b> Rezultat daltonizacije: a. početna mapa; protanska simulacije centara boja i njihova pozicija u CIE u'v' dijagramu hromatičnosti za: b. početnu šemu boja, c. šemu boja prilagođenu sa Chrome Daltonize metodom, d. Koterinim metodom, e. Mačadovim metodom, f. predloženim metodom (crvene tačke su pozicije originalnih centara, a plave predstavljaju nove pozicije) (Milić et al, 2015a)	111
<b>Slika 5.13.</b> Rezultat daltonizacije: a. Početna mapa; protanska simulacije centara boja i njihova pozicija u CIE u'v' dijagramu hromatičnosti za: b. početnu šemu boja i c. šemu boja prilagođenu predloženim metodom težinske daltonizacije (crvene tačke su pozicije početnih centara, a plave predstavljaju nove pozicije)	119
<b>Slika 6.1.</b> Personalizovani opseg u poređenju sa trihromatskim (sRGB) gamutom u: a. CIE u'v' ravni, b. CIE Lu'v' prostoru boja	128



<b>Slika 6.2.</b> Primer upotrebe personalizovanog ICC profila. Originalna slika sa dodeljenim profilom: a. sRGB i b. personalizovanim ICC profilom	129
<b>Slika 6.3.</b> Rezultat daltonizacije za protan PVB sa Mačadovim, Koterinim i novim predloženom tipskom daltonizacijom za sliku prirode sa širokim opsegom boja (Milić et al. 2015a)	131

## Spisak tabela

<b>Tabela 2.1.</b> Kategorije i učestalosti PVB za populaciju evropskog porekla (Machado, 2009; Milić et al, 2015b)	12
<b>Tabela 2.2.</b> Kategorizacija metoda daltonizacije (Milić et al, 2015b)	31
<b>Tabela 4.1.</b> Matrice simulacije anomalnih trihromatskih PVB ФPVB	59
<b>Tabela 5.1.</b> Matrice konverzije za simulaciju PVB različitih težina ( $\epsilon$ )	94
<b>Tabela 5.2.</b> Test slike za subjektivnu evaluaciju i verzije nakon tipske i težinske daltonizacije	124
<b>Tabela 6.1.</b> Test slike nakon daltonizacije Mačadovim metodom optimizovanim za dihromatske PVB	133

## Spisak grafika

<b>Grafik 5.1.</b> Zbirna mera vizuelnog nepoklapanja sa test slikama za svakog ispitanika (OR- originalna slika, PS- personalizovana simulacija, DS- dihromatska simulacija). Pojedinačne ocene za svaku od 18 test slika su: 0-ista, 1-slična i 2-manje slična (različita). Minimalan moguć ukupan zbir je 0, a maksimalan 36 u slučaju da ispitanik verzije svih 18 slika proglaši različitim od test slike (2x18).	95
<b>Grafik 5.2.</b> Zbirna mera vizuelnog nepoklapanja za svaku test sliku. Pojedinačne ocene svakog od 10 ispitanika su: 0-ista, 1-slična i 2-manje slična (različita). Minimalan moguć ukupan zbir je 0, a maksimalan 20 u slučaju da je sliku svih 10 ispitanika ocenilo kao različitu (2x10)	96
<b>Grafik 5.3.</b> Uspešnost rešavanja eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija (M1, M2, M3, P1 i P2) za verzije mape: OR – početna mapa, ChD- nakon Chrome Daltonize daltonizacije, KMnakon Koterine daltonizacije, MM- nakon Mačadove daltonizacije i PM- nakon predložene tipske daltonizacije	112
<b>Grafik 5.4.</b> Vremena uspešno rešenih eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija linija (M1, M2, M3, P1 i P2) za verzije mape: OR – početna mapa, ChD- nakon Chrome Daltonize daltonizacije, KM- nakon Koterine daltonizacije, MM- nakon Mačadove daltonizacije i PM- nakon predložene tipske daltonizacije za: a. test grupu PVB ispitanika, b. kontrolnu grupu ispitanika sa dobrom diskriminacijom boja	116

<b>Grafik 5.5.</b> Usporedna prosečna vremena uspešno rešenih eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija linija (M1, M2, M3, P1 i P2) za verzije mape: OR – početna mapa, ChD- nakon Chrome Daltonize daltonizacije, KM- nakon Koterine daltonizacije, MM- nakon Mačadove daltonizacije i PMnakon predložene tipske daltonizacije	117
<b>Grafik 5.6.</b> Uspešnost rešavanja eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija (3, 4, 8, 9) za početnu mapu i verziju nakon predložene težinske daltonizacije	120
<b>Grafik 5.7.</b> Vremena uspešno rešenih eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija (3, 4, 8, 9) za početnu mapu i verziju nakon predložene težinske daltonizacije za: a. test grupu PVB ispitanika, b. kontrolnu grupu ispitanika sa dobrom diskriminacijom boja	122
<b>Grafik 5.8.</b> Vremena uspešno rešenih eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija (3, 4, 8, 9) za početnu mapu i verziju nakon predložene težinske daltonizacije	123
<b>Grafik 5.9.</b> Vrednosti PC indeksa za pojedinačne test slike, kao i prosečne vrednosti za prirodne slike (1- 6), veštačke slike (7-12) i sve test slike. Minimalna vrednost PC indeksa je 0, a maksimalna 200.	127

## Prilozi

### Prilog P.1

<b>Tabela P.1.1.</b> Kalibracione tablice - protan niz R primara	147
<b>Tabela P.1.2.</b> Kalibracione tablice - deutan niz R primara	149
<b>Tabela P.1.3.</b> Kalibracione tablice - tritan niz B primara	151

### Prilog P.2

<b>Tabela P.2.1.</b> Primer K-means segmenatcije slike na osnovu predefinisnog broja klastera (pet)	153
<b>Tabela P.2.2.</b> Primer K-means segmenatcije slike na osnovu predefinisnom minimalnom razlikom između segmenata $\Delta E=20$	154

### Prilog P.3

<b>Tabela P.3.1.</b> Ocene vizuelnog poklapanja simulacija sa početnom slikom (OR- originalna slika, PS- personalizovana simulacija, DS – dihromatska simulacija)	155
<b>Tabela P.3.2.</b> Test slike za evaluaciju personalizovane simulacije (početne slike, dihromatske simulacije i primeri personalizovanih protan ( $\epsilon=0.6$ ) i deutan ( $\epsilon=0.7$ ) simulacija)	156

## **Prilog P.4**

<b>Slika P.4.1.</b> Početna metro mapa (Atina)	158
<b>Slika P.4.2.</b> Metro mapa (Atina) nakon Chrome Daltonize daltonizacije	159
<b>Slika P.4.3.</b> Metro mapa (Atina) nakon Koterine daltonizacije	160
<b>Slika P.4.4.</b> Metro mapa (Atina) nakon Mačadove daltonizacije	161
<b>Slika P.4.5.</b> Metro mapa (Atina) predložene tipske daltonizacije	162
<b>Slika P.4.6.</b> Početna metro mapa (Madrid) sa traženom linijom 4	163
<b>Slika P.4.7.</b> Metro mapa (Madrid) nakon težinske daltonizacije sa traženom linijom 4	164
<b>Slika P.4.8.</b> Primer testiranja kalibracije	178
<b>Tabela P.4.1.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – početna mapa Madrida (PVB vs nePVB grupa)	165
<b>Tabela P.4.2.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – mapa Madrida posle težinske daltonizacije (PVB vs nePVB grupa)	165
<b>Tabela P.4.3.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – mapa Madrida (poređenje PVB grupe pre i posle težinske daltonizacije)	165
<b>Tabela P.4.4.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje verzija linije M1 mape Atine (PVB vs nePVB grupa)	166
<b>Tabela P.4.5.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje verzija linije M2 mape Atine (PVB vs nePVB grupa)	166
<b>Tabela P.4.6.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje verzija linije M3 mape Atine (PVB vs nePVB grupa)	166
<b>Tabela P.4.7.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje verzija linije P1 mape Atine (PVB vs nePVB grupa)	167
<b>Tabela P.4.8.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje verzija linije P2 mape Atine (PVB vs nePVB grupa)	167
<b>Tabela P.4.9.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje svih linija OR i PM verzije mape Atine (PVB grupa)	167
<b>Tabela P.4.10.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje svih linija ChD i PM verzije mape Atine (PVB grupa)	168
<b>Tabela P.4.11.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje svih linija KM i PM verzije mape Atine (PVB grupa)	168
<b>Tabela P.4.12.</b> Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje svih linija MM i PM verzije mape Atine (PVB grupa)	168
<b>Tabela P.4.13.</b> Primer uspešnog nalaženja zadate transportne linije P1 kod ChD verzije (mapa nakon Chrome Daltonize daltonizacije), ali sa dvoumljenjem između P1 i P2 linije	169
<b>Tabela P.4.14.</b> Primer neuspešnog nalaženja zadate transportne linije P1 kod ChD verzije (mapa nakon Chrome Daltonize daltonizacije) – umesto zadate P1 linije praćena je pogledom P2 linija	171
<b>Tabela P.4.15.</b> Primer neuspešnog nalaženja zadate transportne linije M2 kod OR verzije (početna mapa) – umesto zadate M2 linije praćena je pogledom M1 linija	172

<b>Tabela P.4.16.</b> Primer neuspešnog traženja zadate transportne linije P2 kod KM verzije (mapa nakon Koterine daltonizacije) – ispitanik nije mogao da se odluči između linija P2, M1 i M2	173
<b>Tabela P.4.17.</b> Primer uspešnog praćenja zadate transportne linije M1 na PM verzije (mapa nakon predložene tipske daltonizacije)	175
<b>Tabela P.4.18.</b> Primer ispitanika koji nije uspeo da nađe liniju 4 ni pre ni posle težinske daltonizacije odnosno kod kojeg težinska daltonizacija nije imala efekta – u oba slučaja ispitanik je odabrao liniju 7 umesto linije 4	176
<b>Tabela P.4.19.</b> Primer ispitanika koji nije pronašao liniju 4 na početnoj mapi, ali je uspeo da reši zadatak nakon težinske daltonizacije - u prvom slučaju je umesto linije 4 pratio linije 5 i 7	177

## **Prilog P.5**

<b>Tabela P.5.1.</b> PC indeksi uparenih verzija test slika (poređenje originalne slike sa slikom nakon težinske daltonizacije, poređenje originalne slike sa slikom nakon tipske daltonizacije i poređenje verzija slike nakon težinske i tipske daltonizacije)	179
<b>Slika P.5.1.</b> Test slika 2 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	180
<b>Slika P.5.2.</b> Test slika 3 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	181
<b>Slika P.5.3.</b> Test slika 4 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	182
<b>Slika P.5.4.</b> Test slika 5 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	183
<b>Slika P.5.5.</b> Test slika 6 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	184
<b>Slika P.5.6.</b> Test slika 7 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	185
<b>Slika P.5.7.</b> Test slika 8 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	186
<b>Slika P.5.8.</b> Test slika 9 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	187
<b>Slika P.5.9.</b> Test slika 10 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	188
<b>Slika P.5.10.</b> Test slika 11 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	189
<b>Slika P.5.11.</b> Test slika 12 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	190
<b>Slika P.5.12.</b> Test slika 1 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	191
<b>Slika P.5.13.</b> Test slika 2 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	192
<b>Slika P.5.14.</b> Test slika 3 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	193
<b>Slika P.5.15.</b> Test slika 4 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	194
<b>Slika P.5.16.</b> Test slika 5 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	195
<b>Slika P.5.17.</b> Test slika 6 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	196
<b>Slika P.5.18.</b> Test slika 7 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	197
<b>Slika P.5.19.</b> Test slika 8 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	198
<b>Slika P.5.20.</b> Test slika 9 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	199
<b>Slika P.5.21.</b> Test slika 10 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	200
<b>Slika P.5.22.</b> Test slika 11 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	201
<b>Slika P.5.23.</b> Test slika 12 – Deutanske simulacije sa korespondirajućim gamutima	202

## **Prilog P.6**

<b>Slika P.6.1.</b> Blag protan poremećaj (test skor 40)	203
<b>Slika P.6.2.</b> Blag protan poremećaj (test skor 60)	203
<b>Slika P.6.3.</b> Blag protan poremećaj (test skor 76)	203
<b>Slika P.6.4.</b> Blag protan poremećaj (test skor 100)	204
<b>Slika P.6.5.</b> Umeren protan poremećaj (test skor 124)	204
<b>Slika P.6.6.</b> Umeren protan poremećaj (test skor 132)	204
<b>Slika P.6.7.</b> Umeren protan poremećaj (test skor 144)	205
<b>Slika P.6.8.</b> Ozbiljan protan poremećaj (test skor 216)	205
<b>Slika P.6.9.</b> Ozbiljan protan poremećaj (test skor >280)	205
<b>Slika P.6.10.</b> Blag deutan poremećaj (test skor 76)	206
<b>Slika P.6.11.</b> Blag deutan poremećaj (test skor 84)	206
<b>Slika P.6.12.</b> Blag deutan poremećaj (test skor 84)	206
<b>Slika P.6.13.</b> Umeren deutan poremećaj (test skor 160)	207
<b>Slika P.6.14.</b> Ozbiljan deutan poremećaj (test skor 244)	207
<b>Slika P.6.15.</b> Ozbiljan deutan poremećaj (test skor 252)	207
<b>Tabela P.6.1.</b> Poređenje rezultata ispitanika na Farnsworth-Munsell 100 Hue testu (TS-test skor) i kalibracionom testu ( $\epsilon$ - indeks težine PVB)	208

# Sadržaj

<b>1.0 UVOD</b>	<b>3</b>
1.1 OPAŽANJE BOJA	4
1.1.1 Teorije opažanja boja	6
1.1.2 Standardni posmatrač	7
<b>2.0 STANJE U OBLASTI ISTRAŽIVANJA</b>	<b>9</b>
2.1 POREMEĆAJI VIĐENJA BOJA	9
2.1.1 Klasifikacija poremećaja viđenja boja	11
2.1.2 Uzroci poremećaja viđenja boja	13
2.1.3 Karakteristike poremećaja viđenja boja	16
2.1.4 Kompenzaciona prednost populacije sa poremećajima viđenja boja	22
2.2 METODI SIMULACIJE POREMEĆAJA VIĐENJA BOJA	23
2.2.1 Simulacija dihromatskih PVB	23
2.2.2 Simulacija anomalnih trihromatskih PVB	26
2.2.3 Softverski alati za simulaciju poremećaja viđenja boja	29
2.3 METODI POBOLJŠANJA SLIKE ZA KORISNIKE SA POREMEĆAJIMA VIĐENJA BOJA	30
2.3.1 Sadržajno-nezavisni metodi daltonizacije	35
2.3.2 Sadržajno-zavisni metodi daltonizacije	41
2.3.3 Softverski alati za daltonizaciju	47
2.4 METODI EVALUACIJE	48
2.4.1 Metodi evaluacije simulacije poremećaja viđenja boja	48
2.4.2 Metodi evaluacije daltonizacije	50
<b>3.0 PREDMET, PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA</b>	<b>53</b>
<b>4.0 HIPOTEZE I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA</b>	<b>55</b>
4.1 HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA	56
4.2 METOD PERSONALIZOVANE SIMULACIJE PVB	57
4.2.1 Korišćeni metodi simulacije poremećaja viđenja boja	57
4.2.2 Koncept personalizovane simulacije	65
4.3 METOD DALTONIZACIJE	70
4.3.1 Linije konfuzije	70
4.3.2 Diskriminacione elipse	72
4.3.3 Uslovi posmatranja	75
4.3.4 Koncept daltonizacije	78
4.4 METOD ISPITIVANJA	81
4.4.1 Metod evaluacije pouzdanosti simulacije	81
4.4.2 Metod evaluacije efektivnosti daltonizacije	83
4.4.3 Uređaji, softverski alati i ispitanici	87

<b>5.0 REZULTATI ISTRAŽIVANJA</b>	<b>93</b>
5.1 REZULTATI PERSONALIZOVANE SIMULACIJE	93
5.1.1 Model personalizovane simulacije	93
5.1.2 Evaluacija personalizovane simulacije	95
5.2 REZULTATI DALTONIZACIJE	97
5.2.1. Adaptacija boja prema tipu PVB (Tipska daltonizacija)	97
5.2.2 Adaptacija boja prema težini PVB (Težinska daltonizacija)	103
5.2.3 Univerzalna adaptacija boja prema svetlini	107
5.2.4 Evaluacija rezultata daltonizacije	109
<b>6.0 DISKUSIJA REZULTATA</b>	<b>128</b>
6.1 DISKUSIJA REZULTATA SIMULACIJE	128
6.2 DISKUSIJA REZULTATA DALTONIZACIJE	130
<b>7.0 ZAKLJUČAK</b>	<b>135</b>
<b>8.0 NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA I MOGUĆNOST PRIMENE U PRAKSI</b>	<b>139</b>
<b>9.0 LITERATURA</b>	<b>141</b>
<b>10.0 PRILOZI</b>	<b>147</b>
PRILOG P.1	147
PRILOG P.2	153
PRILOG P.3	155
PRILOG P.4	158
PRILOG P.5	179
PRILOG P.6	203
<b>11.0 BIOGRAFIJA SA BIBLIOGRAFIJOM</b>	<b>209</b>

# 1.0 UVOD

Posredstvom čula vida primamo oko 80% od ukupnog broja informacija iz okoline. Preostalih 20% registrujemo sluhom ( $\approx 10\%$ ), dodirrom ( $\approx 5\%$ ), kao i mirisom, ukusom i čulima za toplo i hladno ( $\approx 5\%$ ). Kao sveprisutan atribut vizuelne percepcije i sredstvo komunikacije na svesnom i nesvesnom nivou, boja prožima sve sfere života i naše svakodnevno delovanje.

U digitalizovanoj svakodnevnici, informacije se kodiraju bojom u različitim (multi)medijima. Osobe pogođene poremećajem viđenja boja imaju problem razlikovanja određenih kombinacija boja i često, kao posledica toga, problem otežanog tumačenja informacija u boji. Iako ovaj poremećaj predstavlja stanje sa kojim pogođene individue „izlaze na kraj“ i ne dovodi do nepremostivih problema u opažanju, neadekvatno kodirani vizuelni sadržaji (na primer: bezbednosna uputstva, saobraćajne ili geografske mape) otežavaju tumačenje i povećavaju vreme reagovanja, odnosno utiču na kvalitet njihovog života. Primer neadekvatno kodirane infografike prikazan je na Slici 1.1.



a.

b.

Slika 1.1. Primer neadekvatno kodirane vizuelne informacije u infografici (izvor: BBC news, <http://www.bbc.com/news/>): a. originalna infografika, b. percepcija infografike od strane osoba sa poremećajem viđenja boja (vrsta poremećaja: deuteranopija)



## 1.1 OPAŽANJE BOJA

Boja predstavlja psihofizički osećaj nastao kao rezultat interakcije između svetlosnog stimulusa, receptora u oku koji registruju taj stimulus i nervnog sistema koji interpretira signal receptora (Sharma, 2003).

U mrežnjači ljudskog oka gusto su raspoređene dve vrste svetlosno osetljivih receptora: čepići i štapići. Ekstremno fotoosetljivi štapići su zaslužni za viđenje u uslovima veoma slabog osvetljenja (manjim od  $1 \text{ cd/m}^2$ ) tzv. *skotopsko viđenje* pri kojem se opažaju *samo nijanse sive* (Fairchild, 2005). Sa porastom nivoa osvetljenja, štapići postaju zasićeni i prestaju da doprinose viđenju, a manje osetljivi čepići se aktiviraju. Pod dnevnim nivoom osvetljenja (većim od  $100 \text{ cd/m}^2$ ) aktivni su samo čepići što predstavlja domen *fotopskog viđenja* pri kojem se opažaju *boje* (Fairchild, 2005). U *mezopskom režimu vida* kao postepenom prelazu iz fotopskog u skotopski vid aktivni su i čepići i štapići.

Naše opažanje boja počinje sa apsorpcijom vidljive svetlosti u čepićima. Fotoosetljivi pigment u čepićima se, pri svetlosnom nadražaju, hemijski razlaže što uzrokuje pojavu natrijumskog naelektrisanja - *signala* koji se nervnim putevima transportuje do viših moždanih centara (Guyton, 2003).

Normalan vizuelni sistem čoveka sadrži tri vrste čepića čiji fotoosetljivi pigmenti imaju različite spektralne apsorpcije odnosno različitu osetljivost na spektralne komponente (Sharma, 2003). Tri tipa čepića nazivaju se uobičajeno **L**, **M** i **S** čepići budući da su najosetljiviji na stimulse dugih (**Long**), srednjih (**Middle**) i kratkih (**Short**) talasnih dužina, respektivno. Funkcije spektralne osetljivosti L, M i S čepića pokazuju maksimume osetljivosti na približno **440 nm** (plavi pojas), **540 nm** (žuto-zeleni pojas) i **560 nm** (žuti pojas), respektivno (Stockman et al, 1993; Stockman & Sharpe, 2000).

Ako je spektralna distribucija svetla dospelog na mrežnjaču predstavljena kao funkcija talasne dužine  $E(\lambda)$ , odzivi L, M i S čepića se računaju na sledeći način (Sharma, 2003):

$$[L, M, S] = \int [l(\lambda), m(\lambda), s(\lambda)]E(\lambda)d\lambda, \quad (1.1)$$

gde  $l(\lambda), m(\lambda), s(\lambda)$  predstavljaju funkcije spektralne osetljivosti L, M, S čepića, respektivno. Prostor obuhvaćen sa tri funkcije spektralne osetljivosti  $l(\lambda), m(\lambda), s(\lambda)$  se naziva **ljudski vizuelni potprostor** (engl. *Human Visual SubSpace - HVSS*) (Sharma, 2003). Ako se kontinualna promenljiva iz Jednačine (1.1) zameni sa **n** ravnomerno raspoređenih diskretnih uzoraka iz vidljivog opsega, njihova suma predstavljaće aproksimaciju Jednačine (1.1):

$$[L, M, S] = \sum_{i=1}^n [l(\lambda_i), m(\lambda_i), s(\lambda_i)] E(\lambda_i) \Delta\lambda. \quad (1.2)$$

U Jednačini (1.2)  $\lambda_i = \lambda_0 + (\mathbf{i}-1)\Delta\lambda$ , ( $\mathbf{i}=1, \dots, \mathbf{n}$ ) su ravnomerno raspoređene talasne dužine koje pokrivaju vidljivi deo spektra sa intervalom uzorkovanja talasnih dužina  $\Delta\lambda$ .

Uređena trojka signala L, M i S čepića se obrađuje u centru za vid i interpretira kao određena senzacija boje, a kako do vidnog centra stižu tri nezavisna odziva receptora, normalno viđenje boja se naziva **trihromatsko** (Mollon & Regan, 2000). Razlike između spektralnih osetljivosti čepića kod posmatrača sa regularnim vizuelnim sistemom su relativno male.

Svaka nesingularna<sup>1</sup>, dobro definisana linearna transformacija vektora odziva čepića takođe može služiti za svrhu određivanja boje (Sharma, 2003).

*Jednom kada je svetlosni stimulus apsorbovan, sve informacije o njegovoj spektralnoj kompoziciji se gube* (Mollon & Regan, 2000). Stoga, bilo koji stimulus može biti okarakterisan kao tačka u trodimenzionom ljudskom vizuelnom potprostoru. Stimulusi sa različitim spektralnim kompozicijama koji se projektuju na istu tačku prostora će izgledati isto (Mollon & Regan, 2000).

---

<sup>1</sup> Matrica je singularna (nije regularna) ako je njena determinanta jednaka nuli.

### 1.1.1 Teorije opažanja boja

Pre nego što je tehnologija fizioloških ispitivanja napredovala dovoljno da dokaže postojanje tri vrste receptora za boju - čepića, njihovo postojanje je pretpostavio britanski filozof **Tomas Jang** (engl. *Thomas Young*) pri definisanju svoje **trihromatske teorije opažanja boja** (Zdravković, 2008). Prema jednostavnom konceptu teorije, svaka vrsta receptora je odgovorna za jednu boju: crvenu, zelenu i plavu, dok se ostale boje opažaju istovremenom stimulacijom dve ili tri vrste receptora (Fairchild, 2005; Zdravković, 2008).

Trihromatsku teoriju, koja je predstavljala standard u percepciji boja tokom XIX veka, unapredio je **Helmholz** (1867) uvođenjem dodatne pretpostavke da svaka vrsta receptora nije aktivna samo u detekciji jedne boje, već čitavog opsega talasnih dužina oko te dominantne boje (Zdravković, 2008), što je kasnije i pokazano fiziološkim eksperimentima (Hunt et al, 1995).

Jang-Helmholcova teorija zadovoljavajuće aproksimira mehanizam viđenja boja, ali ne objašnjava bitne fenomene opažanja boje poput **oponentne prirode naknadne slike**<sup>2</sup> ili **simultanog kontrasta**<sup>3</sup> (Fairchild, 2005).

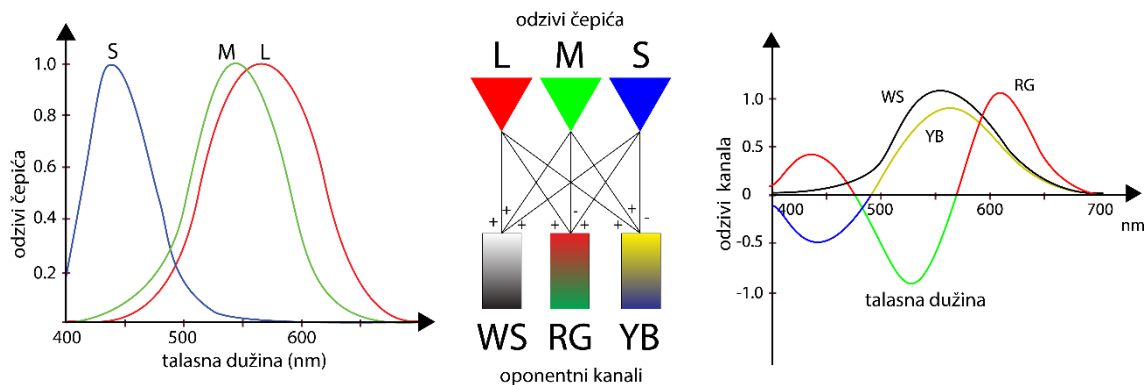
U pokušaju da objasni navedene fenomene, **Hering** je definisao **teoriju oponentnih boja** (engl. *opponent-colour theory*) prema kojoj opažanje boje zavisi od *tri kanala oponentnih procesa*: jednog ahromatskog, **crno-belog**, i dva hromatska, **crveno-zeleni** i **žuto-plavi** (Fairchild, 2005). Primera radi, opažanje zelene dovodi od *hemijske analize* u crveno-zelenom receptoru, a opažanje crvene do *hemijske sinteze* (Zdravković, 2008). Dok jednaki iznosi crne i bele stimulacije daju senzaciju sive, jednaki iznosi plave i žute ili crvene i zelene se međusobno poništavaju i funkcije spektralnog odziva ova dva kanala tada imaju vrednost nula (Ingling & Tsou, 1977). Kasnijim fiziološkim ispitivanjima je pokazano da zaista postoje *tri oponentna receptivna polja ganglijskih neurona* (Dacey, 2000; Fairchild, 2005).

Obe teorije opažanja boja imaju savremeni fiziološki dokaz, ali, razmatrane pojedinačno, ni jedna ni druga ne mogu zadovoljavajuće objasniti sve vizuelne fenomene (Wyszecki & Stiles, 2000). Model vizuelnog sistema najbolje definiše **fazna teorija** (engl. *stage theory*) koja kombinuje trihromatsku teoriju kao prvu retinalnu fazu i teoriju oponentnih boja kao drugu fazu (Hurvich & Jameson, 1957; Judd, 1966). Rezultat retinalne faze je ulaz u sledeću fazu oponentnih mehanizama. Slika 1.2 ilustruje kodiranje signala u faznoj teoriji.

---

<sup>2</sup> Naknadna slika je fenomen kada dugo eksponiranje jednom stimulusu boje rezultira sa pojavom njene oponentne boje na beloj podlozi nakon ukidanja inicijalnog stimulusa.

<sup>3</sup> Simultani kontrast je fenomen kada se stimulusi različito opažaju sa promenom pozadinske boje.



Slika 1.2. Šema kodiranja odziva čepića (L, M, S) u oponentne kanale (WS, RG, YB) i funkcije spektralnih odziva oponentnih kanala u slučaju prosečnog trihromatskog posmatrača: jedan ahromatski, crno-beli (WS), i dva hromatska, crveno-zeleni (RG) i žuto-plavi (YB)

Postoji nekoliko predloženih dvofaznih (Hurvich & Jameson, 1957; Ingling & Tsou, 1977) i trofaznih teorija opažanja boja (Judd, 1949).

Danas je poznato da se, nakon oponentnih procesa u ganglijskim ćelijama, procesiranje vizuelne informacije nastavlja u višim kortikalnim strukturama (Zdravković, 2008).

## 1.1.2 Standardni posmatrač

**Kolorimetrija**, kao grana nauke o boji, bavi se numeričkom specifikacijom boje fizički definisanog stimulusa, odnosno pokušava da kvantitativno opiše boje onako kako ih ljudi opažaju (Sharma, 2003). Jedini način da se objektivno karakterizuje boja, koja u osnovi predstavlja subjektivni doživljaj, vezan je za ideju o definisanju **standardnog posmatrača** (engl. *standard observer*). Određivanje prosečnog posmatrača se zasniva na činjenici da su ljudi,<sup>4</sup> uprkos suštinskoj subjektivnosti, iznenađujuće slični u svom doživljaju vizuelnog stimulusa.

Prvi standard kolorimetrije definisan je 1931. godine od strane CIE organizacije<sup>5</sup> (fr. *Commission Internationale de l'Eclairage*) - **CIE 2° Standard Observer**.<sup>6</sup> Standardni posmatrač je okarakterisan pomoću seta od tri funkcije odziva na vizuelni stimulus koje predstavljaju nesingularne linearne transformacije osetljivosti tri tipa čepića u oku.

<sup>4</sup> sa normalnim vizuelnim sistemom

<sup>5</sup> CIE - glavna organizacija odgovorna za standardizaciju metričkih veličina boje i terminologije

<sup>6</sup> Usled prirode raspodele čepića u mrežnjači, tristimulusne vrednosti zavise od polja viđenja posmatrača. Da bi se eliminisala ova promenljiva i na osnovu pretpostavke da su čepići rasprostranjeni unutar 2° luka fovee mrežnjače, standardni posmatrač CIE 1931 je definisan za ugao posmatranja od 2°.

Koristeći  $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$  funkcije odziva standardnog posmatrača i **koeficijent normalizacije**  $k=683.002 \text{ lm/W}$ , bilo koja boja može biti jednoznačno definisana sa **XYZ tristimulusnim vrednostima** (Wyszecki & Stiles, 2000):

$$[X, Y, Z] = k \int [x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)] E(\lambda) d\lambda \quad (1.3)$$

ili u diskretnoj verziji (kako se i koristi u uređajima za merenje boje):

$$[X, Y, Z] = k \sum_{i=1}^n [x(\lambda_i), y(\lambda_i), z(\lambda_i)] E(\lambda_i) \Delta\lambda, \quad (1.4)$$

gde je  $E(\lambda)$  spektralna distribucija merenog stimulusa, a  $\Delta\lambda$  interval talasne dužine (5 ili 10 nm).

Odzivi čepića LMS se mogu dobiti iz tristimulusnih vrednosti pomoću linearne transformacije:

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = M_{XYZ \rightarrow LMS} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_X & L_Y & L_Z \\ M_X & M_Y & M_Z \\ S_X & S_Y & S_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

gde je  $M_{XYZ \rightarrow LMS}$  matrica 3x3 sa odgovarajućim koeficijentima konverzije. Postoji nekoliko predloženih matrica transformacije koje su dostupne u naučnoj literaturi, ali nijedna od njih nije definisana kao standard. Trenutno na ovoj standardizaciji radi CIE komitet TC1-36 (CIE TC 1-36 Report, 2015).

Ako se spoje jedinične vrednosti sve tri ose CIE XYZ prostora boja, dobija se jedinična ravan koja predstavlja CIE31 xy hromatski dijagram. Projekcijom boje na hromatski dijagram izdvaja se hromatska od ahromatske komponente boje (svetline). CIE XYZ prostor boja služi, takođe, kao osnova za definisanje drugih standardnih prostora boje (CIE Lab, CIE LCH, CIE LUV).

Pored standardnog posmatrača, CIE definiše i standardne izvore svetlosti (engl. *standard illuminant*) i metodologiju merenja boja (Sharma, 2003). Osnovna karakteristika standardnog izvora svetlosti je **temperatura boje** koja se definiše kao temperatura usijanog crnog tela koje zrači svetlost iste boje kao i svetlost čija se temperatura boje određuje (Fairchild, 2005). Na primer, standardni izvori D65 (oponaša dnevnu svetlost), F11 (oponaša fluorescentno osvetljenje) i A (oponaša sijalicu sa užarenim vlaknom) imaju, respektivno, temperature boje 6500 K, 4000 K i 2856 K.

## 2.0 STANJE U OBLASTI ISTRAŽIVANJA

Molekularno-genetička istraživanja objasnila su prirodu anomalija viđenja boja, kao i razlike u tipu, težini i učestalosti anomalija. Na osnovu analize aktuelnog stanja u oblasti simulacije i parametrizacije anomalnog viđenja boja moguće je definisati proceduru mapiranja trodimenzionog gamuta boja prikaznog uređaja u limitiran gamut osoba sa određenim tipom i težinom poremećaja viđenja boja. Pouzdana simulacija čini i značajnu povratnu spregu u modelu poboljšanja kvaliteta slike za posmatrača sa anomalnom percepcijom boja pošto omogućava direktnu evaluaciju korektivne obrade slike.

### 2.1 POREMEĆAJI VIĐENJA BOJA

*„Defektno viđenja boja - delimično ili potpuno slepilo za boje gde je diskriminacija boja redukovana ili u nekim slučajevima potpuno izgubljena.“ (TC 1-89 Report, 2015)*

*„Poremećaj viđenja boja je anomalija vida gde postoji redukovana sposobnost diskriminacije nekih ili svih boja“ (ILV 17-287)*

**Poremećaj viđenja boja** (engl. *colour vision deficiency*) (**PVB**) predstavlja nesposobnost prepoznavanja i razlikovanja određenih kombinacija boja koje su lako uočljive od strane posmatrača sa normalnim viđenjem boja **kao posledica potpunog odsustva ili delimične disfunkcije** (umanjene ili izmenjene spektralne osetljivosti) **jednog, dva ili sva tri tipa čepića** (Sharpe et al, 1999).

PVB uzrokuje različite probleme koji se rangiraju od manjih frustracija (npr. nemogućnosti da se razlikuje posećen hiperlink od neposećenog), preko poteškoća u kupovini voća, kivanju mesa, komuniciranju o estetskom doživljaju umetnosti, do situacija koje ugrožavaju bezbednost (npr. poruka upozorenja koja se „stapa“ sa pozadinom) (Flatla & Gutwin, 2010).

U engleskom govornom području prevladava termin „**colour blindness**“, odnosno **slepilo za boje**, iako manje od 0.01% od svih slučajeva PVB znače zaista to - monohromatsku percepciju. U ostalim slučajevima, PVB se manifestuje tako što osoba vidi **uži spektar boja** u odnosu na prosečnog posmatrača - ima  **smanjenu sposobnost prepoznavanja i razlikovanja boja (delimično slepilo za boje)**.

Primer problematičnih kombinacija boja za protan tip poremećaja viđenja boja je prikazan na Slici 2.1.



Slika 2.1. Primeri parova boja problematičnih za distinkciju za osobe sa protanopskim poremećajem

Poremećaji viđenja boja su na globalnom nivou poznati i pod imenom **daltonizam**, a osoba sa PVB kao **daltonista** prema britanskom hemičaru Džonu Daltonu (engl. *John Dalton*). Dalton je napisao prvo naučno objašnjenje PVB pod nazivom "Neobične činjenice u vezi sa viđenjem boja" (engl. "Extraordinary facts relating to the vision of colours") 1798. godine, nakon što je uočio da i sam ima poremećaj viđenja boja.

U naknadno objavljenim beleškama (1977) opisano je Daltonovo opažanje pink cveta biljke *Geranium zonale* kao "skoro identično plavom nebu po danu", kao i neraspoznavanje crvene, narandžaste, žute i zelene (ostatak spektra mu je izgledao plavo postepeno se menjajući ka ljubičastom). Kao mogući uzrok različite percepcije pomišljao je na plavo obojenu tečnost unutar očnih jabučica. Međutim, nakon njegove smrti urađena je obdukcija 1844. godine koja nije potvrdila postojanje plave tečnosti. Sačuvan biološki materijal je ponovo ispitivan 1995. godine pomoću DNK analize i ustanovljeno je odsustvo M tipa čepića, odnosno dijagnoza deuteranopije (Hunt et al, 1995).

Avugust Sibek (engl. *August Seebeck*) je 1837. godine izveo nekoliko sistematičnih testova viđenja boja i otkrio dve različite klase crveno-zelenog daltonizma sa razlikama u ozbiljnosti poremećaja (od slabih ka težim) u obe klase.

Nakon što je definisana prva trihromatska teorija opažanja boja, razumevanje prirode PVB bilo je blizu. Danas poznajemo kategorije, uzroke i manifestaciju PVB.

## 2.1.1 Klasifikacija poremećaja viđenja boja

Prema težini poremećaja mogu se razlikovati tri kategorije (Sharpe et al, 1999):

1. **monohromatski poremećaji** - stanja potpunog slepila na boje kada su sva tri ili dva tipa čepića odsutna;
2. **dihromatski poremećaji (anopije)** - stanja delimičnog slepila na boje kada jedan od tipova čepića nedostaje:
  - L tip je odsutan u slučaju **protanopije**,
  - M tip je odsutan u slučaju **deuteranopije** i
  - S tip je odsutan u slučaju **tritanopije**;
3. **anomalni trihromatski poremećaji (anomalije)** - stanja blagog slepila na boje gde su svi tipovi receptora prisutni, ali je jedan tip čepića delimično disfunkcionalan ili slabije osetljiv (ima izmenjenu spektralnu osetljivost u odnosu na regularne čepiće te klase):
  - hibridni L tip u slučaju **protanomalije**,
  - hibridni M tip u slučaju **deuteranomalije** i
  - hibridni S tip u slučaju **tritanomalije**.

**Anomalije** i **anopije** nastale promenom jednog od fotopigmenata - L, M ili S, označavaju se grupno kao **protan**, **deutan** i **tritan** poremećaji.<sup>7</sup>

Poremećaj viđenja boja pogađa značajan broj ljudi - približno 8% muške i 0.4% ženske populacije prema analizi uzorka od 80.000 osoba evropskog porekla (Cvetković & Cvetković, 2005). U izolovanim, zatvorenim društvima, gde je raznolikost gena mala, moguća je prisutnost poremećaja u većem postotku, čak i onih oblika PVB koji su manje uobičajeni.<sup>8</sup> Učestalost rasprostiranja PVB zavisi i od etničke grupe- rasprostranjenost PVB kod muškog dela bele, žute i crne rase iznosi oko 7.9%, 4.2% i 2.6%, respektivno, dok kod žena varira između 0.4% i 0.5% (Sharpe et al, 1999). Prema ovim podacima, približno 200 miliona ljudi pogađa jedan od oblika PVB (Machado, 2009). Kategorizacija PVB i učestalost pojedinačnih kategorija PVB za populaciju evropskog porekla prikazane su u Tabeli 2.1.

---

<sup>7</sup> Nazivi potiču od grčkih reči *protos* – prvi, *deuteros* – drugi, *tritos* – treći, sa sufiksom *anomalija* kada je prisutna devijantna funkcija fotopigmenta ili *anopija* u slučaju potpunog izostanka funkcije.

<sup>8</sup> Takvi se primeri mogu pronaći u ruralnim područjima Finske, Mađarske i na nekim ostrvima Škotske.



Tabela 2.1. Kategorije i učestalosti PVB za populaciju evropskog porekla (Machado, 2009; Milić et al, 2015b)

Kategorija PVB	Broj odziva čepića	Tip PVB	Razlikovanje boja	Učestalost (%) Muškarci	Učestalost (%) Žene
Monohromatski	0	Monohromatizam bez čepića (Ahromatopsija)	Totalno slepilo za boje i mala preciznost viđenja	<0.01	<0.01
	1	Monohromatizam sa čepićima	Totalno slepilo za boje		
Dihromatski		Protanopija (L tip nedostaje)		1.01	0.02
	2	Deuteranopija (M tip nedostaje)	Znatno redukovano raspoznavanje boja	1.27	0.01
		Tritanopija (S tip nedostaje)		<0.01	<0.01
Anomalni trihromatski		Protanomalija (L tip disfunkcionalan)		1.08	0.03
	3	Deuteranomalija (M tip disfunkcionalan)	Kontinualni opseg od znatno redukovanog do približno normalnog raspoznavanja boja	4.63	0.36
		Tritanomalija (S tip disfunkcionalan)		<0.01	<0.01

*Zanimljivosti:*

*Verovatnoća da će najmanje jedan član fudbalskog tima biti daltonista je 94%.*

*Ako odaberemo nasumično 100 osoba, šanse da među njima neće biti daltonista su veoma niske (<1.5%).*

*Učestalost poremećaja viđenja boja je veća od učestalosti AB krvne grupe.*

## 2.1.2 Uzroci poremećaja viđenja boja

### Nasledni poremećaji viđenja boja

Grupa PVB koji se karakterišu odsustvom ili disfunkcijom L i M čepića (protan i deutan) je naslednog karaktera i čini približno 99.96% svih slučajeva PVB sa zajedničkim imenom **crveno-zeleno slepilo** (Sharpe et al, 1999). Jednu četvrtinu od tog broja čine dihromati, dok su tri četvrtine anomalni trihromati. Crveno-zelene PVB uzrokuju nasledne mutacije na X hromozomu što podrazumeva da je nasleđivanje (Cvetković & Cvetković, 2005):

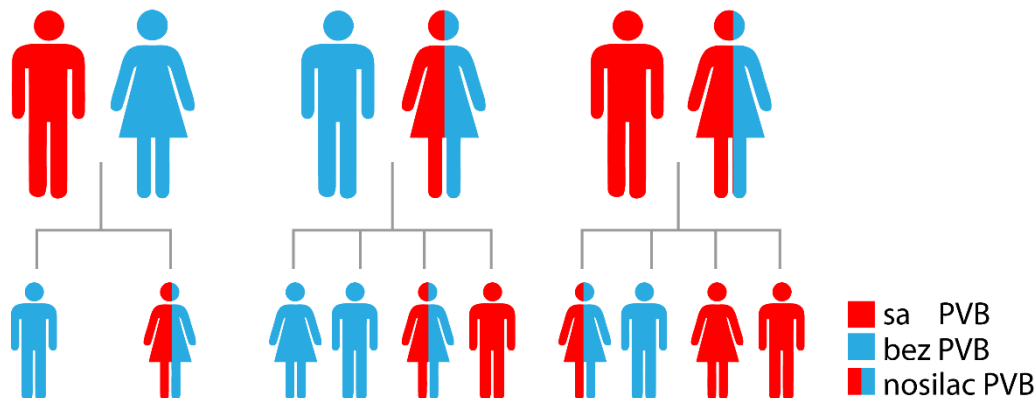
- **recesivno**

Ako žena nasledi jedan normalan i jedan mutirani X hromozom, PVB se neće ispoljiti, jer će normalni X hromozom nadjačati recesivni mutirani alel. U tom slučaju žena će biti nosilac gena za poremećaj viđenja boja. Žena će naslediti jedan od mogućih crveno-zelenih PVB samo ako otac ima ispoljen poremećaj, a majka je bar nosilac mutiranog gena.

- **vezano za pol**

Muškarci imaju mnogo veći rizik od nasleđivanja poremećaja pošto imaju samo jedan X hromozom. Ako naslede mutirani X hromozom, PVB će se ispoljiti.

Na Slici 2.2 je predstavljena šema nasleđivanja.



Slika 2.2. Šema nasleđivanja crveno-zelenih poremećaja uzrokovanih mutacijom na X hromozomu (crvena: osoba sa PVB, plava: osoba bez PVB, crveno-plava: osoba "nosilac" PVB)

Osim što su blisko pozicionirani unutar X hromozoma (Xq28), geni L i M fotopigmenta imaju sličan raspored egzona<sup>9</sup> i visok nivo homologije<sup>10</sup> (96%) (Cvetković & Cvetković, 2005), što

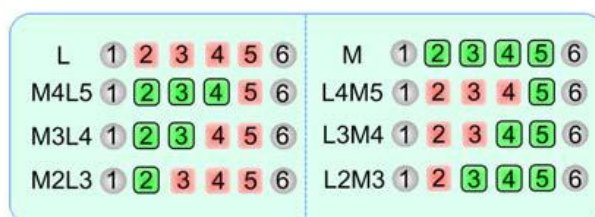
<sup>9</sup> Egzoni su aktivne sekvence gena koje kodiraju informaciju za sintezu proteina.

<sup>10</sup> identični su 96% ako se porede samo egzoni ili 98% ako se uzimaju u obzir i nekodirajuće sekvence – introni

može biti objašnjeno time što su se L i M fotopigmenti poslednji pojavili u evolucionom procesu ljudskog vizuelnog sistema (Sharpe et al, 1999).

Karakteristike L i M fotopigmenta čoveka definisane su sekvencom od šest egzona, od kojih su prvi i poslednji invarijantni, i pet introna (Cvetković & Cvetković, 2005). Četiri središnja egzona u sekvenci su odgovorna za varijabilnost između spektralnih odziva normalnih i anomalnih fotopigmenata (Sharpe et al, 1999).

Hibridni geni sadrže anomalne kombinacije egzona oba fotopigmenta kao što je ilustrovano na Slici 2.3. Crvena i zelena boja ukazuje na specifičnost gena vezano, respektivno, za L i M fotopigmente. Svi hibridni geni proizvode fotopigmente sa maksimumom osetljivosti između maksimuma normalnih L i M fotopigmenata. Iako svaki egzon doprinosi spektralnom pomeraju hibridnog fotopigmenata, peti egzon odlučuje da li će tip poremećaja biti protanski ili deutanski (Machado, 2009). Spektralna osetljivost anomalnih fotopigmenata je interpretirana kao interpolacija normalnih L i M fotopigmenata (Cvetković & Cvetković, 2005).



Slika 2.3. Raspored egzona normalnih i mutiranih gena L i M fotopigmenata

Postoje čvrsti dokazi da određene žene, nosioci gena za PVB, poseduju četiri tipa čepića i nazivaju se *tetrahromatima* (Birch, 2001).

Plavo-žuti PVB (tritanopija i tritanomalija), karakterisani odsustvom ili disfunkcijom S čepića, su retki i prevashodno stečene prirode. U slučaju urođenih plavo-žutih PVB uzrokuju ih mutacije na hromozomu 7 što podrazumeva da je nasleđivanje (Cvetković & Cvetković, 2005):

- **dominantno**

Ako se mutirani gen nalazi samo na jednom hromozomu, PVB će se ispoljiti.

- **autozomno.**

Pogađa podjednako mušku i žensku populaciju.

S fotopigment je, za razliku od M i L fotopigmenata, kodiran sa pet egzona (Cvetković & Cvetković, 2005).

Mapiranje ljudskog genoma dovelo je do spoznaje da mutacije koje mogu da prouzrokuju PVB potiču od najmanje 19 različitih hromozoma i mnogo različitih gena (Cvetković & Cvetković, 2005). Nasledni PVB može biti kongenitalni ili se ispoljiti kasnije u toku života. Zavisno od nasledene mutacije, priroda poremećaja je neprogresivna (stanje ostaje isto tokom života) ili progresivna (stanje se vremenom pogoršava). Postoji nekoliko naslednih bolesti koje uzrokuju progresivne PVB (na primer, *retinitis pigmentosa*, *retinoblastom* i *Leberova kongenitalna amauroza*) koje uključuju propadanje mrežnjače i drugih delova oka, tako da PVB mogu napredovati u ozbiljno oštećenje ili potpuni gubitak vida (Blagojević, 1993).

### **Stečeni poremećaji viđenja boja**

Poremećaj viđenja boja može biti stečen usled katarakte ili zamućenja sočiva (posledica starenja oka koja utiče na ulazak svetlosti u oko) ili neurološkog oštećenja mrežnjače, očnog živca ili viših moždanih centara (Yates et al, 2001). Stečeni PVB pretežno pogađaju S čepiće (Mollon & Regan, 2000).

Oštećenje mrežnjače može biti posledica: bolesti (na primer, *makularna degeneracija* ili *dugotrajni dijabetes*), fizičke povrede, upotrebe određenih lekova (na primer, neke vrste antidepressiva) i dugotrajne izloženosti UV zračenju ili štetnim organskim rastvaračima (npr. *stiren*) (Lomax et al, 2004).

Oštećenje viših moždanih centara može biti posledica bolesti (npr. *tumor*, *meningitis*, *encefalitis*, *šlog*, *aneurizma*) ili povrede. Oboljenja koja dovode do oštećenja očnog živca se najčešće manifestuju se crveno- zelenim PVB.

Određeni stečeni poremećaji viđenja boja su **reverzibilni** - nakon izlečenja primarnog oboljenja (npr. oboljenje očnog živca), viđenje boja se normalizuje (Blagojević, 1993). Poremećaji viđenja boje se, takođe, mogu povući ako se štetne hemikalije ili lekovi, koji uzrokuju njihovo nastajanje, pravovremeno uklone.

Stečeni PVB može biti unilateralan, kada se poremećaj ispoljava samo na jednom oku.

## 2.1.3 Karakteristike poremećaja viđenja boja

### Monohromatski PVB ili monohromazija

Monohromatski vid je jedini opravdan slučaj korišćenja termina „slepilo za boje“, pošto monohromati nemaju mogućnost razlikovanja boja i njihovo opažanje okruženja možemo zamisliti poput crno-belog filma. Kako postoji samo jedan kanal koji prenosi informaciju o boji, vizuelna percepcija je svedena na jednu dimenziju.

Postoje dva tipa monohromazije:

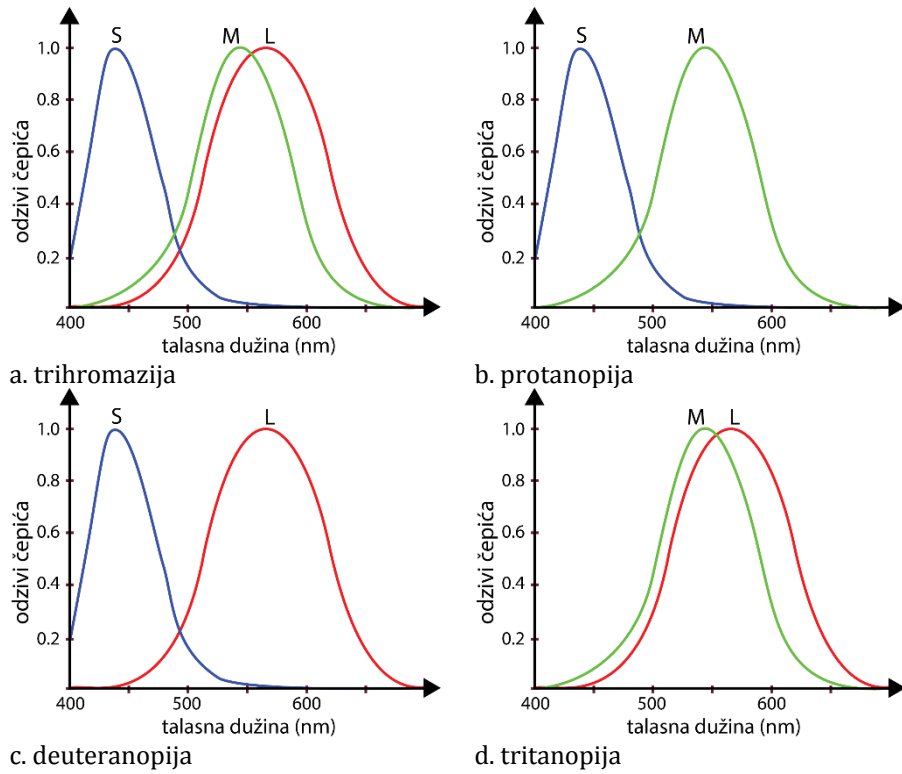
**Monohromazija sa štapićima** (engl. *rod monochromacy*) ili **ahromatopsija** (engl. *achromatopsia*) je uzrokovana nedostatkom ili potpunom disfunkcijom sva tri tipa čepića, čime kompletnu funkciju vida nose štapići (Cvetković & Cvetković, 2005). Odsustvo čepića iz mrežnjače, uz gubitak sposobnosti razlikovanja boja, se manifestuje i slabim vidom generalno praćeno osetljivošću na svetlost i nevoljnim pokretima oka (Blagojević, 1993).

**Monohromazija sa čepićima** (engl. *cone monochromacy*) je uzrokovana nedostatkom ili potpunim defektom dva od tri fotopigmenata čepića. Zbog prisustva samo jedne vrste čepića u mrežnjači (najčešće su to S čepići), ne postoji mogućnost razlikovanja boja, ali je oštrina vida relativno dobra uz prisutnu osetljivost na svetlost i nevoljne pokrete oka (Blagojević, 1993).

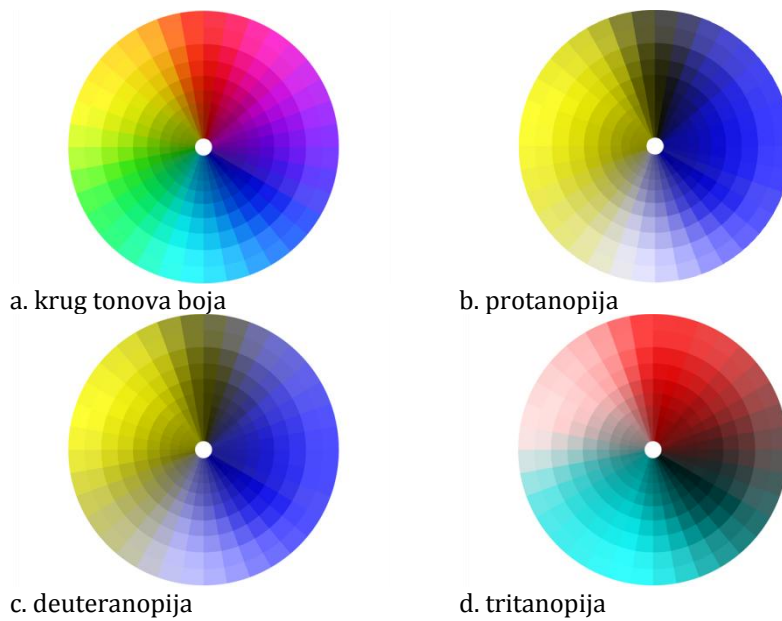
### Dihromatski poremećaji viđenja boja ili dihromazija

Dihromazija je umereno ozbiljna grupa poremećaja viđenja boja kod kojih postoji potpuni nedostatak jednog tipa čepića. U zavisnosti od toga da li je odsutan L, M ili S fotopigment, razlikujemo protanopiju, deuteranopiju i tritanopiju, respektivno (Slika 2.4).

Dihromatska percepcija je redukovana na dve dimenzije što znači da dihromati mogu za svaku boju dobiti vizuelno poklapanje mešavinom dva kolorimetrijski nezavisna stimulusa (Mollon & Regan, 2000). Dihromatski vid podrazumeva značajno redukovanje opsega boja u poređenju sa trihromatskim manifestovano značajnim poteškoćama u identifikaciji boja (Birch, 2001). Osoba sa normalnim viđenjem boja može da razlikuje približno 150 tonova boja, dok dihromati svega 20 (Colblindor, 2015). Slika 2.5 ilustruje protanopsku, deuteranopsku i tritanopsku percepciju kruga boja. Simulacije pokazuju da dihromati imaju problem viđenja ili zelene i crvene ili plave i žute što se uspešno objašnjava Heringovom teorijom oponentnih boja (Zdravković, 2008).



Slika 2.4. Funkcije spektralne osetljivosti čepića: a. normalna trihromazija, b. protanopija (nedostatak L čepića), c. deuteranopija (nedostatak M čepića), d. tritanopija (nedostatak S čepića)



Slika 2.5. Simulacija dihromatskog opažanja (Bretel-Vienot-Molon metod): a. originalni krug tonova boja i simulacije percepcije: b. protanopa, c. deuteranopa, i d. tritanopa

Slika 2.5 otkriva da protanopija i deuteranopija predstavljaju veoma slične crveno-zelene poremećaje što se objašnjava sa 96% zajedničkog identiteta L i M fotopigmenata (Sharpe et al, 1999). Najveće razlike su u svetlini - tonovi crvene izgledaju značajno tamnije za protanope jer nemaju funkcionalne L čepiće odgovorne za talasne dužine na samom kraju vidljivog spektra (usled čega i dolazi do najpoznatije frustracije protanopa da crveno svetlo na semaforu može izgledati ugašeno). Takođe, protanopska simulacija pokazuje više zasićenih plavih nijansi, dok deuteranopska više zasićenih žutih.

Simulacije pokazuju i da poremećaji viđenja boja nisu u vezi sa isključivo crvenim i zelenim tonovima, već utiču na percepciju svih delova vidljivog spektra. Primera radi, protanopi ne razlikuju nijanse plavih od nijansa ljubičastih sa istim udelom plave, jer je crvena komponenta u ljubičastoj za njih eliminisana.

Prema eksperimentima sa unilaterlnim protanopima, određeno je da se njihova neutralna tačka, koju ne mogu razlikovati od svetlosti bele boje, nalazi u zelenom području spektra (Judd, 1948; Wyszecki & Stiles, 2000). Kraće talasne dužine od neutralne tačke se percipiraju kao nijanse plave, a duže kao nijanse žute (Brettel et al, 1997). Slična situacija je i sa deuteranopima, s tim da je njihova neutralna tačka neznatno pomerenka ka dužim talasnim dužinama (Judd, 1948; Sloan & Wollach, 1948; Wyszecki & Stiles, 2000).

Eksperimenti sa unilaterlnim tritanopima pokazuju da se njihova neutralna tačka nalazi u žutom delu spektra i da se talasne dužine ispod neutralne tačke opažaju kao tirkiz-zelene, a one iznad kao crvene (Graham & Hsia, 1972; Wyszecki & Stiles, 2000).

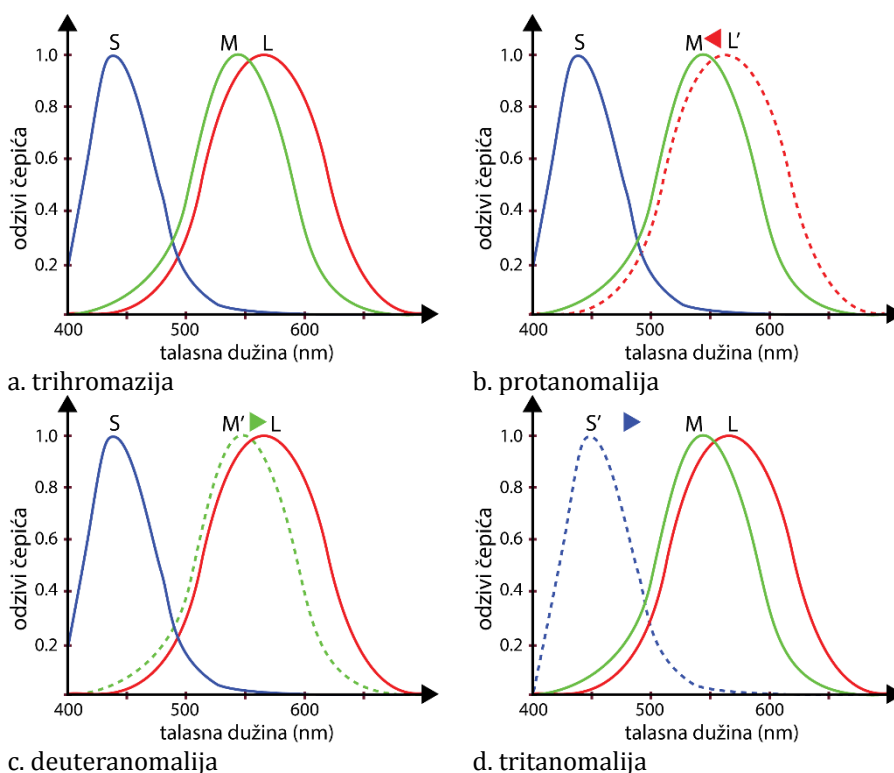
### **Anomalni trihromatski poremećaji viđenja boja ili anomalna trihromazija**

Anomalna trihromazija predstavlja tri četvrtine svih slučajeva PVB i obuhvata kontinualni opseg poremećaja od ozbiljno redukovane diskriminacije boja poput dihromatske percepcije do približno normalnog raspoznavanja boja. Anomalne trihromatske PVB uzrokuje delimična disfunkcionalnost odnosno anomalna funkcionalnost jednog od tri tipa čepića usled izmenjene ili oslabljene spektralne osetljivosti. U zavisnosti od toga da li L, M ili S tip čepića nije potpuno funkcionalan razlikujemo protanomaliju, deuteranomaliju i tritanomaliju, respektivno.

Postoje naznake postojanja slučajeva anomalne trihromazije koji ne spadaju ni pod jedan od navedena tri tipa tzv. *ekstremna anomalna trihromazija* (Birch, 2003) ili *istovremenih višestrukih anomalnih trihromatskih PVB* (protanomalija i tritanomalija ili deuteranomalija i tritanomalija) (Flatla & Gutwin, 2012).

Anomalnim trihromatima su potrebna tri kolorimetrijski nezavisna stimulusa za vizuelno poklapanje sa bilo kojom test bojom, odnosno njihov opseg boja je trodimenzioni. Osobe sa blagim do umerenim anomalnim trihromatskim PVB imaju veoma malo poteškoća u obavljanju aktivnosti koje zahtevaju normalno opažanje boja, a često nisu ni svesne svog nedostatka dok se ne susretnu sa testom provere raspoznavanja boja (najčešće je to Išiharin test na sistematskom pregledu).

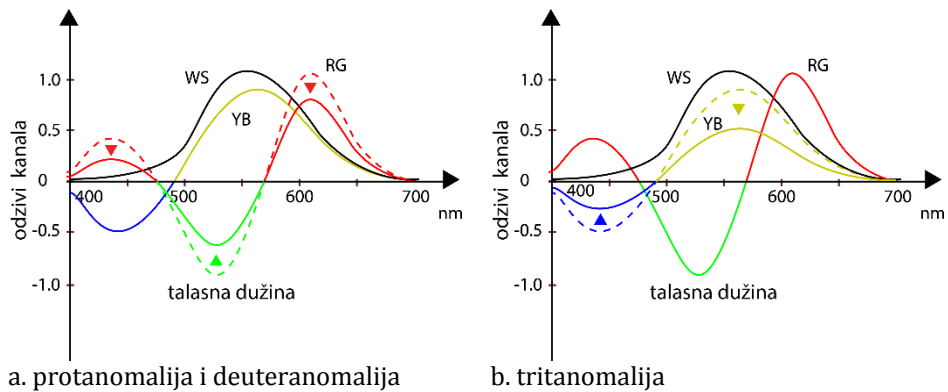
Slika 2.6 demonstrira pomeraje funkcije spektralnih osetljivosti - spektralna funkcija protanomalnih L čepića pomerena je bliže spektralnoj funkciji normalnih M čepića (Slika 2.6.b), dok su osetljivosti anomalnih tipova čepića u slučaju deuteranomalije (Slika 2.6.c) i tritanomalije (Slika 2.6.d) pomerene ka dužim talasnim dužinama. Slika 2.7 ilustruje uticaj izmenjene spektralne osetljivosti čepića na drugu fazu opažanja boja – fazu oponentnih procesa.



Slika 2.6. Funkcije spektralnih osetljivosti čepića: a. normalna trihromazija, b. protanomaliija (anomalni L čepići), c. deuteranomaliija (anomalni M čepići), d. tritanomaliija (anomalni S čepići)

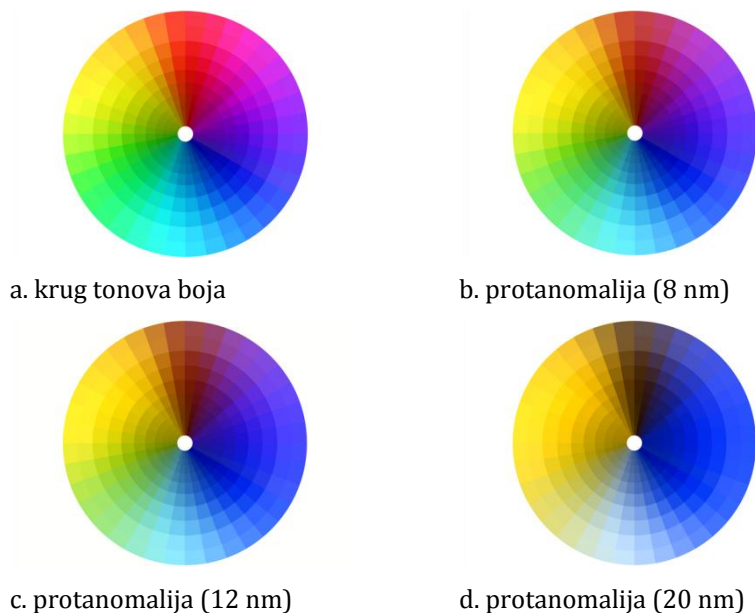
Pre otkrića izuzetne homologije gena L i M fotopigmenata u molekularno-genetičkim istraživanjima, teorija oponentnih boja dala je prihvatljivo objašnjenje sličnosti protan i deutan tipa PVB sa kolorimetrijskog stanovišta: izmenjena spektralna osetljivost M ili L čepića rezultira istim efektom - „poravnanjem“ tj. sažimanjem crveno-zelenog oponentnog kanala (RG) (Slika 2.7.a). Pri stanju tritanomalije dolazi do sažimanja plavo-žutog kanala (Slika 2.7.b).





Slika 2.7. Promena funkcija oponentnih kanala u slučaju: a. protanomaliye i deuteranomaliye, b. tritanomaliye

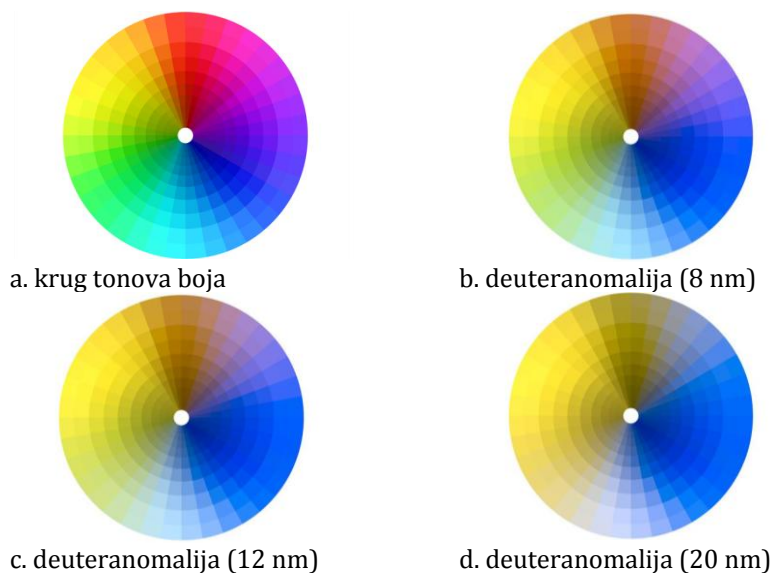
Slike 2.8-2.10 simuliraju različite stepene (težine) anomalnih trihromatskih PVB prema Mačado-Oliveira metodu (Machado, 2009).



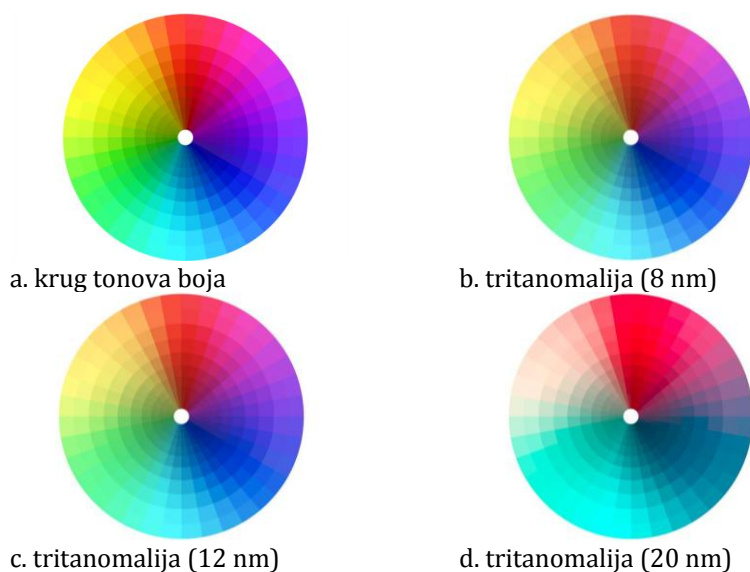
Slika 2.8. Simulacija protanomalske percepcije (Mačado-Oliveira metod): a. originalni krug tonova boja i percepcija protanomala sa pomerajem u funkciji spektralne osetljivosti L čepića od približno: b. 8 nm, c. 12 nm i d. 20 nm

Problemi raspoznavanja boja anomalnih trihromata su isti kao u slučaju korespondirajućeg tipa dihromata samo u slabijem intenzitetu - ako je, u slučaju crveno-zelene dihromazije, postojalo neraspoznavanje crvenih, narandžastih, žutih i zelenih nijansi, sada je u pitanju slabije razlučivanje. Analogno tome, individue sa protanomalijom su takođe slabije osetljive na tonove crvene i vide ih kao tamnije (sa smanjenim intenzitetom svetline) u odnosu na deuteranomale. Teži slučaj protanomaliye sa spektralnim pomerajem od približno 20 nm je veoma sličan

percepciji protanopa prema Bretel-Vienot-Molon metodu, pošto se tada maksimumi osetljivosti L i M čepića gotovo poklapaju (Mcintyre, 2002; Sharpe et al, 1999; Machado, 2009). Isto važi i za deuteranomaliiju.



Slika 2.9. Simulacija deuteranomalske percepcije (Mačadov metod): a. originalni krug tonova boja i percepcija deuteranomala sa pomerajem u funkciji spektralne osetljivosti  $M$  čepića od približno: b. 8 nm, c. 12 nm i d. 20 nm



Slika 2.10. Simulacija tritanomalske percepcije (Mačadov metod): a. originalni krug tonova i percepcija tritanomala sa pomerajem u funkciji spektralne osetljivosti  $S$  čepića od približno: b. 8 nm, c. 12 nm i d. 20 nm

## 2.1.4 Kompenzaciona prednost populacije sa poremećajima viđenja boja

Iako je daltonizam klasifikovan kao ograničenost, invaliditet (engl. *disability*), nekoliko studija otkriva da su osobe sa crveno-zelenim PVB bolje pri opažanju kamuflaža što je direktna indikacija da postoji evolucijski opravdan razlog za visoku rasprostranjenost PVB.

U studiji Morgana i ostalih (1992), od ispitanika se tražilo da lociraju trepćući patern ("ciljnu oblast" od 7x7 horizontalno orjentisanih pravougaonika na pozadini - mreži od 30x30 vertikalno orjentisanih pravougaonika).

U slučaju kada su svi pravougaonici u istoj boji, i trihromatski i dihromatski ispitanici nemaju poteškoće u uočavanju teksture/paterna. Međutim, u slučajevima kada su pravougaonici nasumično obojeni crvenom ili zelenom bojom, posmatrači sa normalnim viđenjem boje pokazuju slabije rezultate, dok crveno-zeleni dihromati lociraju metu podjednako uspešno kao i pre bez ometanja i uticaja boje na detekciju teksture. Isti rezultati su dobijeni kada su pravougaonici mete i pozadine zamenjeni sa slovima "A" i "B". Ova otkrića su podržana sa pojedinim vojnim izveštajima koji otkrivaju prednosti vojnika sa crveno-zelenim PVB u razlikovanju kamuflaže od pozadinskog rastinja. Moguće objašnjenje za ovu **superiornost u detekciji teksture i varijacija svetline** može biti međumodalna organizacija<sup>11</sup> (engl. *cross-modal organisation*) u mozgu osoba sa PVB slična onoj kojom slepi ljudi kompenzuju čulo vida sa razvijenijim mogućnostima sluha ili dodira.

Osim dihromatske prednosti u detekciji teksture, *anomalni trihromati imaju prednost i u detekciji razlika između stimulusa koji predstavljaju za normalnog trihromatu metamerički par*<sup>12</sup> *pod određenim izvorom svetlosti*. Postoje određene kombinacije boja koje anomalni trihromati mogu razlikovati u datim uslovima posmatranja, a koje osobe sa normalnim viđenjem boja ne mogu i obrnuto (Bosten et al, 2005).

---

<sup>11</sup> Međumodalna organizacija je fenomen koji opisuje sposobnost mozga da se reorganizuje kada je ugrožen input jednog čula u cilju usavršavanja ostalih čula.

<sup>12</sup> Metamerički par boja su stimulusi sa različitim spektralnim kompozicijama koji izgledaju isto kada se posmatraju pri jednom setu uslova posmatranja, ali se razlikuju pod drugim.

## 2.2 METODI SIMULACIJE POREMEĆAJA VIĐENJA BOJA

Prve dokumentovane simulacije poremećaja viđenja boja deskriptivnog karaktera pronalazimo u izveštaju Džona Daltona (1798). Posmatrajući spektar, Dalton opisuje da, za razliku od prosečnih posmatrača koji razlikuju šest oblasti u spektru: crvenu, narandžastu, žutu, zelenu, plavu i ljubičastu, on opaža svega dve: žutu i plavu (Dalton, 1977). Njegova oblast žute obuhvata pojaseve crvene, narandžaste, žute i zelene prosečnog posmatrača, dok ostatak spektra opaža kao plave nijanse. Ako bi trebao da se odluči i za treću boju, to bi bila ona koja se poklapa sa pozicijom ljubičastog pojasa u percepciji trihromata.

Nakon identifikacije tonova koji se ne razlikuju čekalo se još 150 godina na odgovor koju „zamensku“ boju zapravo vide daltonisti umesto tih konfuznih boja. Dublje razumevanje PVB pokrenuli su psihofizički eksperimenti u kojima su ispitanici bile osobe sa *urođenim unilateralnim dihromatskim poremećajem*.<sup>13</sup> Eksperimenti su utvrdili da postoje **invarijantni tonovi** (stimulusi) koje isto opažaju dihromati i normalni trihromati (Judd, 1948; Graham & Hsia, 1972; Alpern et al, 1983; Brettel et al, 1997):

- Svi dihromati opažaju **neutralne (ahromatske) boje** na isti način kao trihromati;
- Stimulus od **575 nm** opaža se kao isti žuti ton i stimulus od **475 nm** kao isti plavi ton od strane trihromata, protanopa i deuteranopa;
- Stimulus od **660 nm** opaža se kao ista crvena i stimulus od **485 nm** kao ista plavo-zelena nijansa od strane trihromata i tritanopa.

### 2.2.1 Simulacija dihromatskih PVB

Postoji nekoliko predloženih metoda za konverziju trihromatskog u dihromatski opseg boja (Meyer & Greenberg, 1988; Kotera, 2011; Pardo & Sharma, 2011), među kojima je najčešće citiran i korišćen metod autorskog tima Bretel-Vienot-Molon (Brettel et al, 1997; Vienot et al, 1999). Ovaj metod se bazira *na pretpostavkama psihofizičkih eksperimenata sa unilateralnim dihromatima o invarijantnim monohromatskim stimulusima koji izgledaju isto i dihromatskim i posmatračima sa normalnim viđenjem boja* (Vienot et al, 1995).

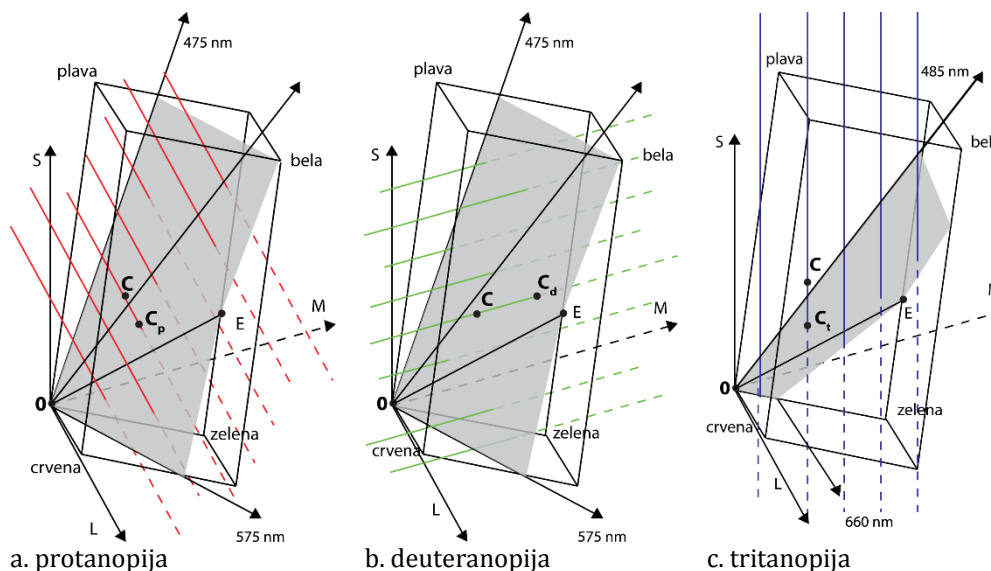
Geometrijska prezentacija njihovog metoda u LMS prostoru (prostoru odziva čepića) prikazana je na Slici 2.11. Za svaki dihromatski tip PVB predstavljen je korespondirajući redukovani gamut

---

<sup>13</sup> Unilateralni dihromati imaju u jednom oku sva tri tipa fotopigmenta, a u drugom dva.

boja - površina koju ahromatska osa **OE** deli na dve poluravni "usidrene" za definisane fiksne monohromatske tačke: 575 nm i 475 nm u slučaju protanopije i deuteranopije i 660 nm i 485 nm u slučaju tritanopije (Brettel et al, 1997).

Slika 2.11 ilustruje i mapiranje stimulusa na dihromatski gamut. Kako dihromatima nedostaje jedan od tipova čepića, oni ne razlikuju boje koje se razlikuju samo u intenzitetu odziva nedostajućeg tipa čepića (Brettel et al, 1997). Za dati stimulus **C** nalazimo njegovu dihromatsku verziju projekcijom na određenu poluravan u pravcu paralelnom nedostajućoj koordinati LMS prostora: **C-C<sub>p</sub>**||**L** osa, **C-C<sub>d</sub>**||**M** osa i **C-C<sub>t</sub>**||**S** osa. Pravci **C-C<sub>p</sub>**, **C-C<sub>d</sub>** i **C-C<sub>t</sub>** predstavljaju *linije konfuzije* ili *dihromatske izohromatske linije* za protanopsko, deuteranopsko i tritanopsko viđenje, respektivno. Tačke koje leže na linijama konfuzije opažaju se kao ista boja od strane odgovarajućeg tipa dihromata.



Slika 2.11. Projekcija stimulusa boje na dihromatski gamut (osenčene poluravni) u LMS prostoru. Dihromatska verzija datog stimulusa **C** se nalazi projekcijom na određenu poluravan u pravcu paralelnom nedostajućem odzivu čepića: a. protanopija (**C-C<sub>p</sub>**||**L** osa), b. deuteranopija (**C-C<sub>d</sub>**||**M** osa), c. tritanopija (**C-C<sub>t</sub>**||**S** osa)

Dihromatsku projekciju  $\mathbf{C}_{PVB} = (\mathbf{L}_{PVB}, \mathbf{M}_{PVB}, \mathbf{S}_{PVB})$  stimulusa **C** na ravan određenu belom tačkom  $\mathbf{E} = (\mathbf{L}_E, \mathbf{M}_E, \mathbf{S}_E)$ , jednim od invarijantnih monohromatskih stimulusa  $\mathbf{A} = (\mathbf{L}_A, \mathbf{M}_A, \mathbf{S}_A)$  i koordinatnim početkom određujemo prema sledećoj jednačini:

$$(\mathbf{M}_E \mathbf{S}_A - \mathbf{S}_E \mathbf{M}_A) \mathbf{L}_{PVB} + (\mathbf{S}_E \mathbf{L}_A - \mathbf{L}_E \mathbf{S}_A) \mathbf{M}_{PVB} + (\mathbf{L}_E \mathbf{M}_A - \mathbf{M}_E \mathbf{L}_A) \mathbf{S}_{PVB} = 0 \quad (2.1)$$

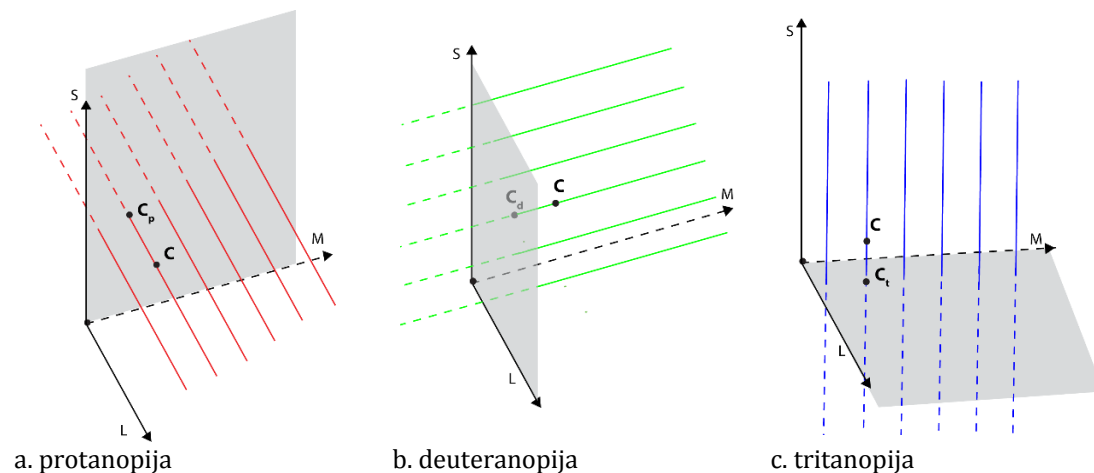
Odzivi postojeća dva tipa čepića ostaju nepromenjeni, dok se vrednost odziva nedostajućeg čepića proračunava iz njihovih vrednosti, prema Jednačini (2.1), na sledeći način:

$$\begin{aligned}
\text{Protanopija: } C_P &= \left( -\frac{(S_E L_A - L_E S_A)M + (L_E M_A - M_E L_A)S}{M_E S_A - S_E M_A}, M, S \right) \\
\text{Deuteranopija: } C_D &= \left( L, -\frac{(M_E S_A - S_E M_A)L + (L_E M_A - M_E L_A)S}{S_E L_A - L_E S_A}, S \right) \\
\text{Tritanopija: } C_T &= \left( L, M, -\frac{(M_E S_A - S_E M_A)L + (S_E L_A - L_E S_A)M}{L_E M_A - M_E L_A} \right)
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Na koju poluravan će stimulus C biti projektovan zavisi od njegove pozicije u odnosu na osu OE.

$$\begin{aligned}
\text{Protanopija: } & \text{ako je } \frac{S}{M} < \frac{S_E}{M_E} \text{ onda } \lambda_A = 575 \text{ nm, inače } \lambda_A = 475 \text{ nm,} \\
\text{Deuteranopija: } & \text{ako je } \frac{S}{L} < \frac{S_E}{L_E} \text{ onda } \lambda_A = 575 \text{ nm, inače } \lambda_A = 475 \text{ nm,} \\
\text{Tritanopija: } & \text{ako je } \frac{M}{L} < \frac{M_E}{L_E} \text{ onda } \lambda_A = 660 \text{ nm, inače } \lambda_A = 485 \text{ nm.}
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Bretel-Vienot-Molon metod ima mnogo bolje rezultate od ranijih algoritama zasnovanih na potpunoj eliminaciji, odnosno anuliranju nedostajućeg tipa čepića (kod protanopije:  $L=0$ ; kod deuteranopije:  $M=0$ ; kod tritanopije:  $S=0$ ) (videti Sliku 2.12). Anulirajući algoritmi daju netačnu simulaciju dihromatskih PVB, pošto uključuju samo receptorski nivo (Jang-Helmholcovu trihromatsku teoriju), zanemarujući drugi nivo vizuelnog aparata (Heringovu teoriju oponentnih kanala). Preklapanje funkcija spektralne osetljivosti čepića, posebno M i L čepića, implicira da *uklanjanje jednog tipa čepića nije ekvivalentno uklanjanju dela vidljivog spektra* (Brettel et al, 1997).



Slika 2.12. Projekcija stimulusa boje na dihromatski gamut (osenčena ravan) u LMS prostoru pod pretpostavkom anuliranja nedostajućeg odziva čepića: a. protanopija ( $C-C_P||L$  osa;  $C_P=(0,M,S)$ ), b. deuteranopija ( $C-C_T||M$  osa;  $C_D=(M,0,S)$ ), c. tritanopija ( $C-C_T||S$  osa;  $C_T=(L,M,0)$ )

## 2.2.2 Simulacija anomalnih trihromatskih PVB

Za razliku od dihromata, anomalni trihromati imaju tri različita odziva čepića. Međutim, *ne postoji univerzalno mapiranje između normalnog i anomalnog trihromatskog gamuta boja* budući da termin anomalna trihromazija pokriva širok opseg od približno prosečne percepcije do slabe diskriminacije boja kao u slučaju pripadajućeg tipa dihromazije.

Nakon uspeha u domenu dihromatske simulacije, pojavio se i manji broj predloga metoda simulacije anomalnih trihromatskih PVB. Jednu od prvih metoda definisao je Kondo (1990) prema *sličnostima između dihromatskog i ozbiljnijeg anomalnog trihromatskog poremećaja*. Međutim, rezultati Kondovog modela ne prezerviraju ahromatske boje za koje je eksperimentalno potvrđeno da se opažaju isto od strane svih posmatrača (Machado, 2009).

Značajan pomak u simulaciji anomalnih trihromatskih PVB napravljen je u radovima autorskog tima Mačado-Oliveira (2009). Za razliku od prethodnih simulacija baziranih na psihofizičkim eksperimentima (Brettel et al, 1997; Meyer & Greenberg, 1988) ili metodama baziranim samo na spektralnim odzivima receptora (Yang et al, 2008; Kotera, 2011), Mačado-Oliveira model kao osnovu koristi *faznu teoriju viđenja boja* (Judd, 1966).

**Prva faza** simuliranja anomalne trihromazije podrazumeva *pomeranje funkcija spektralne osetljivosti anomalnog tipa čepića*:

$$\text{Protanomalija: } L_p(\lambda) = L(\lambda + \Delta\lambda_L)$$

$$\text{Deuteranomalija: } M_d(\lambda) = M(\lambda + \Delta\lambda_M) \quad (2.4)$$

$$\text{Tritanomalija: } S_t(\lambda) = S(\lambda + \Delta\lambda_S)$$

gde su  $L(\lambda)$ ,  $M(\lambda)$ , i  $S(\lambda)$  funkcije spektralne osetljivosti prosečnog trihromata (Smith & Pokorny, 1975), a  $\Delta\lambda_L$ ,  $\Delta\lambda_M$ , i  $\Delta\lambda_S$  predstavljaju iznose pomeraja osetljivosti primenjene na anomalne L, M i S čepiće, respektivno, pri čemu su  $\Delta\lambda_M$  i  $\Delta\lambda_S$  pozitivne, a  $\Delta\lambda_L$  negativna vrednost.

U **drugoj fazi** se, na osnovu novoustanovljenih funkcija spektralnih osetljivosti čepića, određuju *izmenjene (anomalne) funkcije oponentnih kanala*. Konverzija iz LMS prostora u prostor oponentnih kanala (WSYBRG) je linearna, a matrica konverzije  $\mathbf{T}_{LMS \rightarrow Opp}$  definisana je na osnovu psihofizičkih i elektro-psihofizičkih eksperimenata (Ingling & Tsou, 1977):

$$\begin{aligned}
 \text{Normalna trihromazija:} \quad & \begin{bmatrix} WS \\ YB \\ RG \end{bmatrix} = T_{LMS \rightarrow Opp} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \\
 \text{Protanomaliya:} \quad & \begin{bmatrix} WS \\ YB \\ RG \end{bmatrix}_p = T_{LMS \rightarrow Opp} \begin{bmatrix} L_p \\ M \\ S \end{bmatrix} \\
 \text{Deuteranomaliya:} \quad & \begin{bmatrix} WS \\ YB \\ RG \end{bmatrix}_d = T_{LMS \rightarrow Opp} \begin{bmatrix} L \\ M_d \\ S \end{bmatrix} \\
 \text{Tritanomaliya:} \quad & \begin{bmatrix} WS \\ YB \\ RG \end{bmatrix}_t = T_{LMS \rightarrow Opp} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S_t \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Transformacija iz RGB prostora boja u prostor oponentnih kanala se dobija projekcijom spektralnih distribucija RGB primara,  $\boldsymbol{\varphi}_R(\lambda)$ ,  $\boldsymbol{\varphi}_G(\lambda)$  i  $\boldsymbol{\varphi}_B(\lambda)$ , na osnovne funkcije,  $\mathbf{WS}(\lambda)$ ,  $\mathbf{YB}(\lambda)$ , i  $\mathbf{RG}(\lambda)$ , koje definišu prostor oponentnih kanala:

$$\begin{aligned}
 WS_R &= \rho_{WS} \int \varphi_R(\lambda) WS(\lambda) d\lambda, \\
 WS_G &= \rho_{WS} \int \varphi_G(\lambda) WS(\lambda) d\lambda, \\
 WS_B &= \rho_{WS} \int \varphi_B(\lambda) WS(\lambda) d\lambda, \\
 YB_R &= \rho_{YB} \int \varphi_R(\lambda) YB(\lambda) d\lambda, \\
 YB_G &= \rho_{YB} \int \varphi_G(\lambda) YB(\lambda) d\lambda, \\
 YB_B &= \rho_{YB} \int \varphi_B(\lambda) YB(\lambda) d\lambda, \\
 RG_R &= \rho_{RG} \int \varphi_R(\lambda) RG(\lambda) d\lambda, \\
 RG_G &= \rho_{RG} \int \varphi_G(\lambda) RG(\lambda) d\lambda, \\
 RG_B &= \rho_{RG} \int \varphi_B(\lambda) RG(\lambda) d\lambda,
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

gde su faktori normalizacije  $\rho_{WS}$ ,  $\rho_{YB}$  i  $\rho_{RG}$  odabrani tako da zadovoljavaju sledeća ograničenja:

$$\begin{aligned}
 WS_R + WS_G + WS_B &= 1 \\
 YB_R + YB_G + YB_B &= 1 \\
 RG_R + RG_G + RG_B &= 1
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Na ovaj način se osigurava da će ahromatske boje imati nepromenjene RGB koordinate nakon transformacije.



Simulirane RGB vrednosti se dobijaju iz početnih na sledeći način:

$$\begin{bmatrix} R_{PVB} \\ G_{PVB} \\ B_{PVB} \end{bmatrix} = \Phi_{PVB} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \Gamma_{\text{normal}}^{-1} \Gamma_{PVB} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

gde  $\Gamma$  predstavlja klasu matrica transformacije koja mapira RGB vrednosti u oponentne kanale:

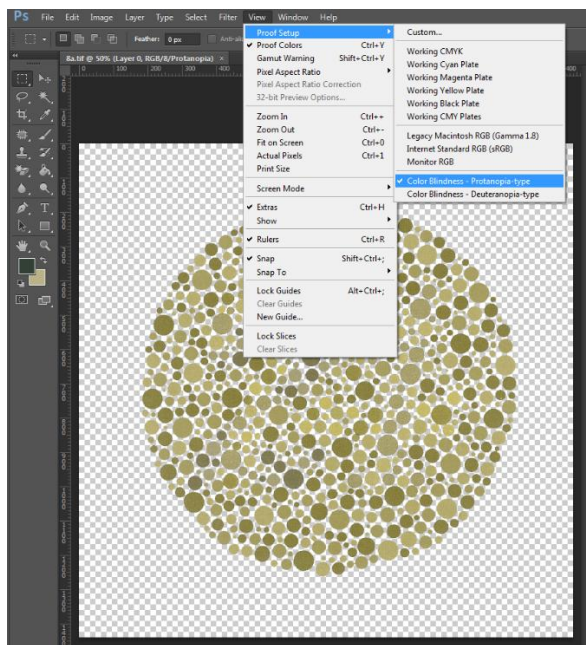
$$\begin{bmatrix} WS \\ YB \\ RG \end{bmatrix} = \Gamma \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} WS_R & WS_G & WS_B \\ YB_R & YB_G & YB_B \\ RG_R & RG_G & RG_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Korišćenje fazne teorije viđenja obezbeđuje Mačado-Oliveira metodu konzistentnu i uniformnu primenu na sve percepcije od normalne trihromatske do dihromatske što čini oko 99.96% od svih slučajeva PVB, dok se Bretel-Vienot-Molon metod odnosi na svega 27.46% slučajeva (Machado et al, 2009).

## 2.2.3 Softverski alati za simulaciju poremećaja viđenja boja

Danas postoji veći broj on-line dostupnih softverskih rešenja za simulaciju PVB poput [www.vischeck.com](http://www.vischeck.com) (*Vischeck*), [www.ryobi-sol.co.jp/visolve/en/](http://www.ryobi-sol.co.jp/visolve/en/) (*Visolve*), ekstenzije za pretraživač *Chrome* (*Chrome Daltonize*) [chrome.google.com/extensions](http://chrome.google.com/extensions) ili off-line poput filtera za *Adobe InDesign* ili *PhotoShop* softver. Slika 2.13 daje primer upotrebe filtera za simulaciju protanopije i deuteranopije integrisanog u softveru *Adobe PhotoShop*.

Najveći broj softverskih rešenja simulira samo dihromatske poremećaje, i to uglavnom protanopiju i deuteranopiju, dok se tritanopija zanemaruje zbog izuzetno male učestalosti. Ova rešenja se zasnivaju na Bretel-Vienot-Molon metodu dihromatskog viđenja boja, a prvo takvo je, u vidu filtera, bilo dostupno široj javnosti na sajtu organizacije *Vischeck* ([www.vischeck.com](http://www.vischeck.com)). Sa trendom upotrebe *Android* i *iOS* operativnih sistema na mobilnim uređajima, pojavio se i veliki broj *open-source* ili komercijalnih mobilnih aplikacija sa tom namenom.



Slika 2.13. Filter za simulaciju dihromatskih PVB u softveru *Adobe PhotoShop* (opcija **View/Proof Setup** → **Color Blindness- Protanopia Type** ili **Color Blindness-Deuteranopia Type**)

## 2.3 METODI POBOLJŠANJA SLIKE ZA KORISNIKE SA POREMEĆAJIMA VIĐENJA BOJA

Prihvaćene i eksperimentalno potvrđene teorije anomalnog viđenja boja su iskorišćene za kreiranje softverskih alata za simulaciju PVB koji omogućavaju posmatračima sa regularnom percepcijom boja da vide svet iz njihove perspektive - „njihovim očima“. Osim zadovoljenja puke radoznalosti prosečnog posmatrača da spozna percepciju različitu od njegove, simulacije omogućavaju osobama odgovornim za kreiranje vizuelnih informacija (veb dizajneri, dizajneri interfejsa, dizajneri javnih vizuelnih komunikacija, inženjeri zaštite na radu itd.) da provere kako će njihov rad izgledati korisnicima sa PVB, identifikuju konfuzne kombinacije boja i time izbegnu njihovu upotrebu.

Definisani su brojni priručnici za pristupačnost informacija (*“Web Contents Accessibility Guidelines”, “Techniques for Web Content Accessibility”* itd.) koji rešavaju problem izbora šema boja za dizajn u dokumentima, interfejsu, veb prezentacijama itd. Međutim, ovi priručnici se retko koriste u realnosti i imaju ograničenu upotrebu u slučaju fotografija i video zapisa.

Simulacija PVB daje kao rezultat sliku sa kompresovanim opsegom boja u odnosu na početnu, pošto se određene boje koje se inicijalno razlikuju mapiraju u istu finalnu boju (Flatla, 2011). Na primer, određene nijanse pink i tirkizne mapiraju se u slučaju protanopije u istu nijansu sive.

Na osnovu simuliranih slika može se definisati metod obrade slike koji prilagođava sadržaj slike tako da individue sa PVB mogu razlikovati više detalja, odnosno da vide sadržaj slike što približnije prosečnom posmatraču. **Ovakva adaptacija slike se uobičajeno naziva daltonizacija i predstavlja kompleksan i još uvek aktuelan problem optimalnog mapiranja opsega boja slike u manji opseg.** Sa aspekta digitalne slike i diskretnih vrednosti boje piksela, daltonizacija predstavlja specifičnu vrstu kvantizacije boja slike jer redukuje ukupan broj boja u skladu sa nepravilnom diskriminacijom PVB osoba, istovremeno nastojeći da poboljša opaženi kvalitet originalne slike. Cilj kvantizacije predstavlja pronalaženje optimalnog podskupa reprezentativnih boja iz gamuta osobe sa PVB i mapiranje boja slike u ovaj podskup (Milić et al, 2015b).

Tabela 2.2 sadrži kategorizaciju metoda daltonizacije (Milić et al, 2015b) prema kriterijumima uticaja sadržaja slike, površine obrade, ciljne grupe, kontrole obrade i tipa poboljšanja slike.

Tabela 2.2. Kategorizacija metoda daltonizacije (Milić et al, 2015b)

Kriterijum	Kategorije	Ključne osobine obrade slike
Uticaoj sadržaja slike	1. sadržajno-nezavisne	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ boja jednog piksela se u dve različite slike mapira u istu boju bez obzira na sadržaj slike</li> <li>▪ jednostavna i pogodna za adaptacije u realnom vremenu</li> </ul>
	2. sadržajno-zavisne	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ista boja se u dve različite slike mapira u različite boje u zavisnosti od sadržaja slike</li> <li>▪ pogodna za kompleksniji sadržaj (npr. fotografija prirode)</li> </ul>
Površina obrade	1. potpuna	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ kompletna slika je modifikovana</li> </ul>
	2. delimična	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ samo su određena zona (segment slike) ili određen opseg tonova (npr. crveni tonovi) modifikovani</li> <li>▪ pogodna za interaktivnu adaptaciju (vođenu događajem) i specifične situacije</li> </ul>
Ciljna grupa	1. univerzalna (prethodna)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ slika (dizajn) treba da bude adaptiran za sve- i normalno trihromatsko viđenje boja i sve tipove i stepene PVB</li> <li>▪ korisnici nisu poznati unapred</li> <li>▪ slika se obrađuje pre krajnje reprodukcije tj. primene (prethodna obrada –engl. <i>pre-processing</i>)</li> <li>▪ pogodno za javne štampane oblike vizuelne komunikacije (npr., metro mapa, mapa evakuacije, dnevne novine)</li> </ul>
	2. prilagođena (naknadna)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ slika (dizajn) treba da bude adaptiran samo za jedan tip PVB ili čak za konkretnu osobu sa PVB</li> <li>▪ korisnik/korisnici poznati unapred</li> <li>▪ slika se obrađuje naknadno po potrebi (naknadna obrada- engl. <i>post-processing</i>)</li> <li>▪ pogodno za digitalni sadržaj (npr. veb dizajn, slike, kompjuterske igre i dr.)</li> </ul>
Kontrola obrade	1. korisnički asistirana	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ rezultat značajno zavisi od odabranih parametara</li> </ul>
	2. automatska	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ rezultat se dobija bez interakcije sa korisnikom</li> <li>▪ pogodno za adaptaciju u realnom vremenu</li> </ul>
Tip poboljšanja	1. promene boja	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ poboljšanje slike je urađeno promenom boja</li> <li>▪ pogodno za prirodne fotografije i tekstualne elemente</li> </ul>
	2. dodavanje teksture (šablon, senke, naglašene ivice)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ poboljšanje slike je urađeno dodavanjem šablona ili senki</li> <li>▪ pogodno za mape, grafike i infografike</li> <li>▪ nije primenjiva za prirodne fotografije zbog interferencije dodate teksture sa originalnom teksturom</li> </ul>
	3. naglašavanje ivica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ poboljšanje slike je urađeno naglašavanjem ivica između različito obojenih regiona</li> <li>▪ pogodno za mape, tehničke crteže i isticanje oblasti u fotografiji</li> </ul>
	4. postavljanje oznaka (tekstualne i/ili simboli)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ poboljšanje slike je urađeno dodavanjem oznake boje selektovane površine slike</li> <li>▪ pogodno za mape/infografike i situacije u kojima je važno prepoznavanje boje</li> </ul>

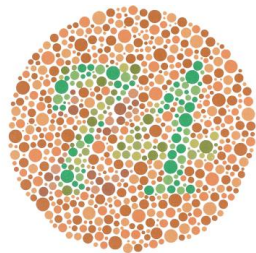
Ne postoji jedinstveni metod poboljšanja slike koji je najbolji za sve primene (CIE TC 1-89 report, 2015).

Za ciljnu PVB populaciju, dizajn bez barijera u vidu boja može biti postignut kao **univerzalni dizajn** (engl. *colour universal design*) ili **prilagođeni dizajn** (engl. *colour customization*) (Chen et al, 2013). U slučaju univerzalnog dizajna, primenjena šema boja treba da bude "sigurna" za sve - jedna verzija dizajna prenosi informaciju u boji i posmatračima sa normalnim viđenjem boja i posmatračima sa PVB (Color Universal Design Organization, 2015). O pravilima univerzalnog dizajna treba voditi računa u svim situacijama kada ne možemo unapred da predvidimo sastav korisničke grupe kao, na primer, pri dizajnu mape javnog prevoza. Sa druge strane, prilagođavanje dizajna obezbeđuje najprikladniji sadržaj za određeni tip PVB ili, pak, za konkretnog PVB posmatrača (Chen et al, 2013). Ovaj koncept je najlakše postići u digitalnom okruženju gde isti sadržaj slike može biti renderovan na različite načine u zavisnosti od potreba korisnika, ali zahteva unapred poznavanje „stanja“ korisnika kojem se prilagođava sadržaj slike (Milić et al, 2015a).

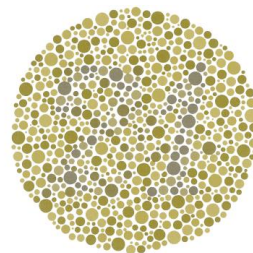
Osim promene boja, određena rešenja predlažu **naglašavanje ivica** (Sakamoto, 2012), **upotrebu tekstura i senki sa različitim uglovima** (Hung & Hiramatsu, 2011), **šablona** (Sajadi et al, 2011) i/ili **dodavanje tekstualnih oznaka** selektovanim bojama (Ruminski et al, 2012) kao korisne dodatke za kompenzaciju limitiranog viđenja informacija u boji.

Metode daltonizacije mogu modifikovati kompletnu sliku, samo segment slike ili samo određeni opseg tonova slike. Kontrola obrade slike može biti korisnički-asistirana ili automatska (bez intervencije korisnika). Kod korisnički-asistiranih metoda, korisnik prosleđuje parametre koji upravljaju tokom obrade slike i, stoga, rezultat u velikoj meri zavisi od odabranih vrednosti parametara (Ruminski et al, 2012), što ih čini nepogodnim za procesiranje u realnom vremenu.

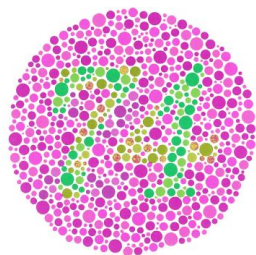
Uobičajeno korišćeni primeri za demonstraciju efektnosti daltonizacije su Išiharine tablice (Slika 2.14) ili fotografije prirode sa crveno-zelenom konfuznom kombinacijom (Slika 2.15).



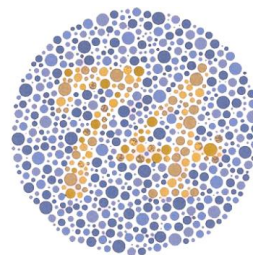
a. Išihara tablica (broj 74)



b. deuteranopska verzija



c. tablica nakon obrade



d. deuteranopska verzija nakon daltonizacije

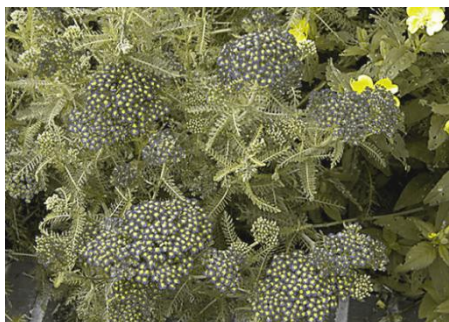
Slika 2.14. Primer daltonizacije: a. Išiharina tablica, b. deuteranopska simulacija, c. slika nakon daltonizacije, d. deuteranopska verzija nakon daltonizacije



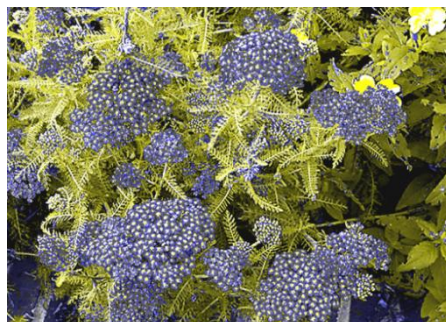
a. početna slika



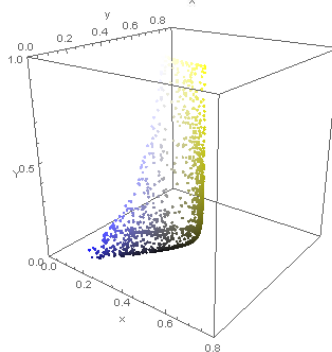
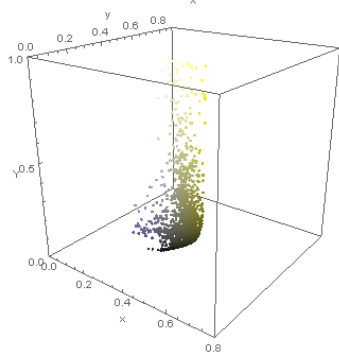
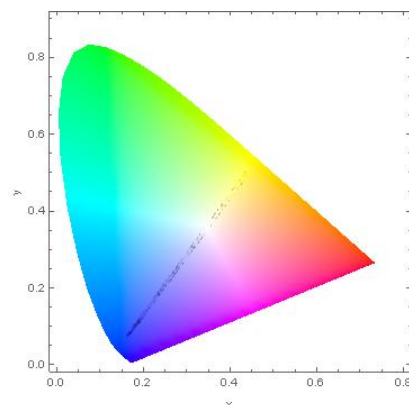
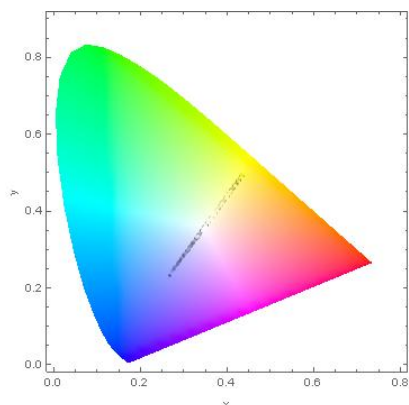
b. slika nakon daltonizacije



c. protanopska verzija



d. protanopska verzija nakon daltonizacije



e. protanopski opseg boja (početna slika)

f. protanopski opseg boja (slika nakon daltonizacije)

Slika 2.15. Primer daltonizacije: a. prirode sa crveno-zelenom konfuznom kombinacijom, b. slika nakon daltonizacije, c. protanopska simulacija, d. protanopska verzija slike nakon daltonizacije, e. opseg hromatičnosti (2D) i opseg svih boja (3D) protanopa u slučaju početne slike, f. hromatski opseg (2D) i opseg svih boja (3D) protanopa u slučaju slike nakon daltonizacije

### 2.3.1 Sadržajno-nezavisni metodi daltonizacije

Sadržajno-nezavisni metodi daltonizacije ne osiguravaju u opštem slučaju razlikovanje boje od strane korisnika sa PVB pošto koriste globalno, generalizovano procesiranje slike i ne uzimaju u obzir gamut slike niti prostornu distribuciju konfuznih boja na slici. Kompletna slika se tretira na uniforman način, gde je proračun vrednosti procesiranih piksela isključivo funkcija njegovih početnih vrednosti, bez obzira na lokaciju unutar slike ili boju ostalih piksela. Na ovaj način se često dešava da mapiranje boja reši početni problem, ali kreira novi konfuzni par između nove (premapirane) boje i boje neke druge susedne oblasti slike. Ili, još nepovoljnije, boje koje su se jasno razlikovale inicijalno mogu biti mapirane u neraspoznavajuću kombinaciju.

Ikarino i ostali (2006) su definisali filter CBFS (*Color Blind Filter Service*) sa obradom HTML stranica na nivou piksela. Zbog jednostavnosti algoritma, filter omogućava brzo renderovanje rezultata adaptacije boja.

Ruminski i ostali (2010) predlažu modifikaciju rendera HTML stranice na nivou piksela, ali samo određenog opsega tonova (crvenih i zelenih).

#### Vischeck Daltonize

Jedan od prvih softverskih alata za daltonizaciju je korisnički-asistiran *Vischeck Daltonize* filter (Dougherty & Wade, 2002), [www.vischeck.com](http://www.vischeck.com). Filter prilagođava slike za protanope i deutranope koristeći tri parametra za:

1. skaliranje („razvlačenje“) vrednosti crveno-zelenog (a\*) kanala (vrednost>1 predstavlja „širenje“ a kanala, a vrednost<1 „skupljanje“ a kanala),
2. korekciju kanala svetline (L) za piksele crvenih tonova (vrednost>0 podrazumeva povećanje svetline crvenih piksela i obrnuto) i
3. korekciju plavo-žutog (b) kanala za piksele crvenih tonova (vrednost>0 podrazumeva korigovanje crvenih piksela ka plavim tonovima, a vrednost<0 ka žutim tonovima).

Kako parametre adaptacije bira korisnik manuelno po principu „pokušaja i grešaka“, ova metoda je komplikovana za korišćenje i iziskuje vreme i strpljenje korisnika. Primeri rezultata daltonizacije dobijenih *Vischeck Daltonize* filterom prikazani su na Slici 2.16.





a.



b.



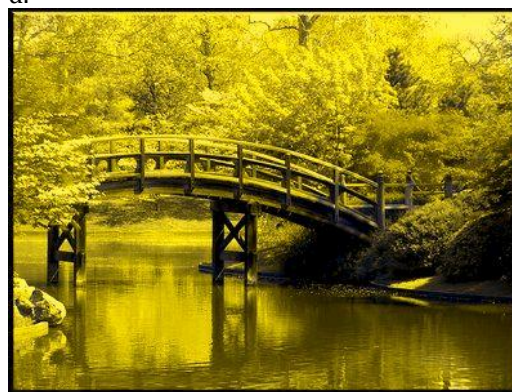
c.



d.



e.



f.

Slika 2.16. Primeri daltonizacije (Vischeck Daltonize filter): a. originalna slika (početne vrednosti parametara bez promena na slici:  $P_{a\text{ kanal}}=1$ ,  $P_{L\text{ kanal}}=0$ ,  $P_{b\text{ kanal}}=0$ ), b. simulirana deuteranopska verzija, c. slika nakon prve daltonizacije ( $P_{a\text{ kanal}}=1$ ,  $P_{L\text{ kanal}}=0.5$ ,  $P_{b\text{ kanal}}=1.2$ ), d. deuteranopska verzija nakon prve daltonizacije, e. slika nakon druge daltonizacije ( $P_{a\text{ kanal}}=1$ ,  $P_{L\text{ kanal}}=0$ ,  $P_{b\text{ kanal}}=-1.3$ ), f. deuteranopska verzija nakon druge daltonizacije

Može se uočiti da efektivnost daltonizacije zavisi od adekvatno odabranih vrednosti ponuđena tri klizača. Prva daltonizacija (Slika 2.16.c) rešava problem distinkcije crvenih krošnji od okoline, ali stvara problem smanjivanja hromatskog kontrasta među elementima u pozadini (Slika 2.16.d). Druga daltonizacija (Slika 2.16.e) daje nepovoljan rezultat sa manjim opsegom boja za dihromate u odnosu na početnu sliku (Slika 2.16.f).

## Chrome Daltonize

Rasprostranjeno rešenje za poboljšanje pristupačnosti vizuelnih informacija u veb okruženju predstavlja *Chrome Daltonize* ekstenzija (plug in) bazirana na radu Fidanera i ostalih (2005). Poboljšanje slike se zasniva na korišćenju matrice greške dobijene oduzimanjem simuliranih dihromatskih vrednosti od originalnih RGB vrednosti. Matrica greške otkriva boje koje se ne opažaju korektno od strane PVB posmatrača. Koraci obrade slike su:

1. Transformacija normalizovanih RGB u LMS vrednosti

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = M_{\text{RGB} \rightarrow \text{LMS}} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17.8824 & 43.5161 & 4.1193 \\ 3.4557 & 27.1554 & 3.8671 \\ 0.02996 & 0.18431 & 1.467 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

2. Proračun (aproksimiranih) dihromatskih LMS vrednosti

$$\begin{bmatrix} L_{\text{dic}} \\ M_{\text{dic}} \\ S_{\text{dic}} \end{bmatrix} = M_{\text{dic}} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

npr. protanopija: 
$$\begin{bmatrix} L_p \\ M_p \\ S_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2.02344 & -2.52581 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix},$$

3. Transformacija dihromatskih LMS vrednosti nazad u RGB vrednosti

$$\begin{bmatrix} R_{\text{dic}} \\ G_{\text{dic}} \\ B_{\text{dic}} \end{bmatrix} = M_{\text{RGB} \rightarrow \text{LMS}}^{-1} \begin{bmatrix} L_{\text{dic}} \\ M_{\text{dic}} \\ S_{\text{dic}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0809 & -0.1305 & 0.1167 \\ -0.0102 & 0.0540 & -0.1136 \\ -0.0003 & -0.0041 & 0.6935 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{\text{dic}} \\ M_{\text{dic}} \\ S_{\text{dic}} \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

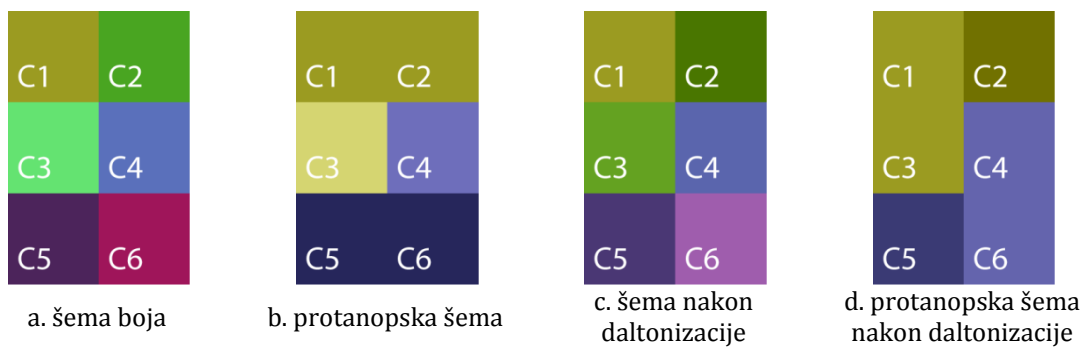
4. Dodavanje matrice greške umnožene sa matricom daltonizacije  $M_{\text{dal}}$  na originalne RGB vrednosti

$$\begin{bmatrix} R_{\text{dal}} \\ G_{\text{dal}} \\ B_{\text{dal}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + M_{\text{dal}} \begin{bmatrix} R - R_{\text{dic}} \\ G - G_{\text{dic}} \\ B - B_{\text{dic}} \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

npr. protanopija: 
$$M_{\text{dal}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 1 & 0 \\ 0.7 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Iz težinskih koeficijenata u matrici  $M_{\text{dal}}$  može se uočiti da mapiranje za protanope podrazumeva pomeranje crvenih vrednosti (dominantnih u protanopskoj matrici greške) ka plavom delu spektra.

Slika 2.17 demonstrira tipičan problem sa sadržajno-nezavisnim metodima na primeru dobijenim korišćenjem *Chrome Daltonize* ekstenzije.



Slika 2.17. Problem mapiranja boja sa sadržajno-nezavisnim *Chrome Daltonize* algoritmom: a. šema boja, b. protanopska verzija inicijalne šeme, c. šema nakon daltonizacije i d. protanopska šema nakon daltonizacije. RGB vrednosti šeme boja su: C1(155,155,35), C2(73,165,35), C3(100,227,113), C4(90,112,187), C5(76,36,91) i C6(159,25,90)

Slika 2.17.b pokazuje da originalna šema ima dva problematična para boja, (C1-C2) i (C5-C6), za protanope. Adaptacija slike izvedena sa *Chrome Daltonize* ekstenzijom rešava inicijalne problematične kombinacije, ali istovremeno kreira nova dva konfuzna para: (C1-C3) i (C4-C6) (Slika 2.17.d).

Zbog ovih razloga, Anagnostopoulos i ostali (2007) predlažu unapređenje metoda sa automatskom iteracijom koja eliminiše mogućnost poklapanja između boja nakon obrade slike. Dodatni koraci algoritma uključuju klasterovanje boja i ispitivanje postojanja problematičnih kombinacija nakon prve daltonizacije. Moguće problematično obojene klustere treba izolovati od ostatka slike pomoću logičke maske i ponovo mapirati sa promenjenim težinskim koeficijentima u matrici  $\mathbf{M}_{dal}$ . Koeficijenti inicijalne matrice daltonizacije  $\mathbf{M}_{dal,0}$  su definisani kao:

$$\mathbf{M}_{dal,0} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 \\ m_7 & m_8 & m_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

dok se matrica daltonizacije u t-toj iteraciji,  $\mathbf{M}_{dal,t}$  dobija iz  $\mathbf{M}_{dal,t-1}$  na sledeći način:

$$\mathbf{M}_{dal,t} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_{4,t} & m_5 & m_6 \\ m_{7,t} & m_8 & m_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_{4,t-1} - s & m_5 & m_6 \\ m_{7,t-1} + s & m_8 & m_9 \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

gde suma težinskih koeficijenata ostaje uvek 3 u cilju redistribucije boja u različiti deo spektra bez preteranih ili neprirodnih rezultata (održavanje "energije" prebojavanja slike nepromenjenom) (Anagnostopoulos et al, 2007). Opisano unapređenje metoda je zavisno od sadržaja slike pošto broj potrebnih iteracija zavisi od skupa početnih boja slike, ali ne zavisi i od njihove lokacije. Iterativna provera postojanja konfuznih boja nije još uvek integrisana u *Chrome Daltonize* ekstenziju.

## Koterin spektralni metod daltonizacije

Poseban slučaj sadržajno-nezavisne daltonizacije je trenutno aktuelan Koterin metod baziran na spektralnim podacima (2012). Iako ovaj metod koristi projekciju spektralnih podataka stimulusa na dihromatski prostor odziva čepića da bi nadoknadio izgubljeni spektar za dihromate, priroda ove obrade slike je sadržajno-nezavisna – pikseli sa istom bojom su uvek premapirani opet u istu boju od slike do slike. Fundamentalna spektralna kriva se dobija iz RGB vrednosti pomoću pseudo-inverzne projekcije i izgubljeni spektar  $\Delta C_{DIC}$  se izračunava kao razlika između fundamentalnog spektra vidljivog trihromatima ( $C^*$ ) i dihromatima ( $C^*_{DIC}$ ). Daltonizacija ima dva cilja: da maksimizira spektralnu vidljivost za dihromate i da minimizira razliku u percepciji obrađene slike između trihromatskog i dihromatskog viđenja.

Koraci obrade slike su:

1. Izračunavanje fundamentalne spektralne krive stimulusa boje ( $C^*$ ) iz sRGB vrednosti koristeći pseudo-inverznu projekciju ( $P^{inv}$ ):

$$C^* = P^{inv} [L M S]^T = P^{inv} M_{lms \rightarrow rgb} [R G B]^T. \quad (2.16)$$

Pseudo-inverzna projekcija iz LMS prostora odziva čepića u n-dimenzioni spektralni prostor se zasniva na matričnoj R-teoriji:

$$P^{inv} = A_{lms} (A_{lms}^T A_{lms})^{-1}, \quad (2.17)$$

gde je  $A_{lms}$  vektor sa funkcijama spektralnih osetljivosti čepića kao komponentama:  $A_{lms} = [l(\lambda), m(\lambda), s(\lambda)]$ .

2. Ekstrakcija vidljivog ( $C^*_{DIC}$ ) i nevidljivog spektra ( $\Delta C_{DIC} = C^* - C^*_{DIC}$ ) za dihromate:

$$C^*_{DIC} = R_{DIC} C^*. \quad (2.18)$$

Operator dihromatske projekcije  $R_{DIC}$  se proračunava na osnovu postojećih odziva čepića kao:

$$R_{DIC} = A_{DIC} (A_{DIC}^T A_{DIC})^{-1} A_{DIC}^T,$$

gde vektor  $A_{DIC}$  ima sledeće varijante:

$$\text{protanopija: } A_{DIC} = [m(\lambda), s(\lambda)], \quad (2.19)$$

$$\text{deuteranopija: } A_{DIC} = [l(\lambda), s(\lambda)],$$

$$\text{tritanopija: } A_{DIC} = [l(\lambda), m(\lambda)].$$

3. Optimalna daltonizacija slike koristeći izgubljeni spektar  $\Delta C_{DIC}$ :

$$\Delta C_{DIC} = C^* - C^*_{DIC}, \quad (2.20)$$

Daltonizacijom se pravi pomeraj distribucije izgubljenog spektra u regione vidljivih talasnih dužina za interval  $\lambda_{\text{shift}}$  na sledeći način:

ako  $\lambda_{\text{max}} \geq \lambda \geq \lambda_{\text{shift}} + \lambda_{\text{min}}$ ,      onda  $\Delta C_{\text{shift}}(\lambda - \lambda_{\text{shift}}) = \Delta C_{\text{DIC}}(\lambda)$ ;  
 inače ako  $\lambda_{\text{shift}} + \lambda_{\text{min}} > \lambda \geq \lambda_{\text{min}}$ ,      onda  $\Delta C_{\text{shift}}(\lambda_{\text{max}} + \lambda_{\text{min}} + \lambda - \lambda_{\text{shift}}) = \Delta C_{\text{DIC}}(\lambda)$

Slika 2.18 ukazuje na problem sa sadržajno-nezavisnim metodima kada daltonizacija rezultira sa redukovanjem hromatskog diverziteta u odnosu na originalnu sliku.



a. originalna slika



b. protanopska verzija



c. slika nakon daltonizacije



d. protanopska slika nakon daltonizacije

Slika 2.18. Primer daltonizacije sa Koterinim metodom (2012): a. inicijalna slika, b. protanopska verzija inicijalne slike, c. slika nakon daltonizacije i d. protanopska verzija slike nakon daltonizacije

Koterin metod je koristan za kreiranje univerzalnog dizajna pošto minimizira razliku između dihromatske i trihromatske percepcije adaptirane slike.

### 2.3.2 Sadržajno-zavisni metodi daltonizacije

Sadržajno-zavisna kategorija podrazumeva obradu slike baziranu na korišćenju histograma, kernela ili segmenata slike, kao i sve ostale metode gde vrednost piksela nakon daltonizacije zavisi od inicijalnog gamuta slike, inicijalnih histograma i/ili lokacije piksela unutar slike. Ove metode su znatno kompleksnije i računski zahtevnije, ali daju uspešniju diferencijaciju obojenih elemenata slike.

Međutim, postoje problemi sa očuvanjem prirodnosti slike i identifikacijom boja, pošto korisnici sada mogu da razlikuju sve obojene elemente, ali su boje često mapirane u kompletno različite što predstavlja problem u slučaju realnih fotografija. Zbog toga ovaj tip adaptacije uključuje objektivnu funkciju koja definiše najbolje mapiranje boja u smislu balansiranja između kontrasta boja i prirodnosti slike. Problem očuvanja prirodnosti slike je naglašen kada posmatrači imaju blagi ili umereni anomalni trihromatski PVB sa distinkcijom boja bližoj normalnom viđenju. Metodi iz ove grupe obično adaptiraju sliku optimalno za dihromatske tipove PVB, iako je broj anomalnih trihromata tri puta veći (Milić et al, 2015b). Minimizacija „vizuelnog jaza“ između normalne trihromatske i dihromatske percepcije rezultira redukcijom opsega boja slike za normalne posmatrače (Milić et al, 2015a). Ovo je opravdano u slučaju univerzalnog dizajna poput sredstava javnih vizuelnih komunikacija, ali predstavlja nepotrebno ograničavanje za prosečne posmatrače i anomalne trihromate u slučaju digitalnog sadržaja.

Sadržajno-zavisni metodi takođe imaju problem *vremenske koherentnosti* koja je potrebna za konzistentnu obradu interaktivnog ili video sadržaja pošto se ista boja u dve različite slike često mapira u potpuno različite boje.

Metodi iz ove kategorije proračunavaju optimalne boje koristeći genetski algoritam (Ichikawa et al, 2008), *mass-spring* optimizaciju (Kuhn et al, 2008), *affine* transformaciju (Rasche et al, 2005a), neuralne mreže (Ma et al, 2009) itd. Većina ovih metoda zbog računске kompleksnosti nema širu praktičnu upotrebu.

Huang i ostali (2008) su predložili adaptaciju koja povećava kontrast pomoću globalne ekvalizacije histograma kanala H (ton) u HSV prostoru boja koristeći tri lokalne karakteristike: vrednost tona zadate tačke, maksimalnu lokalnu razliku tonova i lokalni gubitak informacije o boji (lokalnu razdaljinu boja). Korisnik preko kontrolnog parametra određuje stepen povećanja kontrasta.

Ičikava i ostali (2003) definišu dekompoziciju internet stranice na regione gde se vodi računa o prostornim odnosima između regiona prilikom promene boja piksela. U ovom metodu optimalne boje stranice su proračunate koristeći genetski algoritam.

Vakita i Šimamura (2005) predlažu metod za adaptaciju dokumenata (npr. internet stranice, grafikoni, mape) za dihromate koji se bazira na tri objektivne funkcije: za očuvanje kontrasta boja, za maksimalni kontrast boja i za očuvanje prirodnosti. Ove funkcije su ponderisane prema korisničkim parametrima.

Džeferson i Harvi (2006) koriste četiri objektivne funkcije za očuvanje: svetline, kontrasta boja, boja u dostupnom gamutu i prirodnosti.

Raš i ostali (2005a) su predstavili metod adaptacije slike za dihromate sa optimizacionim procedurama koje treba da očuvaju perceptualnu razliku između svih parova boja u opsegu dihromata koristeći *affine* transformaciju. Međutim, ova transformacija ne može da detektuje varijacije boje duž nekoliko pravaca i ne može da garantuje da će boje biti zadržane unutar dozvoljenog gamuta. Raš i ostali (2005b) su u sledećem radu pokušali da reše ova ograničenja primenjujući procedure ograničene multivarijantne optimizacije nad redukovanim setom ključnih boja koje su, potom, korišćene i za optimizaciju kompletnog seta boja. Uprkos poboljšanim rezultatima, efikasnost ovog metoda naglo opada sa povećanjem broja ključnih boja i veličinom početne slike.

Kuhn i ostali (2008) prezentovali su metod za poboljšanje kontrasta boja za dihromate baziran na *mass-spring* optimizaciji. Optimizacija se prvo vrši nad skupom kvantizovanih boja, a nakon toga se optimizuje ceo skup boja.

## **Samoorganizovana daltonizacija**

Ma i ostali (2009) definišu *samoorganizovanu mapu (SOM)*, model veštačke neuronske mreže, za nelinearno mapiranje boja iz inicijalnog gamuta slike u redukovani dihromatski. Opseg boje se mapira u novi, čuvajući odnose između susednih boja. Međutim, adaptirana slika često izgleda veoma neprirodno i za normalne i za PVB posmatrača. Dodatno, metod, zbog svoje računске kompleksnosti, nema mogućnost praktične aplikacije sa obradom slike u realnom vremenu. Slika 2.19 predstavlja rezultate daltonizacije dobijene SOM algoritmom.

Koraci obrade slike su:

1. Uzorkovanje redukovanog seta boja iz originalne slike

Uzorkovanje redukovanog seta boja iz originalnog gamuta slike se izvodi iz razloga što susedni pikseli imaju slične boje, posebno u uniformno obojenim regijama slike. Uzorkovanje smanjuje računске zahteve ostalih procesnih koraka, a broj uzoraka određen je veličinom slike.

2. Mapiranje uzorkovanih boja u SOM

Vektor sa RGB vrednostima uzorkovanih piksela predstavlja ulaz SOM mreže. Svaki ulazni vektor je povezan sa svim neuronima SOM mreže tako da je dimenzija težinske matrice  $3 \times n$ , gde je  $n$  broj neurona.

3. Samoorganizovano procesiranje (obrada)

SOM koristi algoritam učenja da klasteruje ulazne vektore tako da je svaki vektor uparen sa svojim "pobednikom" – neuronom čija težina mu je najbližnja:

$$\|x - m_c\| = \min\{\|x - m_i\|\}, \quad (2.21)$$

gde  $\|\cdot\|$  predstavlja Euklidijanov operator (engl. *Euclidian norm*),  $x$  je ulazni vektor,  $m_i$  je težinski vektor  $i$ -tog neurona i  $m_c$  je "pobednik". Težine  $i$  "pobednika" i njegovih suseda se iterativno podešavaju tako da se približavaju ulaznom vektoru:

$$m_i(t+1) = \begin{cases} m_i(t) + \alpha(t)[x(t) - m_i(t)], & i \in N_c(t) \\ m_i(t), & \text{inače} \end{cases} \quad (2.22)$$

gde je  $\alpha(t)$  stopa učenja (između 0 i 1) i  $N_c(t)$  je susedstvo "pobednika". Finalne težine se nazivaju **vektori šeme** (*codebook vectors*).

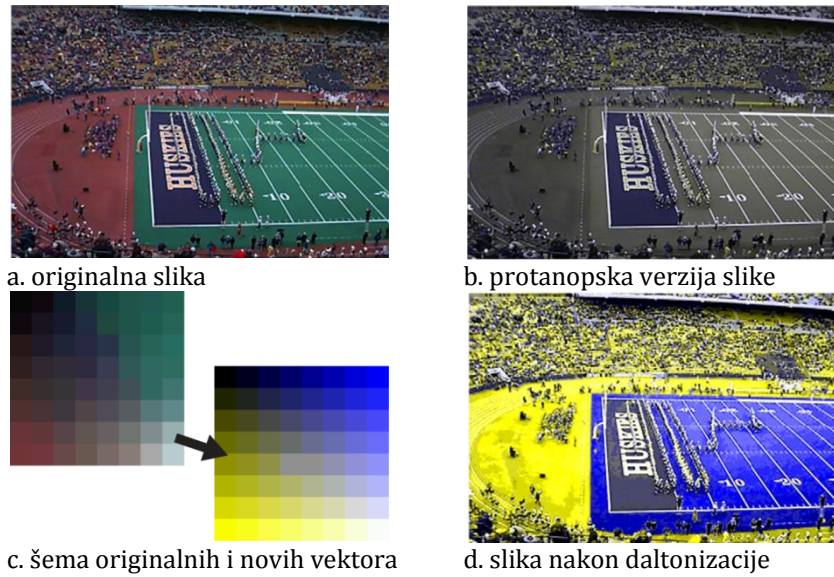
4. Mapiranje boja šeme u novi (dihromatski) prostor boja

Novi prostor boja ima boje dva oponentna kanala u uglovima (bela i crna u jednoj dijagonali, plava i žuta u drugoj) i glatku interpolaciju između. Veličina i rezolucija novog prostora boja su isti kao kod šeme vektora koja je rotirana tako da su njene boje u uglovima najpribližnije povezane sa korespondirajućim bojama u uglovima novog prostora. U novom prostoru se nalaze boje koje opažaju isto i dihromati i normalni posmatrači.

5. Mapiranje piksela originalne slike u najbližnje vektore šeme

Vektor svakog piksela u originalnoj slici se poredi sa svim vektorima da bi se našao najbližnji vektor u šemi čija je pripadajuća boja u novom prostoru podešena kao finalna boja za taj piksel.





Slika 2.19. Rezultat daltonizacije koristeći SOM metod (Ma et al, 2009): a. originalna slika, b. protanopska verzija slike, c. 'originalne boje' šeme vektora i njihove verzije u novom prostoru i d. slika nakon daltonizacije opažena na isti način od strane svih: trihromata, protanopa i protanomala

## Metod poboljšanja dihromatskog kontrasta boja

Maçado i Oliveira (2009) definišu metod sa ciljem da se povrati kontrast boja za dihromate pomoću ortogonalne projekcije originalnih boja na dihromatsku ravan boja poravnato sa pravcem koji maksimizira gubitak kontrasta u CIE Lab prostoru boja. Slika 2.20 daje geometrijsku ilustraciju ovog metoda. Koraci obrade slike su:

1. Projekcija originalnih boja na dihromatku gamutsku ravan i proračun gubitka lokalnog kontrasta opaženog od strane dihromata

Za svaki piksel  $\mathbf{p}_i$  gubitak lokalnog kontrasta je procenjen poređenjem sa jednim susednim pikselom  $\mathbf{p}_j$ . Relativni gubitak kontrasta između inicijalnog para boja  $(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j)$  i njihove dihromatske verzije  $(\mathbf{c}'_i, \mathbf{c}'_j)$  je dat sa:

$$l_{(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j)} = \frac{\|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j\| - \|\mathbf{c}'_i - \mathbf{c}'_j\|}{\|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j\|}, \quad (2.23)$$

gde  $\|\cdot\|$  predstavlja operator dužine vektora i  $\mathbf{w}_i = \mathbf{l}_{(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j)} \boldsymbol{\vartheta}_{ij}$  je vektor gubitka kontrasta duž pravca individualnog gubitka kontrasta  $\boldsymbol{\vartheta}_{ij} = \mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j$  povezanog sa pikselom  $\mathbf{p}_i$ .

2. Procena pravca  $\mathbf{v}_{ab}$  koji maksimizira gubitak kontrasta

Pravac  $\mathbf{v}_{ab}$  koji maksimizira lokalni gubitak kontrasta se proračunava u a-b ravni hromatičnosti (CIE Lab prostor) kao glavni sopstveni (svojtveni) vektor (engl. *eigen vector*) matrice  $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$ , gde

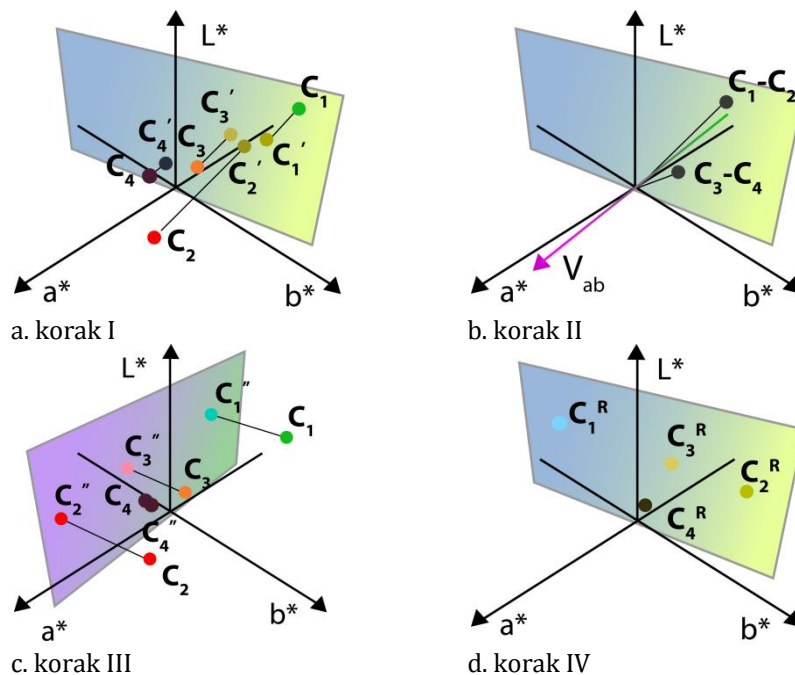
je  $\mathbf{M}$  matrica čiji redovi sadrže koordinate hromatičnosti (a,b) vektora gubitka kontrasta za sve vektore:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} w_1^a & w_1^b \\ w_2^a & w_2^b \\ \dots & \dots \\ w_n^a & w_n^b \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Elementi i-tog reda  $\mathbf{M}$  su projekcije  $\mathbf{w}_i$  na a-b ravan. Precizna procena  $\mathbf{v}_{ab}$  bi zahtevala evaluaciju svih piksela  $\mathbf{p}_i$  u susedstvu  $\mathbf{N}_i$  oko  $\mathbf{p}_i$  umesto samo jednog para susednih piksela  $(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j)$ . Međutim, ovo bi uzrokovalo nepotrebne računске zahteve pošto susedni pikseli uobičajeno imaju slične vrednosti. Uzorkovanje samo jednog para piksela iz susedstva za određivanje pravaca  $\mathbf{v}_{ab}$  je opravdano zbog smanjivanja računskih zahteva.

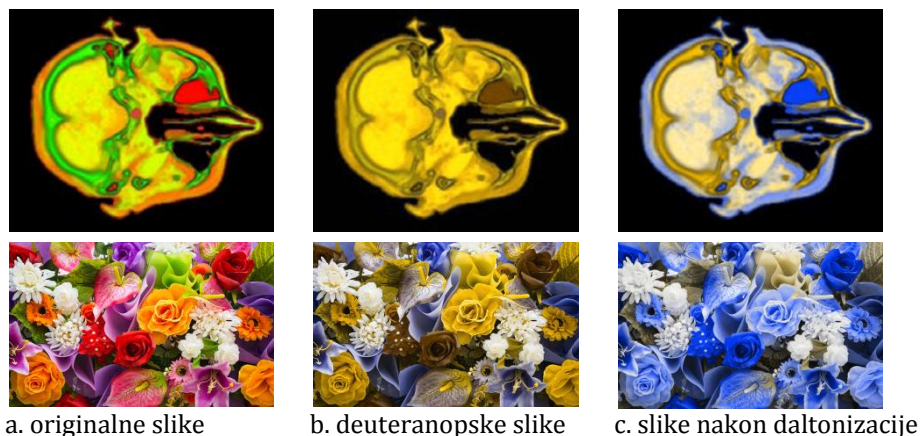
3. Ortogonalna projekcija originalnih boja na ravan definisanu pomoću  $\mathbf{v}_{ab}$  i svetline (L osa) koja premešta originalne boje u poređenju sa njihovim inicijalnim dihromatskim projekcijama.

4. Rotacija projektovanih boja oko L ose dok se ne poravnaju sa dihromatskom ravni i prebojavanje slike sa novim vrednostima boje piksela.



Slika 2.20. Geometrijska ilustracija koraka obrade: a. proračun dihromatskih verzija ( $c_1'$  do  $c_4'$ ) za boje  $c_1$  do  $c_4$ , b. pronalaženje pravaca  $\mathbf{v}_{ab}$  koji maksimiziraju gubitak kontrasta, c. projekcija originalnih boja na ravan definisanu sa  $\mathbf{v}_{ab}$  i osom svetline i d. rotacija projektovanih boja oko L ose dok se ne poravnaju sa dihromatskom gamutskom ravni

Slika 2.21 pokazuje primere daltonizacije korišćenjem ovog pristupa.



Slika 2.21. Rezultat daltonizacije korišćenjem Mačado-Oliveira metoda (2009): a. originalne slike, b. deuteranopske simulacije originalnih slika, c. slike nakon daltonizacije koje se opažaju na isti način od strane normalnih trihromata, deuteranomala i deuteranopa

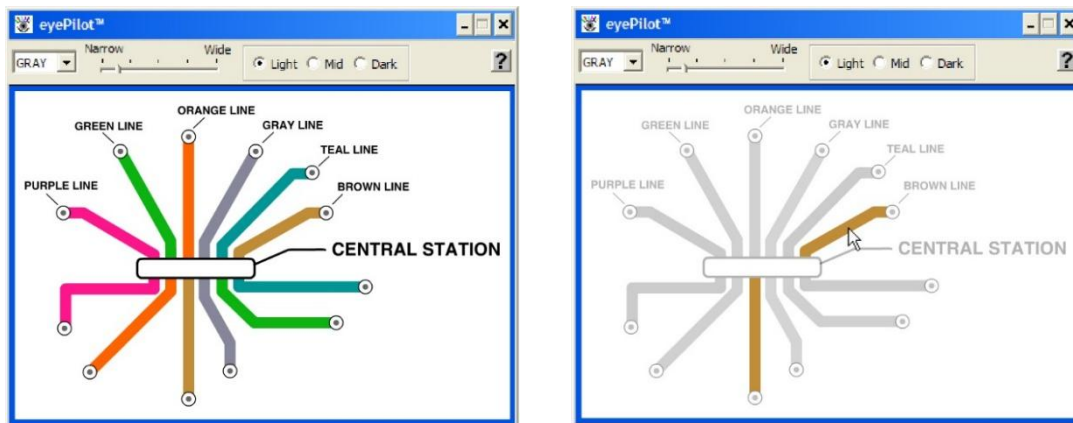
Slika 2.21 demonstrira da metod poboljšava lokalni kontrast boja i sveukupni kvalitet slike za dihromate kada je početni gamut slike skroman (gornja slika), dok sa povećanjem hromatskog diverziteta opada efektnost daltonizacije (donja slika). Poput ostalih metoda usmerenih isključivo na dihromatske PVB, Mačado-Oliveira metod nije pogodan za anomalne trihromate zbog prekomerne redukcije gamuta slike. Ovaj pristup je računski prihvatljiv za obradu slike u (skoro) realnom vremenu i, za razliku od prethodnih, čuva vremensku koherentnost tako da je pogodan za adaptaciju video sadržaja (Machado & Oliveira, 2009).

### 2.3.3 Softverski alati za daltonizaciju

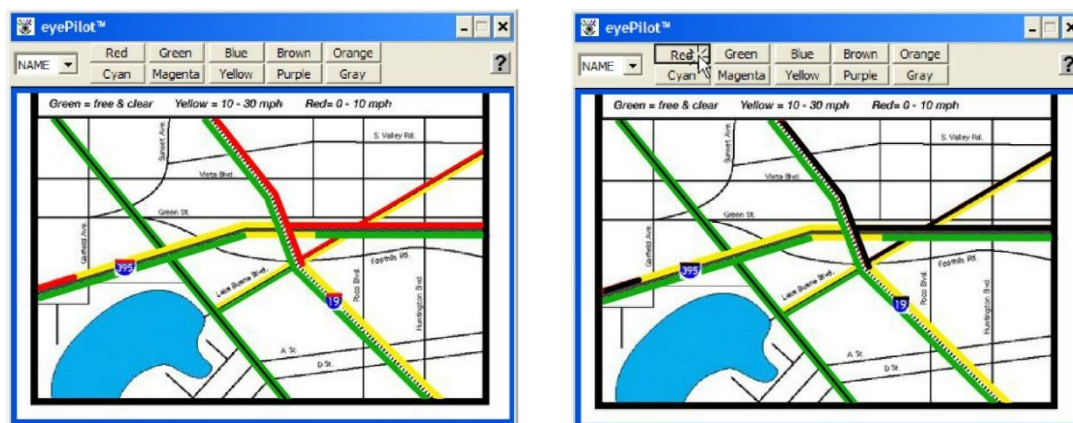
Mnogi sadržajno-nezavisni metodi su zbog svoje jednostavnosti i računске efikasnosti implementirani u veb okruženju i modifikuju HTML stranice na nivou piksela. *Chrome Daltonize* ekstenzija izvršava daltonizaciju `<image>` elemenata u HTML dokumentima koristeći Javascript. Ikarino i ostali (2006) su kreirali jednostavni filter konverzije boja *CBFS (Color Blind Filter Service)* za povećavanje kontrasta. Ruminski i ostali (2010) nude veb proksi sistem i mobilnu aplikaciju za renderovanje veb stranica modifikovanjem samo određenog opsega crvenih i zelenih tonova. Njihov softverski alat poseduje, takođe, opciju tekstualnog imenovanja boje za selektovani piksel slike.

Mobilna aplikacija *Colour Blind Aid iPhone app* (Asada, 2011) omogućava parcijalnu daltonizaciju selektovane oblasti slike. *Eyepilot* softver dostupan on-line obezbeđuje kombinaciju metoda daltonizacije – senčenje, zonsko prebojenje i imenovanje boja.

Slika 2.22 pokazuje primer *Eye Pilot* alata za pomoć korisnicima sa PVB.



a. izdvajanje segmenta slike obojenog selektovane bojom



b. izdvajanje segmenta slike obojenog selektovanim imenom boje

Slika 2.22. Demonstracija *Eye Pilot* softverskog alata: a. izdvajanje segmenta slike obojenog selektovane bojom, b. izdvajanje segmenta slike obojenog selektovanim imenom boje

## 2.4 METODI EVALUACIJE

### 2.4.1 Metodi evaluacije simulacije poremećaja viđenja boja

Opsežni psihometrijski eksperimenti rezultirali su identifikacijom ograničenog broja kombinacija boja koje su konfuzne za raspoznavanje za određenu ciljnu grupu posmatrača pogođenu poremećajima viđenja boja (posebno grupe crveno-zelenih PVB). Na ovim saznanjima počiva celokupna i priznata (medicinska) i neformalna dijagnostika poremećaja viđenja boja.

Međutim, i dalje postoji otvorena diskusija o tome kako proceniti *da li su simulacije anomalnog viđenja boja zaista pouzdane u vizuelizaciji i da li je nivo pouzdanosti isti za različite tipove i stepene PVB*.

Bretel i ostali (1997) su testirali svoj metod dihromatske simulacije samo na jednom protanopu i jednom deuteranopu koji su potvrdili vizuelno poklapanje između originalne test karte i simulacije za svako polje test karte pojedinačno.

U određenom broju radova (Machado & Oliveira, 2009; Flatla & Gutwin, 2012; Liedtke et al, 2013), metode simulacije su verifikovane od strane posmatrača sa normalnom percepcijom boja u ulozi „*virtuelnih daltonista*“.

Mačado i Oliveira (2009) su verifikovali svoj metod simulacije anomalnih trihromatskih PVB poređenjem rezultata na originalnom *Farnsworth-Munsell 100-Hue* testu PVB ispitanika sa rezultatom regularnih „prosečnih“ ispitanika na izmenjenoj verziji testa sa simuliranim bojama. Verifikacija je bazirana na pretpostavci da će, u slučaju pouzdane simulacije, posmatrači sa normalnom percepcijom boja poređati nizove simuliranih boja na isti ili sličan način kao što bi to uradili PVB ispitanici. Ulogu daltonista imalo je 17 ispitanika sa regularnim vidom podeljenih u dve grupe: protansku (NTgp, 8 ispitanika) i deutansku (NTgp, 9 ispitanika). Kontrolnu grupu je činilo 13 PVB korisnika klasifikovanih pomoću Išiharinih tablica na sledeći način: 4 protanomala, 4 protanopa, 3 deuteranomala i 2 deuteranopa. Koristeći Mačado-Oliveira metod simulirano je kako protanomali sa pomerajem L čepića od 12, 16 i 19 nm vide originalne boje testa, a zatim su ispitanici iz protanske grupe rešavali sve tri verzije testa po jednom. Analogno je ponovljeno i sa deutanskom grupom tako što je simulirana deuteranomaliija sa pomerajem M čepića od 12, 16 i 19 nm. Uprosečeni rezultati testova protanske i deutanske grupe virtuelnih daltonista su upoređeni sa uprosečenim rezultatima kontrolnih grupa. Matrica kovarijanse napravljenih grešaka otkriva veliku sličnost u rezultatima virtuelnih i pravih daltonista, s tim da su rezultati protan test grupe imali bolje poklapanje sa deutan PVB ispitanicima.

Flatla i Gutvin (2012) su, takođe, evaluirali svoju metodu personalizovane simulacije pomoću posmatrača sa normalnom percepcijom boja u simuliranom okruženju. U testiranju je učestvovalo pet parova ispitanika gde su svaki par činile jedna PVB osoba (dva ispitanika sa blagom deuteranomalijom, jedan sa umerenom deuteranomalijom, jedan sa ozbiljnijom protanomalijom i jedna osoba sa neklasifikovanim crveno-zelenim PVB) upareni sa jednom osobom normalnog opažanja boja. Ispitanici bez PVB su radili kalibracioni test *ICD2* (Flatla & Gutwin, 2011) za određivanje diskriminacionih elipsi tako što su kalibracione tablice simulirale percepciju njihovih PVB partnera iz para. Rezultati kalibracije pokazali su da personalizovani pristup preciznije izdvaja boje koje PVB osoba neće moći da razlikuje u odnosu na postojeću Bretel-Vienot-Molon dihromatsku simulaciju. Prosečna apsolutna razlika („greška“) između diskriminacione elipse PVB korisnika i nePVB korisnika nakon personalizovane simulacije je statistički značajno niža od razlike između stvarnih diskriminacionih elipsi PVB ispitanika i elipsi dobijenih dihromatskom simulacijom.

Liedtke i ostali (2015) predlažu bihevioralni metod evaluacije simulacije pomoću vizuelnog uparivanja uzoraka (engl. *Sample-to-Match Simulation Evaluation Method- SaMSEM*) prema postavci ispitivanja predstavljenog u radu Bramao i ostalih (2012). Posmatračima je prvo prikazana test slika centrirana na ekranu u originalnoj ili simuliranoj verziji, a zatim su, nakon kratke neutralizacije ekrana, prikazane obe verzije simultano. Od korisnika se tražilo da pritisnu levu ili desnu strelicu na tastaturi prema tome da li misle da je test slika sada locirana levo ili desno, a program je čuvao vreme odziva u [ms] i tačnost odgovora kao *boolean* tip podatka. Polazi se od pretpostavke da će PVB korisnici imati problema da uoče razliku između originalne i simulirane verzije slike - reagovaće sporije (veće vreme odziva) i praviće više grešaka (niska tačnost) u detekciji tačne slike u poređenju sa kontrolnom grupom posmatrača sa normalnom percepcijom boja. Testirane su samo dihromatske simulacije (protanopije i deuteranopije) dobijene primenom četiri različita metoda simulacije: originalni Bretel-Vienot-Molon metod (1997), pojednostavljen metod istih autora (Vienot et al. 1999), Koterin metod simulacije (2011) i referentni metod koji je pretvarao slike u monohromatske, na 44 različita motiva. Fokus eksperimenta nije bio poređenje različitih metoda simulacije, već provera adekvatnosti definisanog metodološkog okvira. Test grupu je sačinjavalo 12 ispitanika sa deutan PVB (deuteranopija ili deuteranomaliija), dva sa protan PVB (deuteranopija ili deuteranomaliija), a kontrolnu 10 ispitanika sa normalnom percepcijom boja. Prosečno vreme reakcije kontrolne grupe je bilo značajnije niže, a prosečna tačnost značajno veća u odnosu na obe PVB grupe – protansku i deutansku. Tačnost je za protanopske simulacije bila niža u protanskoj grupi nego od deutanskoj grupi i obratno, dok je vreme reakcije deutanske grupe bilo značajno više i za

deuteranopske i za protanopske simulacije. Pošto su učestvovala svega dva protanska ispitanika, ove rezultate treba uzeti sa rezervom (Liedtke et al, 2013).

## 2.4.2 Metodi evaluacije daltonizacije

Postoji značajan broj radova koji definišu određeni vid daltonizacije, ali nemaju sistematičnu i pouzdanu verifikaciju efektivnosti niti merilo koliko zavisi poboljšanje opaženog kvaliteta slike od vrste primene (vrste slike i vrste zadatka) i individualnih karakteristika poremećaja viđenja boja.

CIE TC 1-89 tehnički komitet je osnovan u cilju evaluacije poboljšanja slike za posmatrača sa defektnom percepcijom boja. Cilj osnivanja komiteta je analiza postojećih metoda poboljšanja slike, definisanje procedure testiranja ovih metoda i sugerisanje jednog ili više metoda za određenu svrhu i određenu grupu PVB korisnika (CIE TC 1-89 Report, 2015). Pojedinačni elementi relevantni za ciljeve postavljene u Izveštaju tehničkog komiteta su: odabir ispitanika, definisanje metodologije za pripremanje eksperimenata, smernice za pripremanje merne opreme i za izvođenje kvantitativne i kvalitativne analize podataka prikupljenih tokom eksperimenta.

Većina autora je testirala svoje metode daltonizacije na ograničenom broju slučajeva mahom Išiharinim tablicama. Metod se smatrao uspešnim ako daltonisti mogu da „izvuku“ tačnu informaciju tj. pročitaju broj ili simbol sa tablice nakon daltonizacije. Osim Išiharinih tablica, kao pokazni primeri su korišćene slike sa jednostavnim sadržajem, odnosno jednom crveno-zelenom problematičnom kombinacijom koja daltonizacijom treba da bude razrešena. Međutim, ne postoji ispitivanje šire primene koje je uključivalo određene problematične scenarije sa kojima se PVB korisnici susreću i slike sa kompleksnijim sadržajem.

Liedtke i ostali (2013) su predložili metodološki okvir za proveru efektivnosti algoritama daltonizacije ili proveru pristupačnosti informacija u graficima uopšte. Metod je baziran na pretpostavci da su simulacije PVB pouzdane sa namerom angažovanja osoba sa normalnom percepcijom boja kao test ispitanika (u ulozi PVB korisnika). U eksperimentu su korišćene u nasumičnom redosledu tri transportne mape u sedam verzija: 1) originalna, 2) dihromatska simulacija (Anagnostopoulos et al, 2007), 3) nakon daltonizacije (Anagnostopoulos et al, 2007), 4) dihromatska simulacija nakon daltonizacije (Anagnostopoulos et al, 2007), 5) dihromatska simulacija (Kotera, 2012), 6) nakon daltonizacije (Kotera, 2012) i 7) dihromatska simulacija nakon daltonizacije (Kotera, 2012). U ispitivanju je učestvovalo 23 posmatrača sa normalnim viđenjem boja. Korisnici su imali zadatak da kliknu što je brže moguće na odgovarajuću

transportnu liniju unutar mape obojenu kao traženi uzorak boja. Kada je tačna linija odabrana, program nastavlja na sledeći zadatak sa sledećom traženom boju, a vreme potrebno da se nađe linija je sačuvano u bazi podataka zajedno sa tačnom lokacijom klika miša unutar mape i informacijom da li je korisnik uspeo ili nije iz prvog pokušaja da ispuni zadatak. Pokazano je da uspešnost rešavanja zadataka i varijacije u vremenu reakcije mogu biti korišćeni kao indikator dobrog/lošeg algoritma daltonizacije (Liedtke et al, 2013).

Liedtke i ostali (2015) su predložili kasnije i bihevioralni metod za analizu metoda ili komparaciju više metoda daltonizacije, koji uključuje PVB ispitanike i ima standardizovaniji protokol u odnosu na rad iz 2013. godine. Liedtke i ostali predlažu metod evaluacije daltonizacije pomoću vizuelne pretrage (engl. *Visual Search Daltonization Evaluation Method-ViSDEM*) na osnovu eksperimenta autora *Treisman* i drugih (1980). Metod se zasniva na pretpostavci da PVB korisnik treba da protumači relevantnu informaciju iz slike pouzdanije i brže nakon daltonizacije. Fokus rada nije bio ocenjivanje samih algoritama daltonizacije već prezentacija efektivnosti nove metodologije- procena sposobnosti *ViSDEM* metoda da oceni da li metod daltonizacije zaista „radi“, odnosno da li i koliko poboljšava percipirani kvalitet slike za PVB posmatrača. Test grupu je činilo 13 deutan ispitanika, a kontrolnu 10 ispitanika sa normalnim viđenjem boja. Eksperiment se sastojao iz tri koraka: 1) ispitaniku je prvo prezentovana izjava koja se adresira na boje određenih objekata na slici kao na primer: „Dres atletičara ima isti ton boje“ ili „Perje ptice ima različit ton boje od lišća u pozadini“; 2) izjava je, nakon klika ispitanika, smenjena neutralnim (sivim) ekranom sa krstićem fiksacije u centru ekrana; 3) a zatim je prikazana slika u centru ekrana sa prethodno pokazanom izjavom lociranom ispod slike. Od ispitanika se tražilo da odgovori potvrdno (pritisne levu strelicu označenu sa „slažem se“) ili odrično (pritisne desnu strelicu sa značenjem „ne slažem se“). Beležena je tačnost i vreme reakcije na zadatak. *ViSDEM* metod je testiran na sedam različitih setova slika sa motivima koji su odabrani prema kontrastu boja sa fokusom na crveno-zelenu oponentnost i koje mogu biti asocirane sa određenom izjavom u jednoj od sledeće dve forme: „Da li određeni elementi slike imaju različit ton boje?“ ili „Da li određeni elementi slike imaju isti ton boje?“. Za svaki motiv promenjene su boje kako bi se napravile različite varijante istog motiva tako da razlikovanje boja: a) ne bude problematično ni za koga (*DN- Difficult for Nobody*), b) bude problematično samo za PVB posmatrača (*DC- Difficult for Colour-deficient observes*) ili 3) bude teško za sve (*DE- Difficult for Everybody*). Očekivalo se da će PVB posmatrači imati problema da protumače informaciju iz DC i DE varijanti slika, što je i dokazano nižim procentom tačnih odgovora u poređenju sa DN varijantom. Takođe je dokazana hipoteza da posmatrači sa regularnom percepcijom boja neće imati problema sa DC grupom motiva, pošto nije bilo



značajnih razlika u tačnosti između DC i DN varijanti, dok je vreme reakcije bilo slično u sva tri slučaja (DC; DN i DE). ViSDEM postavka je pokazala da učinak u rešavanju zadataka može biti korišćen kao indikator efektnosti metoda daltonizacije, dok vreme reakcije nije dalo statistički značajne zaključke.

## 3.0 PREDMET, PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA

Postoji značajan broj metoda razvijenih za optimizaciju kvaliteta slike koja se reprodukuje sa izvesnim ograničenjem poput ograničenog gamuta boja (mapiranje u manji gamut), ograničenog dinamičkog opsega prikaznog uređaja (npr. renderovanje HDR slika) ili ograničenog broja kanala (npr. konverzija slike u boji u monohromatsku).

**Predmet istraživanja** jeste optimizacija slike kada ograničenje nije na strani načina reprodukcije već do samog posmatrača, odnosno, optimizacija opaženog kvaliteta slike od strane osoba sa poremećajima viđenja boja.

Poremećaj viđenja boja (PVB) predstavlja funkcionalni poremećaj, prevashodno uzrokovan naslednim faktorom, koji se manifestuje problemima u prepoznavanju i razlikovanju određenih kombinacija boja koje su lako uočljive od strane posmatrača sa regularnim vidom. Kako upotreba boje kao nosioca vizuelnih informacija u multimedijalnom sadržaju raste, postaje važno pitanje pristupačnosti takvih informacija za populaciju sa PVB.

**Problem istraživanja.** Pregled i analiza nedostataka prethodnih istraživanja koja definišu metode simulacije anomalnog viđenja boja i metode daltonizacije, kao i brojnost ciljne grupe (preko 200 miliona osoba sa poremećajima viđenja boja) ukazuju na aktuelnost odabranog problema istraživanja i potrebu za njegovim rešavanjem definisanjem unapređenog modela optimizacije slike za korisnike sa poremećajima viđenja boja i novim načinima implementacije takvog modela u digitalnom okruženju. Postoji još uvek otvorena potraga za optimalnim prilagođavanjem slika sa različitim sadržajem za različite vrste poremećaja viđenja boja na koje ovo istraživanje teži da odgovori.

**Cilj istraživanja.** Osnovni cilj istraživanja jeste definisanje modela optimizacije slike prilagođenog tipu i težini poremećaja viđenja boja sa svrhom korekcije boja konfuznih, problematičnih segmenata slike koje ciljni korisnici opažaju kao isto obojene uz očuvanje prirodnosti slike. Predloženi model optimizacije slike treba da prevaziđe ograničenja sadržajno-nezavisnih metoda daltonizacije, ali da zadrži računsku jednostavnost. Takođe, za razliku od postojećih sadržajno-zavisnih metoda daltonizacije optimizovanih isključivo za dihromatske poremećaje, predloženi model treba da bude prilagođen i za anomalne trihromatske PVB.

Predloženi model optimizacije slike treba da omogući prilagođavanje sadržaja slike za konkretnog korisnika sa poremećajem viđenja boja (personalizovana daltonizacija) na osnovu prethodno definisanog opsega boja te individue (personalizovane simulacije).

## 4.0 HIPOTEZE I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Na osnovu dosadašnjih eksperimentalno potvrđenih saznanja u oblasti simulacije anomalnog viđenja boja, kao i sopstvenih istraživanja, definisan je model optimizacije slike prema personalizovanom konceptu (Slika 4.1). Model čine elementi simulacije, daltonizacije i evaluacije.



Slika 4.1. Model optimizacije slike za korisnike sa PVB sa personalizovanim pristupom

Na osnovu rezultata kalibracionog testa za određivanja personalizovanog opsega boja mogu se definisati **objektivni parametri**: *tip poremećaja* (da li je L, M ili S tip čepića odsutan ili disfunkcionalan) od kojeg zavise pravci linija konfuzija i *stepen (težina) poremećaja* od kojeg zavise veličine diskriminacionih elipsi duž pripadajućih linija konfuzija.

Na osnovu evaluacije rezultata daltonizacije mogu se definisati vrednosti **subjektivnih parametara**: težinskih koeficijenata, koji omogućavaju balansiranje između redukcije prirodnosti originalnih slika i povećanja hromatskog kontrasta. Veće oblasti dozvoljenog premeštanja boja daju veće razlike između inicijalnih i krajnjih boja, odnosno veću redukciju prirodnosti slike.

Obezbeđujući tip i stepen PVB i preferirani balans između povećanja kontrasta i očuvanja prirodnosti kao ulazne parametre, metod može biti prilagođen za specifičnu individuu sa PVB.

## 4.1 HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Postavljene su sledeće pojedinačne hipoteze:

### I Simulacija

- *H1: Predložena simulacija omogućava egzaktniji uvid u percepciju korisnika sa PVB u poređenju sa dihromatskom simulacijom.*

### II Daltonizacija

- *H2: Simulacije slika modifikovanih predloženom daltonizacijom imaju veći opseg boja i hromatski diverzitet u odnosu na simulacije originalnih slika za korisnike sa različitim težinama PVB.*
- *H3: Korisnici sa različitim težinama PVB će tačnije i brže pronalaziti informacije u boji na slici nakon predložene daltonizacije u odnosu na pronalaženje istih informacija na originalnoj slici.*
- *H4: Korisnici sa različitim težinama PVB će preferirati sliku nakon predložene daltonizacije u odnosu na originalnu.*
- *H5: Korisnici sa anomalnim trihromatskim PVB će oceniti verziju slike prirodne scene nakon predložene daltonizacije prirodnijom i sa poboljšanim percipiranim kvalitetom u poređenju sa rezultatima daltonizacije prilagođene za dihromatske poremećaje.*

### III Evaluacija

- *H6: Uspešnost i brzina pronalaženja informacije kodirane bojom su dobri indikatori za evaluaciju efektnosti daltonizacije.*
- *H7: Step (težina) poremećaja korisnika utiče na evaluaciju efektnosti daltonizacije.*
- *H8: Sadržaj slike (veštačka ili prirodna, manji ili veći opseg boja) utiče na evaluaciju efektnosti daltonizacije.*

Dokazivanje pojedinačnih hipoteza potvrđuje osnovnu sumarnu hipotezu istraživanja:

- *H: Model optimizacije slike poboljšava opaženi kvalitet slika, što se manifestuje boljom distinkcijom detalja i većim opsegom boja uz očuvanje prirodnosti opaženog sadržaja, za korisnike sa različitim tipom i težinom poremećaja viđenja boja.*

## 4.2 METOD PERSONALIZOVANE SIMULACIJE PVB

Predložena personalizovana simulacija anomalne percepcije boja ne izlazi iz okvira digitalnog okruženja i stoga se ne uzimaju u obzir boje van opsega prikaznog uređaja odnosno boje koje nije moguće reprodukovati prikaznim uređajem, a koje prosečni trihromatski posmatrač može da opazi. Polazi se od pretpostavke da je RGB opseg prikaznog uređaja ujedno i maksimalni normalni trihromatski opseg boja.

### 4.2.1 Korišćeni metodi simulacije poremećaja viđenja boja

#### Metod dihromatske simulacije Bretel-Vienot-Molon

Koraci Bretel-Vienot-Molon simulacije:

1. transformacija iz RGB (ITU-R BT.709 RGB primari) u LMS prostor boja:

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17.8824 & 43.5161 & 4.11935 \\ 3.45565 & 27.1554 & 3.86714 \\ 0.0299566 & 0.184309 & 1.46709 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{0-1} \\ G_{0-1} \\ B_{0-1} \end{bmatrix}^{2.2}; \quad (4.1)$$

2. izračunavanje nedostajućeg odziva čepića:

Originalna postavka modela Bretel-Vienot-Molon (1997) objašnjena je u Potpoglavlju 2.2.1. U kasnijem radu (Vienot et al, 1999), autori u cilju pojednostavljenja modela opravdavaju zamenu dve gamutske polu-ravni sa jednom ravni tako da se proračun nedostajućeg čepića iz Jednačine (2.2) može aproksimovati sa:

$$\begin{bmatrix} L_P \\ M_P \\ S_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000 & 2.023 & -2.526 \\ 0.000 & 1.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix};$$

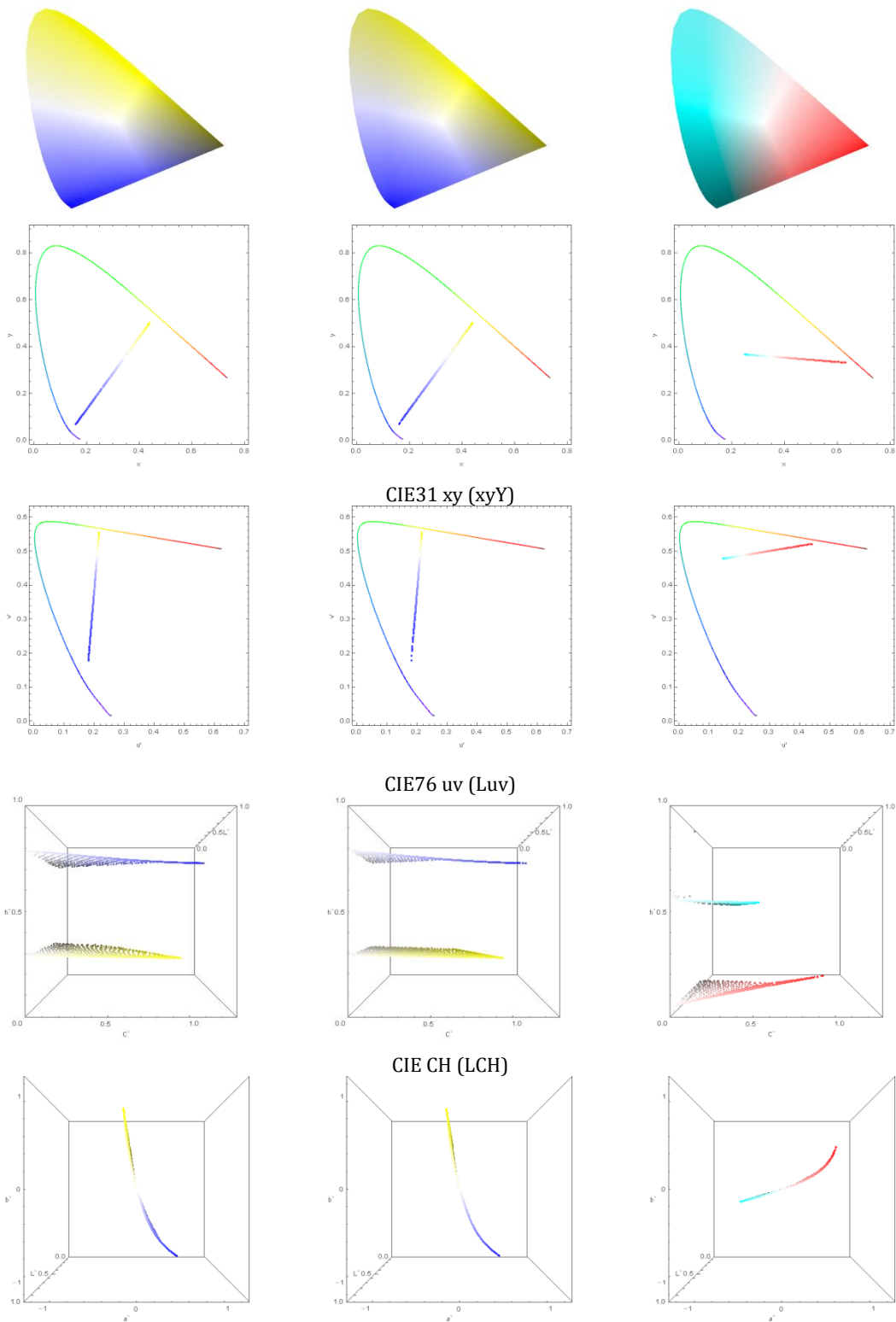
$$\begin{bmatrix} L_D \\ M_D \\ S_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.4942 & 0.000 & 1.248 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} L_T \\ M_T \\ S_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 \\ -0.0122 & 0.072 & 1.000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}$$

3. transformacija dihromatskih LMS vrednosti u RGB vrednosti:

$$\begin{bmatrix} R_{0-255} \\ G_{0-255} \\ B_{0-255} \end{bmatrix} = 255 \begin{bmatrix} 0.080944 & -0.130504 & 0.116721 \\ -0.0102485 & 0.0540194 & -0.113615 \\ -0.000365294 & -0.00412163 & 0.693513 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{PVB} \\ M_{PVB} \\ S_{PVB} \end{bmatrix}^{\frac{1}{2.2}}; \quad (4.3)$$

Slika 4.2 predstavlja rezultate dihromatske simulacije i korespondirajuće hromatske opsege.



a. protanopija

b. deuteranopija

c. tritanopija

Slika 4.2. Hromatski opseg prema Bretel-Vienot-Molon modelu za: a. protanopiju, b. deuteranopiju i c. tritanopiju

## Metod anomalne trihromatske simulacije Maçado-Oliveira

Model se bazira na (dvo)faznoj teoriji viđenja, a konverzija iz LMS prostora u prostor oponentnih kanala (WSYBRG) je preuzeta iz modela autora Ingling i Tsou (1977):

$$\begin{bmatrix} WS \\ YB \\ RG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.600 & 0.400 & 0.000 \\ 0.240 & 0.105 & 0.700 \\ 1.200 & 1.600 & 0.400 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

Simulirane RGB vrednosti dobijamo množenjem početnih RGB vrednosti i matrice  $\Phi_{PVB}$ :

$$\begin{bmatrix} R_{PVB} \\ G_{PVB} \\ B_{PVB} \end{bmatrix} = \Phi_{PVB} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Matrice za stepene poremećaja od normalnog trihromatskog do dihromatskog viđenja za sva tri tipa anomalnih trihromatskih PVB prikazane su u Tabeli 4.1. Korak promene odgovara apsolutnom pomeraju od 2 nm funkcije spektralne osetljivosti anomalnog tipa čepića i to:

- pomeraju vrha osetljivosti L čepića u pravcu kraćih talasnih dužina (-2 nm) i
- pomeraju vrha osetljivosti M i S čepića u pravcu dužih talasnih dužina (+2 nm).

Matrica simulacije za stepene poremećaja koji se nalaze između koraka mogu se dobiti interpolacijom.

Matrice iz Tabele 4.1 nisu univerzalne za sve RGB prostore, već su uređajno-zavisne i odnose se na RGB prostor tipičnog CRT monitora (Machado, 2009). U suprotnom, simulirani opseg boja bi varirao u zavisnosti od RGB okruženja, npr. boje koje bi osoba sa protanomalijom bez problema videla prema simulaciji u ProPhoto radnom prostoru bile bi izvan njenog opsega prema simulaciji u sRGB prostoru.

Tabela 4.1. Matrice simulacije anomalnih trihromatskih PVB  $\Phi_{PVB}$

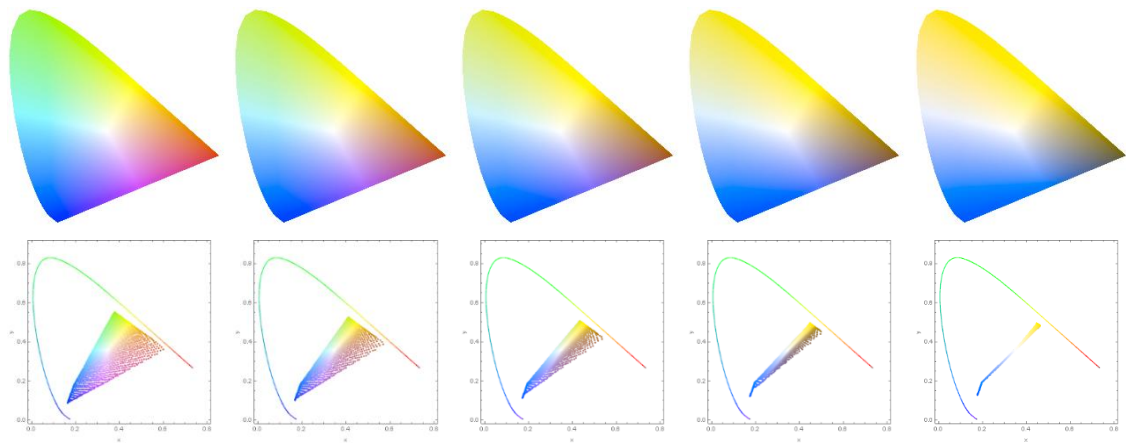
Spektralni pomeraj	Protanomalija	Deuteranomalija	Tritanomalija
2 nm	0.856167 0.182038 -0.038205	0.866435 0.177704 -0.044139	0.926670 0.092514 -0.019184
	0.029342 0.955115 0.015544	0.049567 0.939063 0.011370	0.021191 0.964503 0.014306
	-0.002880 -0.001563 1.004443	-0.003453 0.007233 0.996220	0.008437 0.054813 0.936750
4 nm	0.734766 0.334872 -0.069637	0.760729 0.319078 -0.079807	0.895720 0.133330 -0.029050
	0.051840 0.919198 0.028963	0.090568 0.889315 0.020117	0.029997 0.945400 0.024603
	-0.004928 -0.004209 1.009137	-0.006027 0.013325 0.992702	0.013027 0.104707 0.882266
6 nm	0.630323 0.465641 -0.095964	0.675425 0.433850 -0.109275	0.905871 0.127791 -0.033662
	0.069181 0.890046 0.040773	0.125303 0.847755 0.026942	0.026856 0.941251 0.031893
	-0.006308 -0.007724 1.014032	-0.007950 0.018572 0.989378	0.013410 0.148296 0.838294



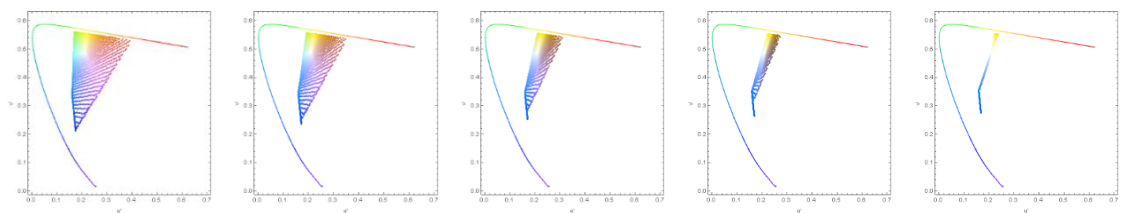
nastavak Tabele 4.1.

8 nm	0.539009 0.579343 -0.118352	0.605511 0.528560 -0.134071	0.948035 0.089490 -0.037526
	0.082546 0.866121 0.051332	0.155318 0.812366 0.032316	0.014364 0.946792 0.038844
	-0.007136 -0.011959 1.019095	-0.009376 0.023176 0.986200	0.010853 0.193991 0.795156
10 nm	0.458064 0.679578 -0.137642	0.547494 0.607765 -0.155259	1.017277 0.027029 -0.044306
	0.092785 0.846313 0.060902	0.181692 0.781742 0.036566	-0.006113 0.958479 0.047634
	-0.007494 -0.016807 1.024301	-0.010410 0.027275 0.983136	0.006379 0.248708 0.744913
12 nm	0.385450 0.769005 -0.154455	0.498864 0.674741 -0.173604	1.104996 -0.046633 -0.058363
	0.100526 0.829802 0.069673	0.205199 0.754872 0.039929	-0.032137 0.971635 0.060503
	-0.007442 -0.022190 1.029632	-0.011131 0.030969 0.980162	0.001336 0.317922 0.680742
14 nm	0.319627 0.849633 -0.169261	0.457771 0.731899 -0.189670	1.193214 -0.109812 -0.083402
	0.106241 0.815969 0.077790	0.226409 0.731012 0.042579	-0.058496 0.979410 0.079086
	-0.007025 -0.028051 1.035076	-0.011595 0.034333 0.977261	-0.002346 0.403492 0.598854
16 nm	0.259411 0.923008 -0.182420	0.422823 0.781057 -0.203881	1.257728 -0.139648 -0.118081
	0.110296 0.804340 0.085364	0.245752 0.709602 0.044646	-0.078003 0.975409 0.102594
	-0.006276 -0.034346 1.040622	-0.011843 0.037423 0.974421	-0.003316 0.501214 0.502102
18 nm	0.203876 0.990338 -0.194214	0.392952 0.823610 -0.216562	1.278864 -0.125333 -0.153531
	0.112975 0.794542 0.092483	0.263559 0.690210 0.046232	-0.084748 0.957674 0.127074
	-0.005222 -0.041043 1.046265	-0.011910 0.040281 0.971630	-0.000989 0.601151 0.399838
20 nm	0.152286 1.052583 -0.204868	0.367322 0.860646 -0.227968	1.255528 -0.076749 -0.178779
	0.114503 0.786281 0.099216	0.280085 0.672501 0.047413	-0.078411 0.930809 0.147602
	-0.003882 -0.048116 1.051998	-0.011820 0.042940 0.968881	0.004733 0.691367 0.303900

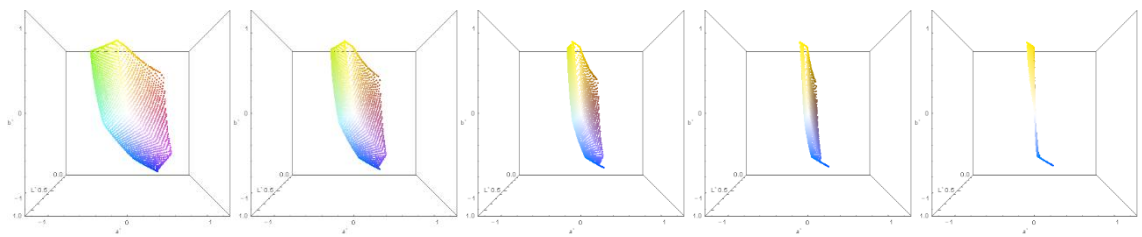
Slike 4.3, 4.4 i 4.5 predstavljaju rezultate protanomalske, deuteranomalske i tritanomalske simulacije, respektivno, kao i korespondirajuće opsege u različitim hromatskim ravnima.



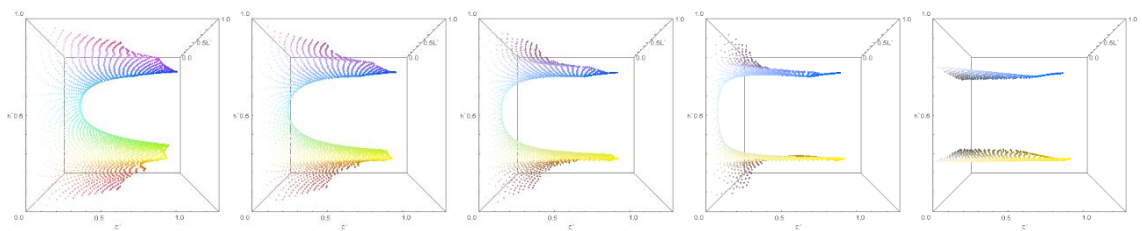
CIE31 xy (xyY)



CIE76 uv (Luv)



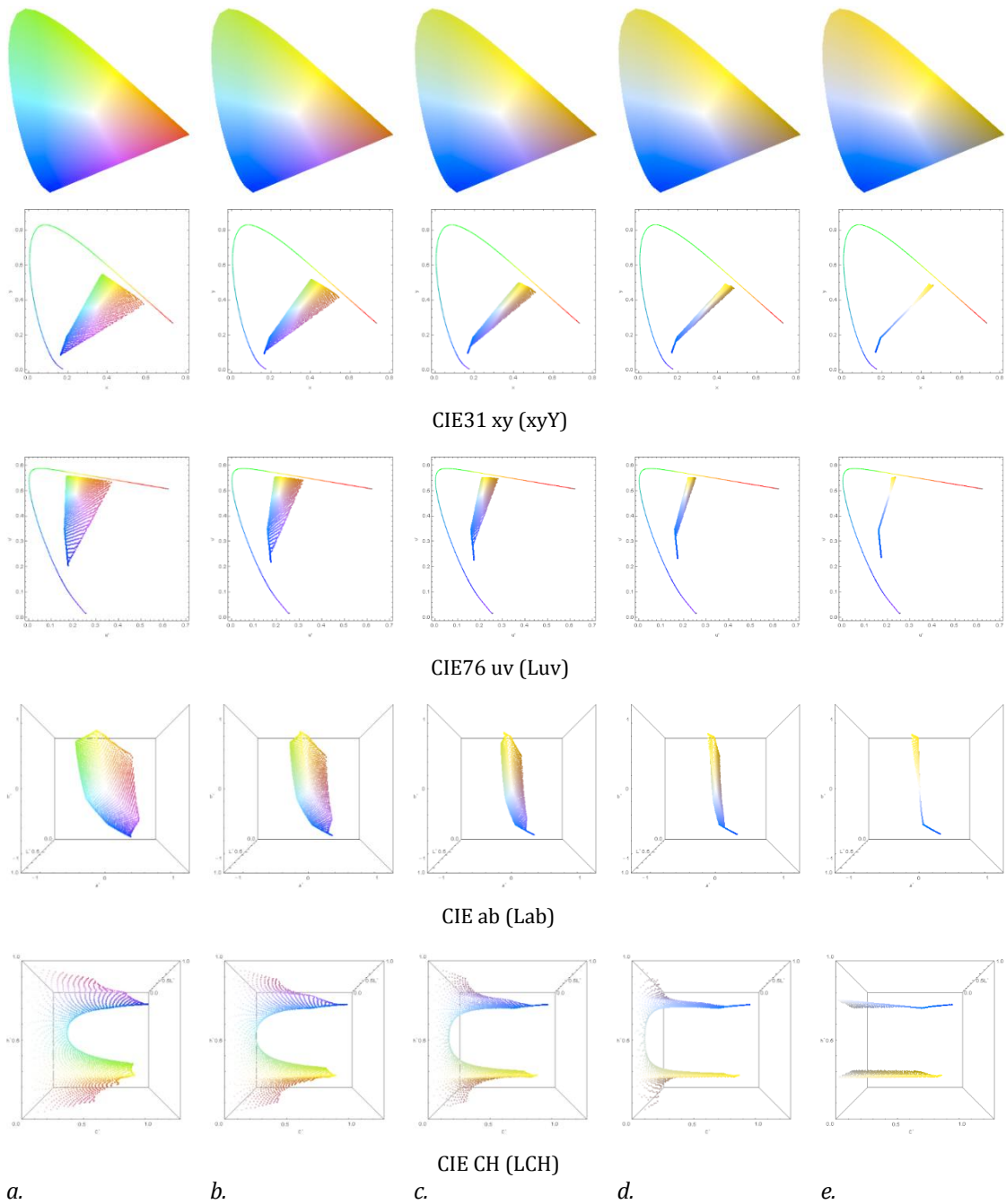
CIE ab (Lab)



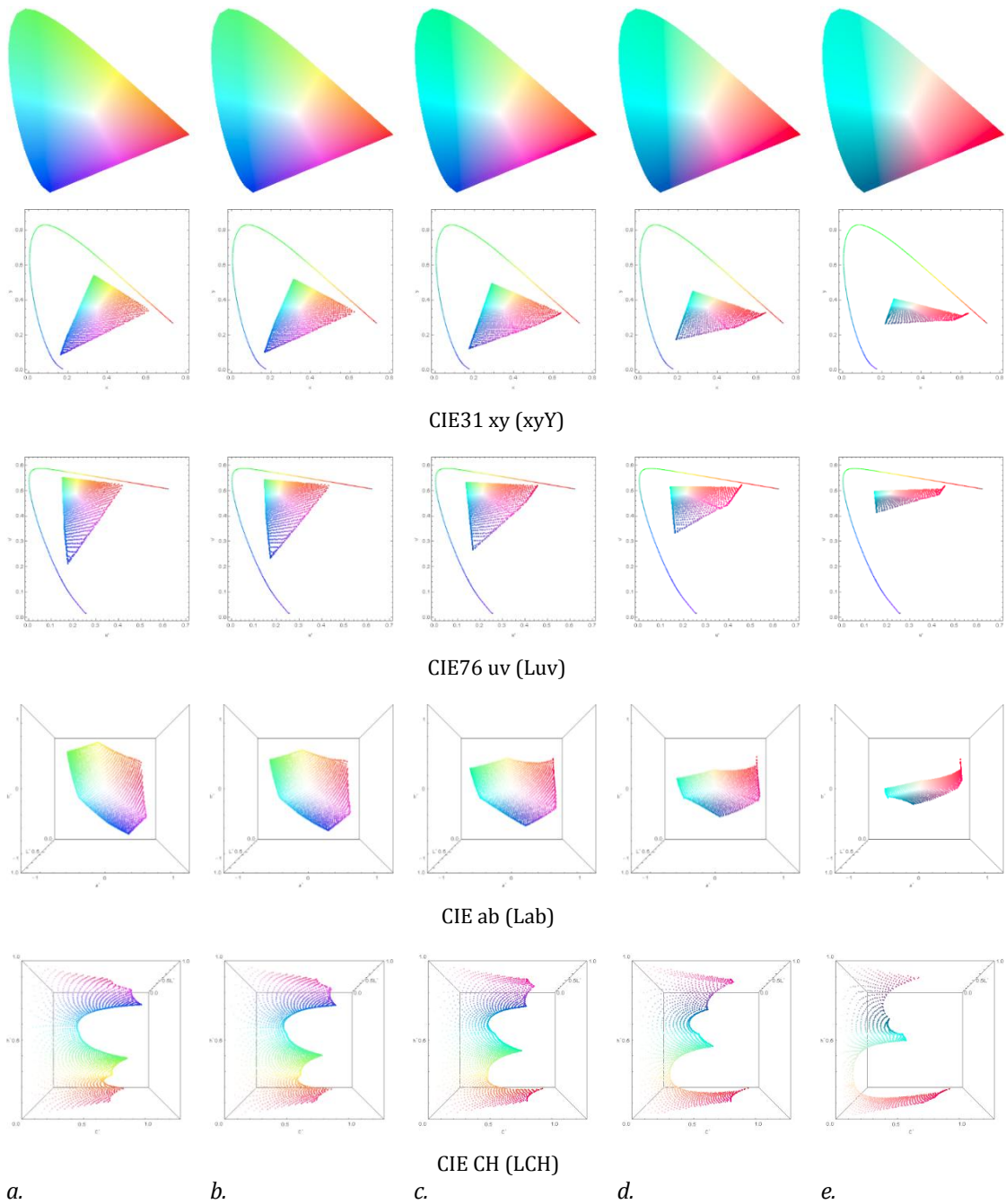
CIE CH (LCH)

*a.*                      *b.*                      *c.*                      *d.*                      *e.*

Slika 4.3. Hromatski opseg prema Maçado-Oliveira modelu za protanomaliiju sa pomerajem L čepića od: *a.* 4 nm, *b.* 8 nm, *c.* 12 nm, *d.* 16 nm i *e.* 20 nm



Slika 4.4. Hromatski opseg prema Mačado-Oliveira modelu za deuteranomaliju sa pomerajem  $M$  čepića od: a. 4 nm, b. 8 nm, c. 12 nm, d. 16 nm i e. 20 nm



Slika 4.5. Hromatski opseg prema Mačado-Oliveira modelu za tritanomaliju sa pomerajem  $S$  čepića od: a. 4 nm, b. 8 nm, c. 12 nm, d. 16 nm i e. 20 nm

**Analiza rezultata.** Poređenjem dihromatskih (Slika 4.2) i anomalnih trihromatskih opsega (Slike 4.3-4.5) uočava se da je teži slučaj protanomalijske sa spektralnim L-pomerajem od približno 20 nm, prema Maçado-Oliveira modelu, veoma sličan percepciji protanopije prema Bretelovom metodu (Machado, 2009), pošto se funkcija osetljivosti anomalnih čepića u tom slučaju gotovo potpuno preklapa sa funkcijom regularnih M čepića (Sharpe et al, 1999). Isto važi i za deuteranomalijsku, dok u slučaju tritanomalijske pomeraj spektralne funkcije S čepića od 20 nm i dalje nije blizu podudaranja sa funkcijom M čepića, odnosno i dalje je karakterističnije trodimenzioni opseg boja.

Analizom simulacija različitih stepena protanomalijske, deuteranomalijske i tritanomalijske (Slike 4.3-4.5) možemo videti da se redukcija mogućnosti diskriminacije boja odvija uniformno i konzistentno - opseg boja se postepeno smanjuje sa povećanjem pomeraja spektralne osetljivosti. Na hromatskom dijagramu (CIE1931 xy i CIE1976 uv) opažaju se, u slučaju protanomalijske i deuteranomalijske, gradijentni pomeraji R i G primara ka invarijantnom monohromatskom stimulusu od 575 nm, dok B primar ostaje na približno istom mestu ( $\approx 475$ nm). CH hromatske ravni pokazuju izdvajanje dva nepromenljiva stimulusa kao dominantnih tonova. U slučaju pomeraja spektralne osetljivosti anomalnih čepića od 20 nm, R i G primari se nalaze na istoj poziciji u dijagramu hromatičnosti, ali imaju različitu vrednost svetline.

U slučaju tritanomalijske, B i G primari se približavaju poziciji invarijantnog tritanopskog stimulusa ( $\approx 485$ nm) sa rastom stepena poremećaja usled pomeraja osetljivosti S-tipa čepića ka funkciji M-tipa čepića, dok R primar ostaje približno fiksiran ( $\approx 660$ nm).

**Ograničenja.** Većina dostupnih softverskih alata simulira isključivo dihromatsku percepciju koja za anomalne trihromatske poremećaje predstavlja prekomernu redukciju opsega boja, pa čak i ekstremnu ako je u pitanju blaži poremećaj.

Aktuelni Maçado-Oliveira model vizuelizacije omogućava simulaciju gradijentnog prelaska iz normalnog trihromatskog opažanja boja u dihromatsko za sva tri tipa poremećaja (protan, deutan i tritan). Ovakva simulacija zahteva unapred poznavanje u kojoj meri je anomalnom tipu čepića izmenjena spektralna osetljivost. Međutim, PVB korisnici su generalno svesni postojanja poremećaja, ali ga ne poznaju - u velikom broju slučajeva nije utvrđeno ni da li je u pitanju protan ili deutan tip poremećaja, već se svrstavaju u zajedničku kategoriju crveno-zelenih poremećaja viđenja boja. Čak i ako postoji potvrda tipa PVB, daltonisti najčešće ne znaju niti su u stanju da ocene stepen tj.

„težinu“ svog poremećaja. Iznos pomeraja spektralne funkcije čepića nije moguće odrediti iz standardnih testova provere viđenja boja i ostale medicinske dijagnostike.

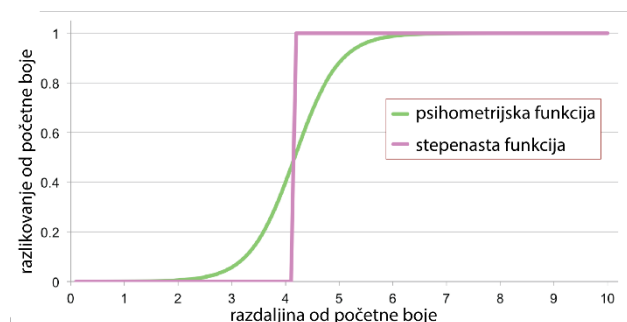
Ova ograničenja znače da, iako aktuelne simulacije mogu da obezbede grubu procenu vrste problema sa kojima se suočavaju osobe sa PVB, specifično opazajno iskustvo određene individue je i dalje teško spoznati.

## 4.2.2 Koncept personalizovane simulacije

Koncept personalizovane simulacije se zasniva na analizi eksperimentalno potvrđenih Bretel-Vienot-Molon metoda dihromatske simulacije i Maçado-Oliveira metoda anomalne trihromatske simulacije. Predloženi metod koristi udruženo benefite empirijski potvrđenih simulacija i dijagnostike pomoću izohromatskih tablica za određivanje pozicije RGB primara za svakog PVB korisnika individualno.

Ako posmatramo prostore boja kao fizičke prostore u kojima svaka boja okupira jedinstvenu lokaciju, udaljavanjem, po bilo kojoj putanji, od neke određene boje nailaziće se na rastuće različite boje i izvesno će se na kraju dosegnuti do tačke (boje) koja je raspoznavljiva u odnosu na početnu, referentnu boju (Mollon & Regan, 2000). Ova tranzicija iz „neraspoznavajući“ stimulusi u „raspoznavajući“ predstavlja psihometrijsku funkciju koja može biti opisana matematički pomoću sigmoidalne funkcije (Flata & Gutwin, 2011).

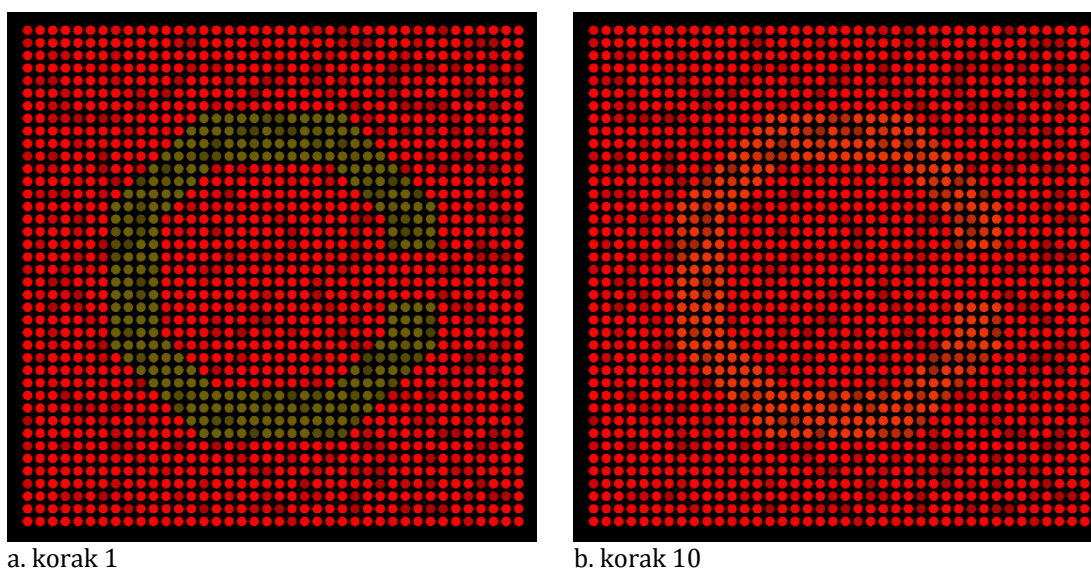
Zbog jednostavnosti, mnogi modeli aproksimiraju psihometrijsku funkciju stepenastom funkcijom koja prelazi iz stanja „neraspoznavajuće“ u stanje „raspoznavajuće“ u jednom jedinom koraku (Slika 4.6). Kada se odaberu putanje u pravcu sve tri ose prostora boja, onda tačke tranzicije - **diskriminacione granice** mogu biti korišćene za definisanje volumena - **diskriminacionog elipsoida** oko početne boje (Flata & Gutwin, 2011).



Slika 4.6. Aproksimacija normalizovane psihometrijske sigmoidalne funkcije jednostavnom stepenastom funkcijom (Flata & Gutwin, 2011)

**Tablice.** CIE Lu'v' prostor boja je izabran kao okruženje za određivanje personalizovanog opsega boja zbog svoje perceptualne uniformnosti - jednake razdaljine u prostoru korespondiraju dovoljno dobro sa jednakim perceptualnim razlikama i zbog toga je dobar alat za proračun pragova diskriminacije (Mollon & Regan, 2000). Za proceduru su korišćene izohromatske tablice izgleda kao na Slici 4.7. Veličina tablice iznosi 400x400 piksela sa veličinom pojedinačnog elementa - kružnice 8x8 piksela. U šablonu od 40x40 tačaka umetnuto je slovo C čiji je otvor usmeren nasumično ka jednoj od četiri strane- gore, dole, levo ili desno. Posmatrač koji razlikuje boje biće u stanju da odgovori u kom je pravcu orjentisano slovo C.

Da bi se izbegao efekat kontrasta svetline, nasumični patern promene svetline je primenjen na kompletnu tablicu: pozadinu i metu. Boje pojedinačnih kružnica imaju identičnu hromatičnost (uv koordinate) dok vrednost svetline može varirati do +/-10% od početne. Crni prostor između pojedinačnih kružnih elemenata takođe redukuje efekat kontrasta svetline.



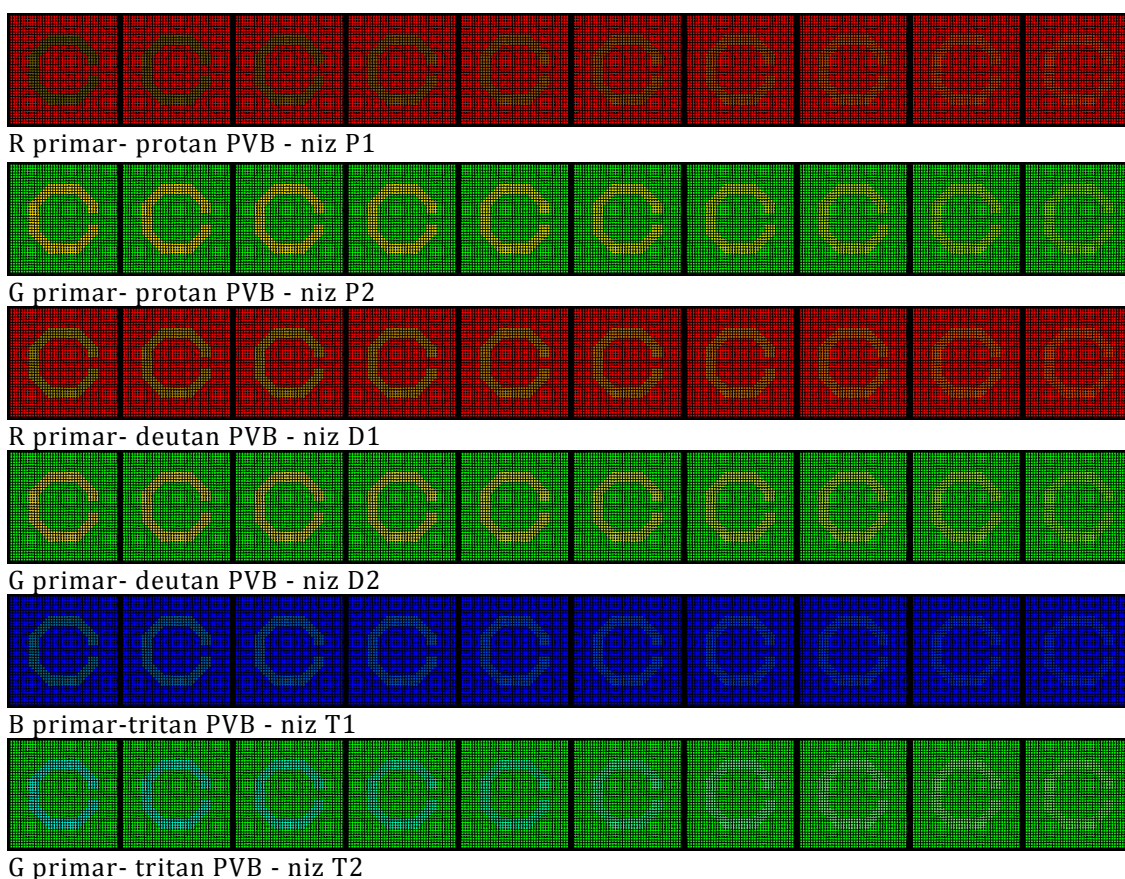
*Slika 4.7. Izgled tablice za procenu individualnog PVB: izgled tablice za određivanje individualne pozicije R primara na protanopskoj liniji konfuzije u: a. početnom koraku i b. poslednjem koraku*

Postoji šest nizova tablica prikazanih na Slici 4.8: nizovi R i G primara za dijagnostiku protan i deutan poremećaja, i nizovi G i B primara za tritan poremećaj. Tablice u razmeri 1:2 su predstavljene u Prilogu P.1. Pozadinska boja je jedan od primara, a boje mete C su anomalne trihromatske verzije primara duž linije konfuzije koja sadrži primarnu boju. U prvom koraku boja mete C je dihromatska verzija primara. Svakom narednom tablicom

smanjuje se pomeraj primara za korak 1/10 razdaljine između trihromatskog i dihromatskog primara- ukupno 10 tablica.

Uspešnim rešavanjem „zadatka“ odnosno opažanjem orijentacije slova C prelazi se na narednu tablicu u nizu i ta procedura se nastavlja dok korisnik ne dođe do koraka kada ne može da raspozna metu C, odnosno do trenutka kada se pronade metamer njegovog primara.

Veći broj uspešnih koraka označava blaži stepen anomalnog trihromatskog PVB i obratno. Ako korisnik naiđe na problem razlikovanja mete od pozadine već u prvom koraku to upućuje na dihromatsku kategoriju poremećaja. Suprotno tome, uspešno savladavanje svih 10 koraka podrazumeva izostanak poremećaja vezanog za tu konfuznu liniju niza tablica.



Slika 4.8. Nizovi kalibracionih tablica

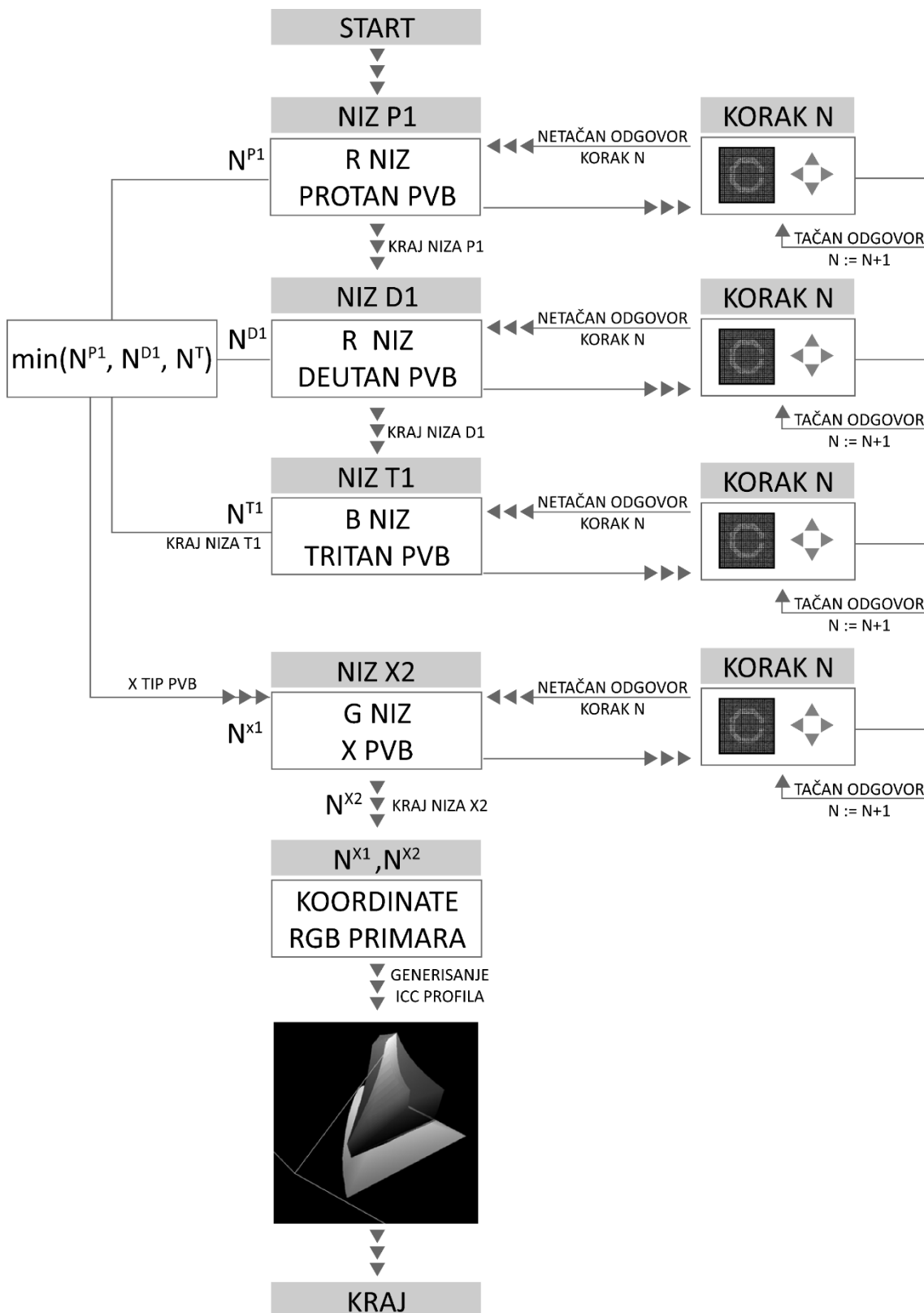
Algoritam modela personalizovane simulacije prikazan je na Slici 4.9.



**Poređenjem rezultata testiranja sa tablicama u protan i deutan R nizovima moguće je dijagnostifikovati o kom tipu poremećaja je reč - manji broj uspešno rešenih koraka tj. zadataka ukazuje na to koji tip prevladava.** Korisnik prvo rešava tablice iz R protan, R deutan i B tritan nizova. Na osnovu najlošijeg rezultata (najmanjeg broja rešenih koraka) određuje se tip PVB i koordinate prvog primara (R ili B), a zatim se rešava i G niz odgovarajućeg tipa i, shodno rezultatu, nalazi pozicija G primara. Treći primar ostaje na približno fiksnoj poziciji, sa korekcijama potrebnim za očuvanje ahromatske ose (neutralnih boja) kao što je opisano u Maçado-Oliveira modelu simulacije (Machado & Oliveira, 2009).

Prema rezultatima Maçado-Oliveira modela simulacije uobičajenih anomalnih trihromatskih PVB kada postoji izmenjena spektralna osetljivost samo jednog fotopigmenta, dovoljno je odrediti samo promenu pozicije R primara u slučaju protan i deutan poremećaja ili samo B primara u slučaju tritan poremećaja, a na osnovu tog pomeraja se mogu predvideti pozicije preostala dva primara, odnosno izračunati interpolacijom.

Utvrđene nove pozicije RGB primara mogu se koristiti za definisanje matrice konverzije početnih RGB vrednosti u simulirane i generisanje personalizovanog ICC profila.



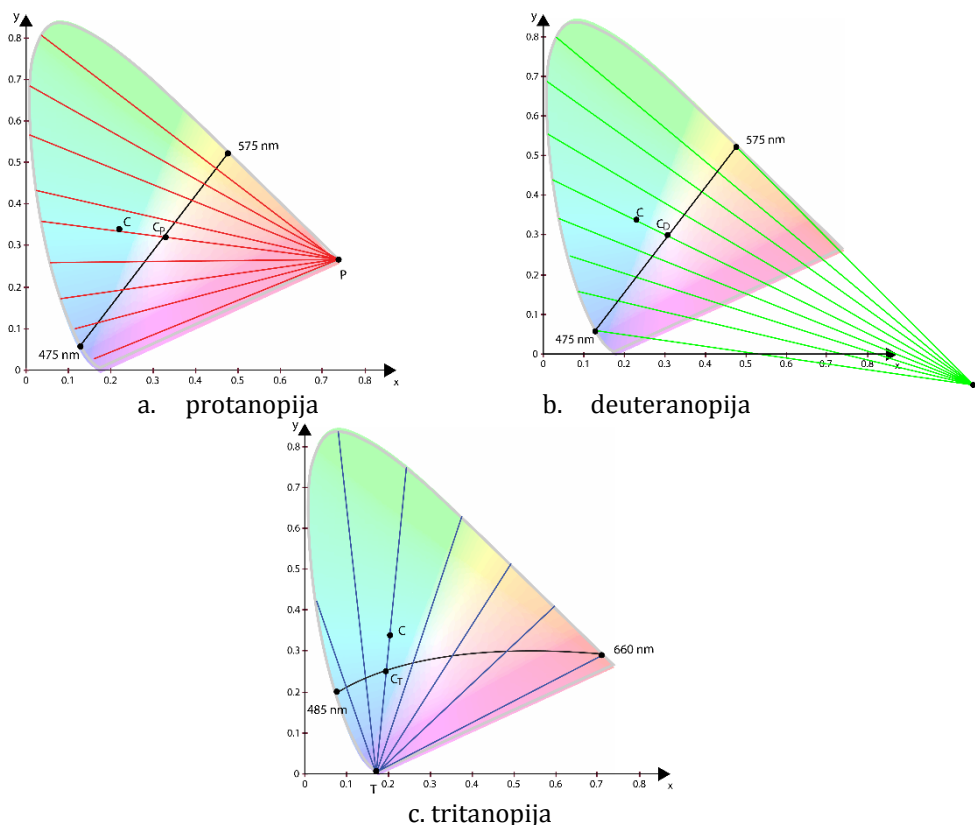
Slika 4.9. Šema određivanja diskriminacionih granica i personalizovanog opsega boja

## 4.3 METOD DALTONIZACIJE

### 4.3.1 Linije konfuzije

Kada se linije konfuzije konvertuju iz LMS prostora boja (Slika 2.11) u CIE31 xy (Slika 4.9) i CIE76 uv (Slika 4.10) hromatske dijagrame, one više nisu paralelne već konvergiraju od tačaka na obodu spektralnog lokusa ka specifičnoj sabirnoj tački (engl. *copunctal point*, *confusion point*). Tačke **P** (Slike 4.10.a-4.11.a), **D** (Slike 4.10.b-4.11.b) i **T** (Slike 4.10.c-4.11.c) predstavljaju tačke konvergencije za protanopiju, deutanopiju i tritanopiju, respektivno.

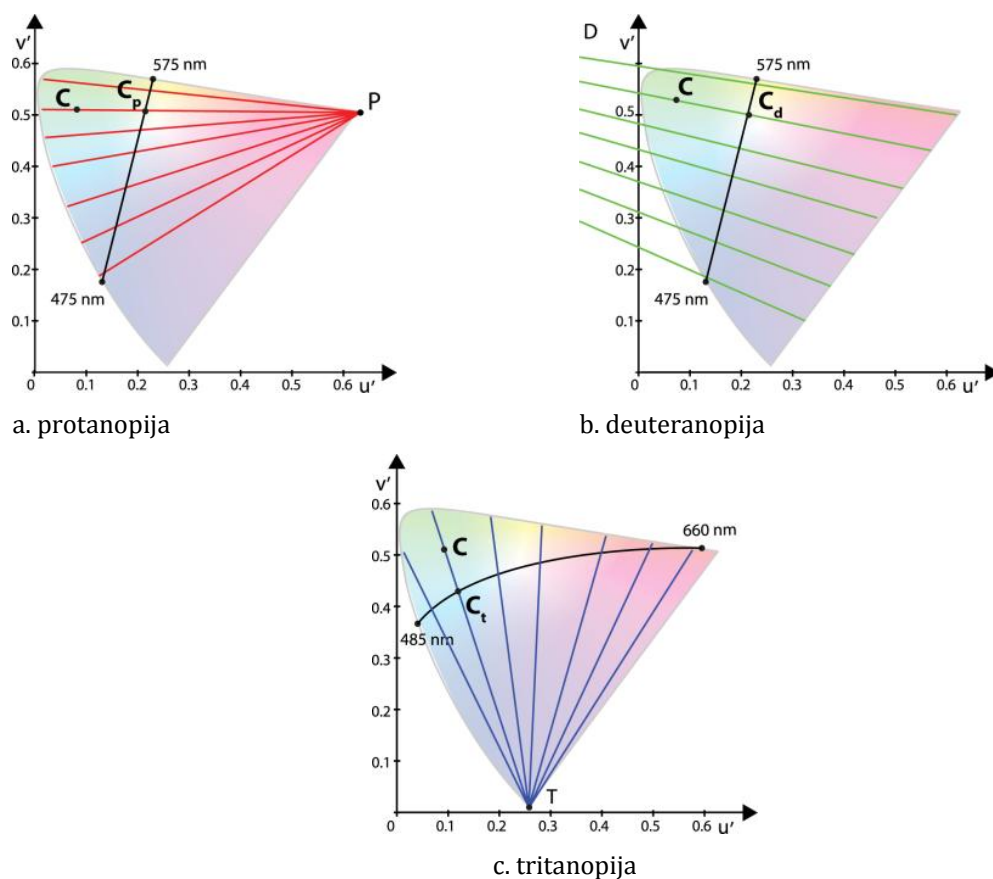
Isključujući dimenziju svetline, dihromatski hromatski gamut predstavlja liniju koja povezuje belu tačku i invarijantne monohromatske stimuluse na ivici spektralnog lokusa (475 i 575 nm za protanope i deutanope, i 485 i 660 nm za tritanope) (Byrne & Hilbert, 2009). Dva linijska segmenta od bele tačke ka monohromatskim stimulusima predstavljaju projekciju dve gamutske dihromatske poluravni (prikazanih na Slici 2.11).



Slika 4.10. Projektovanje stimulusa boje na dihromatski gamut u CIE31 xy hromatskom dijagramu. Dihromatska verzija date hromatičnosti se nalazi kao presek linije konfuzije i linije gamuta. Linije konfuzije se spajaju u specifičnoj tački konvergencije: a. protanopija  $P(0.7635, 0.2365)$ , b. deutanopija  $D(1.40, -0.40)$ , c. tritanopija  $T(0.1748, 0.00)$

Dihromatska verzija hromatičnosti  $\mathbf{C}(\mathbf{x},\mathbf{y})$  (boja koju zapravo vide dihomati) nalazi se kao presek linije konfuzije koja prolazi kroz hromatičnost  $\mathbf{C}$  i linije gamuta. Tačke  $\mathbf{C}_P$ ,  $\mathbf{C}_D$ ,  $\mathbf{C}_T$  predstavljaju protanopsku, deuteranopsku i tritanopsku verziju tačke  $\mathbf{C}$ , respektivno.

Linija konfuzije koja prolazi kroz belu tačku određuje neutralnu tačku na obodu lokusa za taj tip dihomatskog PVB (490-495 nm za protanopiju, 495-505 nm za deuteranopiju i 568-570 nm za tritanopiju) (Wyszecki & Stiles, 1982).



Slika 4.11. Projektovanje stimulusa boje na dihomatski gamut u CIE76 uv hromatskom dijagramu. Dihromatska verzija date hromatičnosti se nalazi kao presek linije konfuzije i linije gamuta. Linije konfuzije se spajaju u specifičnoj tački konvergencije: a. protanopija  $P(0.68,0.50)$ , b. deuteranopija  $D(1.22,-0.78)$ , c. tritanopija  $T(0.26,0.00)$

**Analiza.** Tačka konvergencije za protanopiju je monohromatska crvena svetlost od 700 nm (kraj vidljivog spektra) koja stimuliše isključivo L čepiće, odnosno predstavlja dovoljno blizak L-tip primara (Byrne & Hilbert, 2009). Zbog odsustva L fotopigmenta, protanopi neće razlikovati određeni spektralni stimulus (npr. 550 nm) od mešavine tog stimulusa sa svetlošću od 700 nm u bilo kom odnosu (pod uslovom da se ne menja intenzitet stimulusa). Uzimajući u obzir kako se mešavine predstavljaju na hromatskom dijagramu, linija povučena od 700 do 550 nm definiše hromatičnosti stimulusa koje će se vizuelno poklapati za protanopa- predstavljaće jednu od protanopskih linija konfuzije. Ponavljanje ove procedure za ostale spektralne svetlosti rezultira sa nizom konfuznih linija koje konvergiraju ka 700 nm. Ako dve tačke leže na istoj liniji konfuzije, biće opažene od strane protanopa kao ista boja i *vice versa* - ako dve tačke leže na različitim linijama konfuzije sa međusobnim rastojanjem većim od manje ose diskriminacione elipse, protanop će moći da ih razlikuje. Analogno se svi navedeni zaključci mogu primeniti i kod ostala dva tipa dihromazije.

Jedna od linija konfuzije prolazi kroz belu tačku i završava u spektralnoj svetlosti od 495 nm (Byrne & Hilbert, 2009) koja predstavlja protanopsku neutralnu tačku, jer je protanopi ne mogu razlikovati od neutralnog stimulusa bele.

Deuteranopi i tritanopi imaju svoje sopstvene setove linija konfuzije i neutralne tačke. Pošto svetlost od (približno) 400 nm stimuliše najviše S čepiće, a znatno manje L i M, tačka konvergencije tritanopskih linija konfuzije biće upravo svetlost ove talasne dužine (Slika 4.10.c-4.11.c).

Kako ne postoji svetlost koja stimuliše samo M čepiće, tačka konvergencije za deuteranope „leži“ izvan regiona realnih boja: ( $x \approx 1.4, y \approx -0.4$ ) u CIE31 dijagramu ili ( $u' \approx -1.22, v' \approx -0.78$ ) u CIE76 dijagramu, odnosno M-tip primara je „imaginaran“ (Slika 4.10.b-4.11.b). Neutralna tačka deuteranopa je neznatno bliža zelenom delu od neutralne tačke protanopa ( $\approx 500$  nm) (Byrne & Hilbert, 2009) (Slika 4.10.b-4.11.b).

### 4.3.2 Diskriminacione elipse

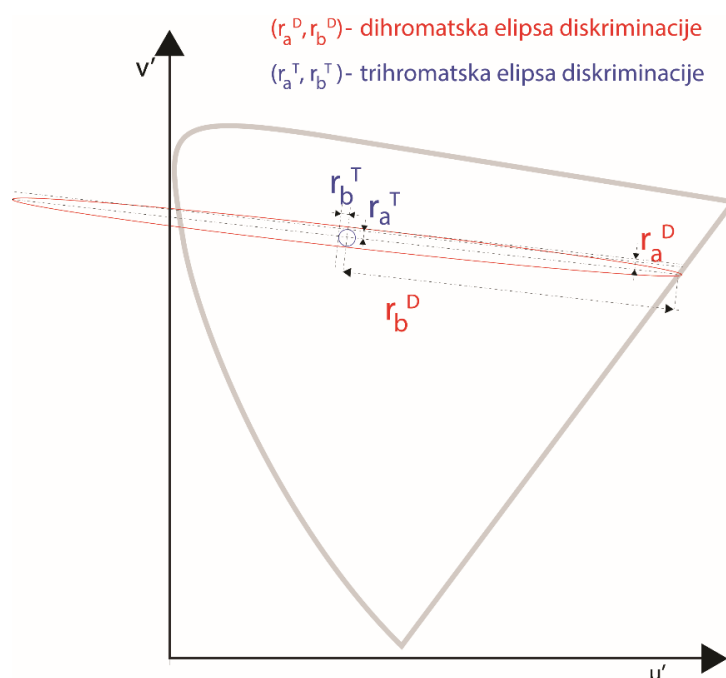
Kako ljudski vizuelni mehanizam ima ograničenu preciznost, oko svake boje na hromatskim dijagramu postoji regija, **MekAdamova elipsa**, koja obuhvata sve susedne boje koje se ne razlikuju međusobno na određenom nivou svetline (MacAdam, 1942). MekAdamove elipsa daje podatke o **jedva primetnim razlikama boje** (engl. *just-noticeable-differences*) odnosno najmanjim razlikama u boji potrebnim da ljudsko oko napravi diskriminaciju između dva stimulusa (Mochizuki et al, 2008). Ova razlika je definisana kao „prag boje“ - boje unutar praga se ne razlikuju od centralne, a boje izvan praga su različite.

Dok u CIE xy dijagramu veličina i orijentacija diskriminacionih elipsi variraju znatno u zavisnosti od pozicije boje koja predstavlja centar elipse, u perceptualno-uniformnom CIE uv dijagramu elipse normalnog razlikovanja boja postaju približno kružne (Mollon & Regan, 2000; Sharma, 2003), odnosno sferne ako se uključi i dimenzija svetline.

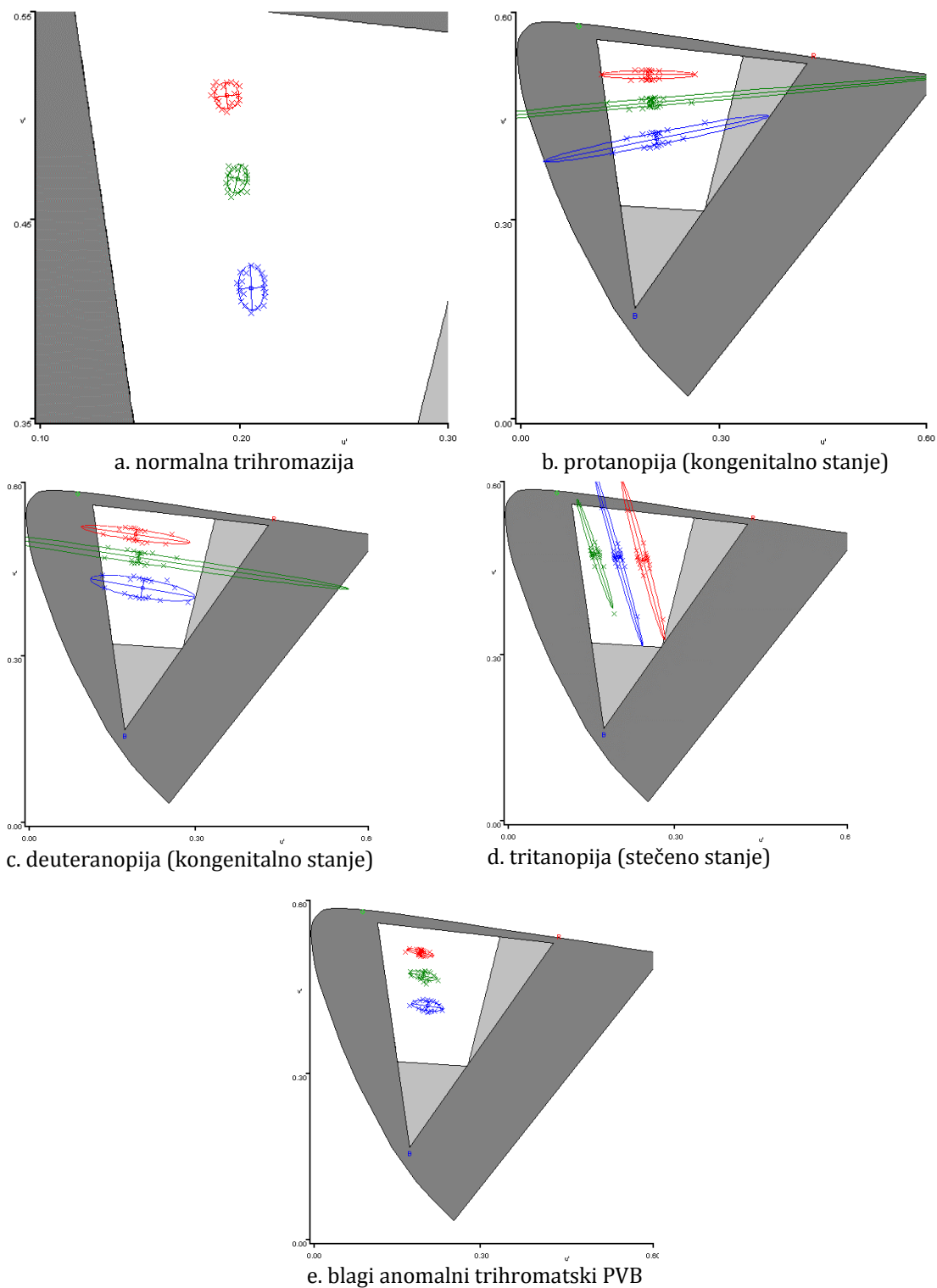
Objektivno mereni pragovi diskriminacije daju pouzdanu reprezentaciju individualnih karakteristika percepcije boje (Mochizuki et al, 2008).

Prema eksperimentima Molona i Regana (2000), svaka linija konfuzije u CIE uv dijagramu ima svoju korespondirajuću diskriminacionu elipsu orjentisanu duž linije konfuzije što predstavlja oblast hromatičnosti koje se ne mogu diferencirati jedna od druge od strane individue sa PVB.

Slika 4.12 pokazuje primer diskriminacionih elipsi za normalno trihromatsko (sa odnosom osa  $r_a^T \approx r_b^T$ ) i za dihromatsko viđenje boja (sa odnosom osa  $r_a^D << r_b^D$ ), dok Slika 4.13 predstavlja primere eksperimentalno dobijenih diskriminacionih elipsi (Mollon & Regan, 2000). U trodimenzionom prostoru dihromatska diskriminaciona regija je zapravo elipsoid koji „izlazi“ van granica CIE Luv gamuta, a pravac duže ose je determinisan tipom poremećaja. Pošto varijacije anomalne trihromatičnosti idu od približno normalne (prosečne) trihromatičnosti pa do ozbiljno redukovane, približno dihromatske diskriminacije boja, njihove diskriminacione elipse leže između ovih ekstrema ( $r_a^T \leq r_a^{AT} \leq r_a^D$  i  $r_b^T < r_b^{AT} < r_b^D$ ) (Milić et al, 2015a). Osa  $r_b^{AT}$  može biti uzeta kao indikacija kvantitativne mere (težine) anomalnog trihromatskog poremećaja (Milić et al, 2015a).



Slika 4.12. Primer diskriminacionih elipsi za normalno trihromatsko i dihromatsko viđenje boja u CIE u'v' dijagramu hromatičnosti (Milić et al, 2015a)



Slika 4.13. Eksperimentalno merene diskriminacione elipse CIE76 uv dijagramu posmatrača sa: a. normalnom trihromatskom percepcijom, b. protanopskom percepcijom (kongenitalno stanje), c. deuteranopskom percepcijom (kongenitalno stanje), d. tritanopskom percepcijom (stečeno stanje) i e. blagim anomalnim trihromatskim poremećajem (Mollon & Regan, 2000)

Slika 4.12 pokazuje da postoje velike varijacije u percepcija boja između individua sa različitim tipom PVB (npr. Slika 4.12.b i Slika 4.12.d) i različitom težinom PVB (Slika 4.12.c i Slika 4.12.e). Slika 4.12 takođe pokazuje da diskriminacione elipse nisu iste veličine za sve pravce konfuzije.

Perales i ostali (2010) su procenili da dihromati vide manje od 1% boja koje opažaju normalni trihromati u prirodnim scenama, dok su redukcije hromatskog diverziteta 30–40% i 40–50% za prosečnog protanomala (L'- i M-funkcije su razdvojene za 10 nm) (DeMarco et al, 1992) i prosečnog deuteranomala (L- i M'-funkcije su razdvojene za 6 nm) (DeMarco et al, 1992), respektivno. Autori, takođe, procenjuju da dihromati razlikuju oko 20% od monohromatskih stimulusa u spektralnom lokusu u poređenju sa trihromatima (Perales et al, 2010).

### 4.3.3 Uslovi posmatranja

Uprkos važnosti okruženja u kojem se posmatra uzorak boje, ne postoji dovoljno publikacija o tome kako uslovi posmatranja utiču na percepciju osoba sa PVB.

Analiza slika simuliranih pod različitim uslovima viđenja otkrivaju da opadanje temperature boje iluminanta vodi ka još značajnijoj redukciji gamuta boja, i, stoga, povećanom broju boja koje se teško razlikuju (Slike 4.14 i 4.15), dok promena svetline okoline od prosečne ka tamnoj vodi boljem kontrastu slike kao i u slučaju normalnih trihromata (Slika 4.16) (Milić et al, 2014).

CIECAM02 model opažanja boja je definisan kao alat za predviđanje tačnog izgleda boja pod različitim uslovima posmatranja nakon adaptacije vizuelnog sistema na promene (Fairchild, 2005). Uzimajući u obzir inicijalne uslove posmatranja, ovaj matematički model transformiše inicijalne vrednosti boje prvo u uređajno-nezavisne XYZ tristimulusne vrednosti, a zatim u perceptualne attribute boje: *apsolutne attribute* svetline (Q), intenziteta boje (M) i tona (h) i *relativne attribute* svetline (J), hrome (C), zasićenja (s), i tona (h). Zatim se perceptualni atributi, koji su i uređajno-nezavisni i nezavisni od uslova posmatranja, inverznom transformacijom proračunavaju nazad u originalni prostor boja uzimajući u obzir finalne uslove posmatranja (Fairchild, 2005).

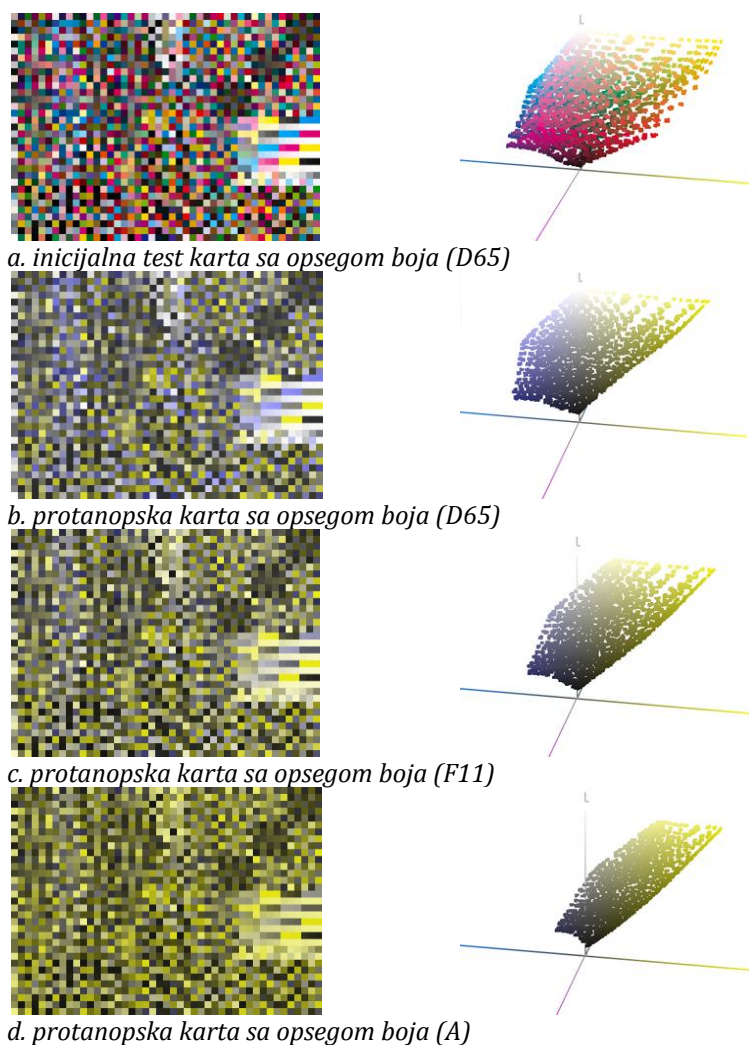
Baras i ostali (2010) su testirali konstantnost boje osoba sa dihromatskim crveno-zelenim PVB i došli su do zaključka da su protanopi i deuteranopi značajno lošiji od normalnih trihromata u rešavanju zadataka koji podrazumevaju diskriminaciju promene iluminanta od promene refleksije površine objekta. Problem sa konstantnošću boje je naglašeniji u slučaju veštačkih slika. Isti autori su prethodno izveli ispitivanje analiziranja konstantnosti boje u prirodnim scenama pod različitim iluminantima (Barras et al, 2006) sa protanomalima i deuteranomalima kao test subjektima i normalnim trihromatima kao kontrolnom grupom. Deuteranomali su se



pokazali uspješnije od protanomala dok su obe test grupe ostvarile lošije rezultate od kontrolne grupe normalnih trihromata (Barras et al, 2006).

Slika 4.15 predstavlja protanomalske i deuteranomalske verzije originalne test karte sa inicijalnim uslovima posmatranja (Milić et al, 2014) - bela tačka: D65; stepen adaptacije: automatski; svetlina pozadine  $Y_b$ : 20%, osvetljenost polja adaptacije  $L_a$ : 20 cd/m<sup>2</sup> i promenjenim iluminantom u finalnim uslovima posmatranja: F11 ili A. Kada je finalna bela tačka različita od inicijalne, CIECAM02 model izvršava hromatsku adaptaciju.

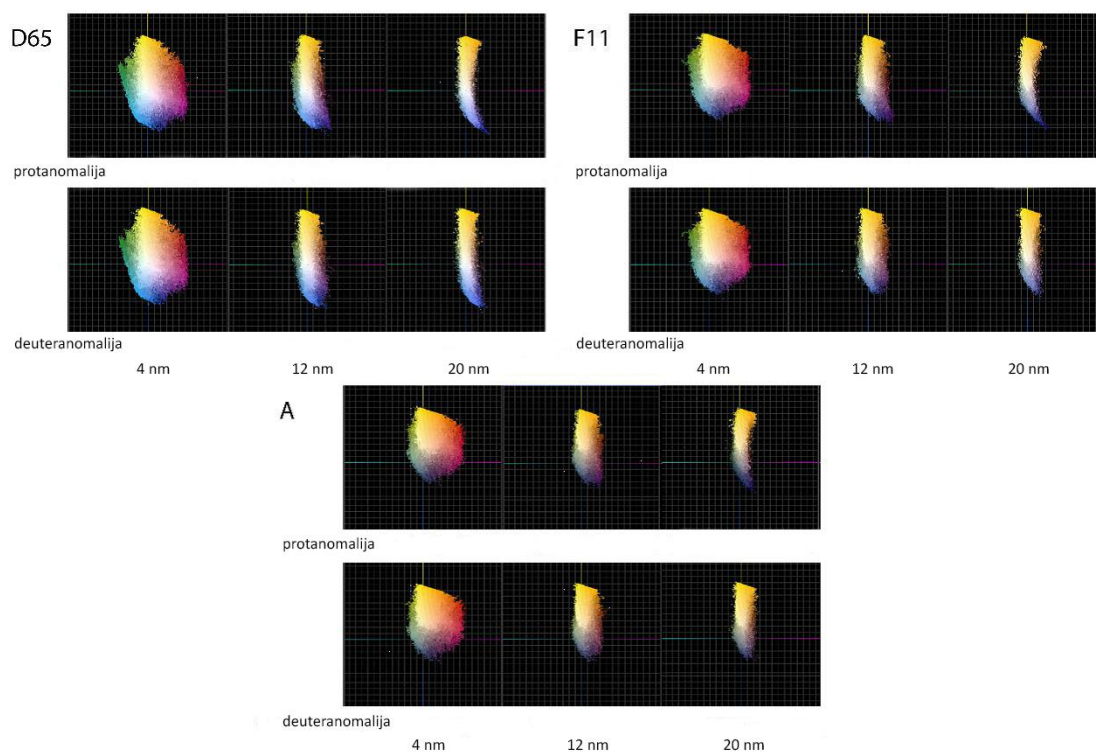
Nezavisno od PVB, porast u temperaturi boje iluminanta vodi ka pomeranju maksimuma spektralne krive reflektovane svetlosti ka plavim tonovima dok snižavanje temperature boje pomera boje posmatranih objekata ka žutim tonovima duž plavo-žutog oponentnog kanala.



Slika 4.14. Simulacija protanopske percepcije pod različitim iluminantima: a. inicijalna test karta ECI2002 Random Layout (bela tačka D65). Simulacija protanopske percepcije test karte pod iluminantima: b. D65-6500K, c. F11-4000K, i d. A-2856K (Milić et al, 2011)

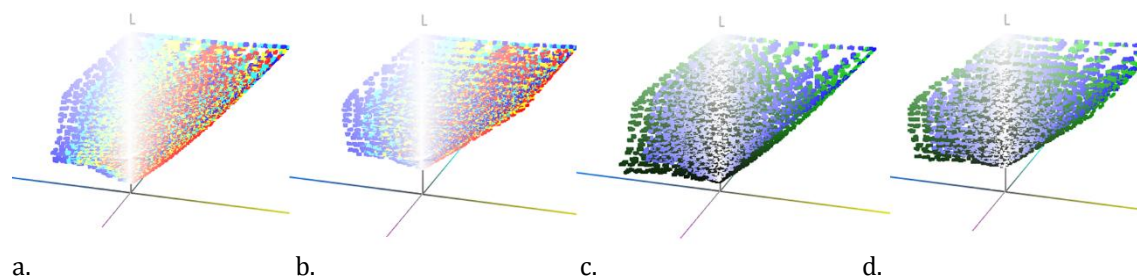
Kako individue sa crveno-zelenim PVB imaju gubitak informacije boje u crveno-zelenom oponentom kanalu i usled toga se „oslanjaju“ više na plavo-žuti kanal, promena iluminanta ima ozbiljniji uticaj na ovu populaciju u poređenju sa normalnim trihromatima i povećava broj konfuznih boja. Simulirane slike pokazuju da smanjivanje temperature boje iluminanta vodi ka redukciji u plavom delu opsega boja, odnosno vodi ka redukciji hromatskog diverziteta što se može uočiti u a-b hromatskoj ravni na Slici 4.15.

Redukcija u žutom delu gamutske ravni je očekivana sa neumerenim porastom temperature boje, ali se ta situacija nije detaljnije razmatrala zbog činjenice da su iluminanti sa izuzetno visokim temperaturama boje (>7000K) retko korišćeni u realnim uslovima. Analiza profila dobijenih iz simuliranih ECI test karti pokazuju da snižavanje temperature boje iluminanta na sličan način utiče na protanomale i deuteranomale, iako je gamut deuteranomala neznatno veći od protanomalskog nakon promene bele tačke iz D65 u F11 i A (Milić et al, 2014) (Slika 4.15).



Slika 4.15. Promena hromatskog opsega usled promene iluminanta D65 u F11 i A u slučaju protan i deutan percepcije različitog stepena (pomeraji anomalnih čepića od 4, 12 i 20 nm) predstavljena u CIE a-b ravni (hromatski diverzitet) (Milić et al, 2014)

Slike 4.16 pokazuje da CIECAM02 model predviđa da će promena okruženja posmatranja sa prosečno svetlog (*average*) na zamračeno (*dark*) voditi ka boljem kontrastu boja što je u skladu sa prethodnim istraživanjima (Fairchild, 2005) i odnosi se i na anomalno i normalno viđenje boja.



Slika 4.16. Uporedno poređenje opsega boja usled promene iluminanta (crvena: A, žuta: F11, plava: D65) za: a. protanopiju i b. deuteranopiju; Uporedno poređenje opsega boja usled promene svetline okruženja (plava: D65, prosečno svetlo (average); zelena: D65, tamno) za: c. protanopiju i d. deuteranopiju

### 4.3.4 Koncept daltonizacije

Predložena daltonizacija sadrži sledeće korake obrade slike prikazane na Slici 4.17:

1. **SEGMENTACIJA:** slika se segmentira na osnovu vrednosti boja piksela i definišu se centri segmenata (reprezentativne boje).

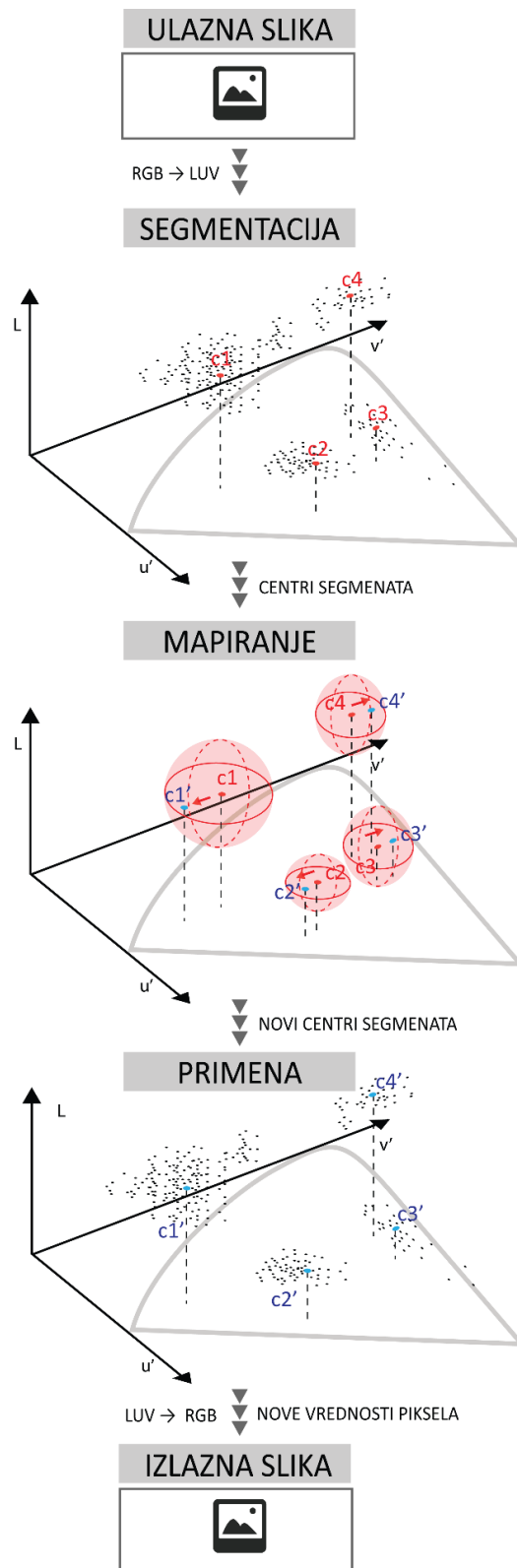
Za segmentaciju slike se koristi K-means klasterovanje bazirano na metrici Euklidove razdaljine u perceptualno uniformnom prostoru boja. K-means klasterovanje segmentira grupe piksela tako da su pikseli unutar svakog klastera što je moguće bliži jedan drugom, a što je moguće udaljeniji od piksela u ostalim klasterima (Celebi, 2014). Reprezentativni centar boje je zatim selektovan za svaki klaster uprosečavanjem svih boja u njemu. Postoje dva osnovna načina za predefinisane procedure segmentacije: (i) unapred određivanje broja segmenata i (ii) unapred određivanje rastojanja (razlike boje) između centara segmenata. Primer K-means klasterizacije slika prikazan je u Prilogu P.2. Zbog prirode adaptacije, segmentacija slike će se vršiti prema definisanom pragu u uniformno perceptualnom prostoru boja (CIE Lab/CIE LUV).

2. **MAPIRANJE:** Centri segmenata mapiraju se na nove lokacije unutar pripadajućih dozvoljenih oblasti kretanja centara.

**Cilj mapiranja jeste da svi centri segmenata budu distinktivni jedan od drugog – nove pozicije trebaju da povećaju hromatični diverzitet i distinkciju detalja slike, dok se istovremeno prezervira prirodnost slike ograničavanjem oblasti dozvoljenog premeštanja centara. Ovim se postiže balans adaptacije tako da su rezultujuće boje dovoljno različite jedna od druge, ali ne odstupaju previše od inicijalnih vrednosti.**

3. **PRIMENA:** Nove pozicije centara boje koriste se za proračun vrednosti pojedinačnih piksela slike.

Odnosi između novih vrednosti piksela u segmentu ostaju isti kao i pre premapiranja (sa izuzetkom „odsečenih“ vrednosti koje su premapirane izvan mogućeg gamuta).



Slika 4.17. Grafička prezentacija koraka predloženog metoda daltonizacije

Poboljšanje distinkcije boja može biti tipsko, težinsko i univerzalno.

**Koncept adaptacije boja prema tipu PVB** je da centri dva ili više segmenata slike koji leže na istoj liniji konfuzije treba da budu premapirani u pravcu upravnom na liniju konfuzije (rotacija oko tačke konvergencije) – „*jedan segment po jednoj liniji konfuzije*“.

*Set centara boje može biti upoređen sa hipotetičkim modelom atoma u kojem tačke  $c_i$ ,  $i=0,1,\dots,n+1$ , predstavljaju pozicije elektrona koji žele da budu odgurnuti što je više moguće jedan od drugog, ali je njihovo kretanje ograničeno individualnim intervalima.*

*Dalje možemo napraviti analogiju između linije konfuzije i hipotetičke orbitale u kojoj prisustvo više od jednog elektrona predstavlja „nedozvoljeno“ energetska stanje pri kojem suvišni elektroni (centri boja) teže da „nasele“ druge, različite orbitale (linije konfuzije) kako bi se atom učinio stabilnijim. Oblast dozvoljenog kretanja centra boje ima ulogu da, poput pravila redosleda popunjavanja hipotetičkih orbitala, spreči centar boje da „skoči“ na previše udaljenu liniju konfuzije.*

**Koncept adaptacije boja prema težini PVB** je da centri dva ili više segmenata koji leže unutar iste diskriminacione elipse treba da budu premapirani izvan granica elipse u pravcu linije konfuzije – „*jedan segment po jednoj diskriminacionoj elipsi*“. Da li će smer pomeraja biti ka tački konfuzije ili suprotan zavisi od toga gde se sporni centar boje nalazi u odnosu na dihromatsku gamutsku ravan.

**Koncept univerzalne adaptacije boja** se zasniva na klasičnom poboljšanju kontrasta korišćenjem vrednosti svetline (premeštanje centara u pravcu ose svetline) – „*jedan segment po jednom diskriminacionom elipsoidu*“.

Rezultujuće pozicije centara boje su sadržajno-zavisne - zavise od: **broja segmenata, inicijalnih pozicija centara segmenata i definisane dozvoljene oblasti mapiranja.**

## 4.4 METOD ISPITIVANJA

### 4.4.1 Metod evaluacije pouzdanosti simulacije

Svrha evaluacije jeste da pokaže da model personalizovane simulacije simulira specifičan PVB neke individue adekvatno. Zasniva se na premisi da će PVB korisnici imati poteškoća da vide razliku između originalne slike i personalizovane simulacije, kao i da će te poteškoće biti uočljivije nego u razlikovanju originalne slike i njene dihromatske simulacije.

*Hipoteza ispitivanja* je da je personalizovanom simulacijom (na osnovu kalibracionog testa) moguće preciznije odrediti opseg boja individue sa poremećajem viđenja boja u odnosu na standardnu dihromatsku simulaciju.

Metodološki okvir ispitivanja postavljen je po uzoru na bihevioralni metod evaluacije *SaMSEM* (Liedtke et al, 2015) opisan u Potpoglavlju 2.4.1. Rezultati korišćenja ove metodologije su pokazali da su PVB korisnici reagovali sporije (veća vremena reakcije) i pravili više grešaka (niska tačnost) od regularnih posmatrača u detekciji tačne slike između originalne verzije i dihromatske simulacije. Za protan PVB ispitanike su kreirane simulacije protanopske percepcije, a za deutan ispitanike simulacije deuteranopije prema Bretel-Vienot-Molon modelu.

Definisanim ispitivanjem se, za razliku od *SaMSEM* metode, porede sa originalnom slikom dve vrste simulacija: dihromatska i personalizovana.

**Opis:** Ispitanicima će biti prvo prikazana originalna slika, a nakon toga će im biti prikazane istovremeno tri verzije slike: i) originalna slika, ii) personalizovana simulacija originalne slike i iii) dihromatska simulacija originalne slike. Ispitanicima je saopšteno da je od tri verzije bar jedna identična test slici, a da su mogući slučajevi da su dve ili sve tri verzije identične.

**Mera:** Ocena sličnosti tj. vizuelnog (ne)poklapanja sa test slikom (0- ista, 1- slična, 2-manje slična)

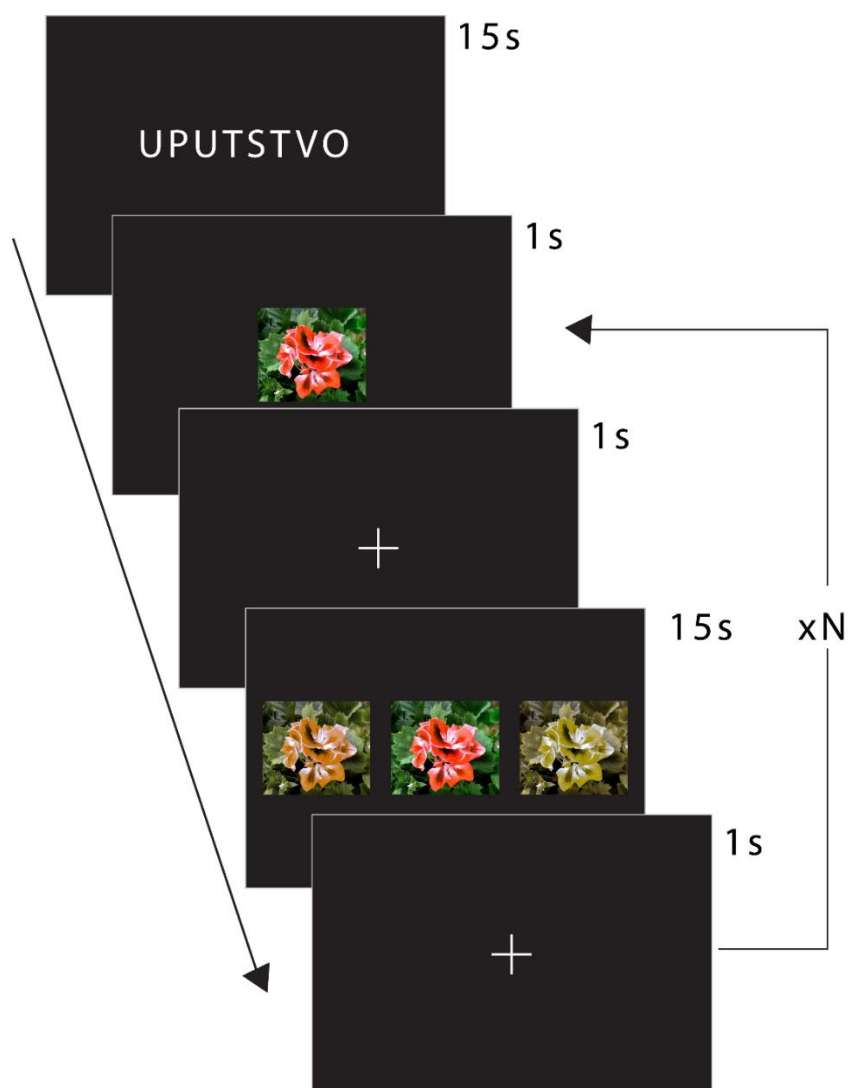
Ocene se mogu ponoviti, odnosno:

- ako korisnik ne vidi razlike između tri verzije treba da oceni sve tri sa 0: **(0,0,0)**,
- ako korisnik jednu verziju opaža identično kao test sliku, a druge dve verzije podjednako slično dodeljuje im ocene 1: **(0,1,1)**,
- ako korisnik jednu verziju opaža identično kao test sliku, a druge dve verzije mu podjednako značajno odstupaju od test slike dodeljuje im ocene 2: **(0,2,2)**,
- ako su za korisnika dve verzije iste, a treća slična ili manje slična ocene su, respektivno, **(0,0,1)** i **(0,0,2)**.

Postavka ispitivanja pouzdanosti personalizovane simulacije PVB, prikazana na Slici 4.18, ima sledeće korake:

1. posmatračima je prvo prezentovano uputstvo u trajanju od 15 sekundi;
2. u trajanju od jedne sekunde prikazana je test slika centrirana na ekranu na neutralnoj pozadini;
3. u trajanju od jedne sekunde korisniku je prikazan neutralni ekran;
4. korisniku su predstavljene zatim istovremeno i u nasumičnom rasporedu tri verzije slike: originalna i dve simulirane (jedna dobijena pomoću modela personalizovane simulacije i druga dobijena Bretel-Vienot-Molon modelom dihromatske simulacije).

Koraci 2, 3 i 4 se ponavljaju za N broj test slika (u ovom istraživanju N=18).



Slika 4.18. Postupak evaluacije personalizovane simulacije. Posmatraču je prvo prezentovana test slika u trajanju od 1s. Slika je zatim smenjena sa praznim ekranom, a nakon toga su ispitaniku istovremeno prikazane u nasumičnom rasporedu tri verzije slike (originalna slika, personalizovana simulacija i dihromatska simulacija).

## 4.4.2 Metod evaluacije efektivnosti daltonizacije

### Kvantitativna analiza računarski simuliranih slika

Za kvantitativne analize slika pre i nakon računarskih simulacija anomalnih percepcija korišćene su sledeće analize promena:

- opsega boja,
- broja različitih boja i
- broja dominantnih boja (klastera slike).

Za potrebe analize simuliranih verzija slika određeni su brojevi različitih boja u 8-bitnom RGB prostoru (16,77 miliona mogućih boja), kao i dominantne boje dobijene klasterovanjem slike sa minimalnom razlikom između centara klastera  $\Delta E=25$ . Prilikom skladištenja rezultata obrade slike, ne menjaju se veličina i format slike. Simulacije dihromatskih verzija slika dobijene su korišćenjem pojednostavljenog Bretel-Vienot-Molon metoda, dok je Maçado-Oliveira metod upotrebljen za kreiranje simulacija anomalnih trihromatskih PVB sa pomerajima spektralnih osetljivosti anomalnih čepića od 8 nm (blag poremećaj) i 12 nm (umeren poremećaj).

### Analiza poboljšanja pristupačnosti informacija u boji praćenjem pogleda

Evaluacija efektivnosti daltonizacije zasniva se na premisi da će PVB korisnici tačnije i brže protumačiti informaciju u boji u slučaju efektne daltonizacije koja će poboljšati globalnu distinkciju boja. Isto tako, očekuje se da će PVB korisnici rešavati zadatke praćenja transportnih linija metro mape na sličan način kao i normalni trihromati, odnosno da će razlike u tačnosti i vremenu reakcije između kontrolne grupe regularnih posmatrača i test grupe PVB korisnika biti manje.

Metodološki okvir ispitivanja postavljen je po uzoru na bihevioralni metod evaluacije autora Liedtke i ostalih (2013). Za razliku od navedenog „*task-based*“ metoda po kojem su regularni posmatrači u ulozi virtuelnih daltonista imali zadatak da klikom miša odaberu transportnu liniju obojenu zadatom bojom, u ovom ispitivanju učestvuju i regularni i PVB posmatrači. Takođe, koristi se *eye-tracking* oprema za dobijanje detaljnijih podataka i zadatak više odgovara scenariju iz realnog života jer liniju treba pronaći i ispratiti pogledom.



**Opis:** Zadatak ispitanika je bio da na osnovu test uzorka boje pronađu na metro mapi liniju iste boje i isprate je pogledom od jednog do drugog kraja (proizvoljno je od kog će kraja početi). Zadatak se smatrao neuspešnim u slučajevima kada je ispitanik pratio pogrešnu liniju ili ako je počeo da prati ispravnu liniju, a posle ukrštanja puteva nastavio da prati drugu liniju. Ispitanici su imali 15 sekundi za svaki zadatak. Korišćene su dve metro mape: sa pet transportnih linija (mapa Atine) i sa deset transportnih linija (mapa Madrida). U slučaju mape Madrida ispitanici su trebali da reše zadatke “nađi metro mapu” na početnoj mapi i na mapama prilagođenim pomoću četiri metoda: Chrome Daltonize, Koterinog, Mačadovog i predložene tipske daltonizacije. U slučaju mape Madrida ispitanici su trebali da reše zadatke na početnoj i mapi nakon težinske daltonizacije.

### **Mere**

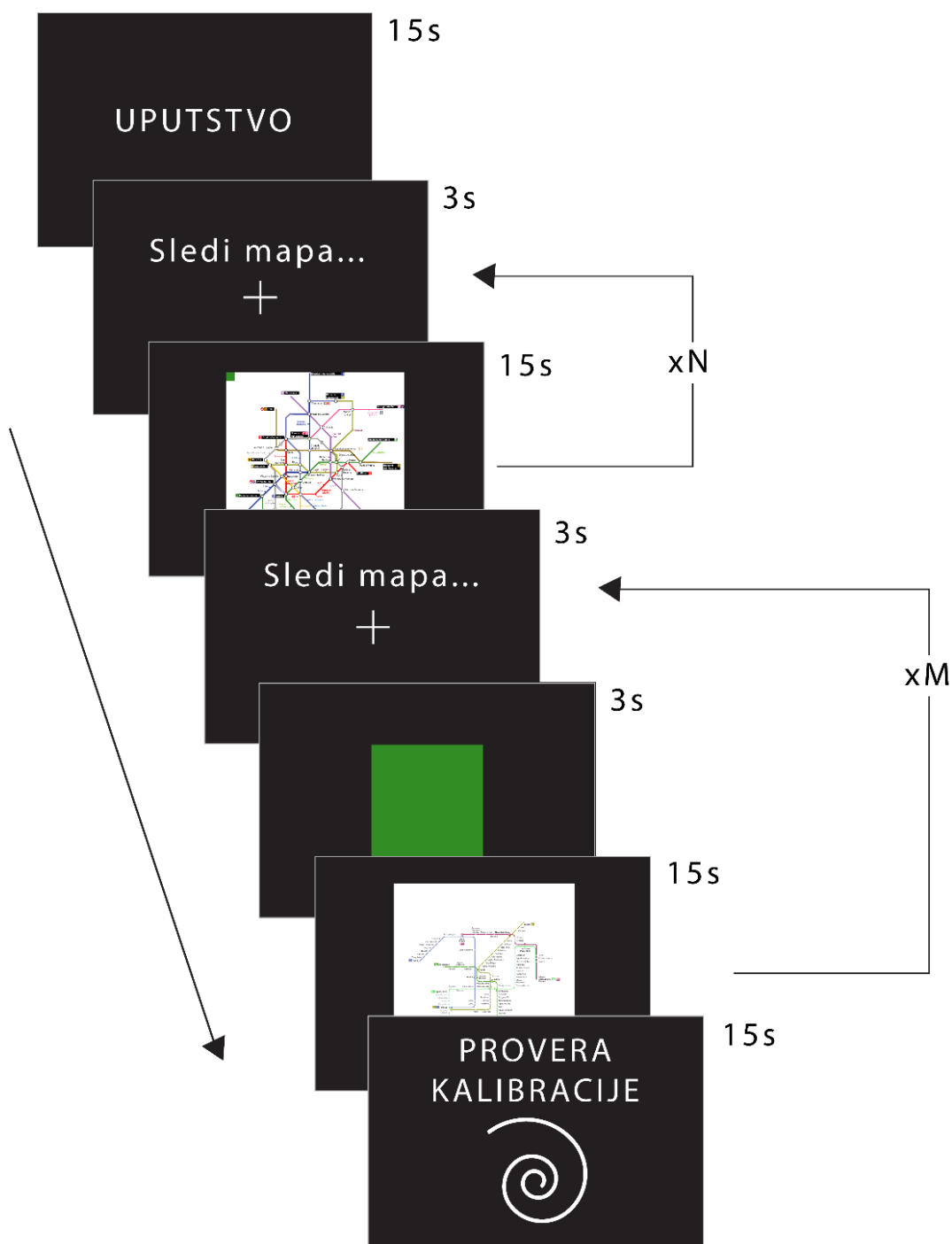
- tačnost nalaženja linije (procenat ispunjenja zadataka);
- vreme ispunjenja zadatka – završetak praćenja linije od jednog do drugog kraja;
- dodatne mere: vreme početka praćenja tačne linije i broj vraćanja pogleda na test uzorak (samo za mapu Madrida)

Postavka ispitivanja efektnosti daltonizacije, prikazana na Slici 4.19, ima sledeće korake:

1. posmatračima je prvo prezentovano uputstvo u trajanju od 15 sekundi;
2. u trajanju od tri sekunde korisniku je prikazan ekran pripreme za zadatak sa tekstom „Sledi mapa...” na neutralnoj pozadini;
3. u trajanju od 15 sekundi prikazana je test mapa centrirana na ekranu na neutralnoj pozadini;
4. u trajanju od tri sekunde korisniku je prikazan ekran pripreme za zadatak sa tekstom „Sledi mapa...” na neutralnoj pozadini;
5. u trajanju od tri sekunde ispitanici su gledali samo test uzorak boje centriran na ekranu na neutralnoj pozadini;
6. u trajanju od 15 sekundi prikazana je test mapa centrirana na ekranu na neutralnoj pozadini;
7. na kraju, u trajanju od 15 sekundi ispitanicima je prezentovana spirala sa ciljem provere ispravnosti kalibracije eye-tracking opreme.

Koraci 2 i 3 i koraci 4, 5 i 6 se ponavljaju, respektivno, za N i M broj test mapa (u ovom istraživanju N=8, a M=25). Nakon svih test mapa korisnik je imao kao poslednji zadatak da

isprati pogledom konturu spirale od spolja ka unutrašnjosti kako bi se proverila ispravnost kalibracije *eye-tracking* opreme.



Slika 4.19. Postupak ispitivanja evaluacije daltonizacije. Posmatraču je prvo prezentovano uputstvo u trajanju od 15s. Slika je zatim smenjena sa pripremnim ekranom, a nakon toga je ispitaniku u trajanju od 15s prikazana metro mapa sa test bojom u gornjem levom uglu, a njegov zadatak je bio da isprati pogledom liniju obojenu zadatom bojom. Nakon  $N$  test mapa, usledilo je  $M$  sličnih zadataka sa razlikom da je test uzorak boje bio prikazan prethodno mapi u trajanju od 3s. Poslednji zadatak je praćenje pogledom spirale u cilju provere kalibracije *eye-tracking* opreme.

## Subjektivna evaluacija uporednom analizom opaženog kvaliteta parova slika

Pored objektivnog ispitivanja efektivnosti daltonizacije korišćenjem opreme za praćenje pogleda, ispitanici su davali i svoje **subjektivne evaluacije** rezultata daltonizacije u *ispitivanju sa uparenim uzorcima test slika*. Korisnicima su prikazivane uparene dve verzije test slike koje su ocenjivali ocenama 1 ako je opaženi kvalitet obe verzije isti ili ocenama 2 i 0 ako jedna verzija ima bolji opaženi kvalitet (2) u odnosu na drugu (0).

Rezultati vizuelnog testa izražavaju se zbirnom ocenom opažanog kvaliteta verzije slika korišćenjem PC indeksa (engl. *Paired-Comparison index*) koji se računa prema sledećoj formuli:

$$\text{PC index} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{2 * n * (m - 1)} * 200 \quad (4.6)$$

gde je **n** broj ispitanika, **m** je broj uzoraka, a **v<sub>i</sub>** je vrednost data od strane posmatrača (0, 1 ili 2). PC indeks može imati vrednost od 0 do 200. Veće vrednosti PC indeksa ukazuju na bolji opaženi kvalitet slike, odnosno veće preferencije posmatrača.

## 4.4.3 Uređaji, softverski alati i ispitanici

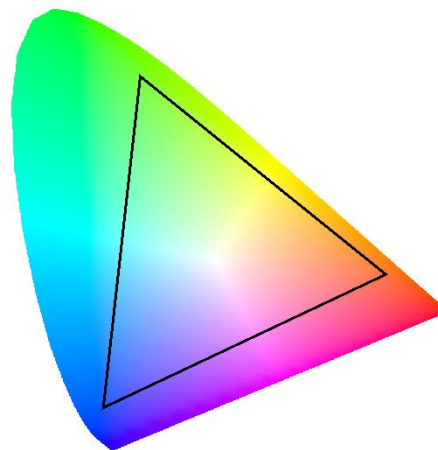
### Postavka ispitivanja

Ispitivanja su izvedena na radnoj stanici sa dva monitora u zatvorenoj zamračenoj prostoriji. U testiranju je korišćen monitor **EIZO ColorEdge CG241W** koji ima mogućnost hardverske kalibracije, dok je na drugom monitoru kontrolisan tok ispitivanja. Za karakterizaciju EIZO ColorEdge CG241W monitora korišćen je **i1Pro** spektrofotometar i **ColorNavigator** softver, a pojednosti karakterizacije monitora nalaze se u Tabeli 4.1.

Tabela 4.1 Karakterizacija monitora

Model monitora	CG241W
Model spektrofotometra	Eye-One Monitor/Pro
Vreme korišćenja monitora	1127 sati
Softver za kalibraciju	ColorNavigator 5.4.2.1

Hromatski gamut monitora



Karakteristika	Ciljna vrednost	Rezultat
Svetlina	120 cd/m <sup>2</sup>	118.90 cd/m <sup>2</sup>
Nivo crne	Minimum	0.07 cd/m <sup>2</sup>
Dinamički opseg	-	1825:1
Bela tačka	(0.313,0.329)	(0.313,0.329)
Temperatura boja	6506K	6510K
Gama vrednost crvenog kanala	2.20	2.20
Gama vrednost zelenog kanala	2.20	2.20
Gama vrednost plavog kanala	2.20	2.20
Hromatičnost crvenog primara	-	(0.654,0.328)
Hromatičnost zelenog primara	-	(0.211,0.682)
Hromatičnost plavog primara	-	(0.146,0.084)
Prioritet	Balans sive	-

## Uređaj za praćenje pogleda

Korišćen je **Gazepoint GP3** uređaj za praćenje pogleda (engl. *eye tracking*) karakteristika prikazanih u Tabeli 4.2. Hardver sistema za praćenje pogleda je jednostavan i sastoji se od dve komponente: infrared LED izvora svetlosti i infrared kamere koja sa frekvencijom od 60Hz beleži kao video sekvencu refleksiju od očiju ispitanika u infrared spektru. Kompleksniji deo sistema – softver izvlači podatke o aktivnostima oka iz snimljene sekvence i analizom podataka nam daje informacije koje oblasti slike je ispitanik gledao, kojim redosledom i koliko dugo.

Tabela 4.2. Karakteristike uređaja za praćenje pogleda

Karakteristika	Rezultat
Preciznost	0.5-1 stepen vidnog polja
Frekvencija	60 Hz
Kalibracija	Kalibracija sa 5 ili 9 tačaka
Kompatibilnost softvera	Lak za korišćenje i otvorenog API standarda
Površina praćenja pogleda	25cm x 11cm (horizontalno x vertikalno)
Dubina praćenja pogleda	±15 cm
Softver za kalibraciju i kontrolu	GazePoint Control
Softver za kreiranje projekata i analizu podataka	GazePoint Analysis

Softver **GazePoint Analysis** beleži sledeće podatke:

- Tačke pogleda (engl. *gaze points*)

Sačuvani su statistički podaci lokacija na ekranu tačaka pogleda i vremena zadržavanja pogleda.

- Mapa fiksacija (engl. *fixation map*)

Može se reprodukovati sekvenca fiksacija za svakog ispitanika sa veličinom tačaka fiksacije proporcionalnom trajanju fiksacije.

- Površine od interesa (engl. *area of interest- AOI*)

Sačuvani su sledeći statistički podaci za pojedinačnog ispitanika:

- trenutak prvog pogleda u AOI,
- vreme zadržavanja pogleda u [s] na AOI i
- broj vraćanja pogleda na AOI.

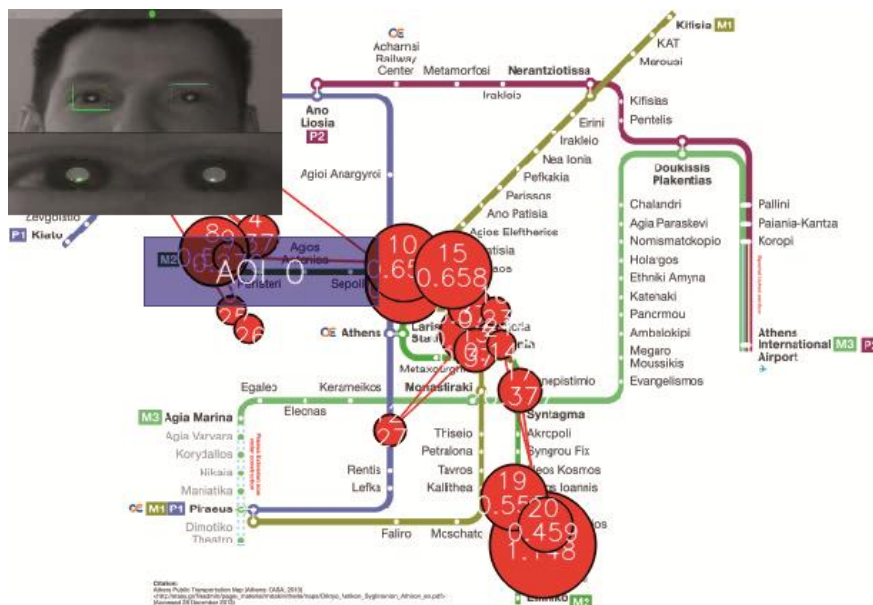
Softver generiše automatski za odabranu grupu ispitanika:

- prosečna vremena prvog pogleda,
- prosečna vremena zadržavanja u [s] i udeo u ukupnom vremenu [%],
- ukupan broj ispitanika koji su pogledali AOI,
- ukupan broj ispitanika koji su pogledali AOI više od jednog puta kao i

- prosečan broj vraćanja pogleda na AOI.

Slika 4.20 demonstrira primer procedure praćenja pogleda u zadatku traženja metro linije.

Na slici se vide putanja pogleda sa tačkama i vremenima zadržavanja pogleda.



Slika 4.20. Procedura praćenja pogleda (eye-tracking) u zadatku traženja metro linije

## Farnsworth-Munsell 100 Hue test

Farnsworth-Munsell 100 Hue test je preko 50 godina bio standard za testiranje sposobnosti diskriminacije različitih nijansi određene boje. Test se sastoji od 4 niza sa ukupno 85 kvadratića uzoraka boja indeksiranih brojevima od 1 do 85. U svakom nizu su fiksirane dve krajnje boje koje treba da služe kao reference ispitaniku da između njih napravi kontinualni prelaz premeštajući središnje uzorke boja jedan po jedan. Parovi krajnjih fiksiranih boja u nizovima su: 1) crvena i žuta, 2) žuta i plavo-zelena, 3) plavo-zelena i plava i 4) plava i ljubičasto-crvena.

Vrednosti korišćenih 85 boja su preuzete iz Munsellovog sistema boja (engl. *Munsell colour system*) tako da boje u nizu imaju isto zasićenje i svetlinu (Chroma 6 i Value 6 prema Munsellovoj notaciji), a razlika tonova između svaka dva susedna uzorka boje je jednaka (počevši od tona crvene 5R prema Munsellovoj notaciji).

Iznos greške za svaki kvadratić se računa kao suma apsolutne razlike između njegovog indeksa i indeksa njegova dva direktna suseda, a zatim se pojedinačne greške sabiraju. Slika 4.21 pokazuje primer vizuelizacije rezultata testa koja pojednostavljuje analizu. Indeksi uzoraka boja

su poređani u smeru suprotnom od kazaljke na satu, a pojedinačne greške su iscrtane radijalno.

Rezultati testa otkrivaju jednu od sledećih kategorija sposobnosti razlikovanja boja:

- Superiorna diskriminacija boja (suma greške od 0 do 16)
- Prosečna (normalna) diskriminacija boja (suma greške od 20 do 100)
- Slaba diskriminacija boja (suma greške veća od 100)

Rezultati na većem uzorku ispitanika imaju normalnu raspodelu: na prvom testu superiornu, prosečnu i slabu diskriminaciju ima približno 15%, 60% i 15% populacije, respektivno. Prvo ponavljanje testiranja može dati poboljšanja dok kasnija ponovna testiranja ne utiču značajno na rezultate (Machado, 2009).

Suma greške veća od 100 ukazuje na postojanje PVB i to: u opsegu od 100-200 na umeren poremećaj (anomalnu trihromaziju), a preko 200 na ozbiljan poremećaj (dihromaziju).

Deo populacije sa blagim anomalnim trihromatskim PVB ostvaruju rezultate u opsegu 60-100 što spada u kategoriju prosečne diskriminacije boja.

Visoka suma greške može se pojaviti kod osoba sa normalnim viđenjem boja kao posledica nerazumevanja testa.

## Ispitanici

U eksperimentima je ukupno učestvovalo 15 ispitanika sa PVB koji su nakon urađenog Farnsworth-Munsell 100 Hue testa klasifikovani na sledeći način:

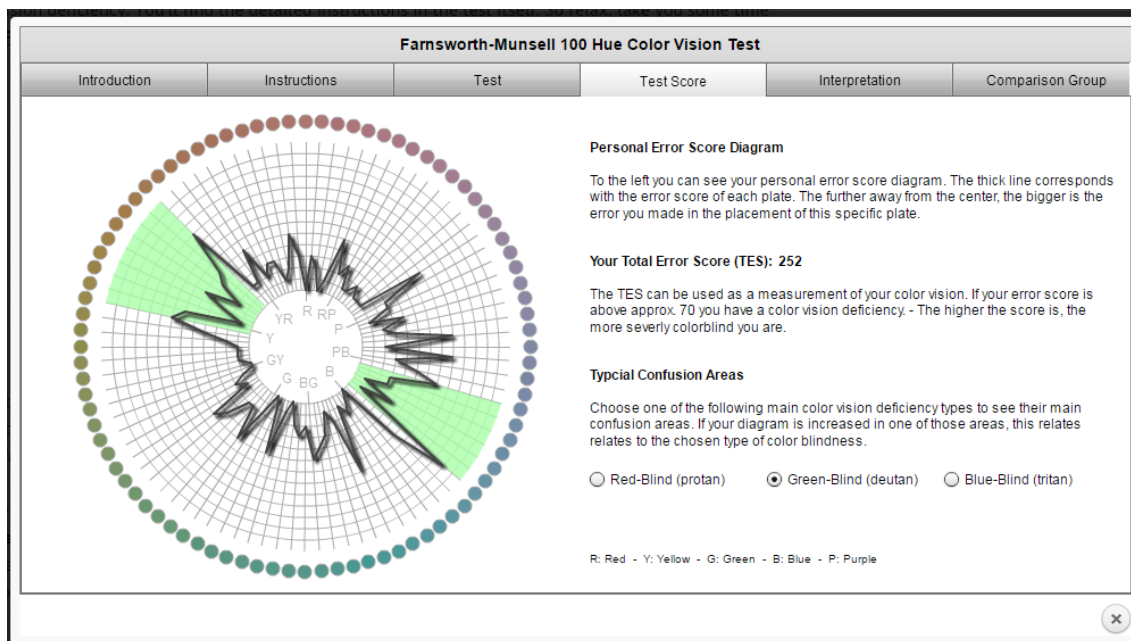
- 9 protan ispitanika sa sledećim težinama poremećaja:

4 ispitanika sa blagom protalomalijom, 3 ispitanika sa umerenom protanomomalijom i 2 ispitanika sa ozbiljnim protan poremećajem - protanopijom.

- 6 deutan ispitanika sa sledećim težinama poremećaja:

3 ispitanika sa blagom deuteranomomalijom, 1 ispitanik sa umerenom deuteranomomalijom i 2 ispitanika sa ozbiljnim deutan poremećajem - deuteranopijom.

Primer rezultata FM testa dat je na Slici 4.21. Ostali rezultati ispitanika sa PVB dati su u Prilogu P.6.



Slika 4.21. Primer rezultata ispitanika koji pokazuju ozbiljniji deutan poremećaj (suma greške 252)

Svi PVB ispitanici su bili muškarci. U objektivnom ispitivanju efektivnosti daltonizacije (*eye-tracking* ispitivanje) učestvovalo je svih 15 ispitanika, ali se rezultati jednog deutan ispitanika (deuteranopa) nisu uzeli u razmatranje, jer je ispitanik, pored poremećaja viđenja boja, imao i smanjenu oštrinu vida, a nošenje korektivnih naočara onemogućavalo je beleženje pogleda.



Pored test grupe korisnika sa PVB, učestvovalo je i 16 korisnika sa normalnim viđenjem boja koji su na Farnsworth-Munsell 100 Hue testu ostvarili rezultate superiorne diskriminacije boja, izuzev dva ispitanika koji su imali rezultate koji spadaju u grupu prosečne diskriminacije boje.

U evaluaciji simulacije učestvovalo je deset ispitanika sa PVB i to prema klasifikaciji na osnovu rezultat Farnsworth-Munsell 100 Hue testa: 6 protan ispitanika (4 ispitanika sa blagom protalomalijom, 1 ispitanik sa umerenom protanomomalijom i 1 ispitanik sa protanopijom) i 4 deutan ispitanika (2 ispitanika sa blagom deuteranomomalijom, 1 ispitanik sa umerenom deuteranomomalijom i 1 ispitanik sa deuteranopijom).

Pored instrukcija zadatih metodološkim okvirom, od PVB ispitanika se, nakon evaluacije simulacije, tražilo da ocene opaženi kvalitet test slika metodom uparenih uzoraka, kao i da prokomentarišu rezultate simulacije i daltonizacije u slobodnoj formi.

## 5.0 REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Obrade slika, prikazi gamuta boja slika i dominantnih boja (centri segmenata) su izvedeni korišćenjem softvera *Wolfram Mathematica 10*. Proračun različitih boja slike urađen je u softveru *Adobe PhotoShop CS6* korišćenjem specijalizovanog filtera *Telegraphics Count Colors*. Tabela i grafički prikazi rezultata evaluacije metoda simulacije i daltonizacije sa ispitanicima su kreirani u softveru *MS Excel 2013*, dok je statistička obrada podataka urađena u softveru *IBM SPSS*.

### 5.1 REZULTATI PERSONALIZOVANE SIMULACIJE

#### 5.1.1 Model personalizovane simulacije

Proračun novih RGB vrednosti nakon personalizovane simulacije (PS) dobijamo na osnovu definisanih pozicija RGB primara PVB korisnika na sledeći način:

Opšti slučaj

$$\begin{bmatrix} R_{0-1} \\ G_{0-1} \\ B_{0-1} \end{bmatrix}^{PS} = 255 \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_R^{PS} & X_G^{PS} & X_B^{PS} \\ Y_R^{PS} & Y_G^{PS} & Y_B^{PS} \\ Z_R^{PS} & Z_G^{PS} & Z_B^{PS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{0-1} \\ G_{0-1} \\ B_{0-1} \end{bmatrix}^{2.2} \Bigg|^{2.2} \Bigg|^{1/2.2} = 255 \left[ M^{PS} \begin{bmatrix} R_{0-1} \\ G_{0-1} \\ B_{0-1} \end{bmatrix}^{2.2} \right] \Bigg|^{1/2.2}, \quad (5.1)$$

gde  $(X_R^{PS}, Y_R^{PS}, Z_R^{PS})$ ,  $(X_G^{PS}, Y_G^{PS}, Z_G^{PS})$  i  $(X_B^{PS}, Y_B^{PS}, Z_B^{PS})$  predstavljaju tristimulusne vrednosti novih pozicija RGB primara. Prema algoritmu personalizovane simulacije broj rešenih koraka otkriva *diskriminacioni prag - indeks težine PVB* na sledeći način:  $\epsilon=0$  kada je broj rešenih koraka **10 (bez PVB)**,  $\epsilon=0.1$  za **9** rešenih koraka, ...,  $\epsilon=1$  za **0** rešenih koraka (dihromatski PVB). Na osnovu ustanovljenog tipa (protan, deutan ili tritan) i težine PVB mogu se izračunati simulirane RGB vrednosti na sledeći način:

$$\begin{aligned} \text{Protan PVB} \quad \begin{bmatrix} R_{0-255} \\ G_{0-255} \\ B_{0-255} \end{bmatrix}^P &= 255 \begin{bmatrix} 1. -0.8500 * \epsilon & 0. +1.0500 * \epsilon & 0. -0.2000 * \epsilon \\ 0. +0.1140 * \epsilon & 1. -0.2140 * \epsilon & 0. +0.1000 * \epsilon \\ 0. -0.0040 * \epsilon & 0. -0.0480 * \epsilon & 1. +0.0520 * \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{0-1} \\ G_{0-1} \\ B_{0-1} \end{bmatrix}^{2.2} \Bigg|^{2.2} \Bigg|^{1/2.2} \\ \text{Deutan PVB} \quad \begin{bmatrix} R_{0-255} \\ G_{0-255} \\ B_{0-255} \end{bmatrix}^D &= 255 \begin{bmatrix} 1. -0.6330 * \epsilon & 0. +0.8610 * \epsilon & 0. -0.2280 * \epsilon \\ 0. +0.2800 * \epsilon & 1. -0.3275 * \epsilon & 0. +0.0475 * \epsilon \\ 0. -0.0120 * \epsilon & 0. +0.0430 * \epsilon & 1. -0.0310 * \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{0-1} \\ G_{0-1} \\ B_{0-1} \end{bmatrix}^{2.2} \Bigg|^{2.2} \Bigg|^{1/2.2} \\ \text{Tritan PVB} \quad \begin{bmatrix} R_{0-255} \\ G_{0-255} \\ B_{0-255} \end{bmatrix}^T &= 255 \begin{bmatrix} 1. +0.2560 * \epsilon & 0. -0.0770 * \epsilon & 0. -0.1790 * \epsilon \\ 0. -0.0780 * \epsilon & 1. -0.0690 * \epsilon & 0. +0.1470 * \epsilon \\ 0. +0.0050 * \epsilon & 0. +0.6910 * \epsilon & 1. -0.6960 * \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{0-1} \\ G_{0-1} \\ B_{0-1} \end{bmatrix}^{2.2} \Bigg|^{2.2} \Bigg|^{1/2.2} \end{aligned}$$

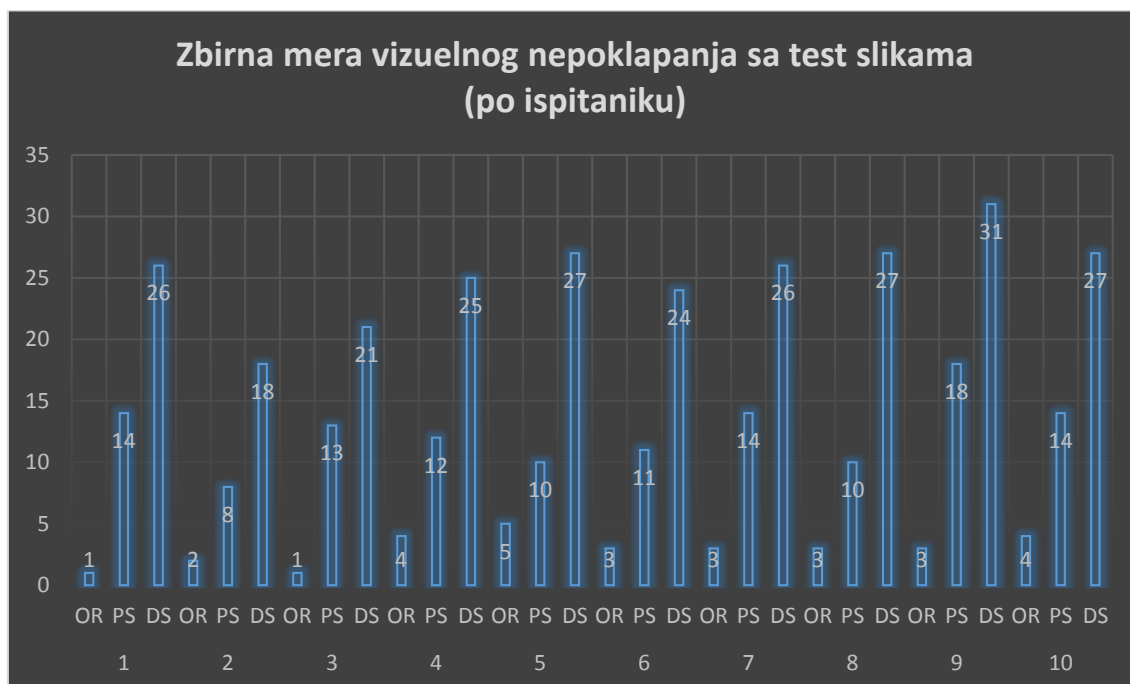
Koeficijenti matrica konverzije za težine PVB od 0 do 1 sa korakom 0.1 prikazani su u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Matrice konverzije za simulaciju PVB različitih težina ( $\epsilon$ )

Indeks težine PVB ( $\epsilon$ )	Protan			Deutan			Tritan		
<b>0.1</b>	0.9150	0.1050	-0.0200	0.9367	0.0861	-0.0228	1.0256	-0.0077	-0.0179
	0.0114	0.9786	0.0100	0.0280	0.96725	0.00475	-0.0078	0.9931	0.01470
	-0.0004	-0.0048	1.0052	-0.0012	0.0043	0.9969	0.0005	0.0691	0.9304
<b>0.2</b>	0.8300	0.2100	-0.0400	0.8734	0.1722	-0.0456	1.0512	-0.0154	-0.0358
	0.0228	0.9572	0.0200	0.0560	0.9345	0.0095	-0.0156	0.9862	0.02940
	-0.0008	-0.0096	1.0104	-0.0024	0.0086	0.9938	0.001	0.1382	0.8608
<b>0.3</b>	0.7450	0.3150	-0.0600	0.8101	0.2583	-0.0684	1.0768	-0.0231	-0.0537
	0.0342	0.9358	0.0300	0.0840	0.90175	0.01425	-0.0234	0.9793	0.0441
	-0.0012	-0.0144	1.0156	-0.0036	0.0129	0.9907	0.015	0.2073	0.7912
<b>0.4</b>	0.6600	0.4200	-0.0800	0.7468	0.3444	-0.0912	1.1024	-0.0308	-0.0716
	0.0456	0.9144	0.0400	0.1120	0.8690	0.0190	-0.0312	0.9724	0.0588
	-0.0016	-0.0192	1.0208	-0.0048	0.0172	0.9876	0.002	0.2764	0.7216
<b>0.5</b>	0.5750	0.5250	-0.1000	0.6835	0.4305	-0.1140	1.1280	-0.0385	-0.0895
	0.0570	0.8930	0.0500	0.1400	0.83625	0.02375	-0.0390	0.9655	0.0735
	-0.0020	-0.0024	1.02601	-0.0060	0.0215	0.9845	0.0025	0.3455	0.6520
<b>0.6</b>	0.4900	0.6300	-0.1200	0.6202	0.5166	-0.1368	1.1536	-0.0462	-0.1074
	0.0684	0.8716	0.0600	0.1680	0.8035	0.0285	-0.0468	0.9586	0.08820
	-0.0024	-0.00288	1.0312	-0.0072	0.0258	0.9814	0.003	0.4146	0.5824
<b>0.7</b>	0.4050	0.7350	-0.1400	0.5569	0.6027	-0.1596	1.1792	-0.0539	-0.1253
	0.0798	0.8502	0.0700	0.1960	0.77075	0.03325	-0.0546	0.9517	0.1029
	-0.0028	-0.00336	1.0364	-0.0084	0.0301	0.9783	0.0035	0.4837	0.5128
<b>0.8</b>	0.3200	0.8400	-0.1600	0.4936	0.6888	-0.1824	1.2048	-0.0616	-0.1432
	0.0912	0.8288	0.0800	0.2240	0.7380	0.0380	-0.0624	0.9448	0.1176
	-0.0032	-0.00384	1.0416	-0.0096	0.0344	0.9752	0.004	0.5528	0.4432
<b>0.9</b>	0.2350	0.9450	-0.1800	0.4303	0.7749	-0.2052	1.2304	-0.0693	-0.1611
	0.1026	0.8074	0.0900	0.2520	0.70525	0.04275	-0.0702	0.9379	0.1323
	-0.0036	-0.00432	1.0468	-0.0108	0.0387	0.9721	0.0045	0.6219	0.3736
<b>1.0</b>	0.1500	1.0500	-0.2000	0.3670	0.8610	-0.2280	1.2560	-0.0770	-0.1790
	0.1140	0.7860	0.1000	0.2800	0.6725	0.0475	-0.0780	0.9310	0.1470
	-0.0040	-0.0480	1.0520	-0.0120	0.0430	0.9690	0.0050	0.6910	0.3040

## 5.1.2 Evaluacija personalizovane simulacije

Grafik 5.1 pokazuje zbirnu meru vizuelnog (ne)poklapanja sa test slikama za svakog ispitanika, a Grafik 5.2 zbirne rezultate za svaku test sliku. Primeri test slika i pojedinačni rezultati predstavljeni su u Prilogu P.3.



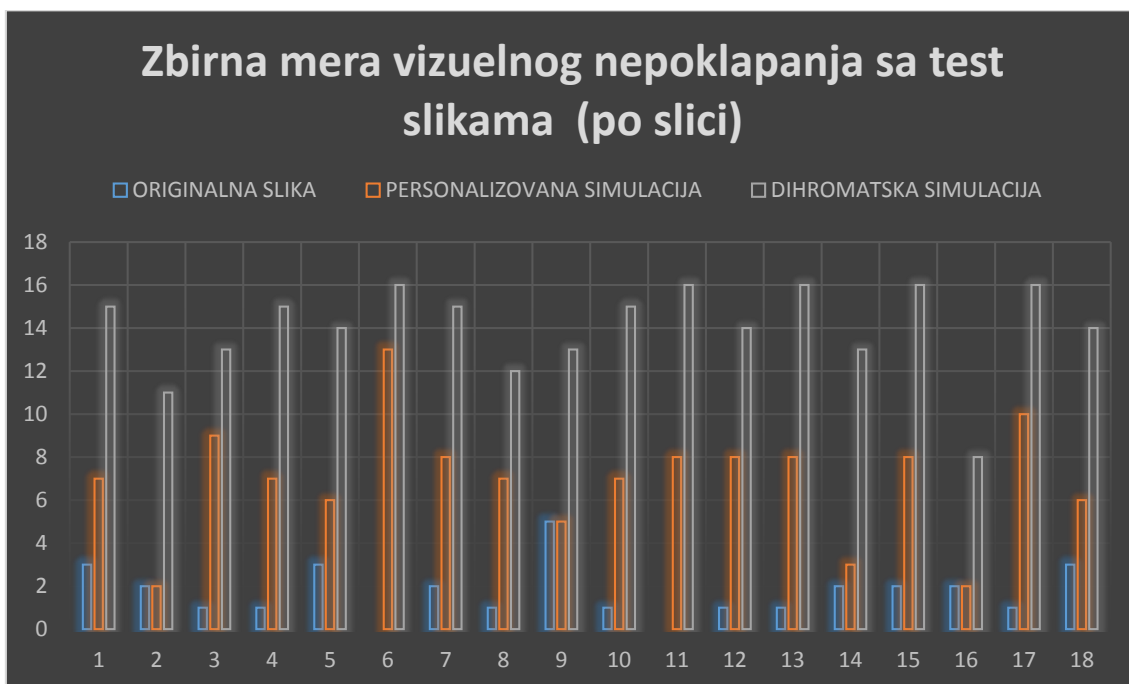
Grafik 5.1. Zbirna mera vizuelnog nepoklapanja sa test slikama za svakog ispitanika (OR- originalna slika, PS- personalizovana simulacija, DS- dihromatska simulacija). Pojedinačne ocene za svaku od 18 test slika su: 0-ista, 1-slična i 2-manje slična (različita). Minimalan mogući ukupan zbir je 0, a maksimalan 36 u slučaju da ispitanik verzije svih 18 slika proglasi različitim od test slike (2x18).

Vilkoksonov test ranga otkrio je statistički značajno manju sličnost dihromatske simulacije sa originalnim test slikama u odnosu na personalizovanu simulaciju,  $z=-2.825$ ,  $p<0.005$ , uz veliku razliku ( $r=0.63$ , veliki uticaj). Medijana rezultata na skali mere vizuelnog nepoklapanja porasla je od (Md=12.4) za personalizovanu simulaciju do (Md=25.2) za dihromatsku.

Ukupna suma ocena vizuelnog nepoklapanja dihromatske simulacije je veća u slučaju svih 10 ispitanika uključujući i dva ispitanika sa ozbiljnijim poremećajem.

Hi-kvadrat test nezavisnosti (uz korekciju neprekidnosti prema Jejsu) pokazao je značajnu razliku između personalizovane i dihromatske simulacije u broju slika ocenjenih kao identične test slici,  $\chi^2(1,n=360)=60.434$ ,  $p<0.01$ . U trećini slučajeva (66/180) ispitanici su personalizovanu simulaciju slike proglasili identičnom test slici, od kojih je 31 put došlo do

zamene originalne slike i simulacije – simuliranoj verziji je data ocena 0, a verziji koja je zapravo identična test slici ocena 1.



Grafik 5.2. Zbirna mera vizuelnog nepoklapanja za svaku test sliku. Pojedinačne ocene svakog od 10 ispitanika su: 0-ista, 1-slična i 2-manje slična (različita). Minimalan moguć ukupan zbir je 0, a maksimalan 20 u slučaju da je sliku svih 10 ispitanika ocenilo kao različitu (2x10).

Primećeno je da su ispitanici češće proglašavali personalizovanu simulaciju identičnom test slici kada je originalna slika bila manje zasićenih boja („zagastije“), kao i kada je na slici bilo puno detalja (slike 2, 5, 9, 14 i 16 u Grafiku 5.2). Sa druge strane, ispitanici su videli najviše razlike kod slika koje su imale izuzetno zasićene boje, a posebno ljubičaste tonove (slike 3, 6 i 17). Prema naknadnim komentarima u slobodnoj formi, utvrđeno je da su se ispitanici sa umerenim i ozbiljnijim PVB u pronalaženju originalne slike u velikoj meri oslanjali na razlike u svetlini, dok su ispitanici sa blagim poremećajem bili u stanju da naprave razliku u tonovima.

Varijacije u ocenama vizuelnog nepoklapanja između slika ukazuju da ni personalizovana ni dihromatska simulacija ne simuliraju sa konstantnom pouzdanošću sve delove trihromskog opsega. Česti komentari ispitanika „Slično samo tamnije“ i „Slično samo svetlije“ ukazuju na mogućnost da je mapiranje hromatičnosti preciznije u odnosu na mapiranje svetline čime se otvara pitanje kako izostanak ili disfunkcija čepića utiče na svetlo-tamno oponentni proces. U svetlu zabeleženih komentara i naučno potvrđenih ispitivanja u kojima su se osobe sa PVB pokazale kao superiorne u detekciji varijacija svetline, buduća istraživanja bi trebalo usmeriti

ka otkrivanju preciznijeg mapiranja dimenzije svetline u cilju dobijanja simulacije višeg nivoa pouzdanosti.

## 5.2 REZULTATI DALTONIZACIJE

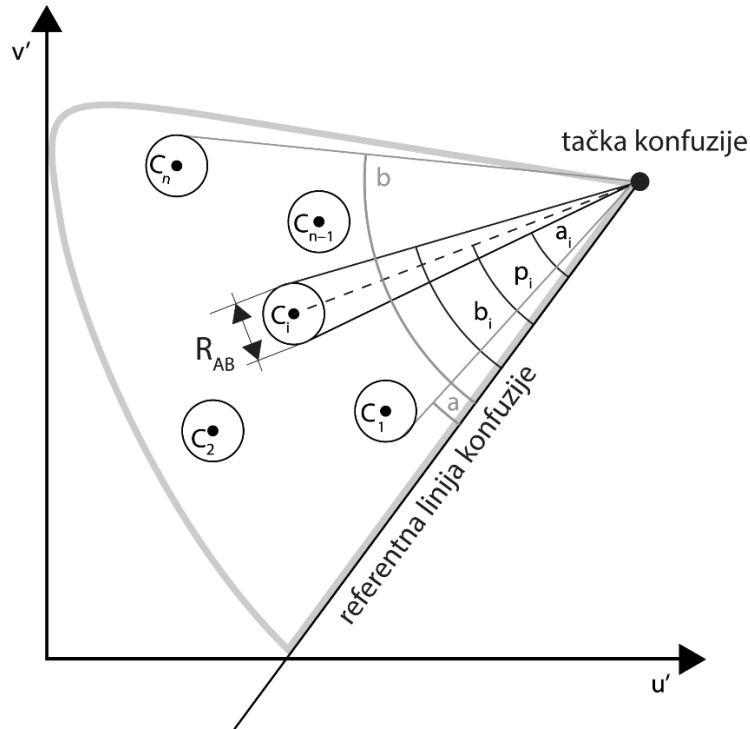
### 5.2.1. Adaptacija boja prema tipu PVB (Tipska daltonizacija)

Dihromatski i anomalni trihromatski PVB istog tipa (protan, deutan, tritan) imaju iste probleme distinkcije, odnosno iste linije konfuzije. Tipsko poboljšanje distinkcije boja polazi od ideje da centar samo jednog segmenta slike treba da bude lociran po jednoj liniji konfuzije. U suprotnom, centre treba premestiti vodeći računa o ukupnom sadržaju slike - distribuciji boja ostalih segmenata.

Slika 5.1 ilustruje koncept tipskog poboljšanja distinkcije boja. Tačke  $(c_1, c_2, \dots, c_i, c_j, \dots, c_n)$  predstavljaju centre boja  $n$  segmenata slike. Cilj je redistribuirati ove boje (rotirati oko tačke konfuzije) na takav način da linije koje polaze od tačke konvergencije do centara boje budu što je moguće više udaljene jedna od druge (Milić et al, 2015a). Za svaku boju  $c_i$  postoji oblast unutar koje je dozvoljeno da tačka bude premeštena.

U slučaju tipskog poboljšanja, relevantna za mapiranje je osa oblasti upravna na liniju konfuzije koja treba biti veća od manje ose dihromatske diskriminacione elipse ( $R^{AB} > 2r_a^D$ ) (videti Sliku 5.1).

Ako povežemo centar boje  $c_i$  i tačku konvergencije (isprekidana linija), kao i krajnje dozvoljene pozicije unutar oblasti premapiranja sa tačkom konvergencije (dve pune linije), linije koje dobijamo će graditi sa referentnom linijom konfuzije uglove  $p_i$ ,  $a_i$  i  $b_i$ , respektivno.



Slika 5.1. Grafička prezentacija tipskog poboljšanja distinkcije boja. Primer oblasti dozvoljenog kretanja  $[a_i, b_i]$  za centar boje segmenta  $c_i$  i za set centara boja  $[a, b]$  (Milić et al, 2015a)

Ovaj model teži da pronađe stanje ravnoteže. Za svrhu nalaženja ekvilibrijuma, prvi centar je postavljen na krajnju levu dozvoljenu poziciju,  $p_1=a_1=a$ , a poslednji na krajnju desnu,  $p_n=b_n=b$ , dok se ostali centri iterativno pomeraju. Unutar maksimalnog intervala  $[a, b]$  se nalaze manji podintervali dozvoljenog kretanja  $[a_i, b_i]$ .

Sa vrednostima  $a_i$  i  $b_i$  predefinisanim za boju  $c_i$ , cilj je naći optimalan ugao  $p_i$ , gde je  $p_i \in [a_i, b_i]$ , za  $i=1, \dots, n$ , odnosno optimalnu poziciju centra boje  $c_i$ . Matematičko rešenje je formulisano na sledeći način (Milić et al, 2015a):

$$p_i = \begin{cases} \frac{1}{2}(p_{i-1} + p_{i+1}), & \text{ako } a_i < \frac{1}{2}(p_{i-1} + p_{i+1}) < b_i, \\ a_i, & \text{ako } \frac{1}{2}(p_{i-1} + p_{i+1}) \leq a_i, \\ b_i, & \text{ako } b_i \leq \frac{1}{2}(p_{i-1} + p_{i+1}), \end{cases} \quad (5.2)$$

za svako  $i=1, \dots, n$ , gde su  $p_1, p_2, \dots, p_n$  pozitivni realni brojevi za koje važi  $p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_n$ ,  $p_1:=a$  i  $p_n:=b$ .

Pri definisanju oblasti dozvoljenog kretanja  $[a_i, b_i]$  polazi se od dva suprotstavljena pomoću kriterijuma kojima se balansira između globalnog povećanja hromatskog diverziteta (kontrasta) i globalne konzervacije prirodnosti:

1. **kriterijum očuvanja prirodnosti** sa ciljem da se minimizuje pomeraj segmenata koje isto opažaju osobe sa i bez PVB

Termin „prirodnost“ slike treba uzeti uslovno u slučaju individua sa PVB i odnosi se na očuvanje boja koje su oni navikli da vide u svojoj svakodnevici u određenom kontekstu. To znači da nisu svi segmenti podjednako važni u minimiziranju pomeraja, već su prioritetni oni koje PVB korisnik opaža isto kao i regularan posmatrač, odnosno teži se minimizaciji izraza:

$$\sum_{i=1}^n \Delta p_i / \Delta E_i,$$

gde je  $\Delta p_i$  pomeraj, odnosno promena ugla segmenta,  $\Delta p_i = |p_i^{postle} - p_i^{pre}|$ , a  $\Delta E_i$  je razlika u boji između originalne vrednosti boje ( $c_i$ ) i boje koju vidi PVB korisnik:

$$\Delta E_i = \sqrt{(L_i - L^{PVB}_i)^2 + (a_i - a^{PVB}_i)^2 + (b_i - b^{PVB}_i)^2} \quad (5.3)$$

Oblast dozvoljenog premeštanja centra treba da je u funkciji razlike boja:  $[a_i, b_i] = f(\Delta E_i)$

Težnja da boje slike koje PVB korisnik vidi isto kao normalni trihromata budu najmanje pomerene je posebno od značaja kod prirodnih slika gde se na ovaj način ne modifikuju ahromatski tonovi i tonovi kože.

Ako se prisetimo analogije sa hipotetičkim modelom atoma, onda se boje koje približno isto opažaju PVB i nePVB korisnici mogu zamisliti kao elektroni koje „jača sila“ zadržava u blizini inicijalne pozicije (orbitale). Sa većom razlikom u percepciji boje pri anomalnog i normalnog kolornog vida slabi i vezanost centra boje (elektrona) za svoju inicijalnu liniju konfuzije (orbitalu), odnosno povećava se oblast dozvoljenog premeštanja boje.

*Kriterijum prirodnosti ima važnost samo u slučaju prirodnih slika – fotografija realnih scena.*

2. **kriterijum povećanja hromatskog diverziteta** sa ciljem da se maksimizuje rastojanje između svakog para centara

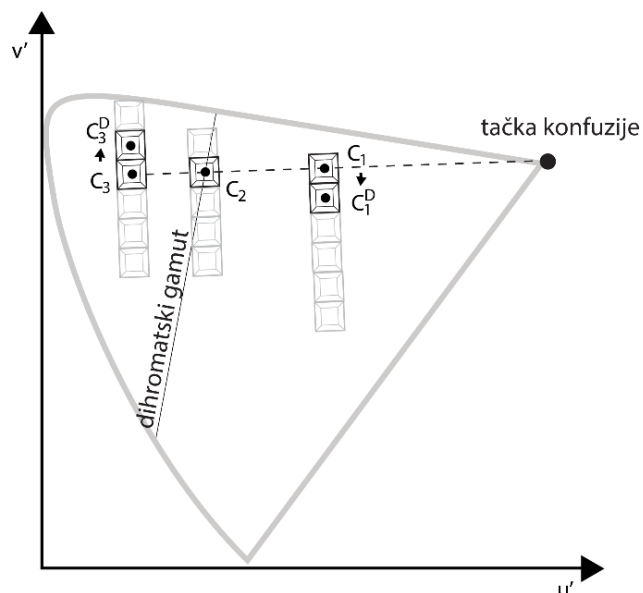
Ako  $\Delta p_{ij}$  predstavlja razliku uglova između dva centra segmenata ( $c_i, c_j$ ) u odnosu na tačku konvergencije ( $\Delta p_{ij} = |p_i^{postle} - p_j^{postle}|$ ), onda se za poboljšani kontrast prema tipu PVB teži maksimizaciji izraza:  $\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \Delta p_{ij}$ .

Zahtev da svaki par centara leži izvan kontura pripadajućih diskriminacionih elipsi je teže postići kada postoji previše centara boja koncentrisanih u istoj oblasti (u blizini iste linije



konfuzije). U tom slučaju poboljšanu distinkciju može obezbediti veća dozvoljena oblast što znači da oblast treba korigovati na osnovu inicijalnih rastojanja centara:  $[a_i, b_i] = f(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \Delta p_{ij}^{pre})$ .

Ako se funkcija mapiranja primeni na diskretnim vrednostima koristeći setove indeksiranih klastera boja radi smanjivanja računskih zahteva, onda će  $\Delta p_i$  i  $\Delta p_{ij}$  biti celi brojevi. Slika 5.2 demonstrira šemu mapiranja u diskretne indeksirane klustere boja. Na primer, pošto centri  $c_1$ ,  $c_2$  i  $c_3$  leže na istoj liniji konfuzije ( $p_1=p_2=p_3$ ), biće opaženi kao ista hromatičnost od strane dihromata, a slabije razlučeni od strane anomalnih trihromata. Stoga, centri treba da budu alocirani u pravcu povećavanja hromatskog diverziteta ( $c_1 \rightarrow c_1^D$  i  $c_3 \rightarrow c_3^D$ ). Na inicijalnoj liniji konfuzije ostaje centar  $c_2$  jer se, zbog blizine gamutske linije, opaža na sličan način od strane svih: i regularnih i anomalnih posmatrača (kriterijum prirodnosti).

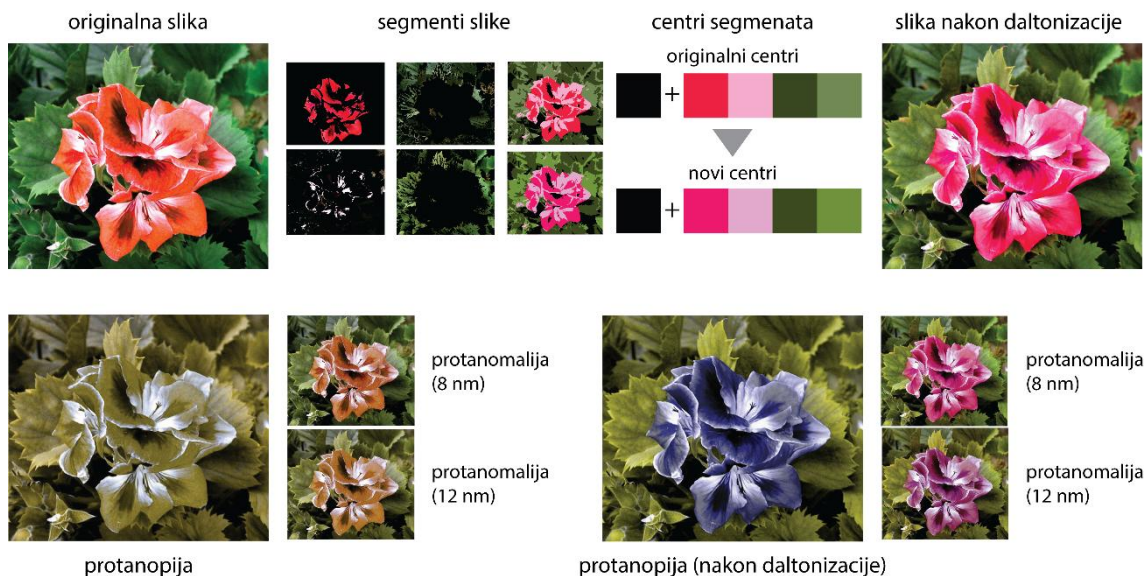


Slika 5.2. Tipska adaptacija centara boja u distinktno indeksirane boje u cilju povećanja hromatskog diverziteta ( $c_1 \rightarrow c_1^D$ ,  $c_2 \rightarrow c_2$ ,  $c_3 \rightarrow c_3^D$ )

**Tipska daltonizacija dovodi do poboljšanja distinkcije boja slike za sve težine poremećaja istog tipa.**

## Primer i analiza rezultata adaptacije boja prema tipu PVB

Slika 5.3 demonstrira rezultate izolovanog tipskog poboljšanja distinkcije boja na primeru slike prirode sa konfuznom crveno-zelenom kombinacijom.

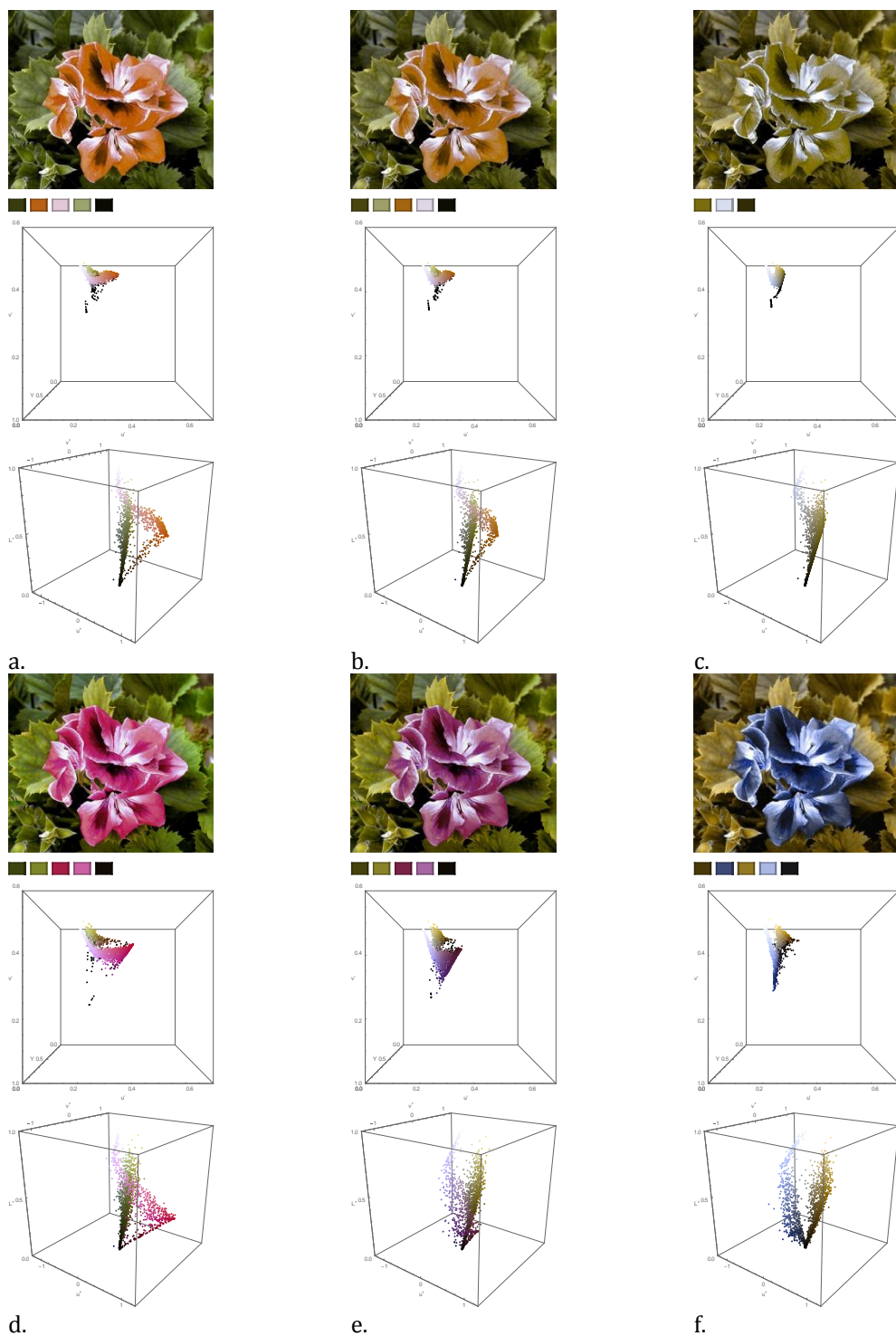


Slika 5.3. Rezultati tipske daltonizacije na primeru slike prirode sa crveno-zelenim konfuznim sadržajem za protan tip poremećaja

Na Slici 5.4 su prikazani gamuti i dominantne boje protanskih verzija slike pre i posle tipske daltonizacije. Protanopska i protanomalske verzije slike nakon daltonizacije pokazuju da se regioni slike (cveće i lišće) sada jasno razlikuju, a slika je ostala prilično prirodna za PVB posmatrača – boje na slici su ostale blizu onih na koje su PVB posmatrači navikli. Klaster crne je ostao nepromenjen jer se crna boja opaža na isti način od strane svih grupa posmatrača odnosno  $\Delta E=0$ , pa je samim tim i oblast dozvoljenog premeštanja anulirana.

Slika 5.4 demonstrira da broj dominantnih boja (pet) ostaje isti pri svim težinama PVB za razliku od dihromatske simulacije originalne slike koja ima svega tri dominantna klastera.

Takođe, izračunat ukupan broj različitih boja na slici pokazuje isti zaključak – sve tri protanske verzije imaju više boja nakon daltonizacije (blag protan PVB: 99.436→120.058; umeren protan PVB: 91.059→103.867; ozbiljniji protan PVB: 63.882→90.919). Relativni porasti broja boja su proporcionalni težini poremećaja - najveći relativni porast opsega boja percipiraju dihromati.



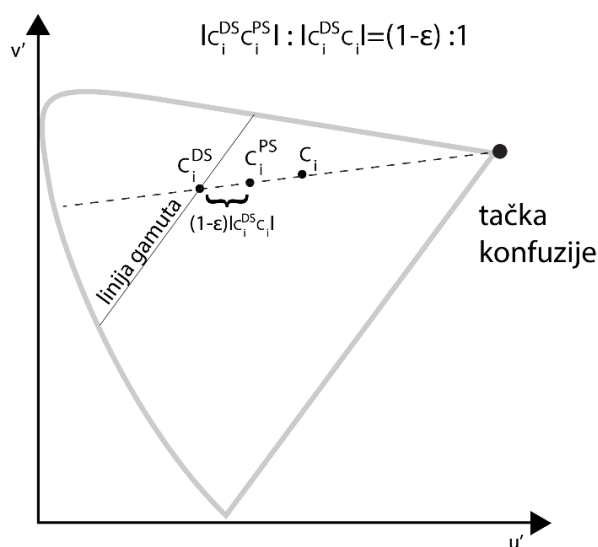
**d.** *Slika 5.4. Opseg boja i dominantne boje protanskih verzije originalne slike pre: a. blag protan PVB (8 nm), b. umeren protan PVB (12 nm) i c. ozbiljan protan PVB (20 nm); i nakon tipske daltonizacije: d. blag protan PVB (8 nm), e. umeren protan PVB (12 nm) i f. ozbiljan protan PVB (20 nm)*

## 5.2.2 Adaptacija boja prema težini PVB (Težinska daltonizacija)

Diskriminacione elipse duž iste linije konfuzije razlikuju se u veličini u zavisnosti od težine PVB (videti Sliku 4.11) – elipse anomalnih trihromata variraju između ekstrema: minimalne elipse normalnih trihromata i maksimalne elipse dihromata. Osa diskriminacione elipse u pravcu linije konfuzije predstavlja meru težine PVB.

Koncept poboljšanja distinkcije boja prema težini PVB se zasniva na ideji da dva ili više centara koji leže unutar iste diskriminacione elipse treba premapirati izvan granica elipse u pravcu linije konfuzije. Za proračun pomeraja koristi se diskriminaciona granica – **indeks težine  $\epsilon$**  utvrđen pomoću kalibracionog testa personalizovane simulacije (Potpoglavlje 5.1.1).

Za razliku od dihromatske verzije hromatičnosti koja se nalazi na preseku gamutske ravni i linije konfuzije, anomalna trihromatska verzija je mapirana ka ravni, ali ne doseže do ravni (Slika 5.5).



Slika 5.5. Grafička prezentacija težinskog poboljšanja distinkcije boja

Ako je  $\epsilon$  ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ ) indeks težine PVB iz kalibracione procedure, a  $c_i$  i  $c_i^{DS}$  centar segmenta i njegova dihromatska verzija, onda se, na osnovu zakona o mešanju boja u hromatskom dijagramu, personalizovana percepcija centra  $c_i^{PS}$  računa kao:

$$c_i^{PS} = c_i^{DS} + (1 - \epsilon)(c_i - c_i^{DS}) \quad (5.4)$$

Poboljšanje distinkcije boja prema težini se ostvaruje pomeranjem centra segmenta duž linije konfuzije u pravcu suprotnom od pravca mapiranja. Da li će smer pomeraja biti ka tački konfuzije ili suprotan zavisi od toga gde se sporni centar boje nalazi u odnosu na dihromatsku gamutsku ravan. U primeru na Slici 5.5 to je pravac ka tački konfuzije.

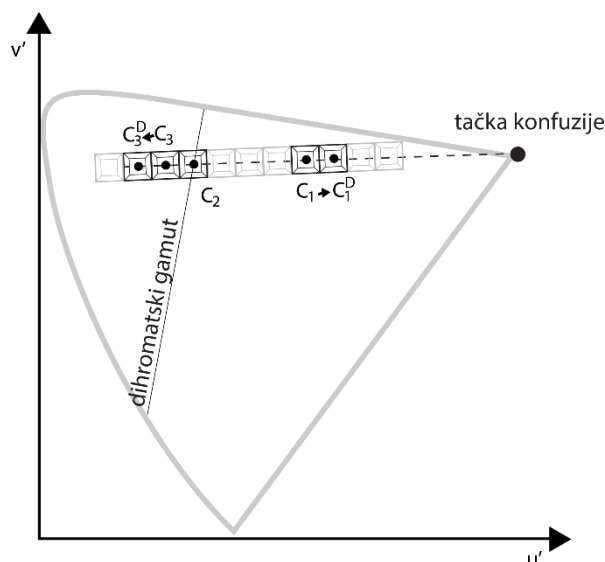
Granica oblasti pomeranja se dobija na sledeći način:

$$c_i^{\max} = c_i^{\text{DS}} + \frac{1}{(1 - \varepsilon)} (c_i - c_i^{\text{DS}}) \quad (5.5)$$

Efektivnost težinskog poboljšanja biće najuočljivija u slučaju male težine (blagog) PVB i skromnog inicijalnog gamuta slike bez boja bliskih maksimalnim intenzitetima primara.

U slučaju dihromatskog PVB ( $\varepsilon = 1$ ), adaptacija boja prema težini nema efekta.

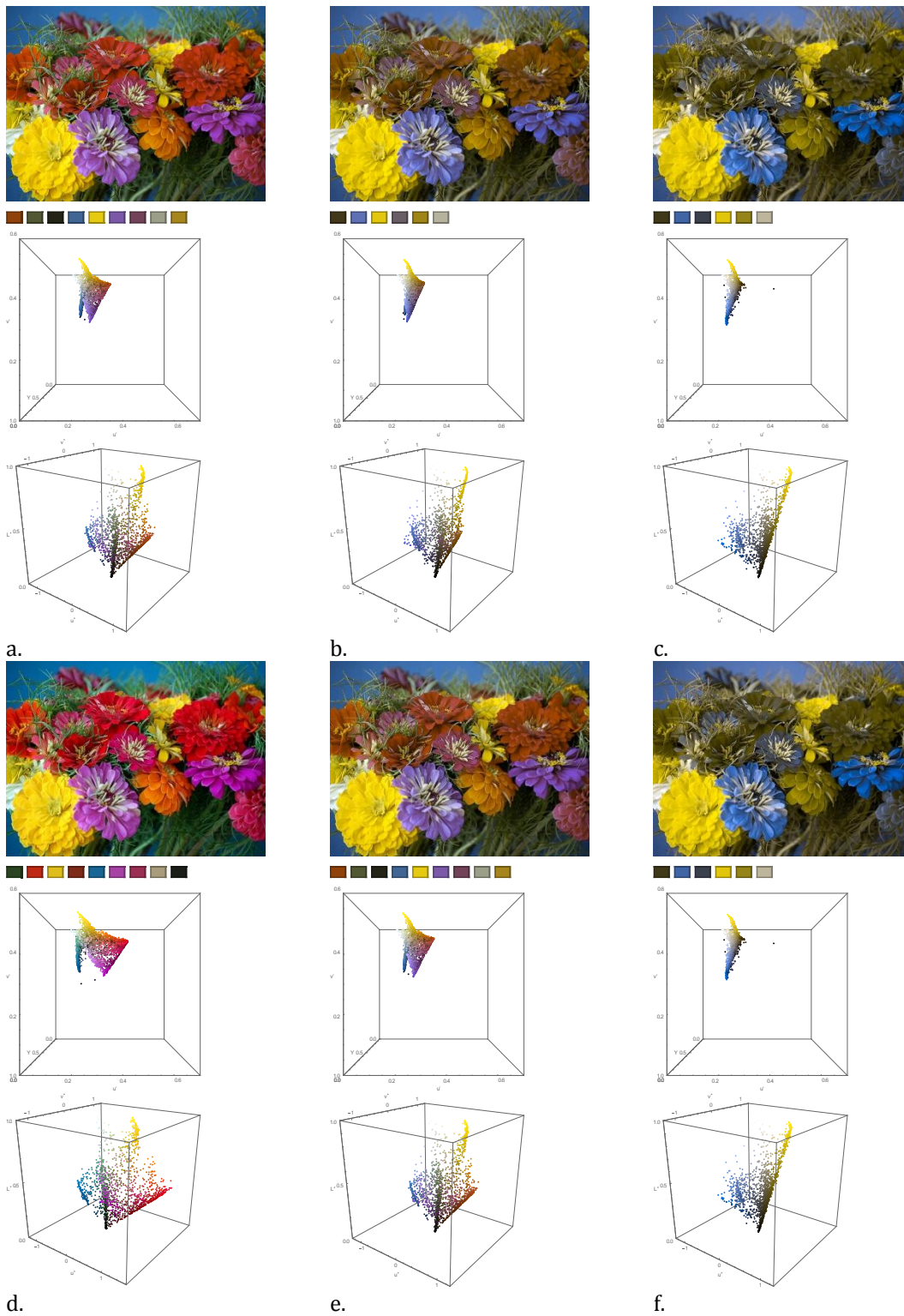
Slika 5.6 demonstrira težinsko poboljšanje hromatskog kontrasta mapiranjem u diskretne indeksirane klasterne boje. Na primer, centri  $c_1$ ,  $c_2$  i  $c_3$  biće opaženi kao ista hromatičnost od strane dihromata, ali i od strane anomalnih trihromata čija diskriminaciona elipsa obuhvata sva tri centra ( $|C_1C_3| < 2r_b^{\text{PS}}$ ). Da bi anomalni trihromata opazio razliku u hromatičnosti, centri treba da budu alocirani van diskriminacione elipse u pravcu linije konfuzije ( $c_1 \rightarrow c_1^{\text{D}}$  i  $c_3 \rightarrow c_3^{\text{D}}$ ). Unutar diskriminacione elipse ostaje centar  $c_2$  jer se, zbog blizine gamutskoj liniji, opaža kao približno ista boja koju vide normalni trihromati.



Slika 5.6. Težinska adaptacija centara boja u distinktno indeksirane boje u cilju povećanja hromatskog diverziteta ( $c_1 \rightarrow c_1^{\text{D}}$ ,  $c_2 \rightarrow c_2$ ,  $c_3 \rightarrow c_3^{\text{D}}$ )

### Primer i analiza rezultata adaptacije boja prema težini PVB

Slika 5.7 pokazuje primer rezultata adaptacije boja prema težini PVB. Efektivnost težinske adaptacije zavisi od težine PVB – najefektniji je u slučaju blagog poremećaja, dok dihromatskom posmatraču ne menja opaženi kvalitet slike. Centri segmenata nakon težinske adaptacije završavaju bliže ivicama spektralnog lokusa.



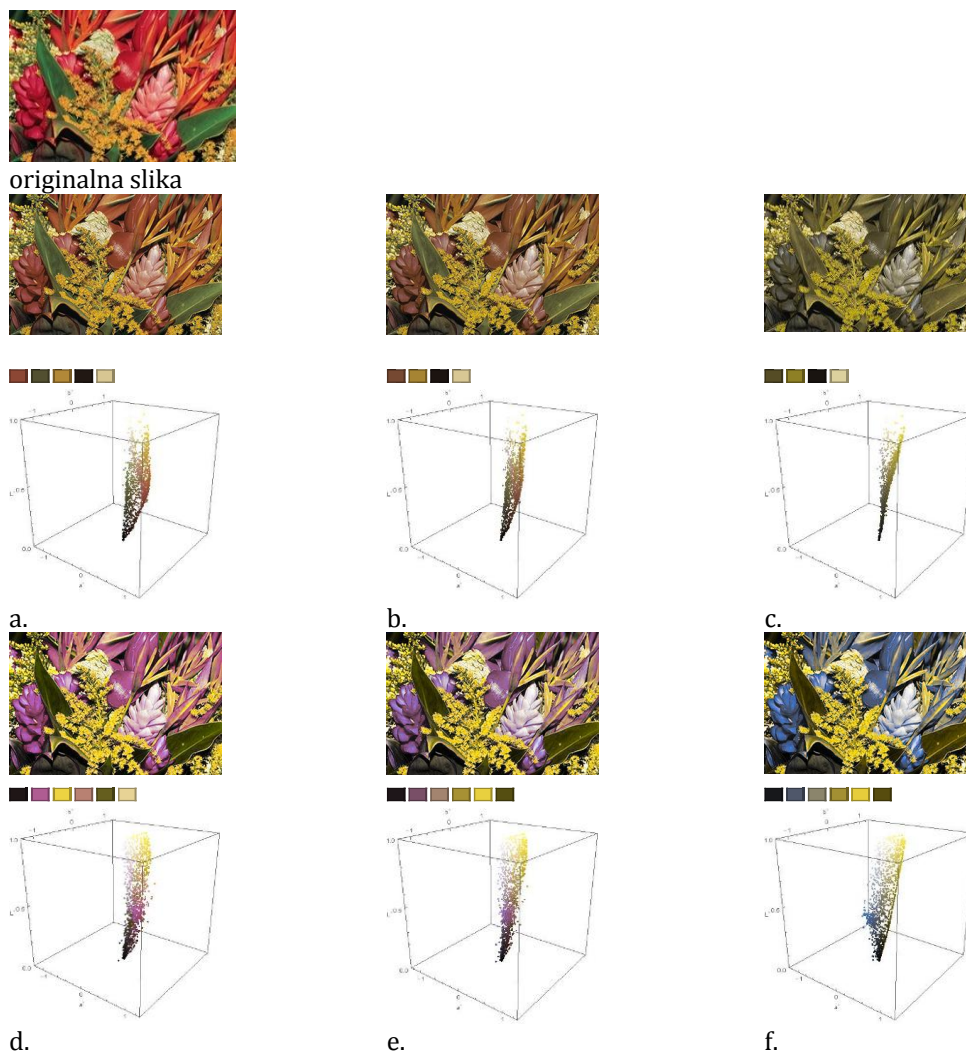
**Slika 5.7.** *Opseg boja i dominantne boje od: a. originalne slike, b. blage protan percepcije (8 nm), c. ozbiljne protan percepcije (20 nm); i verzija nakon daltonizacije: d. originalne slike, e. blage protan percepcije PVB (8 nm) i f. ozbiljne protan percepcije PVB (20 nm)*

Nakon težinske daltonizacije došlo je do povećanja opsega boja u slučaju blagog protan poremećaja (Slika 5.7.e). Kako su centri boja segmenata premešteni u pravcu konfuznih linija, dihromatska verzija je ostala ista kao u slučaju originalne slike (Slike 5.7.c i 5.7.f).

Izračunat ukupan broj različitih boja na slici pokazuje da blaga protanska verzija ima više različitih boja nakon daltonizacije (368.359→395.575), dok broj boja u dihromatskoj verziji ostaje isti (136.156). Težinska daltonizacije rezultira i povećanjem broja dominantnih klastera boja sa šest na devet koliko postoji i u slučaju normalne trihromatske percepcije (Slika 5.7.d).

### Primer i analiza udružene adaptacije boja

Slika 5.8 predstavlja primer daltonizacije u kojoj je prvo izvršeno tipsko poboljšanje distinkcije, a potom težinska adaptacija.

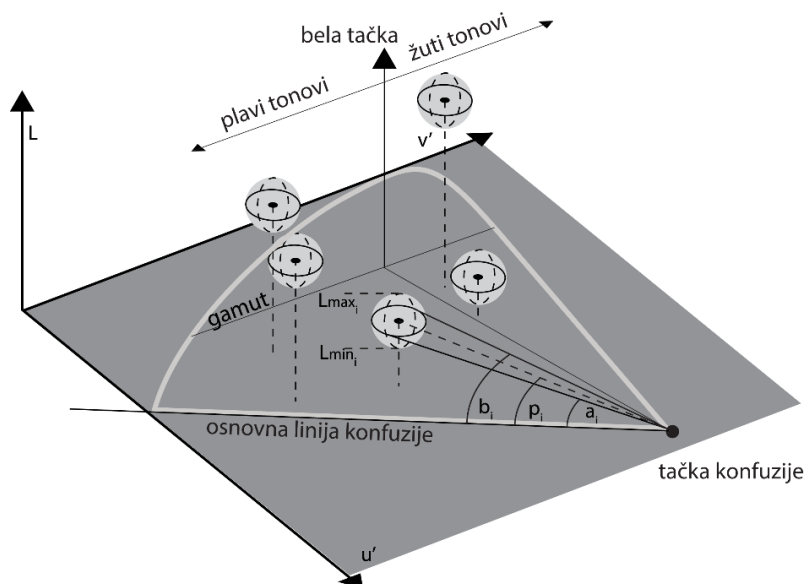


Slika 5.8. Opseg boja i dominantne boje protanskih verzije originalne slike pre: a. blag protan PVB (8 nm), b. umeren protan PVB (12 nm) i c. ozbiljan protan PVB (20 nm); i nakon udružene daltonizacije: d. blag protan PVB (8 nm), e. umeren protan PVB (12 nm) i f. ozbiljan protan PVB (20 nm)

Primer pokazuje efektivnost udruženog delovanja tipske i težinske daltonizacije što je potvrđeno svim objektivnim parametrima (opsegom boja, brojem različitih boja i brojem distinktnih klastera) za sve tri težine poremećaja. Sa rastom težine PVB dolazi do smanjivanja intenziteta crveno-zelenog oponentnog procesa što se manifestuje u smanjenju broja klastera u protanskim verzijama originalne slike sa pet za blag protan PVB na četiri za umeren i ozbiljan poremećaj. Nakon daltonizacije, sve protan verzije imaju šest dominantnih klastera – odnosno udružena daltonizacija je inicijalne klasterne originalne slike učinila distinktnim za sve težine PVB. Ovaj zaključak potvrđuje broj različitih boja na slici gde sve tri protanske verzije imaju više boja nakon daltonizacije (blag protan PVB: 49.747→51.449; umeren protan PVB: 46.829→49.503; ozbiljniji protan PVB: 36.273→46.983).

### 5.2.3 Univerzalna adaptacija boja prema svetlini

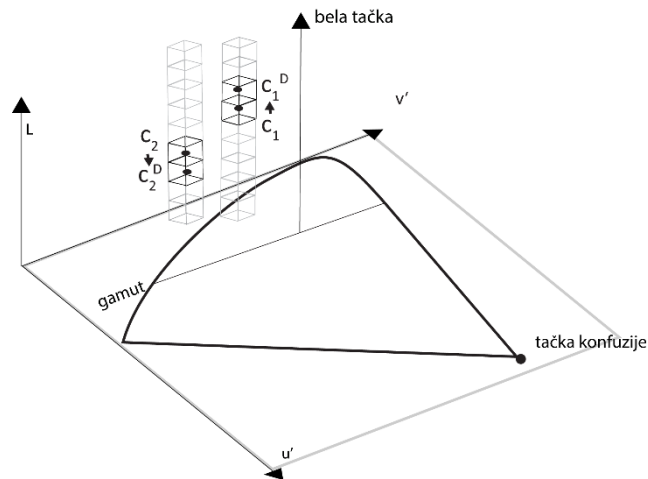
Za razliku od tipskog i težinskog poboljšanja hromatskog kontrasta, uključivanjem dimenzije svetline u mapiranje povećava se kontrast svetline (Slika 5.9). Efektivnost univerzalnog mapiranja na približan način doživljavaju i regularni i anomalni posmatrači. Remapiranje centara u pravcu ose svetline treba da bude primenjeno odvojeno za plavu i žutu „polovinu“ dihromatskog gamuta, pošto su boje projektovane na oponentne krajeve gamuta već dovoljno distinktnih hromatičnosti.



Slika 5.9. Grafička prezentacija univerzalnog poboljšanja distinkcije boja sa primerom oblasti dozvoljene redistribucije svetline za centar segmenta  $[L_i^{max}, L_i^{min}]$

Slika 5.10 ilustruje univerzalno mapiranje u slučaju da postoje predefinisane diskretne pozicije centara duž ose svetline.

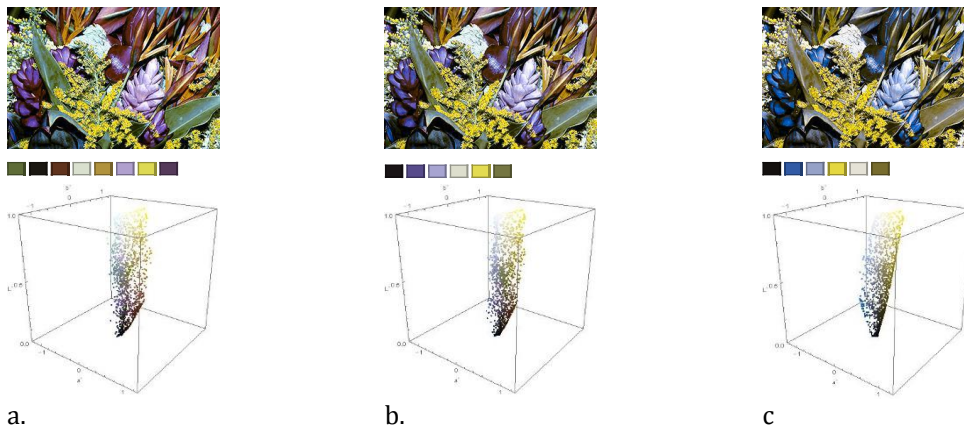




Slika 5.10. Univerzalna adaptacija centara boja u distinktno indeksirane boje u cilju povećanja kontrasta svetline ( $c_1 \rightarrow c_1^D$ ,  $c_2 \rightarrow c_2^D$ )

### Primer i analiza univerzalne adaptacije boja

Ako se na rezultatu daltonizacije iz prethodnog primera (Slike 5.8) primeni i univerzalna adaptacija koja zapravo predstavlja uobičajeno poboljšanje kontrasta pomoću redistribucije vrednosti svetline dobiće se još izraženija kontrastnost regiona slike na uštrb očuvanja prirodnosti slike (Slika 5.11).



Slika 5.11. Opseg boja i dominantne boje protanskih verzije originalne slike nakon univerzalne daltonizacije: a. blag protan PVB (8 nm), b. umeren protan PVB (12 nm) i c. ozbiljan protan PVB (20nm)

Univerzalna daltonizacija povećava dodatno, ali ne i značajno, broj različitih boja i to u slučaju blagog PVB: 51.449→52.395, umerenog protan PVB: 49.503→51.031, i ozbiljnijeg protan PVB: 46.983→48.732. Međutim, daljim povećavanjem kontrasta svetline došlo bi do smanjenja različitih boja jer bi se povećao i broj premapiranih vrednosti piksela koje izlaze van granica mogućeg gamuta i koje bi, usled toga, bile "klipovane" na iste granične vrednosti. U slučaju

primera na Slici 5.11 povećavanje kontrasta adaptacijom svetline se ne ocenjuje kao poboljšana verzija od strane ispitanika sa umerenim i težim poremećajem u odnosu na rezultat daltonizacije predstavljen na Slici 5.8. Stoga, efektnost univerzalne daltonizacije zavisi i od inicijalnog kontrasta slike i od preferencija posmatrača.

## 5.2.4 Evaluacija rezultata daltonizacije

### Evaluacija daltonizacije analizom poboljšanja pristupačnosti informacija u boji

U ispitivanju pomoću praćenja pogleda koristile su se dve mape metroa: za evaluaciju efektnosti tipske daltonizacije korišćena je metro mapa Atine sa pet transportnih linija, dok je za evaluaciju efektnosti težinske daltonizacije korišćena metro mapa Madrida sa deset transportnih linija. Korišćene mape prikazane su Prilogu P.4.

#### Tipska daltonizacija

Metro mapa sa pet transportnih linija korišćena u ispitivanju efektnosti tipske daltonizacije je prikazana na Slici 5.12.a. Heksadecimalne vrednosti boja na početnoj mapi su (Slika 5.12.b): M1(#9b9b23), M2(#49a523), M3(#64e371), P1(#5a70bb) i P2(#9f195a).

Boje početne mape su adaptirane sa četiri metoda daltonizacije: Chrome Daltonize (Slika 5.12.c), Koterin (Slika 5.12.d), Mačadov (Slika 5.12.e) i predloženi metod tipske daltonizacije (Slika 5.12.f).

Svi parovi boja iz početne šeme (Slika 5.12.b) imaju razliku boja  $\Delta E > 10$  što ih čini zadovoljavajuće distinktnim za posmatrača sa regularnim kolornim vidom. Međutim, za protan PVB korisnike originalna mapa ima jedan problematičan par boja, M1-M2 (leže na istoj liniji konfuzije).

Boje na mapi su odabrane sa intencijom da predstave komparativne prednosti novog metoda u poređenju sa aktuelnim sadržajno-nezavisnim metodom korišćenim u Chrome Daltonize ekstenziji za rešavanje problema pristupačnosti boje u web okruženju i sa nedavno objavljenim Koterinim metodom daltonizacije (spektralna daltonizacija).

Rezultat demonstrira da fiksni sadržajno-nezavisni metodi ne vode konzistentno poboljšanju distinkcije boja pošto je moguć scenario da boje koje su teške za razlikovanje ostanu konfuzne i posle daltonizacije ili, kao još nepovoljniji scenario, da boje koje su se jasno razlikovale budu mapirane u problematične kombinacije.

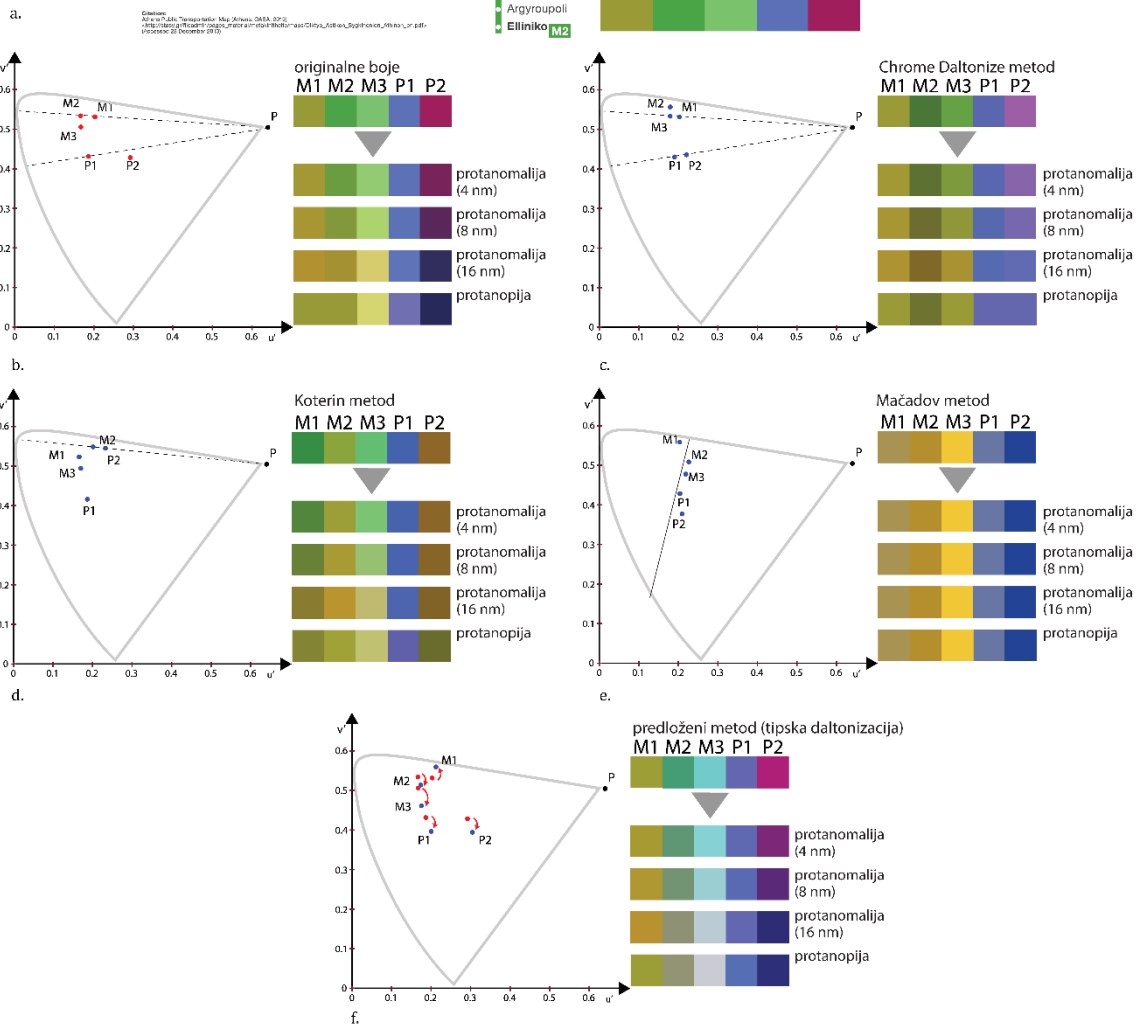
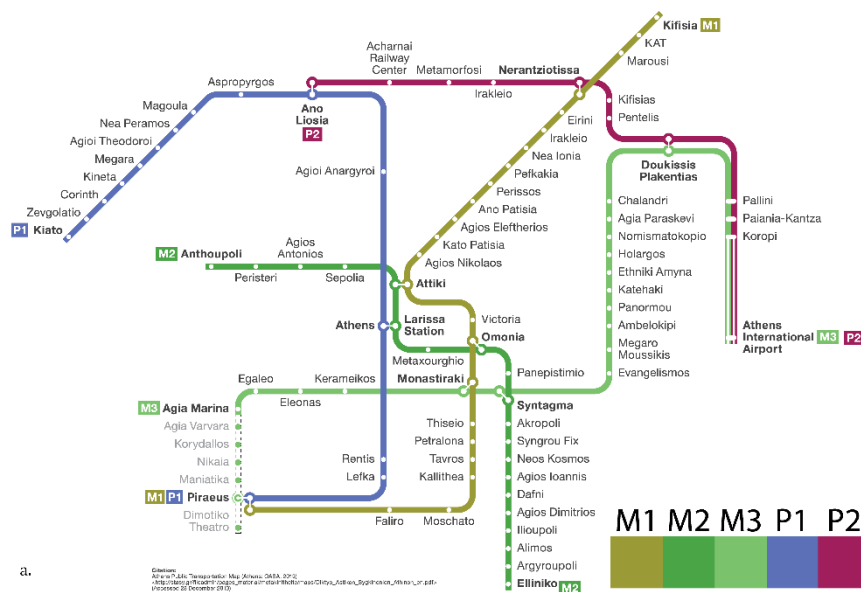
Adaptacija slike izvedena Chrome Daltonize ekstenzijom rešava inicijalnu problematičnu kombinaciju M1-M2, ali kreira nove dve – između M1 i M3 linija, i između P1 i P2 linija (Slika 5.12.c).

U slučaju Koterinog metoda daltonizacije (Slika 5.12.d), centar P2 je premapiran na oponentni deo dihromatske linije hromatičnosti i sada leži na istoj liniji konfuzije sa premapiranim M2 centrom, mada postoji distinkcija između P2 i M2 linije usled razlike u svetlini. Rezultat ove daltonizacije kreira konfuziju u tumačenju informacija sa mape pošto je P2 region sada vizuelno bliži M grupi transportnih ruta. Konačna šema boja ima redukovan hromatski diverzitet u odnosu na originalnu.

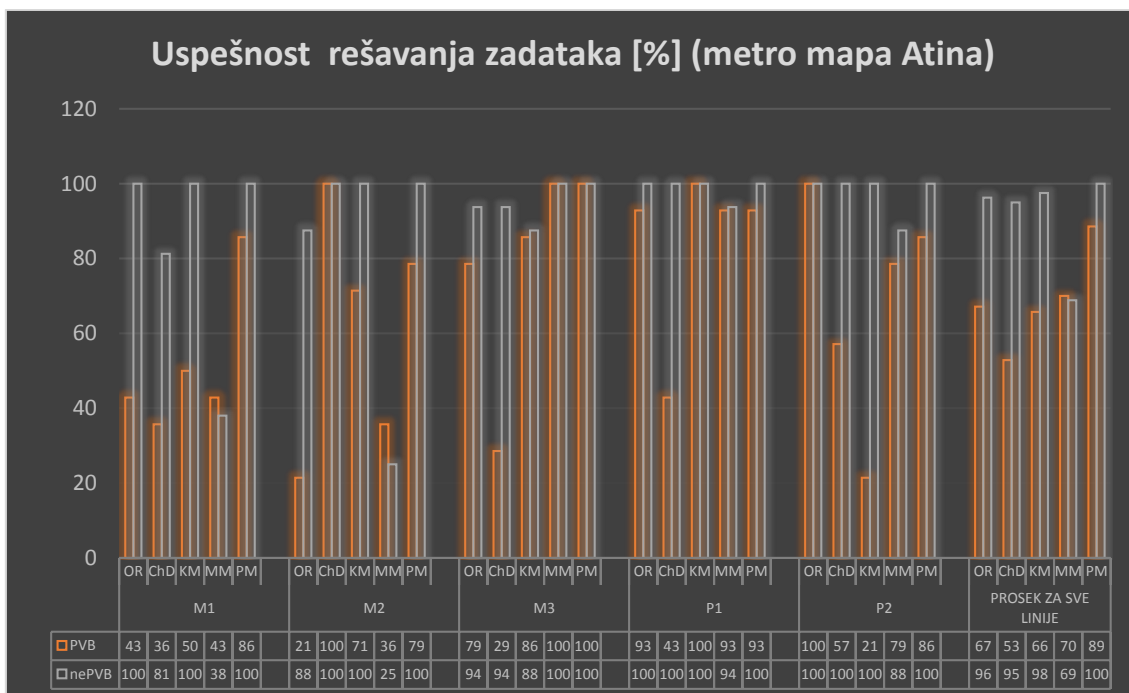
Sadržajno-zavisni metod definisan od strane Mačada je optimizovan za dihromatske PVB (Slika 5.12.e) tako da poboljšava distinkciju boja za dihromate. Međutim, opažanje slike nakon daltonizacije je isto za sve grupe posmatrača (dihromate, anomalne i normalne trihromate) što znači da je gamut slike redukovan više nego što je potrebno za anomalne i normalne trihromate. Ispitanici su ovo komentarisali kao neželjen rezultat, posebno oni čija je diskriminacija tonova normalna ili bliska normalnom viđenju boja.

Za razliku od ovih metoda, predložena tipska daltonizacija redistribuira boje segmenata mape bez pravljenja novih konfuznih kombinacija – samo jedan centar boje se nalazi na svakoj liniji konfuzije (Slika 5.12.f) i to tako da premapirani centri nisu odmakli puno od svojih početnih pozicija. Rezultat daltonizacije poboljšava globalni hromatski diverzitet.

Grafik 5.3 sumira uspešnost rešavanja zadataka u *eye-tracking* ispitivanju. Specifični slučajevi rešavanja zadataka dati su u Prilogu P.4.



Slika 5.12. Rezultat daltonizacije: a. početna mapa; protanske simulacije centara boja i njihove pozicije u CIE  $u'v'$  dijagramu hromatičnosti za: b. početnu šemu boja, c. šemu boja prilagođenu sa Chrome Daltonize metodom, d. Koterinim metodom, e. Mačadovim metodom, f. predloženim metodom (crvene tačke su pozicije originalnih centara, a plave predstavljaju nove pozicije) (Milić et al, 2015a)



Grafik 5.3. Uspešnost rešavanja eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija (M1, M2, M3, P1 i P2) za verzije mape: OR – početna mapa, ChD- nakon Chrome Daltonize daltonizacije, KM- nakon Koterine daltonizacije, MM- nakon Mačadove daltonizacije i PM- nakon predložene tipske daltonizacije

Porast uspešnosti rešavanja zadataka od strane test grupe PVB korisnika pre (67%) i nakon predložene daltonizacije (89%) predstavlja dokaz efektivnosti metoda u poboljšanju distinkcije boja za ciljnu populaciju. Osim potvrde hipoteze H3 da će PVB korisnici nakon daltonizacije tumačiti tačnije informacije kodirane bojom, pokazano je i da je predložena daltonizacija efektivnija od korišćenih sadržajno-nezavisnih metoda Chrome Daltonize (53%) i Koterinog metoda (66%), ali i sadržajno-zavisnog Mačadovog metoda (70%). Kuriozitet je da je predložena daltonizacija bila najefektivnija i za kontrolnu grupu regularnih posmatrača.

Ovako definisano ispitivanje otkriva da za efektivnost daltonizacije nije dovoljno da se napravi kontrast između dva elementa ili dva uska opsega boja (obično crvenog i zelenog), već je potrebno napraviti *globalno poboljšanje distinkcije boja*. Kao što se primećuje na Grafiku 5.3, uspešnost rešavanja zadataka PVB korisnika na mapi nakon predložene tipske daltonizacije je najveća u slučaju samo jedne linije – M1. PVB korisnici pronalaze liniju M3 podjednako uspešno i u slučaju predložene i u slučaju Mačadove daltonizacije (žuta), dok, u slučaju preostale tri linije, verzija nakon predložene daltonizacije nije sa najuspešnijim procentom rešavanja. Međutim, kako ne postoje velike oscilacije u uspešnosti rešavanja zadataka (79%-100%), sumarno je verzija mape nakon predložene tipske daltonizacije najefektivnija.

Na Grafiku 5.4 prikazana su pojedinačna vremena uspešno rešenih zadataka, dok Grafik 5.5 predstavlja prosečna vremena za transportne linije i sumarno za verzije mape. Može se primetiti da, iako nisu obuhvaćeni slučajevi kada korisnik nije uspeo da pronađe traženu liniju (vreme reakcije > 15s), vremena rešavanja zadataka kontrolne i test grupe predstavljaju dobar indikator zadovoljavajuće ili nezadovoljavajuće distinkcije boja.

Najbržu reakciju PVB ispitanici su imali u slučaju M3 transportne linije u KM (Koterin metod daltonizacije) verziji mape, jer u ovom slučaju žuta boja značajno odstupa po hromatičnosti od ostalih transportnih linija (videti Sliku 5.12.e). Ovo je, takođe, i slučaj kada su prosečna vremena test (PVB) i kontrolne (nePVB) grupe najpribližnija. PVB ispitanici su sa lakoćom nalazili i liniju P1 u MM (Mačadov metod daltonizacije) verziji mape jer je u ovom slučaju linija P1 jedina sa dominantnom komponentom plave, za razliku od ostale četiri koje se projektuju na žutu polovinu plavo-žute dihromatske ravni.

Hi-kvadrat test nezavisnosti (uz korekciju neprekidnosti prema Jeitsu) pokazao je značajnu razliku u uspešnosti rešavanja zadataka između PVB i nePVB grupe, sa nivoom značajnosti od 0.05, u sledećim slučajevima:

#### *Linija M1*

**OR verzija:**  $c^2(1, N=30)=9.717, p<0.01, fi=0.645$  (veliki uticaj)

**ChD verzija:**  $c^2(1, N=30)=4.693, p=0.03$  (prema Fišeru  $p=0.024$ ),  $fi=0.464$  (srednji uticaj)

**KM verzija:**  $c^2(1, N=30)=7.827, p<0.01, fi=0.59$  (veliki uticaj)

#### *Linija M2*

**OR verzija:**  $c^2(1, N=30)=10.72, p<0.01, fi=0.665$  (veliki uticaj)

**KM verzija:**  $c^2(1, N=30)=3.092, p=0.079$  (prema Fišeru  $p=0.037$ ),  $fi=0.419$  (srednji uticaj)

#### *Linija M3*

**ChD verzija:**  $c^2(1, N=30)=10.997, p<0.01, fi=0.675$  (veliki uticaj)

#### *Linija P1*

**ChD verzija:**  $c^2(1, N=30)=9.717, p<0.01, fi=0.645$  (veliki uticaj)

#### *Linija P2*

**ChD verzija:**  $c^2(1, N=30)=6.102, p=0.0135, fi=0.535$  (veliki uticaj)

**KM verzija:**  $c^2(1, N=30)=16.61, p<0.01, fi=0.813$  (veliki uticaj)

Takođe, postoji statistički značajna razlika sa velikim uticajem između stopa uspešnosti rešavanja zadataka među PVB grupom u slučaju svih linija izuzev linije M1:

**Linija M2:**  $c^2(4, N=70)=19.309, p<0.01$

**Linija M3:**  $c^2(4, N=70)=23.439, p<0.01$

**Linija P1:**  $c^2(4, N=70)=17.5, p<0.01$

**Linija P2:**  $c^2(4, N=70)=19.24, p<0.01$

U slučaju nePVB grupe, značajne razlike u uspešnosti postoje u slučaju **linije M1** ( $c^2(4, N=80)=27.945, p<0.01$ ) i **linije M2** ( $c^2(4, N=80)=35.154, p<0.01$ ), odnosno na Koterinoj verziji mape nePVB ispitanici neuspešnije nalaze linije M1 i M2 u odnosu na ostale verzije.

Slično procentu uspešnosti rešavanja, prosečna vremena uspešnog traženja linija (od strane PVB ispitanika) na mapi nakon predložene tipske daltonizacije nisu najniža u slučaju svih pojedinačnih linija, ali je najniže zbirno prosečno vreme (6.75 s), što znači da predložena tipska daltonizacija globalno rezultira tačnijim i bržim tumačenjem vizuelnih informacija sa mape.

U slučaju kontrolne (nePVB) grupe Koterin metod daltonizacije (KM) rezultuje najmanjim prosečnim vremenom, a Mačadov metod daltonizacije (MM) najvećim. U slučaju preostale tri verzije mape prosečna vremena su približna.

Najveća razlika u vremenu reakcije između test i kontrolne grupe je u slučaju P2 linije u KM verziji mape.

Kada postoji dobra distinkcija boja, posmatrači iz obe grupe imaju niža prosečna vremena nalaženja transportne linije, kao i manje varijacije u vremenu (tačke na grafiku su „gušće“ skoncentrisane) i obrnuto – u slučaju nezadovoljavajuće distinkcije i posmatrači sa normalnim viđenjem boja su imali „dvoumljenja“ prilikom izbora tražene linije.

Man-Vitnjev U test je otkrio statistički značajno brže ispunjenje zadatka od strane kontrolne grupe (nePVB korisnika) u odnosu na test grupu (PVB korisnike) u sledećim slučajevima:

*Linija M1*

**OR verzija:** U: 17, z:-2.289, p=0.022, r=0.418 (srednji uticaj)

*Linija M2*

**KM verzija:** U: 22.5, z:-3.036, p=0.001, r=0.554 (veliki uticaj)

*Linija P1*

**ChD verzija:** U: 15, z:-2.436, p=0.013, r=0.444 (srednji uticaj)

**PM verzija:** U: 48, z:-2.459, p=0.013, r=0.449 (srednji uticaj)

*Linija P2*

**KM verzija:** U: 3, z:-2.350, p=0.019, r=0.43 (srednji uticaj)

Man-Vitnjev U test je otkrio statistički značajno brže ispunjenje zadatka PVB korisnika u slučaju PM verzije mape u poređenju sa ostalim verzijama mape Atine u sledećim slučajevima:

*Linija M1*

**OR vs PM verzija:** U: 12, z:-2.251, p=0.024, r=0.425 (srednji uticaj)

**MM vs PM verzija:** U: 3, z:-3.094, p=0.01, r=0.58 (veliki uticaj)

*Linija M2*

**MM vs PM verzija:** U: 9.5, z:-2.048, p=0.038, r=0.39 (srednji uticaj)

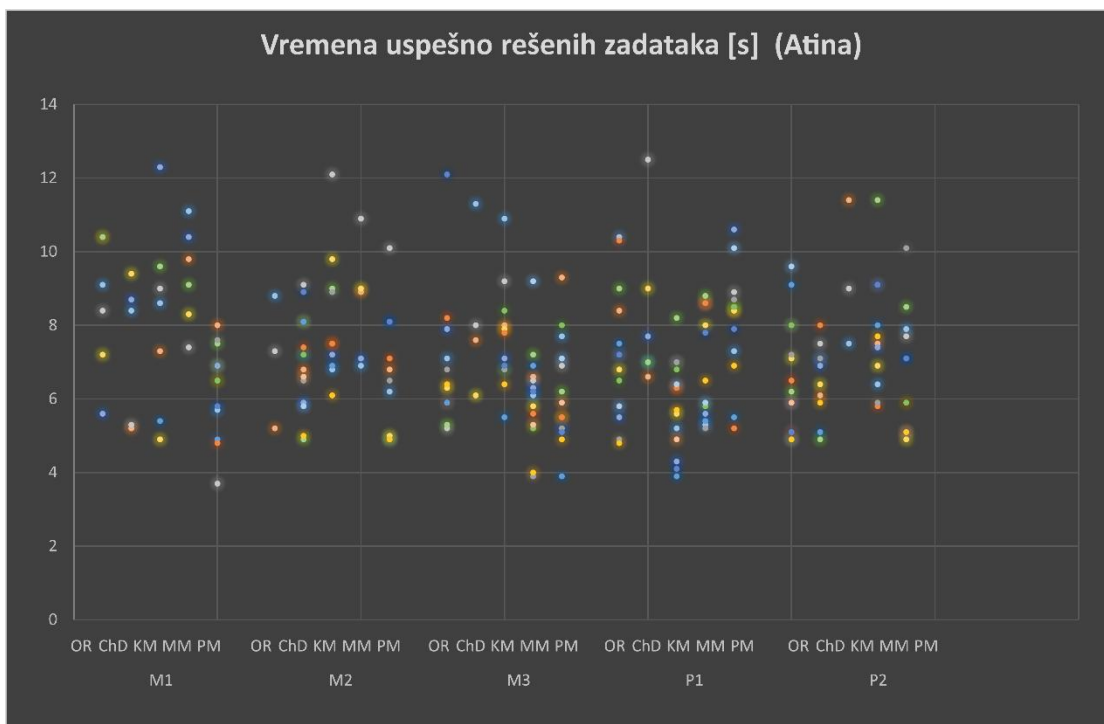
*Linija M3*

**KM vs PM verzija:** U: 38.5, z:-2.344, p=0.017, r=0.44 (srednji uticaj)

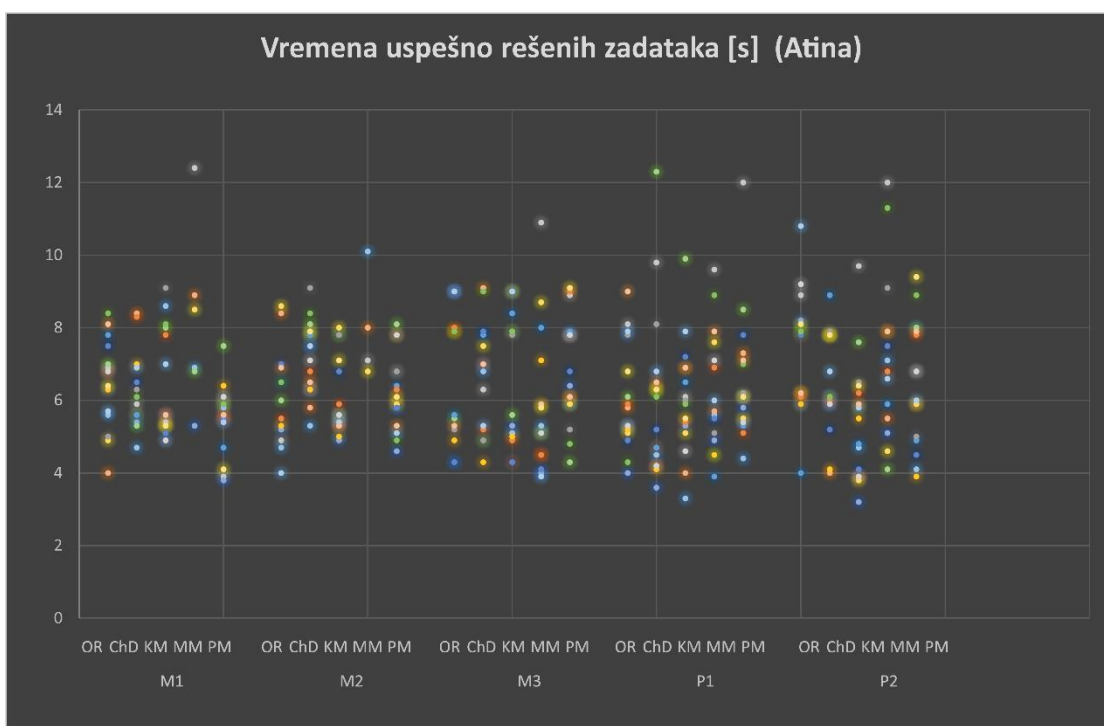
Međutim, posmatrači su brže nalazili liniju P1 na KM verziji mape u poređenju sa PM verzijom mape: U: 23.5, z:-3.278, p=0.01, r=0.62 (veliki uticaj).

Iako statistička značajnost u smanjenju vremena uspešnog rešavanja zadataka od strane PVB ispitanika između mape nakon predložene tipske daltonizacije i ostalih verzija mape Atine postoji samo u izolovanim slučajevima, najmanje prosečno vreme (6.75s) i najmanja razlika u vremenu između kontrole i test grupe (0.42s) su pokazatelji da tipska daltonizacija utiče na brže tumačenje informacija kodiranih u boji. Statistički podaci su prikazani u Prilogu P.4.



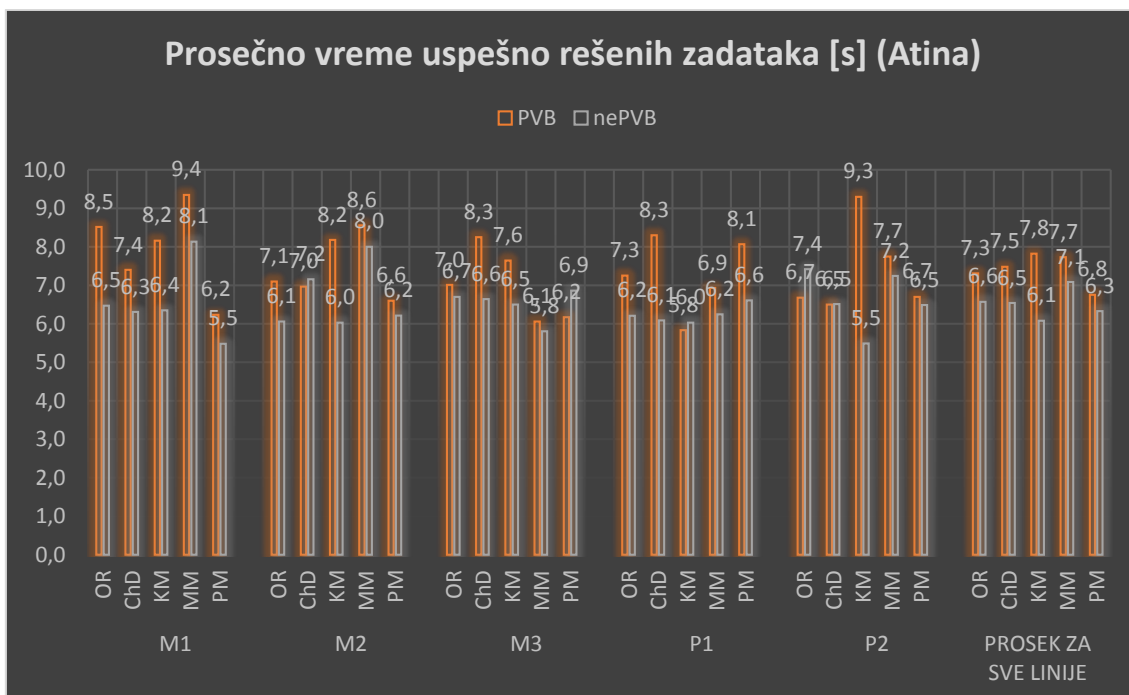


a.



b.

Grafik 5.4. Vremena uspešno rešenih eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija (M1, M2, M3, P1 i P2) za verzije mape: OR – početna mapa, ChD- nakon Chrome Daltonize daltonizacije, KM- nakon Koterine daltonizacije, MM- nakon Mačadove daltonizacije i PM- nakon predložene tipske daltonizacije za: a. test grupu PVB ispitanika, b. kontrolnu grupu ispitanika sa dobrom diskriminacijom boja



Grafik 5.5. Uporedna prosečna vremena uspešno rešenih eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija (M1, M2, M3, P1 i P2) za verzije mape: OR – početna mapa, ChD- nakon Chrome Daltonize daltonizacije, KM- nakon Koterine daltonizacije, MM- nakon Mačadove daltonizacije i PM- nakon predložene tipske daltonizacije

## Težinska daltonizacija

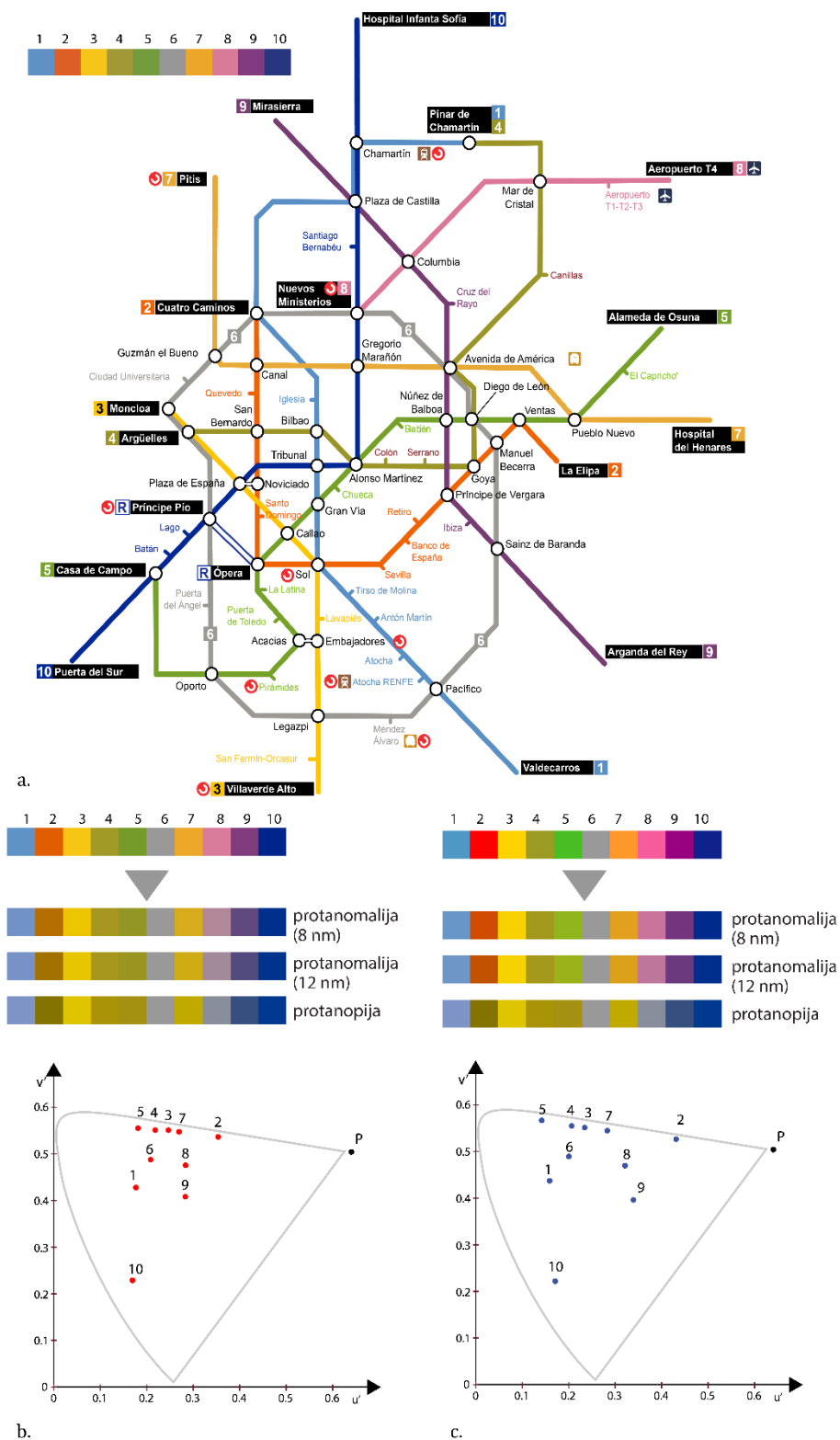
Metro mapa sa deset transportnih linija korišćena u ispitivanju efektivnosti težinske daltonizacije je prikazana na Slici 5.13. Heksadecimalne vrednosti boja na početnoj mapi su (Slika 5.13.a): linija 1(#5f92c5), linija 2(#e05e00), linija 3(#f7c615), linija 4(#a19a27), linija 5(#759c2a), linija 6(#999999), linija 7(#eda729), linija 8(#d97b9a), linija 9(#803b7d) i linija 10(#00258a).

Boje početne mape (Slika 5.13.b) su adaptirane predloženom težinskom daltonizacijom (Slika 5.13.c). Svi parovi boja iz početne šeme (Slika 5.13.b) imaju razliku boja  $\Delta E > 10$  što ih čini zadovoljavajuće distinktnim za posmatrača sa regularnim kolornim vidom. Međutim, za dihromatske posmatrača na početnoj mapi se izdvajaju tri seta boja koje dele diskriminacionu elipsu – u prvom su linije 2, 3, 4, 5 i 7, u drugoj su linije 1, 6 i 8, a u trećoj linije 9 i 10. Te skupine se ne menjaju ni nakon težinske daltonizacije, ali su boje unutar korespondirajućih diskriminacionih elipsi „razmaknutije“ (Slika 5.13.c). Težinska adaptacija određene boje je uslovljena njenom početnom pozicijom, tako da se linije koje se opažaju isto/sasvim slično od strane normalnih dihromata i trihromata najmanje pomeraju – to su linije 3, 4, 6 i 10, dok se najviše menjaju boje sa dominantnom crvenom komponentom (linije 2 i 8) ili dominantnom

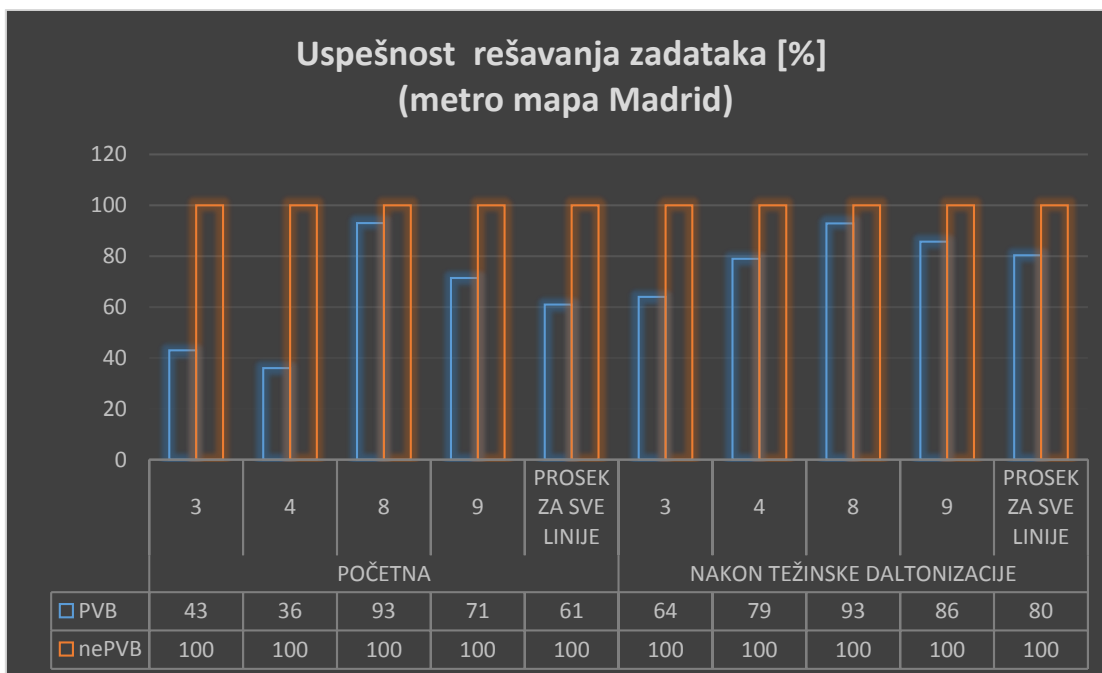
zelenom komponentom (linija 5). Boje završavaju bliže granicama spektralnog lokusa što se manifestuje većim zasićenjem boja.

Ispitanici obe grupe su imali zadatak da isprate pogledom linije 3, 4, 8 ili 9 pre i nakon težinske daltonizacije. Uzorak boje tražene metro linije prikazan je istovremeno sa mapom u gornjem levom uglu mape. Grafik 5.6 prikazuje rezultate uspešnosti rešavanja zadataka. Specifični slučajevi rešavanja zadataka dati su u Prilogu P.4.

Na Grafiku 5.7 prikazana su pojedinačna vremena uspešno rešenih zadataka, dok Grafik 5.8 predstavlja prosečna vremena za transportne linije i sumarno za verzije mape.



Slika 5.13. Rezultat daltonizacije: a. Početna mapa; protanske simulacije centara boja i njihova pozicija u CIE  $u'v'$  dijagramu hromatičnosti za: b. početnu šemu boja i c. šemu boja prilagođenu predloženi metodom težinske daltonizacije (crvene tačke su pozicije početnih centara, a plave predstavljaju nove pozicije)



Grafik 5.6. Uspešnost rešavanja eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija (3, 4, 8, 9) za početnu mapu i verziju nakon predložene težinske daltonizacije

Sa grafika se može uočiti da je težinska daltonizacija rezultirala za test grupu (PVB ispitanike) porastom procenta uspešnosti praćenja traženih transportnih linija od 61% na 80%. Razlog zbog kojeg procenat uspešnosti nije 100% iako je uzorak tražene boje bio prisutan na mapi kao referenca može se naći u tome što je među ispitanicima bilo i ispitanika sa ozbiljnijim poremećajima viđenja boja za koje težinska daltonizacija nema efekta.

Hi-kvadrat test nezavisnosti (uz korekciju prema Jejtisu) pokazao je značajnu razliku, sa nivoom značajnosti od 0.05, u uspešnosti rešavanja zadataka između PVB i nePVB grupe u sledećim slučajevima:

I Mapa pre težinske daltonizacije

**Linija 3:**  $c^2(1, N=30)=9.717$ ,  $p<0.01$ ,  $fi=0.645$  (veliki uticaj)

**Linija 4:**  $c^2(1, N=30)=11.792$ ,  $p<0.01$ ,  $fi=0.7$  (veliki uticaj)

**Linija 9:**  $c^2(1, N=30)=3.092$ ,  $p=0.037$  (korekcija prema Fišeru),  $fi=0.419$  (srednji uticaj)

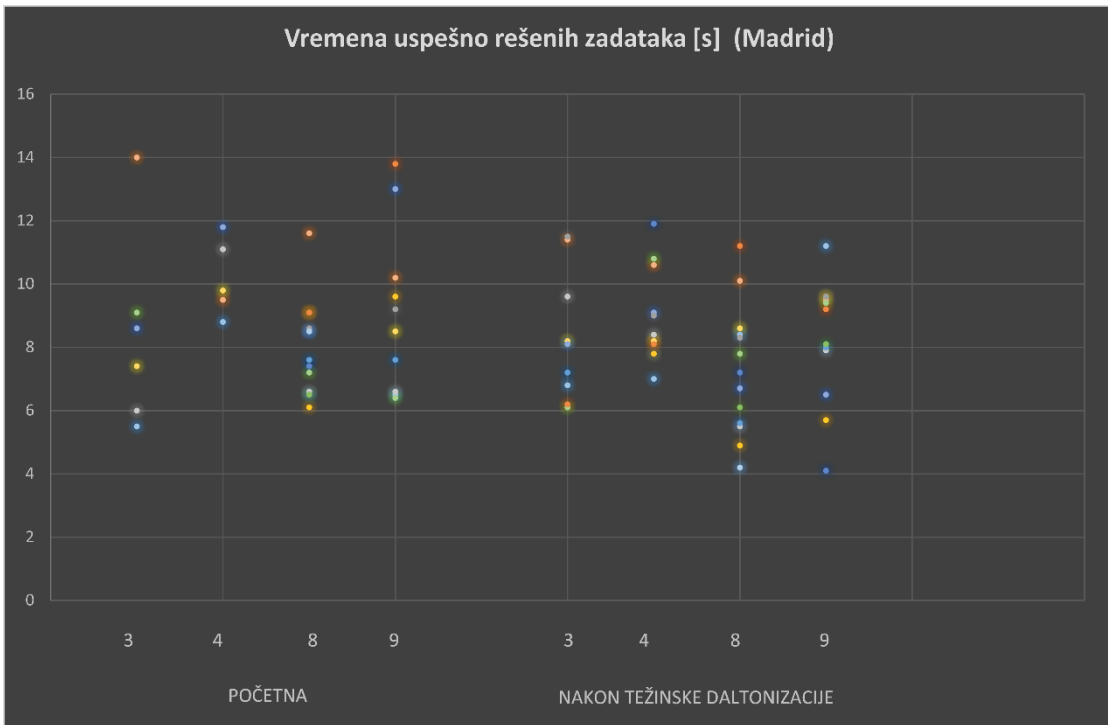
II Mapa posle težinske daltonizacije

**Linija 3:**  $c^2(1, N=30)=4.527$ ,  $p=0.014$  (korekcija prema Fišeru),  $fi=0.479$  (srednji uticaj)

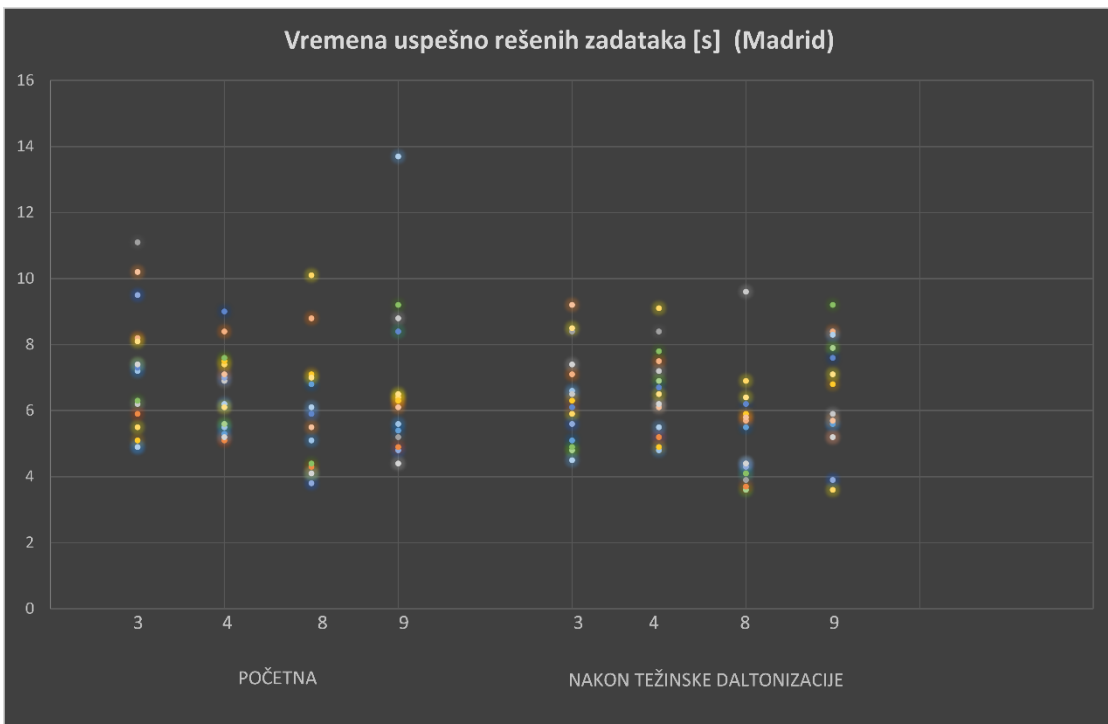
Odnosno, statistički značajno je povećana stopa uspešnosti u slučaju Linije 4:  $c^2(1, N=28)=3.646$ ,  $p=0.05$ ,  $fi=0.433$  (srednji uticaj).

Osim većeg procenta uspešnosti, predložena težinska daltonizacija je smanjila i prosečna vremena uspešno rešenih zadataka (sa 8.93s na 8.21s). Povećanje brzine reakcije najuočljivije je u slučaju linije 4 (sa 10.2s na 8.97s).

Grupa ispitanika sa normalnim raspoznavanjem boja nije imala problema u rešavanju zadataka ni na početnoj mapi ni na mapi nakon težinske daltonizacije. Međutim, sa Grafika 5.8 može se uočiti da je težinska daltonizacija bila efektivna i za kontrolnu (nePVB) grupu jer su prosečna vremena nalaženja linija niža nakon težinske daltonizacije.

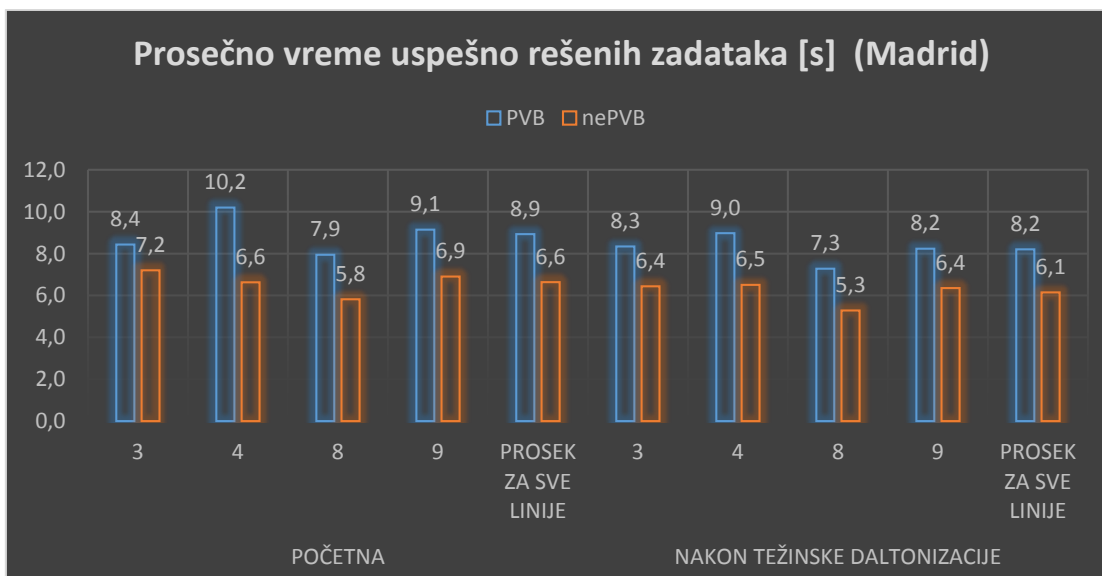


a.



b.

Grafik 5.7. Vremena uspešno rešenih eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija (3, 4, 8, 9) za početnu mapu i verziju nakon predložene težinske daltonizacije za: a. test grupu PVB ispitanika, b. kontrolnu grupu ispitanika sa dobrom diskriminacijom boja



Grafik 5.8. Vremena uspešno rešenih eye-tracking zadataka prema zadatim bojama transportnih linija (3, 4, 8, 9) za početnu mapu i verziju nakon predložene težinske daltonizacije

U poređenju sa vremenima rešavanja zadataka u ispitivanju tipske daltonizacije na metro mapi Atine (Grafik 5.5), razlike u prosečnim vremenima između test i kontrolne grupe su u slučaju mape Madrida veće (Grafik 5.5). Ovo se može objasniti time što je, za razliku od mape Atine, uzorak boje tražene linije sve vreme prisutan u gornjem levom uglu mape tako da su PVB ispitanici koristili priliku da ponovo pogledaju u pravcu uzorka boje kada naiđu na konfuznu kombinaciju što je povećavalo ukupno vreme traženja linije.

Man-Vitnijev U test pokazuje značajnu razliku u vremenu ispunjenja zadatka između PVB i nePVB korisnika u svim slučajevima izuzev linije 3 kod početne mape. Takođe, Man-Vitnijev U test pokazuje i da nema statistički značajne razlike između vremena uspešnog rešavanja zadataka od strane PVB ispitanika pre i nakon težinske daltonizacije. Iako nema statističke značajnosti, tendencija smanjenja vremena u slučaju sve četiri linije pojedinačno (a time i prosečnog vremena za verziju mape) predstavlja dobar indikator uticaja daltonizacije na brže tumačenje informacija kodiranih u boji. Statistički podaci su prikazani u Prilogu P.4.



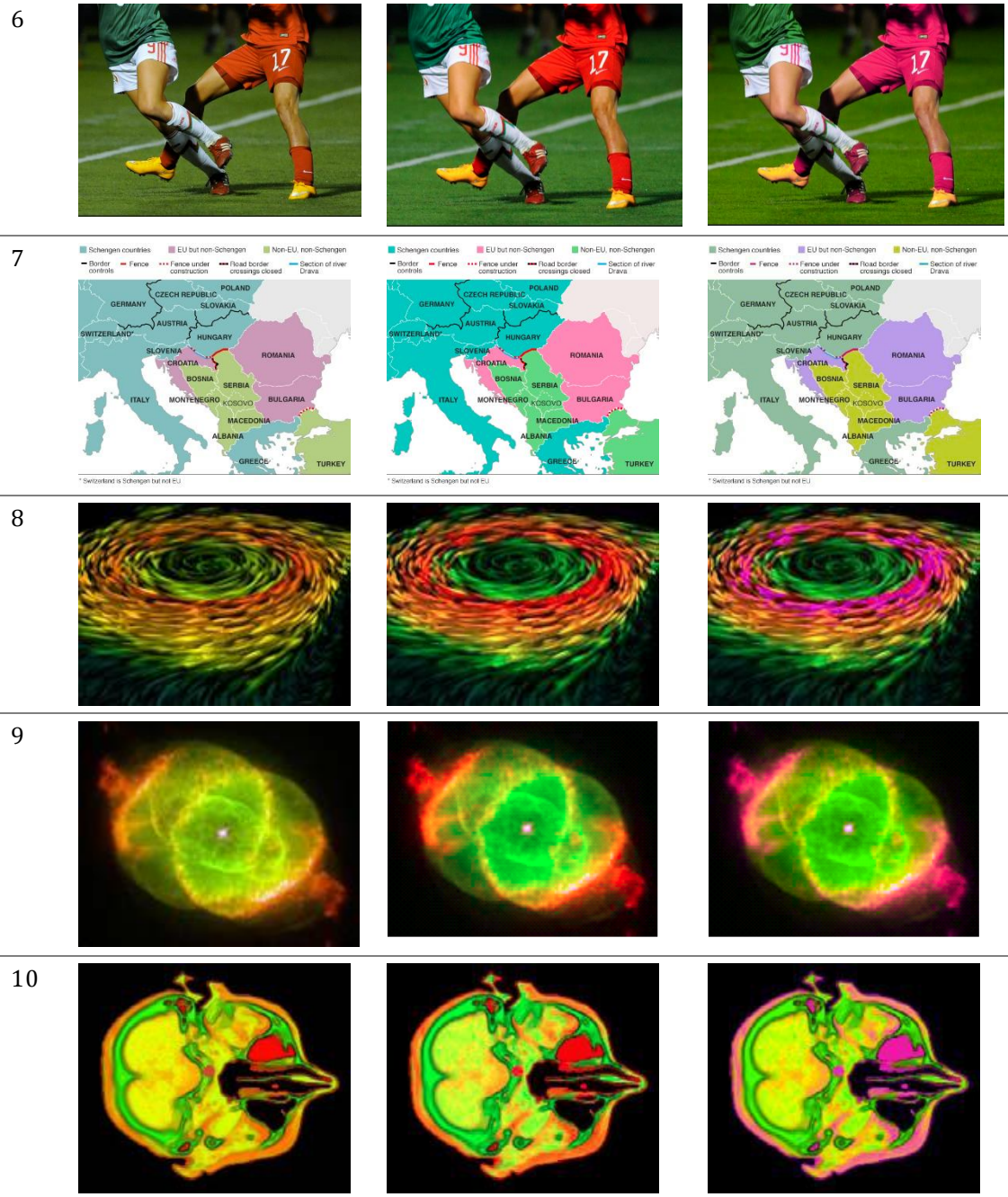
## Subjektivna evaluacija uporednom analizom opaženog kvaliteta parova slika

Tabela 5.2. prikazuje dvanaest test slika i njihove verzije nakon predložene težinske i tpske daltonizacije. Slike 1-6 su fotografije prirodnih scena, dok su slike 7-12 artifičijelnog sadržaja i boja.

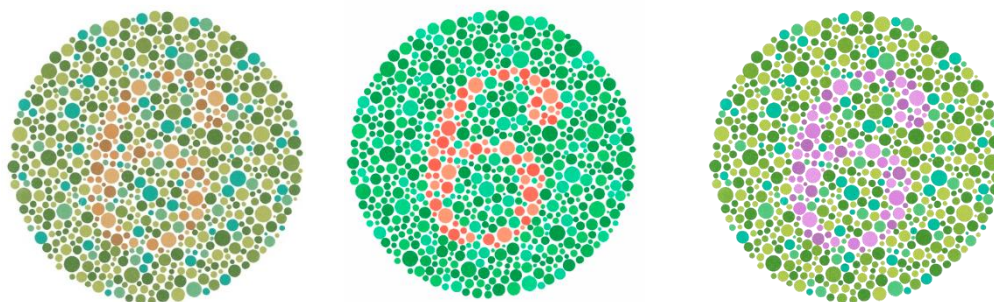
Tabela 5.2. Test slike za subjektivnu evaluaciju i verzije nakon tpske i težinske daltonizacije

rbr	Originalna slika	Nakon težinske daltonizacije	Nakon tpske daltonizacije
1			
2			
3			
4			
5			

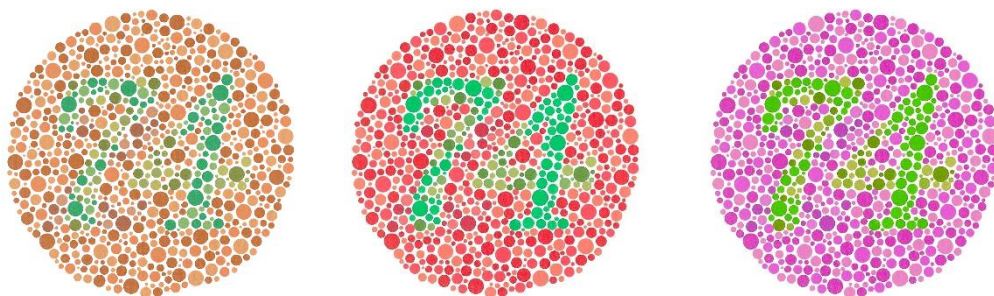
Nastavak Tabele 5.2



11



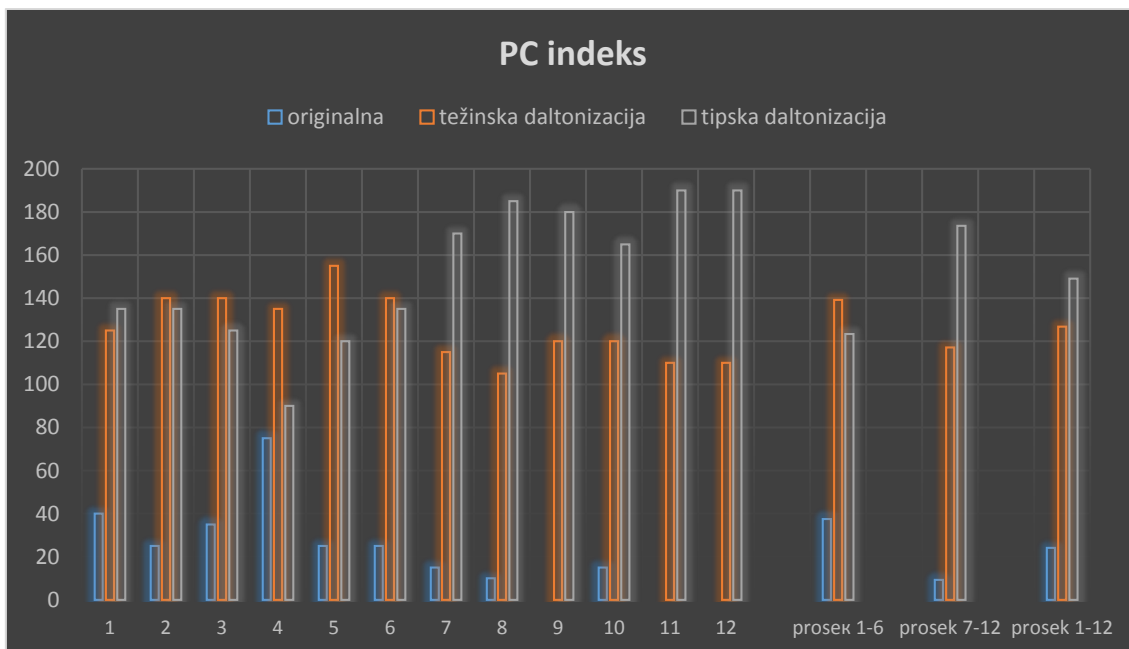
12



---

Grafik 5.9 pokazuje rezultate PC indeksa pojedinačno za svaku sliku, kao i sumarni PC indeks za prirodne test slike (1-6), veštačke test slike (7-12) i sve (1-12). Zbirni PC indeks pokazuje da se obe modifikovane verzije, i nakon težinske i nakon tipske daltonizacije, preferiraju u odnosu na originalne test slike. Pojedinačni PC indeksi pokazuju da opaženo poboljšanje kvaliteta slike varira od slike do slike, kao i da se u slučaju prirodnih slika (1-6) neznatno bolje pokazala težinska daltonizacija, dok tipska daltonizacija predstavlja najbolje ocenjenu verziju u slučaju slika sa artificijelnim sadržajem (7-12). Najizraženije poboljšanje opaženog kvaliteta (PC indeks 190) PVB ispitanici su primetili nakon tipske daltonizacije Išiharinih tablica (slike 11 i 12). Slike 1-6 pokazuju i prednost koncepta zavisnosti dozvoljene oblasti premeštanja od razlike između trihromatske i dihromatske percepcije boje. Boje koje se nalaze bliže dihromatskoj plavo-žutoj gamutskoj ravni izmenjene sa slabijim intenzitetom, a ahromatska skala na slici je ostala neizmenjena. Slika 6 pokazuje i dobro očuvanje prirodnosti izgleda tonova kože.

Time što je premeštaj boje proporcionalan razlici boje, odnosno čuvaju se one boje slike koje PVB korisnici opažaju najsličnije prosečnim posmatračima, zadovoljava se svojstvo globalne konzistentnosti i čuvaju se “perceptualne razlike” između originalnih boja. Pojedinačni rezultati prikazani su u Prilogu P.5.



Grafik 5.9. Vrednosti PC indeksa za pojedinačne test slike, kao i prosečne vrednosti za prirodne slike (1-6), veštačke slike (7-12) i sve test slike. Minimalna vrednost PC indeksa je 0, a maksimalna 200.

Dobijeni rezultati potvrđuju hipotezu H7 da težina poremećaja utiče na procenu poboljšanja opaženog kvaliteta slike, gde korisnici sa blažim poremećajem bolje ocenjuju težinsku daltonizaciju u poređenju sa korisnicima sa ozbiljnim poremećajem. Takođe je potvrđena i hipoteza H8 da sadržaj slike utiče na procenu poboljšanja opaženog kvaliteta, tako da se, u slučaju slika prirodnih scena, preferira težinska daltonizacija, a, u slučaju veštačkih slika, tipska daltonizacija koja daje bolji hromatski kontrast.

Kako je PC indeks najmanji u slučaju originalne verzije svih 12 test slika potvrđena je i hipoteza H4 verifikacije daltonizacije da će korisnici sa različitim težinama PVB preferirati sliku nakon predložene daltonizacije u odnosu na originalnu.

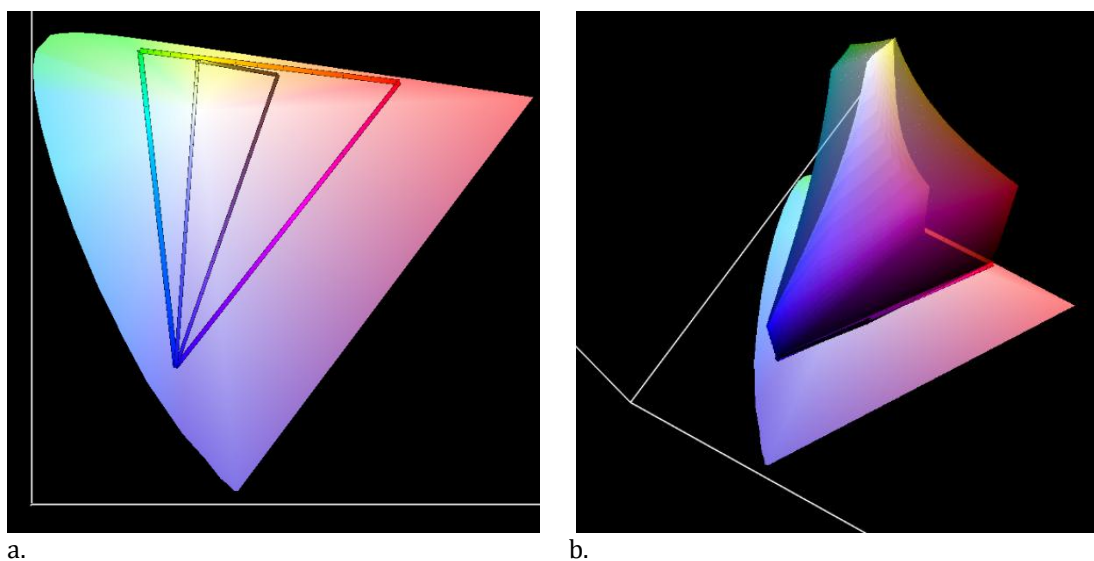
# 6.0 DISKUSIJA REZULTATA

## 6.1 DISKUSIJA REZULTATA SIMULACIJE

Značajno veće poklapanje personalizovane simulacije sa originalnom slikom u odnosu na dihromatsku simulaciju od strane PVB ispitanika dokazuje *hipotezu H1* da personalizovana simulacija omogućava egzaktniji uvid u percepciju korisnika sa PVB u poređenju sa dihromatskom simulacijom po Bretel-Vienot-Molon metodu.

Iako se prosečna pojedinačna ocena predložene simulacija (0.7) nalazi bliže oceni „slično“ nego „identično“, odnosno ne pruža savršenu reprodukciju percepcije PVB korisnika, i dalje predstavlja pouzdaniji način za predviđanje konfuznih skupova boja od dihromatske simulacije.

Na osnovu određenih tristimulusnih vrednosti RGB primara moguće je kreirati i ICC RGB profil. Primer generisanog personalizovanog profila sa tristimulusnim koordinatama pokazan je na Slici 6.1.



Slika 6.1. Personalizovani opseg u poređenju sa trihromatskim (sRGB) gamutom u: a. CIE  $u'v'$  ravni, b. CIE  $Lu'v'$  prostoru boja

Vizuelizacija profila daje tačan uvid u to koje se boje nalaze izvan opsega posmatrača. Osim kvalitativne analize, inspekcijom profila u *Chromix ColorThink* softveru ili softveru slične namene možemo doći i do kvantitativnog iznosa volumena gamuta i procenta redukcije gamuta u odnosu na trihromatski (sRGB). U slučaju profila sa Slike 6.1 volumen

gamuta iznosi tek 16.34% standardizovanog sRGB gamuta. Kreirani personalizovani ICC profil može se koristiti kao radno okruženje prikaznog uređaja (Slika 6.2).



a.

Slika 6.2. Primer upotrebe personalizovanog ICC profila. Originalna slika sa dodeljenim profilom: a. sRGB i b. personalizovanim ICC profilom



b.

**Ograničenja i pravci daljeg istraživanja.** Razlike u ocenama test slika kao i komentari ispitanika u slobodnoj formi nameću zaključak da postoji potreba za detaljnijom analizom simulacije anomalnog viđenja boja i preispitivanjem na koji način hibridni ili nedostajući fotopigment utiče na svetlo-tamno oponentni kanal. Buduće ispitivanje treba da uključuje test polja uniformno obojenih stimulusa kako bi se preciznije izdvojile boje čije opažanje simulacija pouzdano reprodukuje, a gde nastaju problemi i da li je priroda problema u komponenti hromatičnosti ili svetline. Isto tako, potrebno je ispitati i razliku između pozicija RGB primara određenih diskretnim izohromatskim tablicama i kontinualnim određivanjem praga diskriminacije.

U buduće pravce istraživanja treba uključiti i ispitivanje pouzdanosti generisanja RGB ICC profila na osnovu promenjenih pozicija RGB primara, odnosno određivanje razlika u vrednostima piksela slika nakon matrične konverzije u softveru (*Wolftam Mathematica*, *MathWorks* ili slično) i nakon konvertovanja slike iz sRGB u personalizovani ICC profil kreiran specijalizovanim softverom (*GratagMacbeth ProfileMaker*, *Quick Monitor Profile* ili slično).

Dokazana hipoteza ispitivanja u saglasnosti je sa rezultatima istraživanja Flatle i Gutvina (2012) čiji personalizovani pristup određivanja diskriminacionih elipsi preciznije utvrđuje boje koje PVB osoba neće moći da razlikuje u odnosu na standardnu dihromatsku simulaciju.

Nakon ocenjivanja slika, ispitanici su imali priliku da ponovo pogledaju korišćene test slike i komentarišu u slobodnoj formi opaženu razliku između slika. Komentari su otkrili da ispitanici primećuju u značajnom broju slučajeva veću razliku između personalizovane i dihromatske nego između personalizovanih simulacija protan i deutan tipa iste ili slične težine. Preciznije-razlike između deutan i protan simulacije iste ili slične težine uočavali su u svetlini, dok su

razlike između dve protan ili dve deutan simulacije različitih težina uočavali u izmenjenim ili izgubljenim tonovima slike.

Poređenje rezultata ispitanika na Farnsworth-Munsell 100 Hue testu i kalibracionom testu prikazano je u Prilogu P.6. Indeks težine PVB kalibracionog testa u dobroj je korelaciji sa ukupnom greškom kao merom težine poremećaja na FM 100 Hue testu. U slučaju osam od ukupno deset ispitanika klasifikacija tipa PVB pomoću ova dva testa se podudara. Dva ispitanika, dijagnostifikovana FM 100 Hue testom kao protan tip poremećaja, imali su na kalibracionom testu manje uspešno rešenih koraka u deutan nizu R primara – klasifikovani su kao deuteranomali. Sistematična i pouzdanija verifikacija kalibracionog testa zahteva veći broj ispitanika i uključivanje dijagnostike pomoću anomaloskopa.

## 6.2 DISKUSIJA REZULTATA DALTONIZACIJE

### Diskusija ispitivanja sa praćenjem pogleda

Ispitivanje sa praćenjem pogleda imalo je za osnovni cilj da ukaže na univerzalni nedostatak sadržajno-nezavisnih metoda, tako da je početna šema boje mape Atine kreirana sa intencijom da pokaže primer problematičnog slučaja sa najčešće korišćenim sadržajno-nezavisnim algoritmom *Chrome Daltonize* ekstenzije. Rezultati su poređeni sa predloženom tipskom daltonizacijom kako bi se dobila potvrda da širenje hromatskog diverziteta u pravcu plavo-žutog kanala vodi boljoj distinkciji hromatičnosti.

Povratne reakcije od ispitanika u vezi bihevioralnog ispitivanja sa praćenjem pogleda su izuzetno pozitivne – ispitanicima je bila zanimljivija forma zadatka nego prosta komparacija uparenih uzoraka ili rangiranje. Dodatne prednosti ovakvog metodološkog okvira su smanjivanje trajanja ispitivanja i replicirani scenario iz realnog života kada se traži odgovarajuća linija transporta na mapi javnog prevoza.

Uspešnost rešavanja zadataka se pokazala kao odgovarajući indikator dobrog ili lošeg učinka daltonizacije (*hipoteza H6*) što potvrđuju i rezultati u radu Liedtke i ostalih (2013).

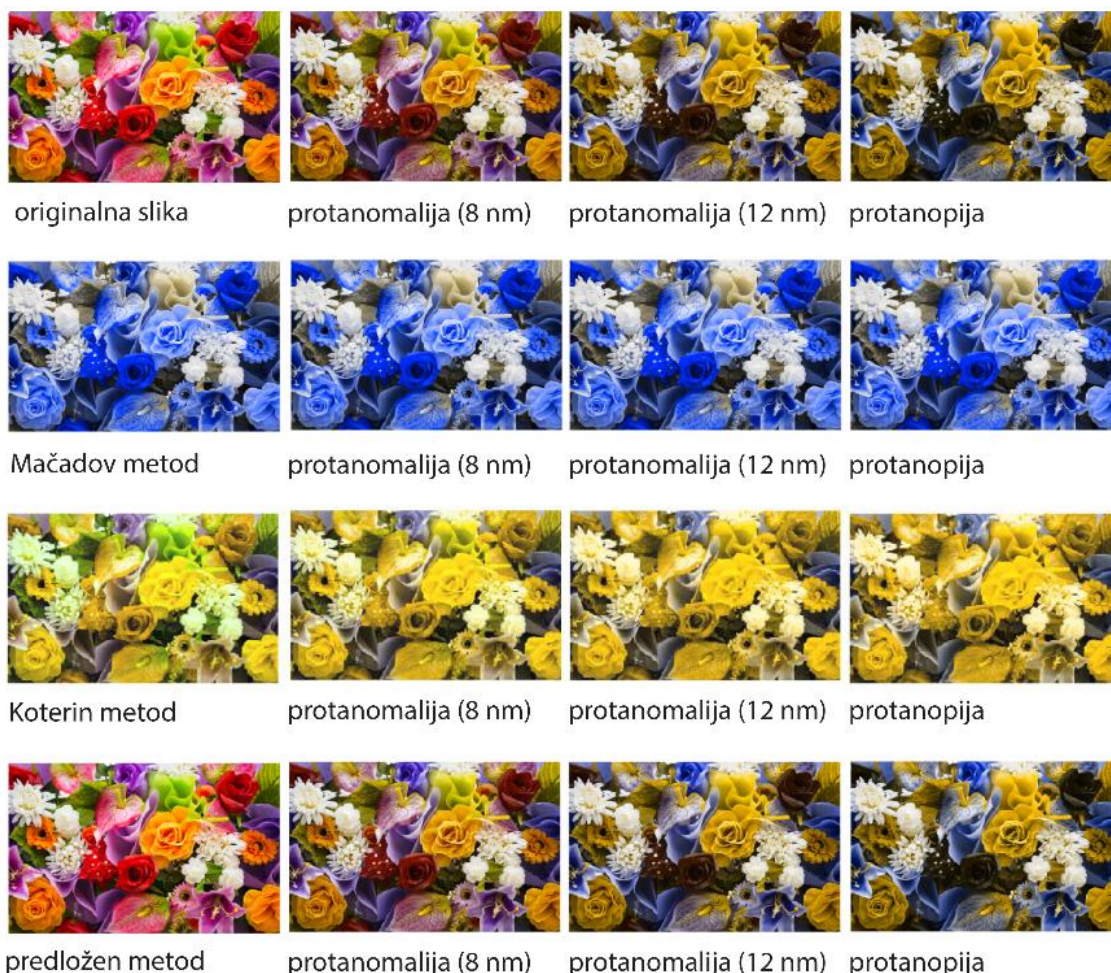
Iako kod Liedtke i ostalih (2013) nije bilo statistički značajnih razlika u prosečnom vremenu reakcije između različitih verzija mapa, analiza *eye-tracking* podataka je pokazala opravdanost *hipoteze H6*, odnosno da ima smisla beležiti i vreme reakcije kao meru efektivnosti daltonizacije i pristupačnosti informacija generalno, jer dobra distinkcija boja rezultira manjim varijacijama u vremenu nalaženja boje među posmatračima, a prosečno vreme reakcije daje sliku o uopštenoj tendenciji učinka daltonizacije.

*Eye-tracking* podaci omogućavaju jasniji uvid gde tačno nastaju problemi u rešavanju vizuelnih zadataka, odnosno između kojih boja se javljaju konfuzije ili „dvoumljenja“.

**Ograničenja i pravci daljeg istraživanja.** U budućim istraživanjima trebalo bi proširiti primenu *eye-tracking* opreme i u ispitivanju prirodnih slika. Takođe, trebalo bi uvrstiti i šeme boja sa sistematičnijim pristupom kako bi se povezali rezultati sa konfuznim linijama.

### Diskusija subjektivne evaluacije

Slika 6.3 predstavlja rezultat daltonizacije slike prirode sa ekstremnim opsegom boja. Ovaj tip sadržaja slike može da ukaže na nedostatke u algoritmu daltonizacije koji ne mogu biti otkriveni korišćenjem konvencionalnih primera sa crveno-zelenim konfuznim kombinacijama poput onih korišćenih na Slici 5.4. Premapirani centri boja nakon tipske daltonizacije ostali su veoma blizu originalnih pozicija pošto je početna slika imala inicijalno zadovoljavajuću hromatsku distribuciju.



Slika 6.3. Rezultat daltonizacije za protan PVB Mačadovim, Koterinim i novim predloženom tipskom daltonizacijom za sliku prirode sa širokim opsegom boja (Milić et al, 2015a)




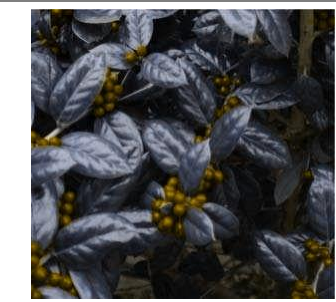
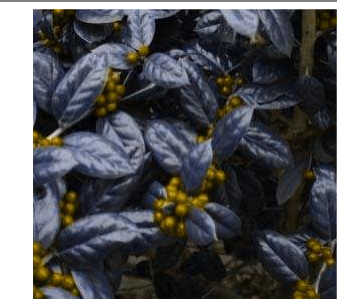



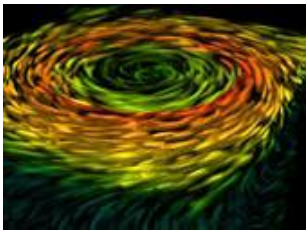
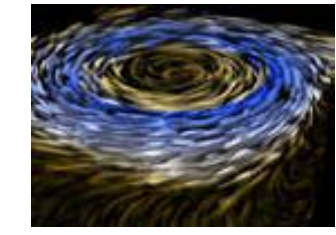
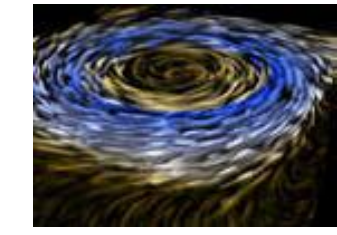
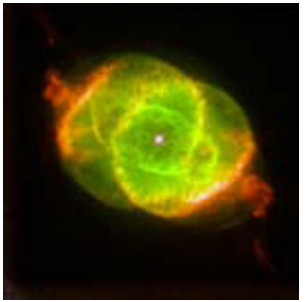
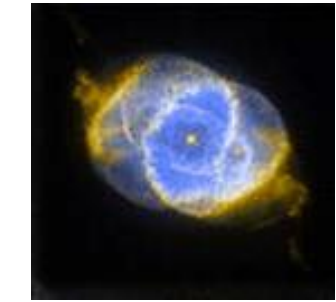
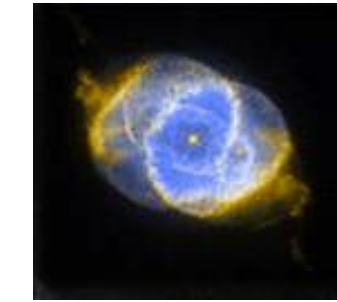
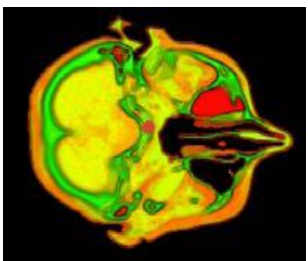
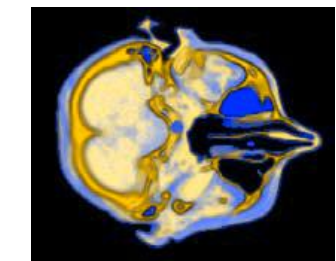
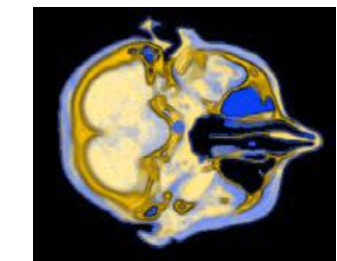
Ovaj primer prikazuje da predložena tipska daltonizacija ne vodi ka pogoršanju opaženog kvaliteta slike u slučaju opsega boja slike koji se približava maksimalnoj pokrivenosti *sRGB* gamuta. Sa povećavanjem inicijalnog gamuta boja slike, rezultat daltonizacije će postati približniji originalnoj slici, dok rezultat Mačadove i Koterine daltonizacije rezultira lošijom distinkcijom i manjim opsegom boja u odnosu na početnu sliku.

Razlog za skoro nepromenenu adaptaciju prema predloženom konceptu daltonizacije je to što u ovom slučaju početni opseg boja slike pokriva sve što oni mogu da percipiraju i ne može im se preneti dodatna informacija iz domena boje.

Koterin i Mačadov metod teže da minimizuju razliku u percepciji adaptirane slike između normalnog i dihromatskog viđenja što rezultira redukovanim gamutom slike za standardne posmatrača i anomalne trihromate. Novi pristup (Milić et al, 2015a) teži da percepcija slike nakon daltonizacije za svakog korisnika bude bliska njegovoj percepciji originalne slike. Ovaj koncept ima opravdanje u činjenici da sadržaj slike u digitalnom okruženju može biti adaptiran (personalizovan) na zahtev umesto da bude dostupan svima u jednoj verziji.

Tabela 6.1 prikazuje još primera rezultata adaptacije boja slike nakon Mačadovog metoda daltonizacije optimizovanog za dihromatske poremećaje. Može se primetiti da ovakva daltonizacija daje zadovoljavajući kontrast boja u slučaju jednostavnog artificijelnog sadržaja sa kombinacijom boja koje leže na svega jednoj liniji konfuzije, odnosno pripadaju jednoj diskriminacionoj elipsi. U slučaju prirodnih slika, ove neumerene promene boja zarad kontrasta doživljavaju se kao pogoršanje kvaliteta slike u odnosu na početnu sliku.

Tabela 6.1. Test slike nakon daltonizacije Mačadovim metodom optimizovanim za dihromatske PVB

rbr	Originalna slika	Nakon protanopske daltonizacije (Mačadov metod)	Nakon deuteranopske daltonizacije (Mačadov metod)
1			
2			
3			
4			
5			

Iz subjektivnih evaluacija rezultata i predloženog (Tabela 5.2, Slike 8-10) i Mačadovog metoda daltonizacije (Tabela 6.1, Slike 3-6) se zaključuje da je mnogo jednostavnije „doterati“ proste sadržaje (jedna crveno-zelena konfuzna kombinacija) koji su uz to i apstraktni. Kada su u pitanju slike prirodnih scena, onda se, pored diferencijacije elemenata, mora voditi računa i o prepoznavanju objekata. Kod kompleksnih prirodnih slika imamo još jedan dodatni aspekt – kontekst. Kontekst kod svih nas utiče na opažanje što se najbolje može demonstrirati iluzijama. Ako je promena boja na slici prirodne scene neumerena ili ako se menjaju pogrešne boje onda se to komentariše negativno jer se menja kontekst slike i osobe sa PVB imaju problem da prepoznaju objekte. Dalje, u prirodnim scenama postoji visoka korelacija između boje i oblika i tekstura. Na primer, sve što ima oblik trave pretpostavljamo da je zelene boje. Međutim, za slike koje su veštački kreirane (naučne slike, sintetizovane 3D slike, medicinski snimci sa pseudo bojama) odnos između boje i oblika nije očigledan, tako da ne postoji problem korelacije oblika i boje niti problem konteksta.

Svi ispitanici ocenili su Slike 1-2 (Tabela 6.1) nakon daltonizacije kao lošiji kvalitet slike u odnosu na početni, dok su bili zadovoljni poboljšanjem kontrasta na Slikama 3-6.

Rezultati subjektivne evaluacije ističu neophodnost da se daltonizacija adaptira primeni, odnosno vrsti slike. Takođe, komentari ispitanika idu u prilog *hipotezi H5* i potvrđuju da ne postoji opravdan razlog za širu upotrebu daltonizacije definisane na osnovu dihromatske percepcije, posebno ne za adaptaciju slika prirodnih scena, s obzirom da je broj anomalnih trihromata tri puta veći od dihromata i da smisao daltonizacije treba da bude povećanje opaženog opsega boja, a ne redukcija.

## 7.0 ZAKLJUČAK

Savremena istraživanja u oblasti molekularne genetike objasnila su poreklo raznovrsnosti anomalija viđenja boja po tipu i težini i razloge razlika u učestalosti tih anomalija. Iako lečenje naslednih poremećaja viđenja boja za sada nije moguće, ne postoji sumnja da će buduća molekularno-genetička istraživanja dati odgovor i na ovo preostalo nerešeno pitanje.

Poremećaj viđenja boja ne dovodi do nepremostivih problema u opažanju i ljudi sa PVB razvijaju strategije kojima uspešno prevazilaze prirodno nametnuta ograničenja. Čak i pri potpunom slepilu za boje – monohromaziji moguće je imati razumljiv vizuelni doživljaj što smo i sami iskusili pri gledanju crno-belih filmova ili fotografija. Međutim, kao i u slučaju drugih ograničenja i nesposobnosti (npr. slaba oštrina vida ili gubitak sluha), postoji izvestan nivo frustracije u funkcionisanju unutar okruženja ergonomske organizovanog za 95% populacije.

*Individualne karakteristike percepcije boja predstavljaju, poput otiska prsta, jedinstveno svojstvo svake osobe.* Razlike u opažanju boja postoje i kod posmatrača sa potpuno funkcionalnim receptorima, ali su relativno male u odnosu na razlike između individua sa anomalnim vizuelnim sistemom. Varijabilnost u anomalnoj percepciji boja ukazuje da i način adaptacije sadržaja slike takođe treba da bude prilagođen „stanju“ korisnika.

Na osnovu analize aktuelnog stanja u oblasti simulacije i parametrizacije anomalnog viđenja boja definisan je način mapiranja trodimenzionog gamuta boja prikaznog uređaja u limitiran gamut osoba sa određenim tipom i težinom poremećaja viđenja boja.

*Personalizovana simulacija omogućava bolje razumevanje percepcije sadržaja slike konkretne individue sa PVB - otkriva koje skupove boja je problematično razlikovati i na koji način i u kom stepenu je redukovana opseg boja u poređenju sa trihromatskim.* Simulacije pokazuju da su PVB kompleksniji fenomen od stereotipnog neraspознаvanja crvene od zelene i utiču na opažanje kompletnog spektra. Pouzdana simulacija čini i značajnu povratnu spregu u modelu optimizacije slike za korisnike sa PVB jer omogućava direktnu evaluaciju korektivne obrade slike - daltonizacije.

Optimizacija slike u slučajevima kada ograničenje ne potiče od načina reprodukcije slike, već je povezano sa samim posmatračem, ne može uticati na inicijalno stanje posmatrača, odnosno ne može magično vratiti osobama sa PVB boje koje do sada nisu opažali –

*„Ne postoji način da im se vrate boje koje im je priroda uzela.“ (Milić, 2009)*

**Svrha predloženog modela optimizacije slike jeste poboljšanje opaženog kvaliteta slike od strane korisnika sa PVB upotrebom prikladnijeg skupa boja, odnosno boljim iskorišćenjem njihovog ograničenog gamuta.**

Relevantni zaključci istraživanja su:

- Predložena daltonizacija predstavlja proceduru adaptacije boja slike koje korisnici sa PVB opažaju kao iste ili sasvim slične i, usled toga, vodi poboljšanju opaženog kvaliteta slike i pristupačnosti u tumačenju vizuelnih informacija.
- Metod daltonizacije je definisan tako da balansira između poboljšanja distinkcije boja i očuvanja prirodnosti slike. Pri definisanju oblasti dozvoljenog kretanja polazi se od kriterijuma globalnog povećanja hromatskog kontrasta i globalne konzervacije prirodnosti što rezultira izmenama dominantnih boja slike tako da budu dovoljno različite međusobno, ali da ne odstupaju previše od inicijalnih vrednosti.
- Za razliku od sadržajno-nezavisnih metoda daltonizacije kod kojih postoji problem nepredvidivog diferenciranja boja, predložena daltonizacija adaptira sadržaj slike bez mogućnosti kreiranja novih problematičnih kombinacija boja.
- Za razliku od sadržajno-zavisnih metoda daltonizacije fokusiranih samo na dihromatsku percepciju kod kojih postoji problem očuvanja prirodnosti slike usled redukcije gamuta na dihromatsku ravan boja, predložena daltonizacija koristi optimalno diskriminaciju tonova korisnika sa blagim do umerenim PVB koja je približnija trihromatskom raspoznavanju boja. Na taj način su uključeni zanemareni anomalni trihromatski tipovi PVB koji predstavljaju tri četvrtine svih PVB slučajeva.
- Sa povećanjem inicijalnog gamuta boja slike, rezultat daltonizacije će postati približniji originalnoj slici. Razlog tome je da, ako početni opseg boja slike pokriva sve što PVB individue mogu da percipiraju, i ne može im se preneti dodatna informacija iz domena boje.
- Evaluacijom simulacije potvrđeno je da postoje relativno pouzdani načini da se simulira anomalna percepcija boja. Analiza komentara ispitanika otkriva i da postoje veće razlike u opsegu boja između različitih težina istog tipa PVB nego između deutan i protan tipa poremećaja iste težine. Iste zaključke potvrđuju i računarske simulacije na osnovu Maçado-Oliveira metoda simulacije.

- Tipska daltonizacija poboljšava hromatski diverzitet slike za osobe sa različitim težinama poremećaja. Usled bliskih pravaca linija konfuzije (izohromatskih linija), protan tipska daltonizacija povećava hromatski diverzitet i za deutan ispitanike i *vice versa*.
- Težinska adaptacija je najefektnija u slučaju blagog poremećaja, dok dihromatskom posmatraču ne menja opaženi kvalitet slike.
- Kao što se moraju uzeti u obzir svojstvenosti PVB da bi se optimizovala adaptacija sadržaja slike za određenog korisnika-daltonistu, na isti način treba da postoji i mogućnost uzimanja u obzir preferencija korisnika radi optimizacije rezultata za određenu primenu. Ako je predmet adaptacije grafika ili infografika, primarni cilj daltonizacije postaje povećanje kontrasta boje, dok se u slučaju prirodnih scena mora voditi računa o očuvanju prirodnosti slike kako bi posmatrač doživeo rezultat obrade slike kao pozitivnu promenu. Ne treba zaboraviti da se, nakon retinalne faze i faze oponentnih mehanizama u ganglijskim ćelijama, procesiranje boje nastavlja u višim kortikalnim strukturama u kojima, između ostalog, učestvuje i naše iskustvo, odnosno dugotrajna memorija. PVB ispitanicima kao odraslim osobama sa izvesnom količinom vizuelnog iskustva ne odgovaraju neumerene promene boja na slikama prirodnih scena jer menjaju kontekst slike i otežavaju prepoznavanje objekata.
- Za razliku od velikog broja radova u kojima je metod daltonizacije testiran na ograničenom broju Išiharinih tablica ili slika sa jednom problematičnom kombinacijom crvene i zelene boje koje treba „prebojiti“, u okviru istraživanja izvršeno je ispitivanje šire primene predložene daltonizacije. Korišćeni metodi daju sistematičnu i pouzdanu verifikaciju efektnosti daltonizacije uključujući analizu računarskih simulacija, analizu poboljšanja pristupačnosti informacija u boji u ispitivanju sa praćenjem pogleda, kao i analizu subjektivnog poboljšanja opaženog kvaliteta slika raznovrsnog sadržaja (artificijelnog ili prirodnog).
- Kvantitativna analiza računarskih simulacija potvrđuje da težinska daltonizacija poboljšava hromatski diverzitet slike i povećava broj različitih boja slike u slučaju blagih i umerenih poremećaja, a tipska za sve težine poremećaja.
- *Eye-tracking* evaluacija potvrđuje da ispitanici sa poremećajima viđenja boja tačnije i brže tumače vizuelne informacije kodirane bojom i nakon tipske i nakon težinske daltonizacije.

- Subjektivna evaluacija potvrđuje da težina poremećaja utiče na procenu poboljšanja opaženog kvaliteta slike, gde korisnici sa blažim poremećajem bolje ocenjuju težinsku daltonizaciju u poređenju sa korisnicima sa ozbiljnim poremećajem. Takođe je otkriveno i da sadržaj slike utiče na ocenu preferencije- u slučaju slika prirodnih scena ispitanici preferiraju težinsku daltonizaciju, a u slučaju veštačkih slika tipsku daltonizaciju koja daje bolji hromatski kontrast.
- Potpuni potencijal modela optimizacije slike za korisnike sa poremećajima viđenja boja je dostupan u digitalnom okruženju gde isti sadržaj slike može biti renderovan na različite načine u zavisnosti od zahteva korisnika (personalizovana daltonizacija) na osnovu unapred utvrđenog „stanja“ korisnika kojem se prilagođava sadržaj slike (personalizovana simulacija). Uzimanjem u obzir karakteristika poremećaja viđenja boja i preferencija korisnika, može se definisati odnos tipske, težinske i univerzalne daltonizacije optimalan za konkretnog korisnika i konkretnu primenu (veštačka ili prirodna slika).

Sinergijom personalizovane simulacije i daltonizacije kreira se korisničko digitalno okruženje bez barijera boja (*“colour-barrier-free” environment*).

## 8.0 NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA I MOGUĆNOST PRIMENE U PRAKSI

Primarne naučne doprinose istraživanja za postizanje društva bez barijera boja predstavljaju predloženi pristupi (i) personalizovane simulacije i (ii) personalizovane daltonizacije koji rešavaju bitna ograničenja aktuelnih srodnih metoda u oblasti.

Pristup personalizovane simulacije baziran na empirijskoj proceduri pokazuje veliki potencijal za poboljšanje razumevanja PVB reflektujući stvarne perceptualne mogućnosti individua sa redukovanim viđenjem boja.

Pristup daltonizacije na osnovu personalizovane simulacije omogućava optimizaciju opsega boja slike za korisnike sa različitim tipom i težinom PVB i različitim preferencijama po pitanju važnosti očuvanja prirodnosti slike.

Važne naučne doprinose predstavljaju i sledeći elementi istraživanja:

- pregled aktuelnog stanja u oblasti:
  - (i) simulacije anomalnog viđenja boja,
  - (ii) adaptacije slike za potrebe PVB populacije i
  - (iii) evaluacije simulacije i daltonizacije;
- predložena kategorizacija metoda daltonizacije (Milić et al, 2015b);
- predloženi metodološki okvir evaluacije efektivnosti daltonizacije korišćenjem *eye-tracking* opreme;
- predloženi metodološki okvir evaluacije pouzdanosti simulacije PVB i
- definisanje smernica za testiranje i odabir odgovarajućeg metoda poboljšanja slike za specifičnu primenu i određenu grupu PVB korisnika.

Jednostavnost koncepta personalizovanog pristupa simulacije omogućava rasprostranjenu praktičnu primenu. Kalibracioni test se može implementirati na različitim platformama (PC, tablet, telefon) u različitim oblicima, npr., plug-in za veb pretraživač, mobilna aplikacija, filter za PhotoShop softver i slično. Takođe, personalizovani ICC profil se može koristiti u svim



namenama u kojima se koriste i standardni ICC profili monitora. Na ovaj način će korisnicima biti omogućeno da podele svoje iskustvo sa drugima, a kreatorima vizuelnih informacija (veb i grafički dizajneri, video montažeri, dizajneri interfejsa, inženjeri zaštite na radu itd.) da osiguraju vidljivost i pristupačnost informacija za širi rang korisnika. Personalizovana simulacija će omogućiti da se predvide ograničenosti vizuelnog sistema PVB korisnika u situacijama u kojima je boja korišćena kao važan nosilac informacije.

Integracija simulacije i daltonizacije u jedinstven model optimizacije slike omogućava da se, na osnovu sačuvanih parametara koje definišu opažanje PVB konkretnog korisnika, sadržaj slika automatski optimizuje za tog korisnika. Mogućnosti primene modela optimizacije su iste kao i u slučaju izdvojene simulacije: na nivou veb pretraživača, mobilne aplikacije, ekstenzije ili filtera za softver.

Osim kao početni korak definisanja ulaznih parametara za daltonizaciju, simulacija obezbeđuje i vizuelnu inspekciju proizvedenih rezultata daltonizacije u stvarnom digitalnom okruženju korisnika.

U poslednjih nekoliko godina, uporedo sa ekspanzijom HTML5 standarda za dizajn veb aplikacija i prezentacija, širi se i trend korišćenja SVG (engl. *Scalable Vector Graphic*) formata za kreiranje interaktivnih vektorskih grafika, infografika, navigacionih i geografskih mapa u internet okruženju. Implementacijom modela optimizacije kao JavaScript sintakse moguće je pristupiti interaktivno osobinama SVG elemenata i promeniti im boje.

Pojednostavljenjem modela optimizacije slike za populaciju sa PVB sa aspekta implementacije, moguća je primena modela za adaptaciju signala sa kamere mobilnog uređaja u realnom vremenu.

## 9.0 LITERATURA

1. Alpern M, Kitahara K, Krantz DH (1983) Perception of colour in unilateral tritanopia. *J. Physiol.* 335: 683–697
2. Anagnostopoulos CN, Tsekouras G, Anagnostopoulos I, Kalloniatis C (2007) Intelligent Modification for the daltonization process of digitized paintings. Paper presented at the 5th International Conference on Computer Vision Systems, University of Bielefeld, Bielefeld, 2007
3. Asada K, Kobayasi M, Furukawa S (2011) A portable assistance tool for color-deficient individuals with real-time color changing function. Paper presented at the AIC 2011 Midterm Meeting of the International Colour Association (AIC), International Colour Association, Zurich, 7-10 June 2011
4. Baraas RC, Foster DH, Amano K, Nascimento SMC (2010) Color constancy of red-green dichromats and anomalous trichromats. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 51(4):2286–93
5. BBC news, <http://www.bbc.com/news/>
6. Blagojević M (1993) *Oftamologija*. Medicinska knjiga, Beograd
7. Birch J (2001) *Diagnosis of Defective Colour Vision*. Butterworth-Heinemann, London
8. Birch J (2003) Extreme Anomalous Trichromatism. In *Normal and Defective Colour Vision* (eds. Mollon, Pokorny, Knoblauch). Oxford Press
9. Bosten JM, Robinson JD, Jordan G, Mollon JD (2005) Multidimensional scaling reveals a color dimension unique to "color-deficient" observers. *Current Biology* 15(3): R950-R952
10. Boynton RM (1960) Theory of Color Vision. *Journal of the Optical Society of America* 50:929–944
11. Bramao I, Faisca L, Petersson KM, Reis A (2012) The contribution of color to object recognition. In I. Kypraios, editor. *Advances in Object Recognition Systems*. InTech (2012)
12. Brettel H, Vienot F, Mollon J (1997) Computerized simulation of colour appearance for dichromats. *J Op Soc. Am* 14:2647- 2655
13. Byrne A, Hilbert DR (2010) How do things look to the color-blind? In J. Cohen and M. Matthen, editors. *Color Ontology and Color Science*: 259–290. The MIT Press, Cambridge
14. Celebi ME (2011) Improving the Performance of K-means for Color Quantization. *Image and Vision Computing* 29(4): 260–271

15. Celebi ME (2014) *Partitional Clustering Algorithms*. Springer, Shreveport
16. Chrome Daltonize extension. <https://chrome.google.com/webstore/detail/chrome-daltonize/efeladnkafmoofnbgdbfaieabmejfcf>. Accessed 20 June (2015)
17. Chen YC, Guan Y, Ishikawa T, Eto H, Nakatsue T, Chao J, Ayama M (2013) Preference for color-enhanced images assessed by color deficiencies. *Color Research & Application* 39(3): 234–251
18. CIE (2013) *International Lighting Vocabulary*, [www.cie.co.at](http://www.cie.co.at)
19. CIE TC 1-36 (2015) Report
20. CIE TC 1-89 (2015) Report
21. Colblindor. [www.colblindor.com](http://www.colblindor.com). Accessed 20 June (2015)
22. Color Universal Design Organization. <http://jfly.iam.u-tokyo.ac.jp/color/>. Accessed 20 June (2015)
23. Cvetković D, Cvetković D (2005) Nasledne anomalije kolornog vida: od Daltona do molekularne genetike. *Srpski arhiv za celokupno lekarstvo* 133:521-527
24. Dacey DM (2000). Parallel Pathways for Spectral Coding in Primate Retina. *Annual Reviews in Neuroscience* 23:743-755
25. Dalton, J (1977) John Dalton's discovery of his colour blindness. *Applied Optics* 16: 520
26. Dalton J (1798) Extraordinary facts relating to the vision of colours. *Mem. Proc. Manchester Lit. Philos. Soc.* 5, 28–45. Repr. in C. Dickinson, I. Murray, and D. Carden, eds., *John Dalton's Colour Vision Legacy*. London: Taylor and Francis, 1997, 7–14.
27. DeMarco P, Pokorny J, Smith VC (1992) Full-spectrum cone sensitivity functions for X-chromosome-linked anomalous trichromates. *J. Opt. Soc. Am. A* 9: 1465–1476
28. Fairchild M (2005) *Colour Appearance Models*. John Wiley & Sons, Chichester
29. Fidaner P, Poliang L, Ozguven N (2005) Analysis of Colour Blindness. [http://scien.stanford.edu/pages/labsite/2005/psych221/projects/05/ofidaner/colourblindness\\_project.htm](http://scien.stanford.edu/pages/labsite/2005/psych221/projects/05/ofidaner/colourblindness_project.htm). Accessed 20 June (2015)
30. Guyton A, Hall J (2003) *Medical physiology*. Savremena administracija, Beograd
31. Graham JCH, Hsia Y (1972) Visual discriminations of a subject with acquired unilateral tritanopia. *Vision Research* 7:469–479
32. Helmholtz H (1867) *Handbuch der Physiologischen Optik*, Hamburg and Leipzig, Voss
33. Huang J, Tseng YC, Wu SI, Wang SJ (2007) Information preserving colour transformation for protanopiijaand deuteranopiija. *IEEE Signal Processing Letters* 14:711–714
34. Huang J, Wu S, Chen S (2008) Enhancing colour representation for the colour vision impaired. Paper presented at the ECCV Int. Workshop on Computer Vision Applications

- for the Visually Impaired in conjunction with European Conf. on Computer Vision, Marseille, 2008
35. Hunt DM, Dulai KS, Bowmaker JK, Mollon JD (1995) The chemistry of John Dalton's color blindness. *Science* 267:984-8
  36. Hurvich LM, Jameson D (1957) An Opponent-Process Theory of Color Vision. *Psychological Review* 64:384-404
  37. Iaccarino G, Malandrino D, Percio MD, Scarano V (2006) Efficient edge-services for colourblind users. Paper presented at the 15th WWW'06, Edinburgh, 22-26 May 2006
  38. Ichikawa M, Tanaka K, Kondo S, Hiroshima K, Ichikawa K, Tanabe S, Fukami K (2003) Web-page colour modification for barrier-free colour vision with genetic algorithm. *LNCS* 2724:2134-2146
  39. Ingling CR, Tsou HBP (1977) Orthogonal Combination of the Three Visual Visual Channels. *Vision Research* 17:1075-1082
  40. Ishihara S (1977) Tests for colour blindness. Kanehara, Tokyo
  41. Judd DB (1948) Color perceptions of deuteranopic and protanopic observers. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 41:247-271
  42. Judd DB (1949) Response Functions for Types of Vision According to the Müller Theory, Research Paper RP1946. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 42:356-371
  43. Judd DB (1966) Fundamental Studies of Color Vision from 1860 to 1960. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 55:1313-1330
  44. Kondo S (1990) A Computer Simulation of Anomalous Color Vision. In *Color vision deficiencies*. Kugler & Ghedini
  45. Kotera H (2011) A Study on Spectral Response for Dichromatic Vision. Paper presented at the 19th Colour and Imaging Conference, 2011
  46. Kotera H (2012) Optimal Daltonization by Spectral Shift for Dichromatic Vision. Paper presented at the 20th Colour and Imaging Conference, 2012
  47. Kuhn GR, Oliveira MM, Fernandes LAF (2008) An Efficient Naturalness-Preserving Image-Recolouring Method for Dichromats. *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 14:1747-1754
  48. Lomax R, Ridgway P, Meldrum M (2004) Does Occupational Exposure to Organic Solvents Affect Colour Discrimination? *Tox. Rev.* 23(2): 92-121
  49. Ma Y, Gu X, Wang Y (2009) Colour discrimination enhancement for dichromats using self-organizing colour transformation. *Information Science* 179:830-843

50. MacAdam D (1942) Visual Sensitivities to Colour Differences in Daylight. *J Optical Soc of America* 32:247-274
51. Machado GM (2010) A Model for Simulation of Color Vision Deficiency and a Color Contrast Enhancement Technique for Dichromats. Dissertation, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
52. Machado GM, Oliveira MM, Fernandes LAF (2009) A Physiologically-based Model for Simulation of Colour Vision Deficiency. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 15:1291–1298
53. Machado GM, Oliveira MM (2010) Real-Time Temporal-Coherent Colour Contrast Enhancement for Dichromats. *Computer Graphics Forum* 29:933-942
54. McIntyre D (2002) *Color Blindness*. Dalton Publishing
55. Meyer GW, Greenberg DP (1988) Color-defective vision and computer graphics displays. *IEEE Comput. Graph. Appl.* 8(5):28–40
56. Milić N (2009) Razvoj softverskog modula za pomoć osobama sa poremećajima viđenja boja. Master rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
57. Milić N, Novaković D, Zeljković Ž (2011) Development of plug-in for optimizing colours of graphic and web designs for persons with dichromatic vision deficiencies. Paper presented at the AIC 2011 Midterm Meeting of the International Colour Association (AIC), International Colour Association, Zurich, 7-10 June 2011
58. Milić N, Kašiković N, Novaković D (2014) The influence of viewing conditions on colour gamut of red-green vision deficiencies. Paper presented at the 7th GRID Symposium, Novi Sad, November 2014
59. Milić N, Hoffmann M, Tómacs T, Novaković D, Milosavljević B (2015) A Content-Dependent Naturalness-Preserving Daltonization Method for Dichromatic and Anomalous Trichromatic Color Vision Deficiencies. *Journal of Imaging Science and Technology* 59: 1-10
60. Milić N, Novaković D, Milosavljević B (2015) Enhancement of image content for observers with colour vision deficiencies. In *Colour and Video Enhancement* (eds. Celebi E, Smolka M). Springer
61. Mollon J, Regan BC (2000) *Cambridge colour test*. Cambridge Research Systems, Cambridge
62. Morgan MJ, Adam A, Mollon JD (1992) Dichromats Detect Colour-Camouflaged Objects that are not Detected by Dichromats. *Proceedings: Biological Sciences* 248(1323): 291-295

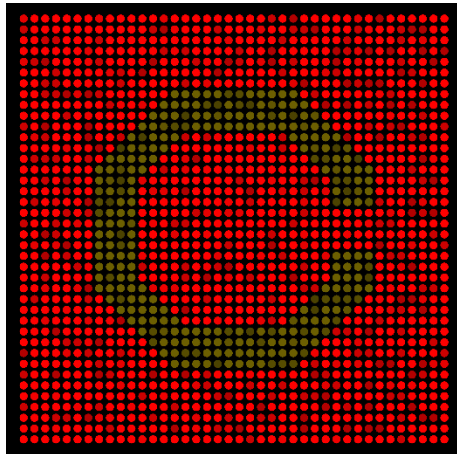
63. Mochizuki R, Nakamura T (2008) Color-weak correction by discrimination threshold matching. *Proceeding CGIV 2008 MCS'08*: 208-2013
64. Ohta N, Robertson R (2005) *Colourimetry: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, Chichester
65. Pardo CE, Sharma G (2011) Dichromatic color perception in a two stage model: testing for cone replacement and cone loss models. Paper presented at the IEEE IVMS 2011 Workshop, June 2011
66. Perales E (2010) Number of discernible colors for color-deficient observers estimated from the MacAdam limits. *Journal of the Optical Society of America. A. Optics, image science, and vision* 27(10):2106-14
67. Rasche K, Geist R, Westall J (2005) Detail Preserving Reproduction of Colour Images for Monochromats and Dichromats. *IEEE Comput. Graph. Appl* 25:22-30
68. Ruddock KH (1991) Psychophysics of inherited colour vision deficiencies. in *Inherited and Acquired Colour Vision Deficiencies: Fundamental Aspects and Clinical Studies*, D. H. Foster, ed., Vol. 7 of *Vision and Visual Dysfunction* (Macmillan, London, 1991), pp. 4-37.
69. Ruminski J, Wtorek J, Ruminska J, Kaczmarek M, Bujnowski A, Kocejko T, Polinski A (2010) Color transformation methods for dichromats. Paper presented at the IEEE 3rd Human System Interactions (HSI) Conference, May 2010
70. Ruminski J, Bajorek M, Ruminska J, Wtorek J, Bujnowski A (2012) Computerized Color Processing for Dichromats. *Human - Computer Systems Interaction* 98:453-470
71. Sajadi B, Majumder A, Oliveira M, Schneider RG, Raskar R (2011) Using Patterns to encode color information for dichromats. *Transaction on visualization and computer graphics* 17:1-13
72. Sharpe TL (1999) *Color Vision: from genes to perception*. Cambridge University Press, Cambridge.
73. Sharma G (2003) *Digital Colour Imaging*. CRC Press, London
74. Sharma G, Wencheng W, Dalal EN (2005) The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Applications* 30 (1): 21-30
75. Stockman A, MacLeod DIA, Johnson NE (1993) Spectral sensitivities of the human cones. *J Opt Soc Am A* 1993 10:2491-2521
76. Stockman A, Sharpe LT (2000) The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Res* 40:1711-1737

77. Sloan LL, Wollach L (1948) A case of unilateral deuteranoia. *Journal of the Optical Society of America*, 38:502–509
78. Treisman AM, Gelade G (1980) A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology* 12(1): 97–136
79. Vienot F, Brettel H, Mollon J (1999) Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats. *Colour Research and Application* 24:243-252
80. Vienot F, Brettel H, Ott L, Ben M'Barek A, Mollon J (1995) What do colour-blind people see? *Nature* 376:127-128
81. Vischeck. <http://www.vischeck.com>. Accessed 20 September (2009)
82. Visolve. <http://www.ryobi-sol.co.jp/visolve/en/>. Accessed 20 June (2015)
83. Wolfram Mathematica, <http://www.wolfram.com/>. Accessed 20 June (2015)
84. Wyszecki G, Stiles WS (2000) *Color Science: concepts and methods, quantitative data and formula*. John Wiley & Sons, Chichester
85. Yates J, Diamantopoulos I, Daumann F (2001) Acquired (Transient and Permanent) Colour Vision Disorders. In *Operational Colour Vision in the Modern Aviation Environment*. NATO Tech. Rep. 16: 43-47
86. Zdravković S (2008) *Percepcija*. Gradska narodna biblioteka, Zrenjenin

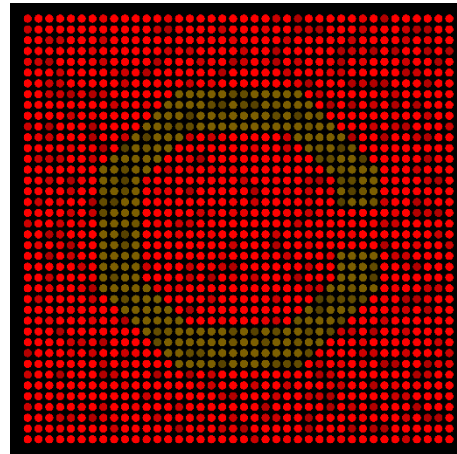
# 10.0 PRILOZI

## PRILOG P.1

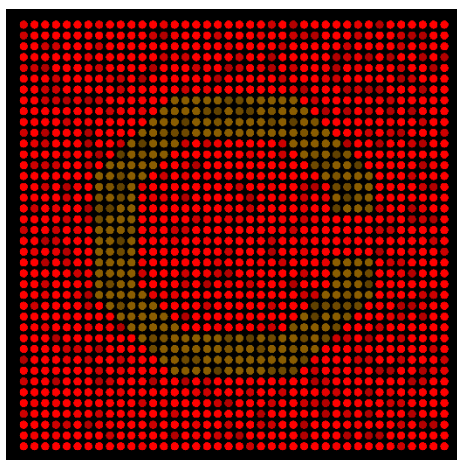
*Tabela P.1.1. Kalibracione tablice - protan niz R primara*



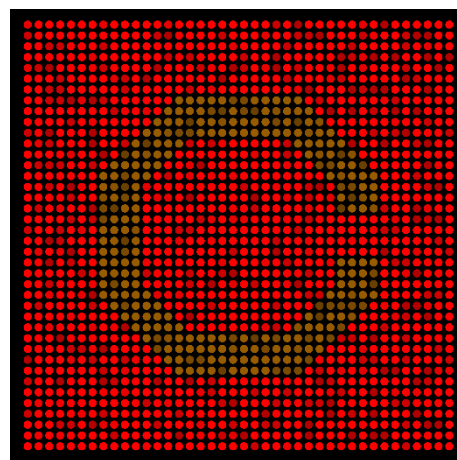
korak 1



korak 2



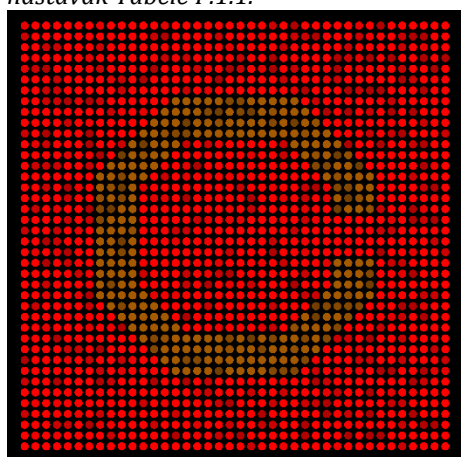
korak 3



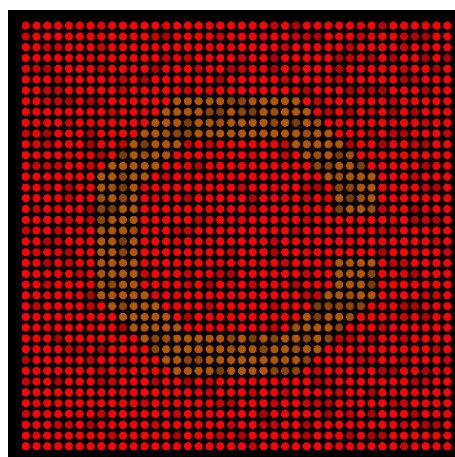
korak 4



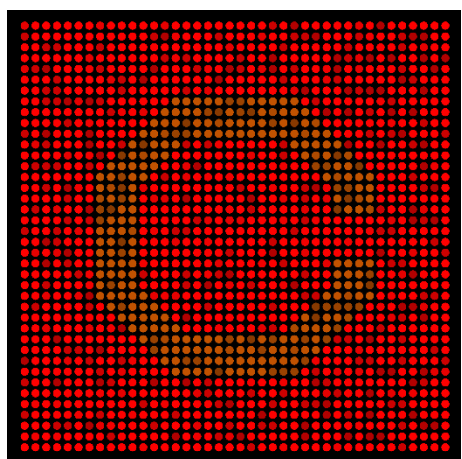
*nastavak Tabele P.1.1.*



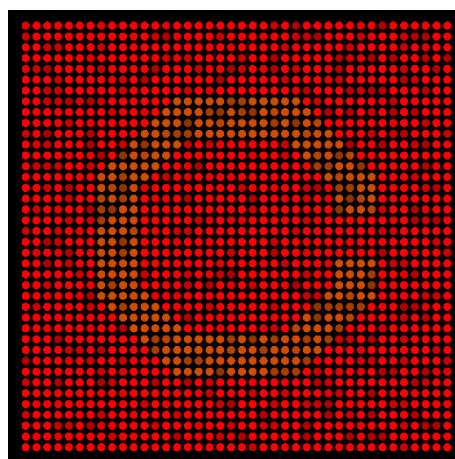
korak 5



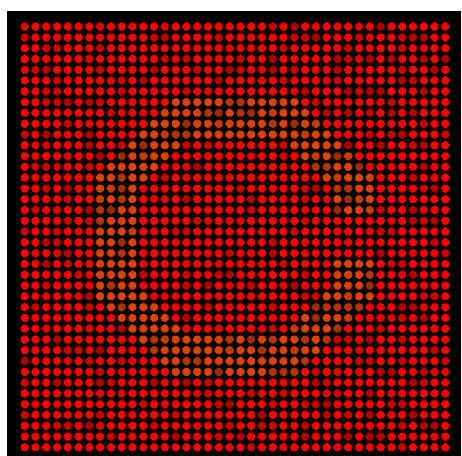
korak 6



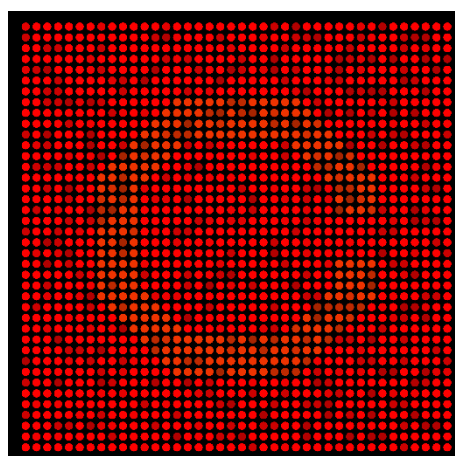
korak 7



korak 8

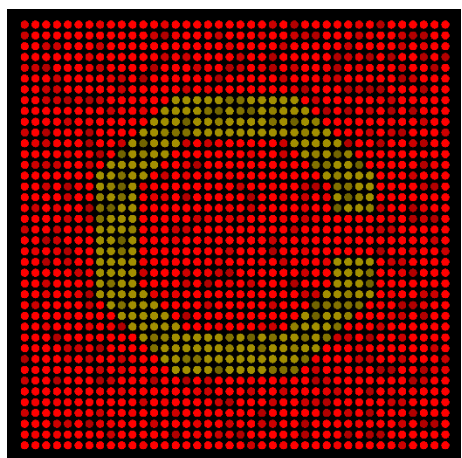


korak 9

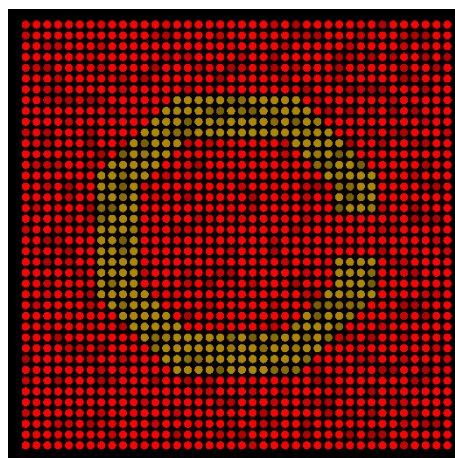


korak 10

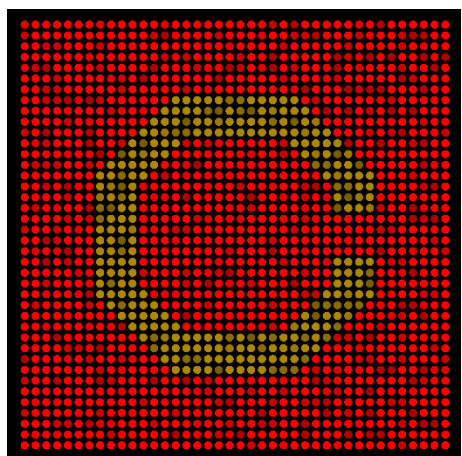
Tabela P.1.2. Kalibracione tablice - deutan niz R primara



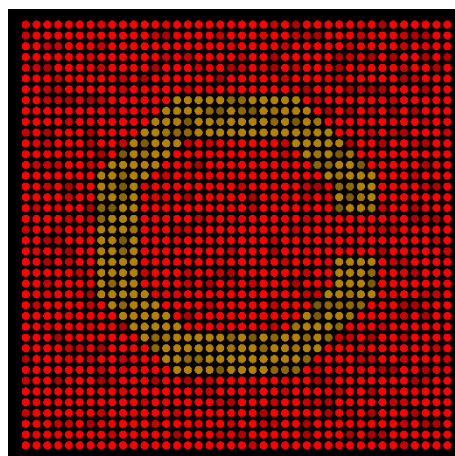
korak 1



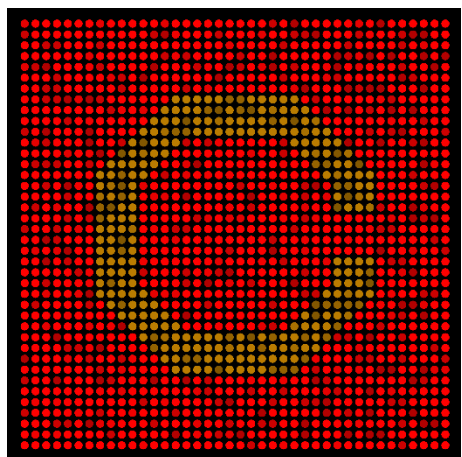
korak 2



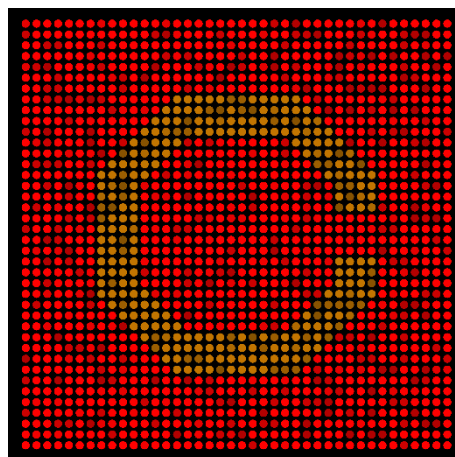
korak 3



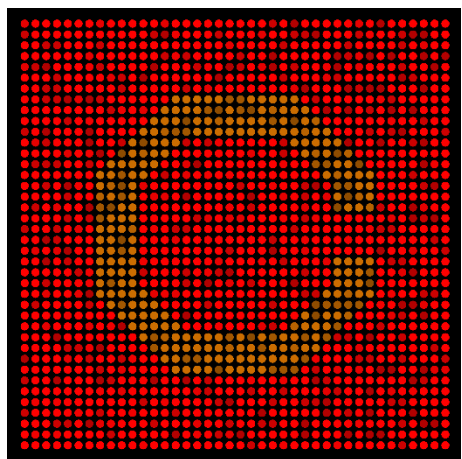
korak 4



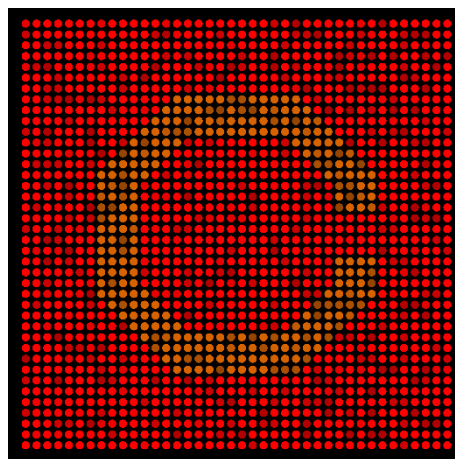
korak 5



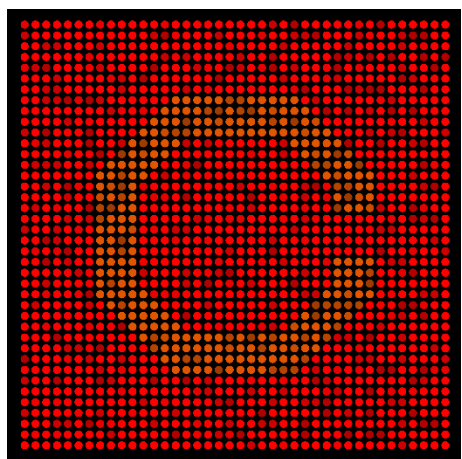
korak 6



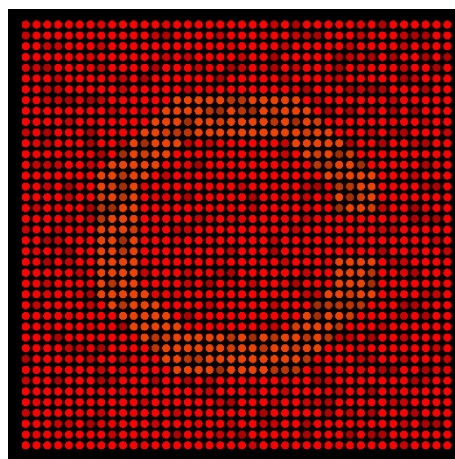
korak 7



korak 8

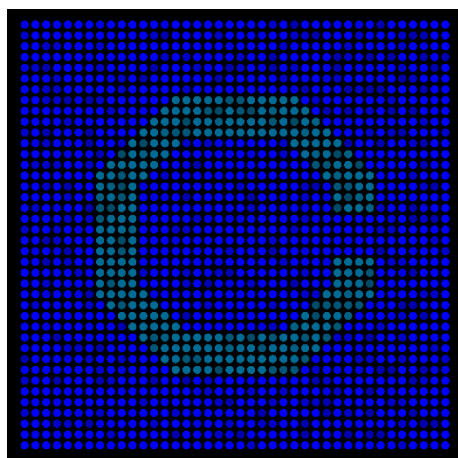


korak 9

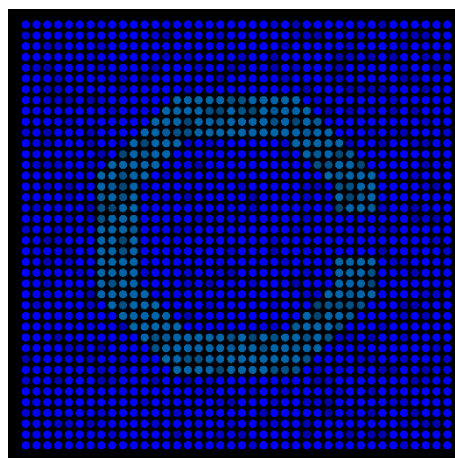


korak 10

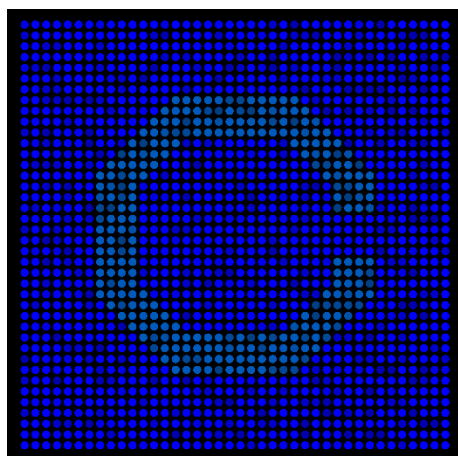
Tabela P.1.3. Kalibracija tablice - tritan niz B primara



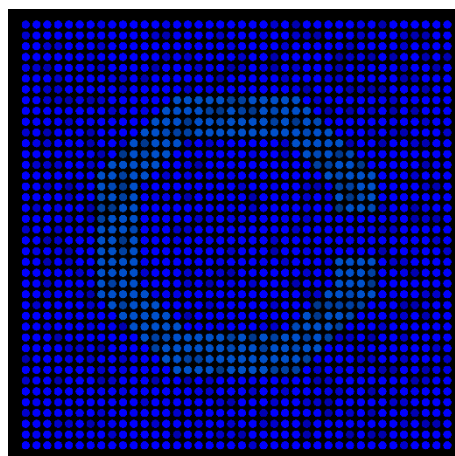
korak 1



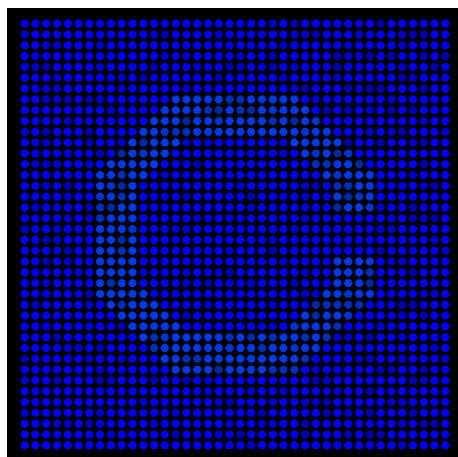
korak 2



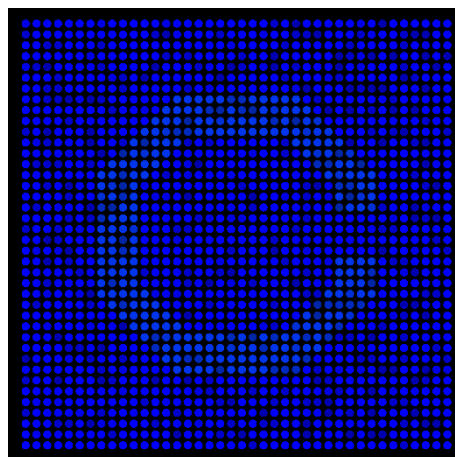
korak 3



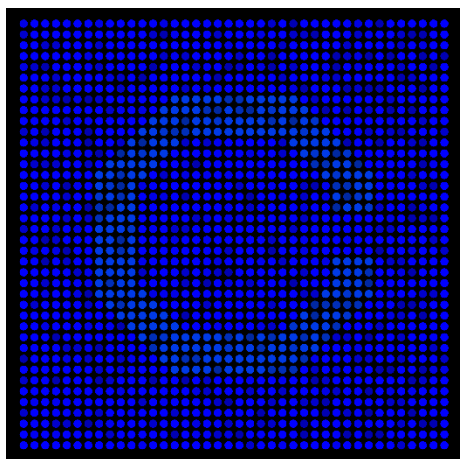
korak 4



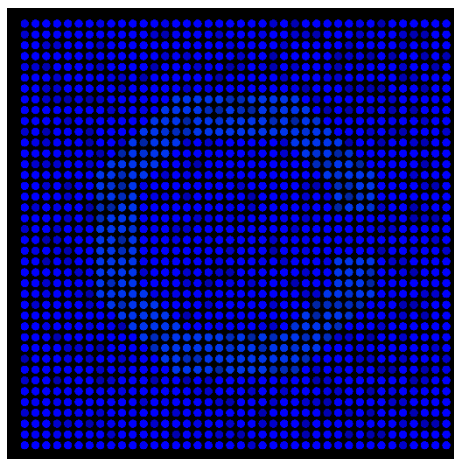
korak 5



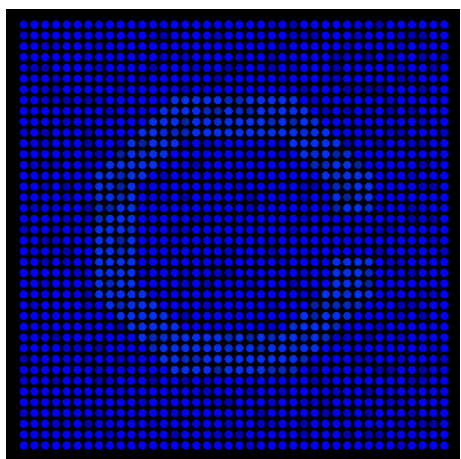
korak 6



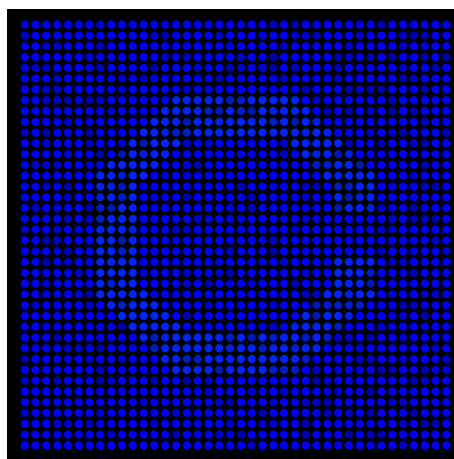
korak 7



korak 8



korak 9

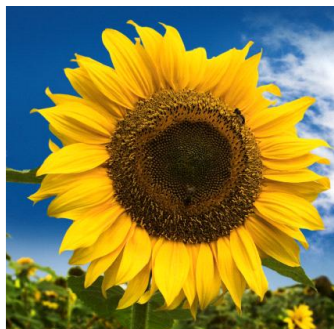


korak 10

## PRILOG P.2

### Segmentacija slike i dominantne boje (centri segmenata)

Tabela P.2.1. Primer K-means segmenatcije slike na osnovu predefinisanoj broja klastera (pet)



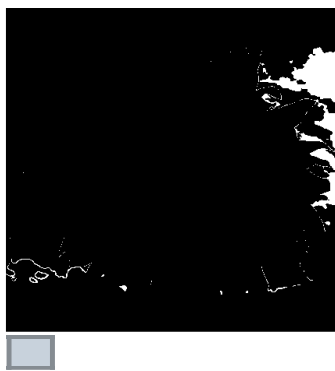
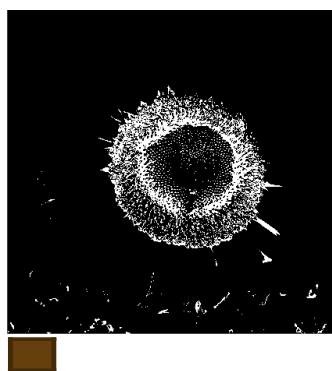
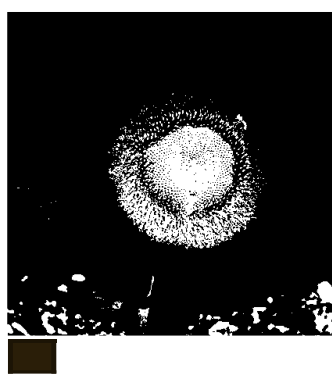
Segmenti i centri segmenata



Tabela P.2.2. Primer K-means segmenatcije slike na osnovu predefinisanim minimalnom razlikom između segmenata  $\Delta E=20$



Segmenti i centri segmenata



## PRILOG P.3

### Evaluacija simulacije – primeri test slika i rezultati ocenjivanja vizuelnog poklapanja

Tabela P.3.1. Ocene vizuelnog poklapanja simulacija sa početnom slikom (OR- originalna slika, PS- personalizovana simulacija, DS – dihromatska simulacija)


PVB ispitanik Slika / verzija	1			2			3			4			5		
	OR	PS	DS	OR	PS	DS	OR	PS	DS	OR	PS	DS	OR	PS	DS
1	0	1	2	1	0	1	0	1	1	0	1	2	1	0	1
2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
3	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	2	1	0	1
4	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	2	0	1	2
5	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	2
6	0	1	2	0	1	1	0	2	1	0	2	2	0	1	2
7	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	2
8	0	1	2	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1
9	0	1	1	0	1	1	0	1	2	1	0	1	1	0	1
10	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	1	2	0	1	2
11	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	2
12	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	1	0	2	2
13	0	1	1	0	0	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2
14	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
15	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	1	1	0	1
16	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
17	0	2	2	0	0	1	0	1	1	0	1	2	0	1	2
18	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1

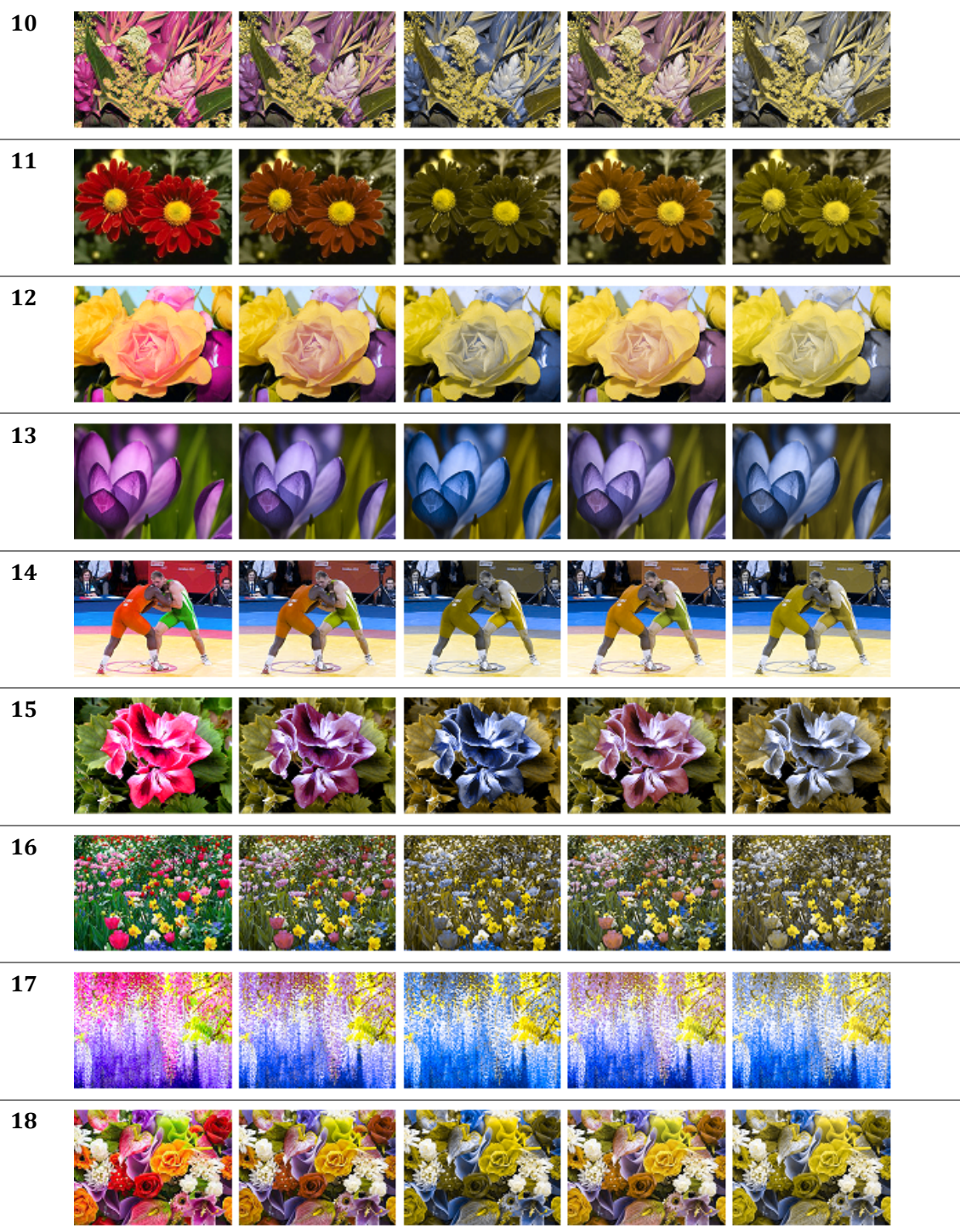
nastavak Tabele P.3.1.

PVB ispitanik Slika / verzija	6			7			8			9			10		
	OR	PS	DS	OR	PS	DS	OR	PS	DS	OR	PS	DS	OR	PS	DS
1	0	1	2	0	1	1	0	1	2	0	1	2	1	0	1
2	1	0	1	0	1	2	1	0	2	0	1	1	0	0	1
3	0	1	1	0	1	2	0	1	1	0	2	2	0	1	1
4	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	1	0	1
5	1	0	2	0	1	2	0	0	1	1	0	1	0	1	2
6	0	1	2	0	1	1	0	1	2	0	1	2	0	2	1
7	0	1	1	1	0	2	0	1	2	0	2	2	0	2	2
8	0	0	0	0	2	1	0	0	1	0	1	2	0	1	2
9	0	1	2	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	2
10	1	0	1	0	1	1	0	1	2	0	1	2	0	0	1
11	0	1	2	0	1	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2
12	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	2
13	0	1	1	0	1	2	1	0	1	0	1	2	0	1	2
14	0	1	2	0	1	2	1	0	1	1	0	2	0	1	1
15	0	1	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	1	0	1
16	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1
17	0	1	1	1	0	1	0	1	2	0	2	2	0	1	2
18	0	0	1	1	0	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2



Tabela P.3.2. Test slike za evaluaciju personalizovane simulacije (početne slike, dihromatske simulacije i primeri personalizovanih protan ( $\epsilon=0.6$ ) i deutan ( $\epsilon=0.7$ ) simulacija)

Test slika	PS protan ( $\epsilon=0.6$ )	DS protan	PS deutan ( $\epsilon=0.7$ )	DS deutan	
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

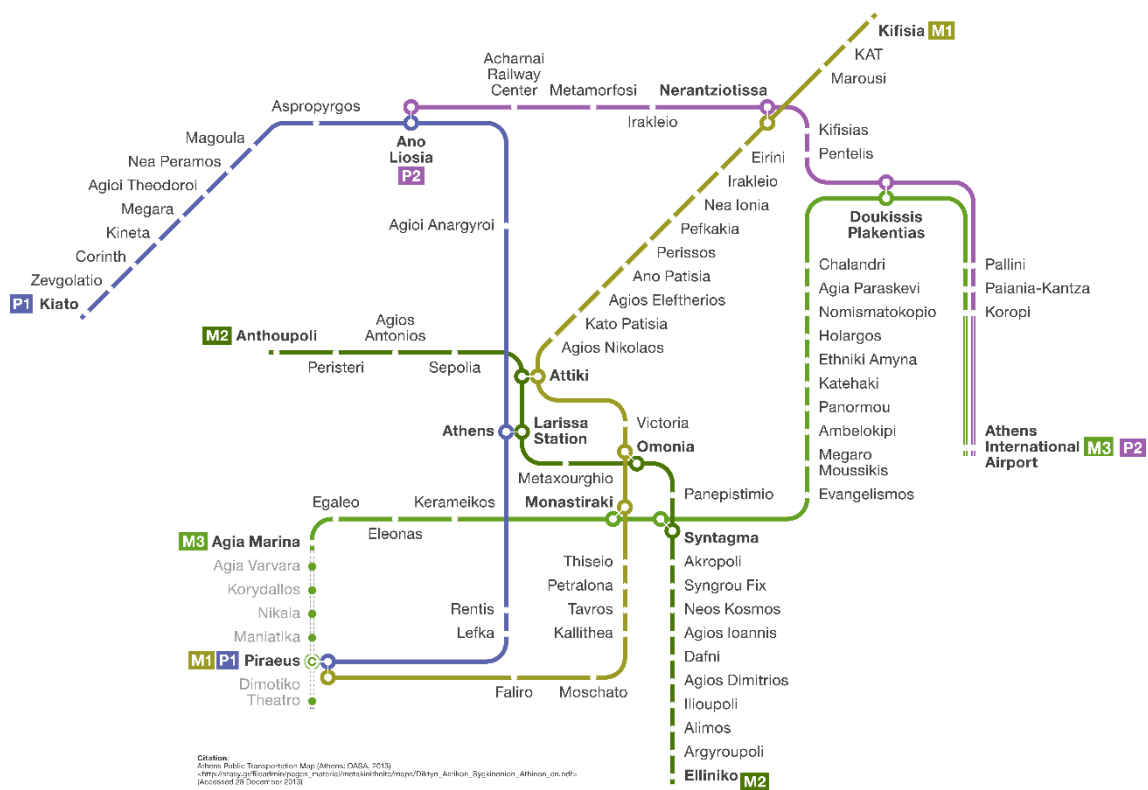


## PRILOG P.4

### Metro mapa (Atina)



Slika P.4.1. Početna metro mapa (Atina)



Slika P.4.2. Metro mapa (Atina) nakon Chrome Daltonize daltonizacije



Slika P.4.3. Metro mapa (Atina) nakon Koterine daltonizacije



Slika P.4.4. Metro mapa (Atina) nakon Mačadove daltonizacije



Slika P.4.5. Metro mapa (Atina) nakon predložene tpske daltonizacije

## Metro mapa (Madrid)



Slika P.4.6. Početna metro mapa (Madrid) sa traženom linijom 4





Slika P.4.7. Metro mapa (Madrid) nakon predložene težinske daltonizacije sa traženom linijom 4

## Statistička analiza vremena uspešnog rešavanja zadatka

Tabela P.4.1. Rezultati Man-Vitnijev U testa – početna mapa Madrida (PVB vs nePVB grupa)

	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L8</b>	<b>L9</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	35.500	1.000	34.500	29.500
<b>Wilcoxon W</b>	171.500	137.000	170.500	165.500
<b>Z</b>	-.923	-3.221	-3.051	-2.664
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.356	.001	.002	.008
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.367	.000**	.001**	.006**

\*\*značajno pri nivou značajnosti p=0.01

Tabela P.4.2. Rezultati Man-Vitnijev U testa – mapa Madrida posle težinske daltonizacije (PVB vs nePVB grupa)

	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L8</b>	<b>L9</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	32.000	17.000	44.500	40.000
<b>Wilcoxon W</b>	168.000	153.000	180.500	176.000
<b>Z</b>	-2.266	-3.508	-2.610	-2.603
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.023	.000	.009	.009
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.023*	.000**	.008**	.008**

\*značajno pri nivou značajnosti p=0.05, \*\*značajno pri nivou značajnosti p=0.01

Tabela P.4.3. Rezultati Man-Vitnijev U testa – mapa Madrida (poređenje PVB grupe pre i posle težinske daltonizacije)

	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L8</b>	<b>L9</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	25.000	13.000	63.500	52.000
<b>Wilcoxon W</b>	46.000	79.000	154.500	130.000
<b>Z</b>	-.236	-1.644	-1.078	-.528
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.814	.100	.281	.597
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.864	.115	.287	.628

Tabela P.4.4. Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje verzija linije M1 mape Atine (PVB vs nePVB grupa)

	<b>OR</b>	<b>ChD</b>	<b>KM</b>	<b>MM</b>	<b>PD</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	17.000	24.000	32.000	10.000	58.000
<b>Wilcoxon W</b>	153.000	115.000	168.000	31.000	194.000
<b>Z</b>	-2.289	-.839	-1.609	-1.281	-1.767
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.022	.401	.108	.200	.077
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.021*	.443	.118	.240	.082

\*značajno pri nivou značajnosti  $p=0.05$

Tabela P.4.5. Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje verzija linije M2 mape Atine (PVB vs nePVB grupa)

	<b>OR</b>	<b>ChD</b>	<b>KM</b>	<b>MM</b>	<b>PD</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	12.500	103.000	22.500	7.500	77.500
<b>Wilcoxon W</b>	117.500	208.000	158.500	17.500	213.500
<b>Z</b>	-1.073	-.375	-3.036	-.615	-.520
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.283	.708	.002	.539	.603
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.300	.728	.001**	.556	.610

\*\*značajno pri nivou značajnosti  $p=0.01$

Tabela P.4.6. Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje verzija linije M3 mape Atine (PVB vs nePVB grupa)

	<b>OR</b>	<b>ChD</b>	<b>KM</b>	<b>MM</b>	<b>PD</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	76.500	16.000	54.000	87.000	82.000
<b>Wilcoxon W</b>	196.500	136.000	159.000	223.000	187.000
<b>Z</b>	-.312	-1.401	-1.545	-1.040	-1.249
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.755	.161	.122	.298	.212
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.760	.185	.131	.313	.224

Tabela P.4.7. Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje verzija linije P1 mape Atine (PVB vs nePVB grupa)

	<b>OR</b>	<b>ChD</b>	<b>KM</b>	<b>MM</b>	<b>PD</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	73.000	15.000	108.000	71.500	48.000
<b>Wilcoxon W</b>	209.000	151.000	213.000	191.500	184.000
<b>Z</b>	-1.361	-2.436	-.166	-1.199	-2.459
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.174	.015	.868	.231	.014
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.184	.013*	.886	.235	.013*

\*značajno pri nivou značajnosti p=0.05

Tabela P.4.8. Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje verzija linije P2 mape Atine (PVB vs nePVB grupa)

	<b>OR</b>	<b>ChD</b>	<b>KM</b>	<b>MM</b>	<b>PD</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	82.000	63.000	3.000	61.000	90.000
<b>Wilcoxon W</b>	187.000	99.000	139.000	166.000	226.000
<b>Z</b>	-1.250	-.061	-2.350	-.877	-.279
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.211	.951	.019	.380	.780
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.224	.976	.014*	.403	.802

\*značajno pri nivou značajnosti p=0.05

Tabela P.4.9. Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje svih linija OR i PM verzije mape Atine (PVB grupa)

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	12.000	11.000	53.500	58.500	83.000
<b>Wilcoxon W</b>	90.000	77.000	158.500	149.500	161.000
<b>Z</b>	-2.251	-.861	-1.289	-1.335	-.052
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.024	.389	.197	.182	.959
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.024*	.456	.202	.186	.980

\*značajno pri nivou značajnosti p=0.05

Tabela P.4.10. Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje svih linija ChD i PM verzije mape Atine (PVB grupa)

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	18.000	61.000	10.500	36.000	45.000
<b>Wilcoxon W</b>	96.000	127.000	115.500	57.000	81.000
<b>Z</b>	-1.266	-.880	-1.861	-.263	-.233
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.205	.379	.063	.792	.816
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.234	.403	.061	.831	.851

Tabela P.4.11. Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje svih linija KM i PM verzije mape Atine (PVB grupa)

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	21.500	27.500	38.500	23.500	5.000
<b>Wilcoxon W</b>	99.500	93.500	143.500	128.500	83.000
<b>Z</b>	-1.735	-1.941	-2.344	-3.278	-1.887
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.083	.052	.019	.001	.059
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.083	.051	.017	.001**	.070

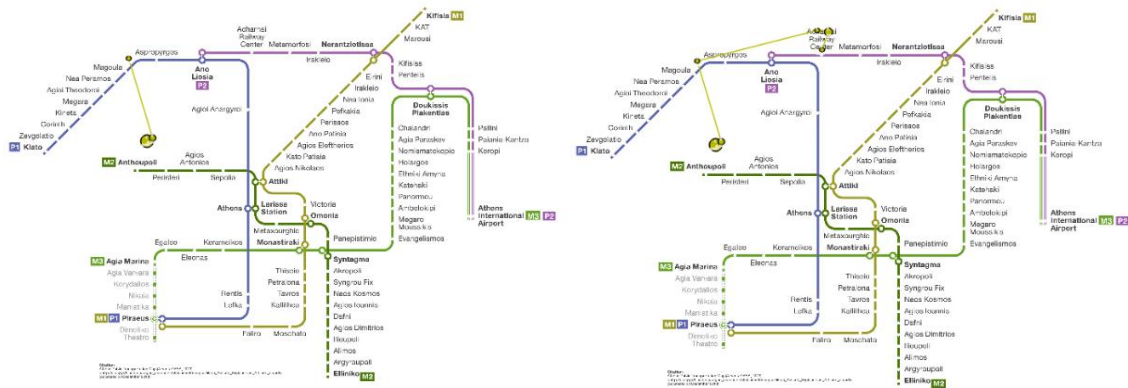
\*\*značajno pri nivou značajnosti p=0.01

Tabela P.4.12. Rezultati Man-Vitnijev U testa – poređenje svih linija MM i PM verzije mape Atine (PVB grupa)

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>Mann-Whitney U</b>	3.000	9.500	94.500	56.500	42.500
<b>Wilcoxon W</b>	81.000	75.500	199.500	147.500	120.500
<b>Z</b>	-3.094	-2.048	-.161	-1.438	-1.450
<b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>	.002	.041	.872	.151	.147
<b>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</b>	.001**	.038*	.874	.153	.151

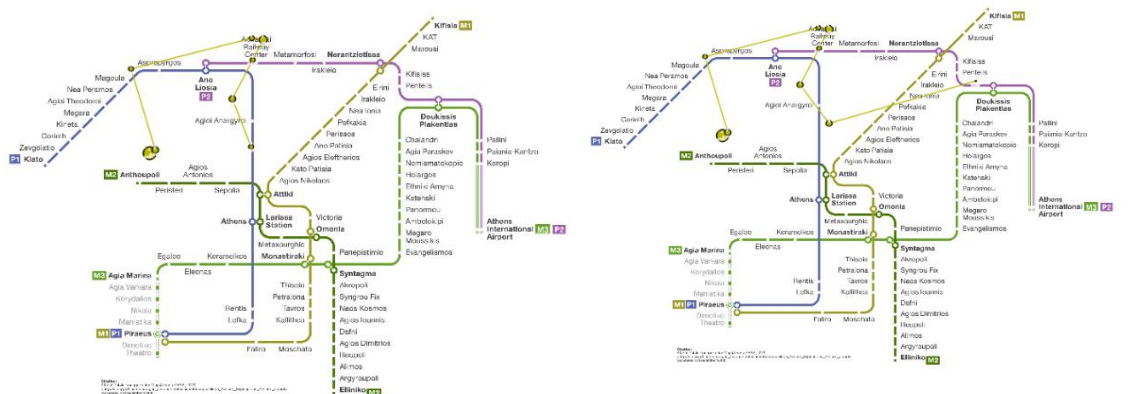
\*značajno pri nivou značajnosti p=0.05, \*\*značajno pri nivou značajnosti p=0.01

Tabela P.4.13. Primer uspešnog nalaženja zadate transportne linije P1 kod ChD verzije (mapa nakon Chrome Daltonize daltonizacije), ali sa dvoumljenjem između P1 i P2 linije



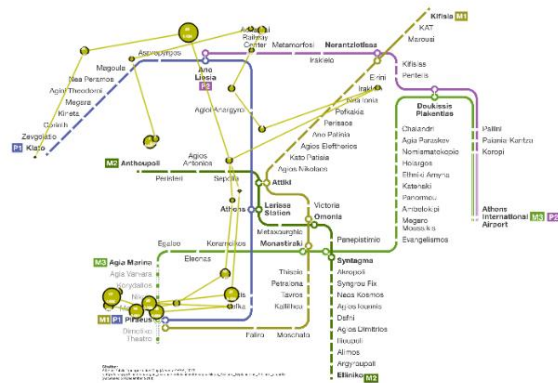
Pogled ka liniji P1

Pogled ka liniji P2



Vraćanje pogleda na P1

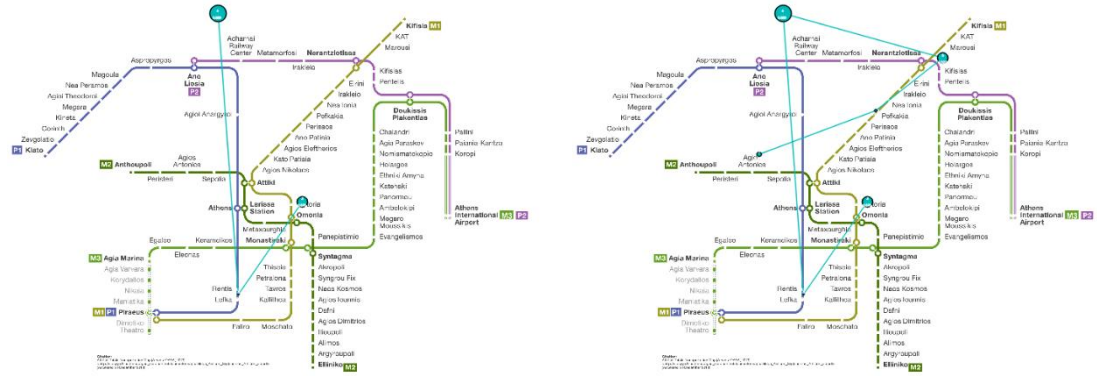
Vraćanje pogleda na P2



Odlučivanje za liniju P1

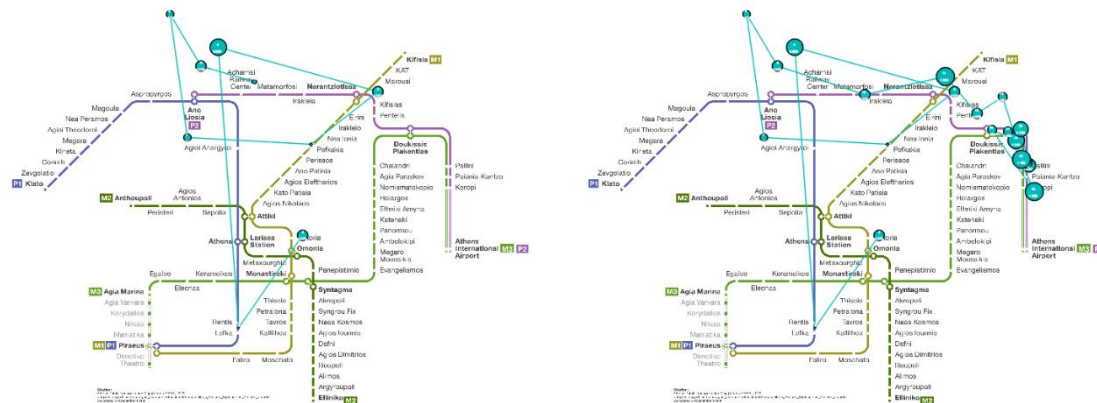
Uspešno ispraćena transportna linija P1

Tabela P.4.14. Primer neuspešnog nalaženja zadate transportne linije P1 kod ChD verzije (mapa nakon Chrome Daltonize daltonizacije) – umesto zadate P1 linije praćena je pogledom P2 linija



Pogled niz liniju P1

Dvouljenje između linija P1 i P2

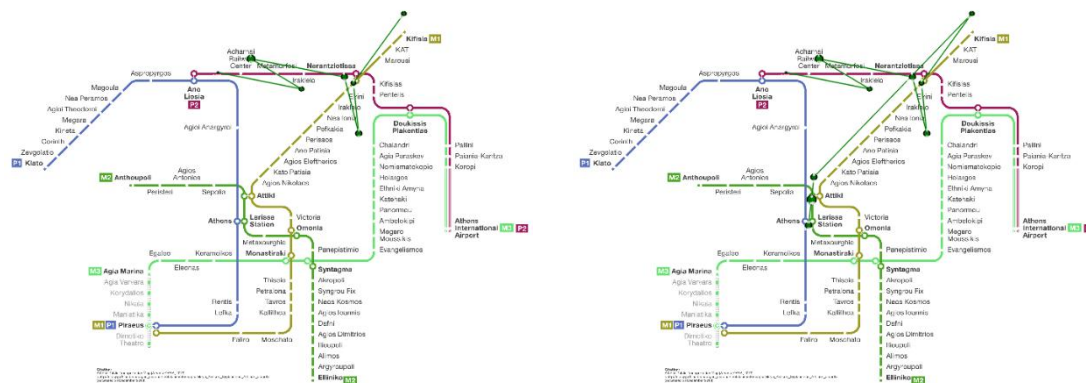


Odlučivanje za liniju P2

Neuspešno ispraćena linija P2 umesto P1

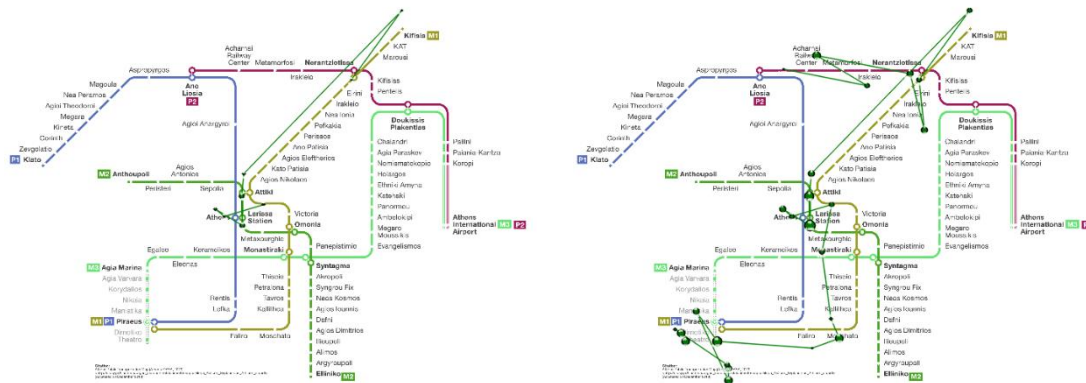


Tabela P.4.15. Primer neuspešnog nalaženja zadate transportne linije M2 kod OR verzije (početna mapa) – umesto zadate M2 linije praćena je pogledom M1 linija



Odlučivanje za liniju M1

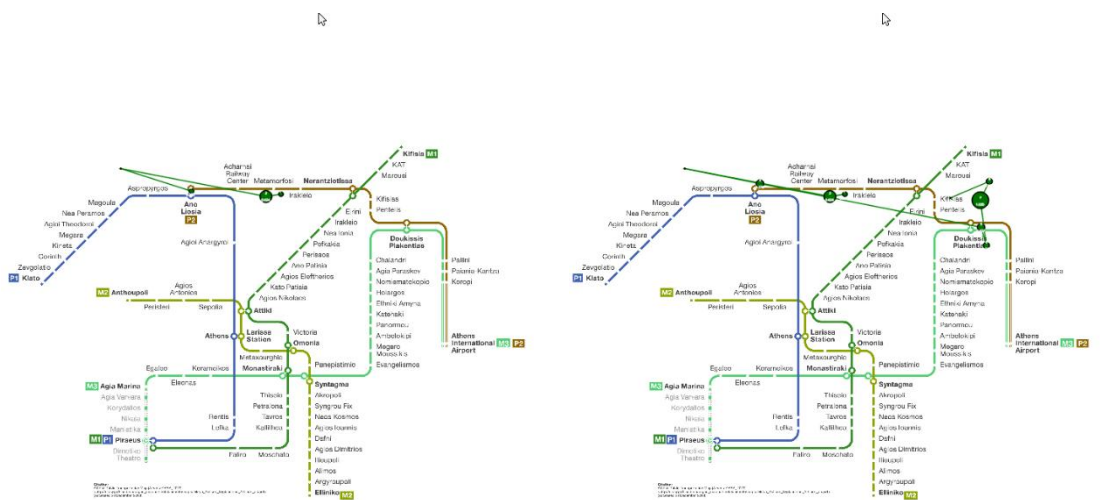
Moment dvoumljenja na ukrštanju linija M1 i M2



Vraćanje pogleda na liniju M1

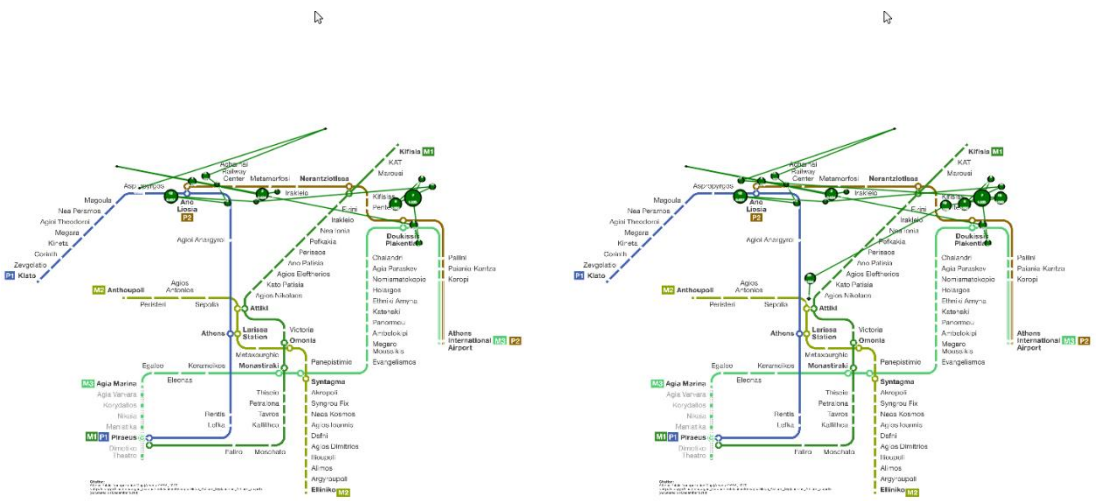
Neuspešno ispraćena linija M1 umesto M2

Tabela P.4.16. Primer neuspešnog traženja zadate transportne linije P2 kod KM verzije (mapa nakon Koterine daltonizacije) – ispitanik nije mogao da se odluči između linija P2, M1 i M2



Pogled ka liniji P2

Moment dvoumljenja između linija P2 i M1



Vraćanje pogleda na P2

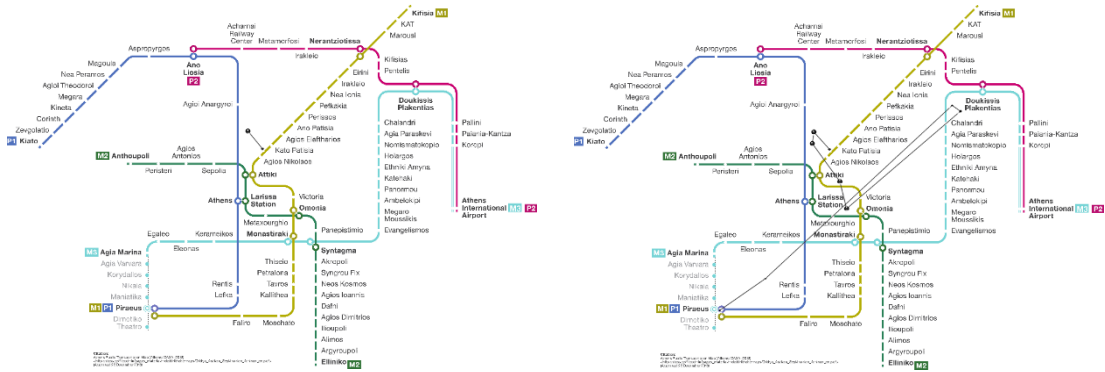
Preusmeravanje pogleda na M1



Preusmeravanje pogleda na M2

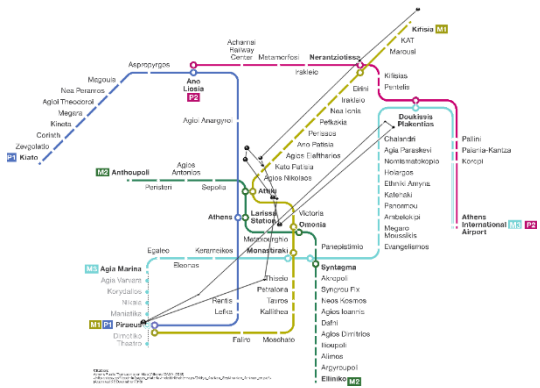
Neuspešno ispraćena linija M2 umesto P2

Tabela P.4.17. Primer uspešnog praćenja zadate transportne linije M1 na PM verzije (mapa nakon predložene tipske daltonizacije)



Odlučivanje za liniju M1

Početak praćenja linije M1



Uspešno ispraćena linija M1

Tabela P.4.18. Primer ispitanika koji nije uspeo da nađe liniju 4 ni pre ni posle težinske daltonizacije odnosno kod kojeg težinska daltonizacija nije imala efekta – u oba slučaja ispitanik je odabrao liniju 7 umesto linije 4



Početna mapa

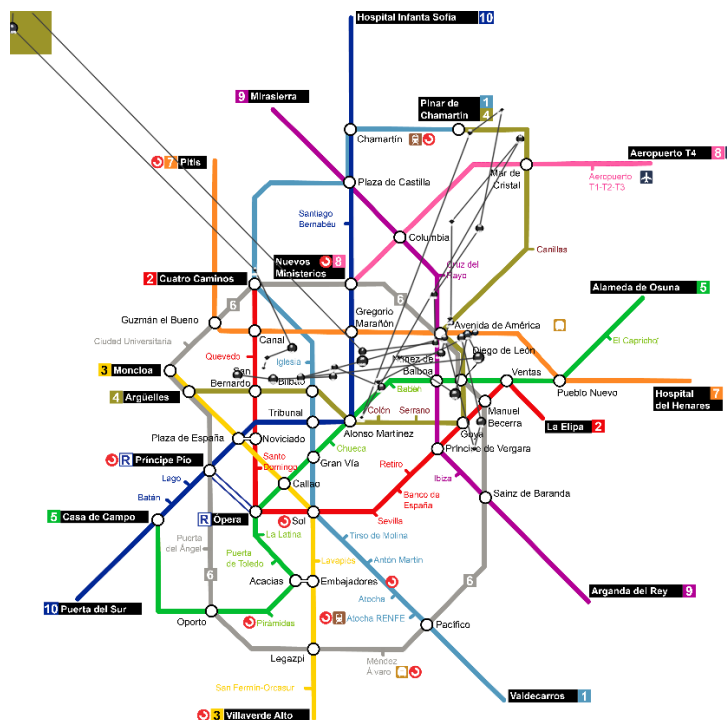


Mapa nakon težinske daltonizacije

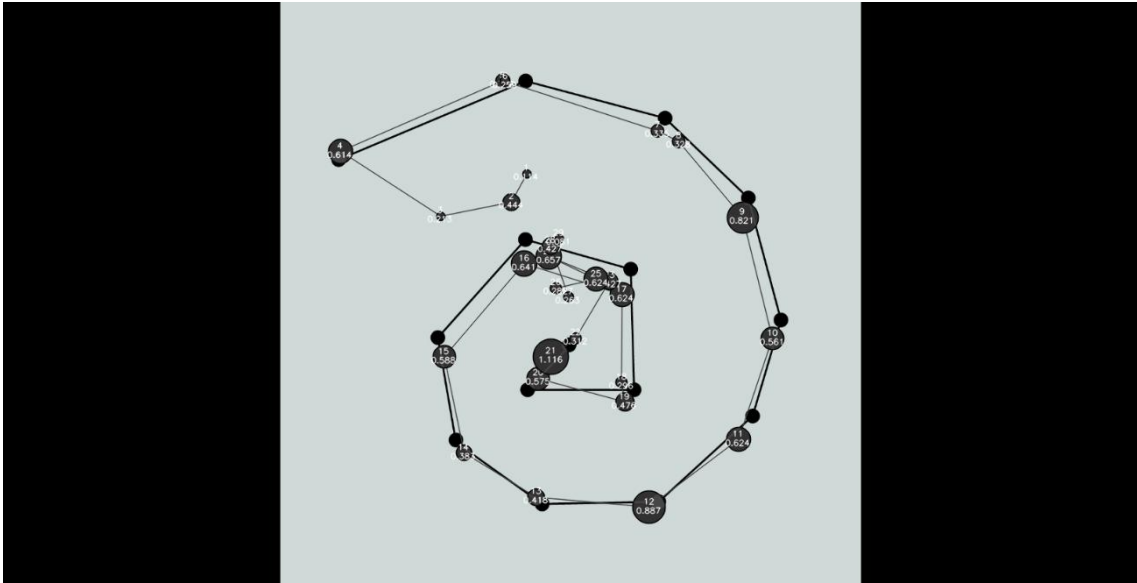
Tabela P.4.19. Primer ispitanika koji nije pronašao liniju 4 na početnoj mapi, ali je uspeo da reši zadatak nakon težinske daltonizacije - u prvom slučaju je umesto linije 4 pratio linije 5 i 7



Početna mapa



Mapa nakon težinske daltonizacije



Slika P.4.8. Primer testiranja kalibracije

## PRILOG P.5

### PC indeks – pojedinačni rezultati subjektivne ocene uparenih uzoraka

Tabela P.5.1. PC indeksi uparenih verzija test slika (poređenje originalne slike sa slikom nakon težinske daltonizacije, poređenje originalne slike sa slikom nakon tipske daltonizacije i poređenje verzija slike nakon težinske i tipske daltonizacije)

rbr	1						2						3						
	originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		
	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	
1	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
2	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	2	0	1	1	0	2	0	2	0
3	0	2	1	1	0	2	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	0	2	0
4	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	0	2	0
5	1	1	0	2	0	2	1	1	0	2	2	0	0	2	0	2	1	1	1
6	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	2	1	0
7	1	1	1	1	2	0	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	2	2	0
8	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	0	2	0
9	0	2	2	0	2	0	1	1	1	1	1	1	0	2	0	2	2	2	0
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0	2	0

nastavak Tabele P.5.1. (test slike 4-6)

rbr	4						5						6						
	originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		
	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	
1	1	1	2	0	2	0	0	2	0	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	2	0	2	2	0	1	1	1	1	1	1	0	2	0	2	1	1	1
3	1	1	2	0	2	0	0	2	0	2	2	0	1	1	0	2	0	2	0
4	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	0	2	0
5	1	1	2	0	1	1	0	2	0	2	1	1	0	2	1	1	2	0	0
6	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
7	1	1	2	0	2	0	0	2	0	2	2	0	0	2	0	2	2	2	0
8	1	1	2	0	2	0	0	2	0	2	2	0	0	2	0	2	1	1	1
9	0	2	0	2	0	2	0	2	1	1	2	0	0	2	1	1	2	0	0
10	0	2	0	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	0	2	1	1	1

nastavak Tabele P.5.1. (test slike 7-9)

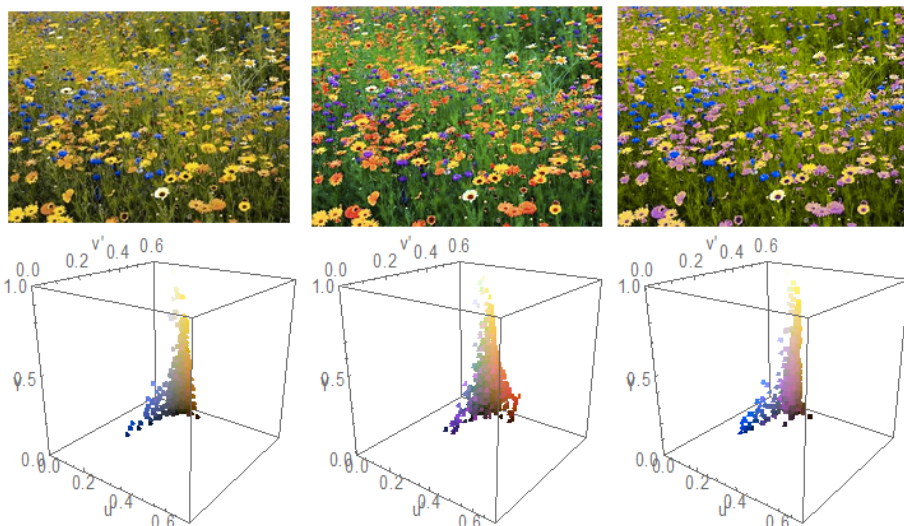
rbr	7						8						9						
	originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		
	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	
1	0	2	0	2	2	0	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	2	2	0
2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
3	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
4	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
5	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	2	1	1
6	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	0	2	0	2	0	2	0
8	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
9	1	1	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
10	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	2	1	1

nastavak Tabele P.5.1. (test slike 10-12)

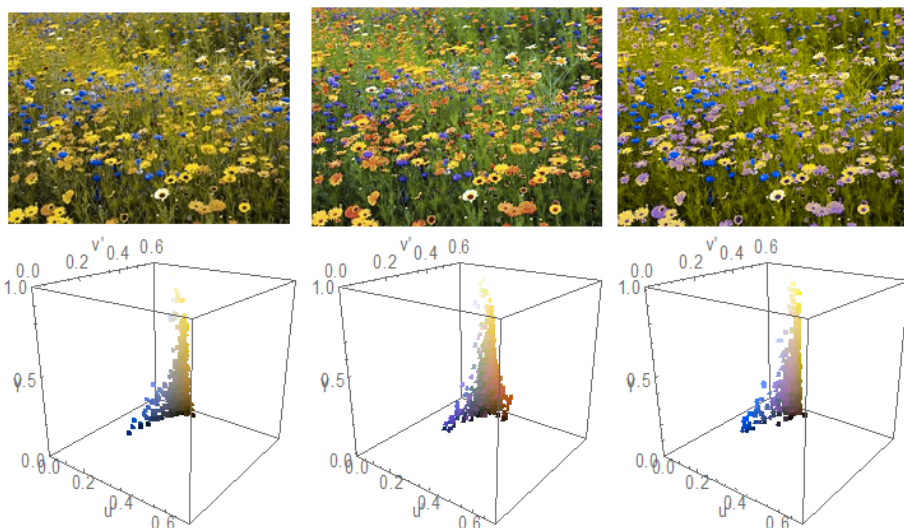
rbr	10						11						12						
	originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		originalna-težinska		originalna-tipska		težinska-tipska		
	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	originalna	težinska	originalna	tipska	težinska	tipska	
1	0	2	0	2	2	0	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
2	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
3	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
4	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
5	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	2	1	1
6	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
7	1	1	1	1	1	1	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
8	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
9	1	1	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
10	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	2	1	1



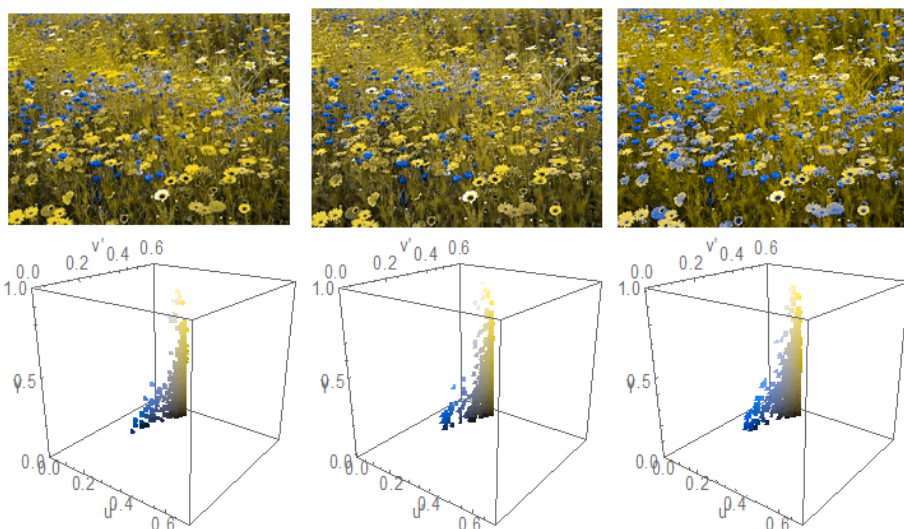
blag protan  
(4 nm)



umeren  
protan  
(12 nm)

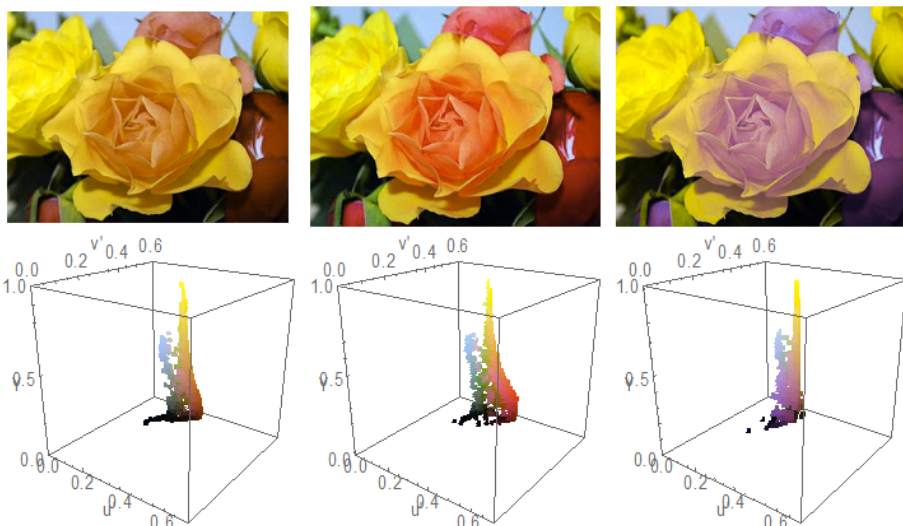


ozbiljan  
protan  
~protanopija  
(20 nm)

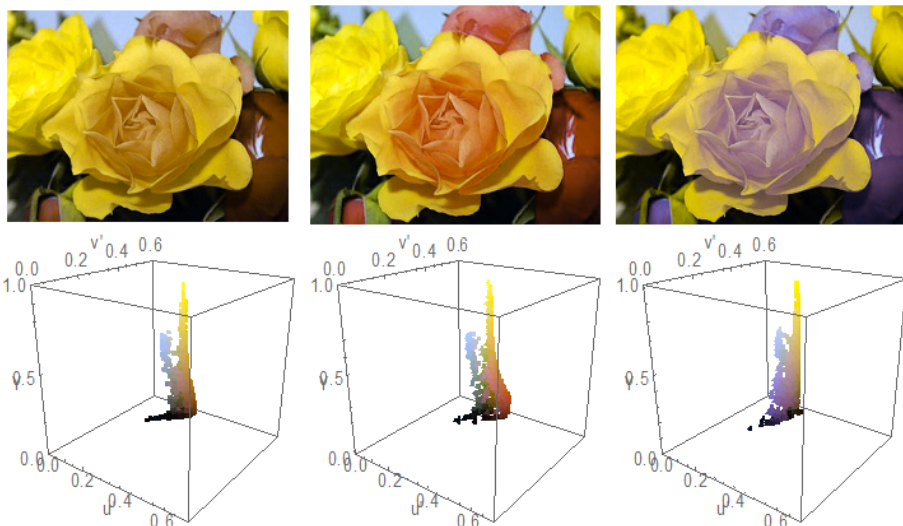


Slika P.5.1. Test slika 2 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima

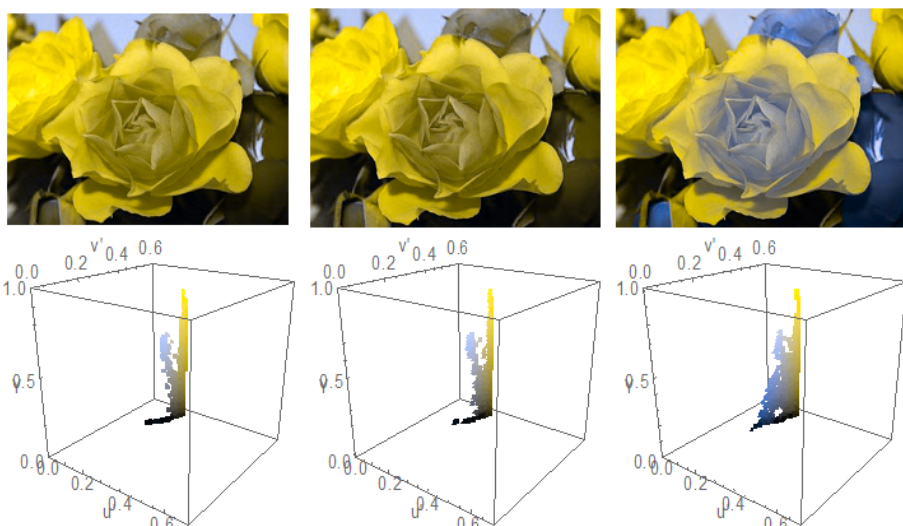
blag protan  
(4 nm)



umeren protan  
(12 nm)

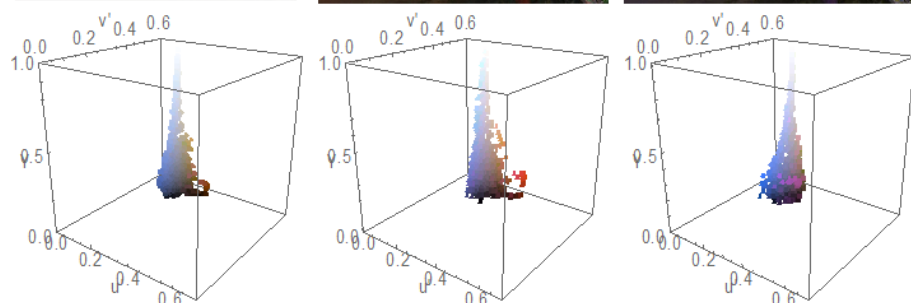


ozbiljan protan  
~protanopija  
(20 nm)

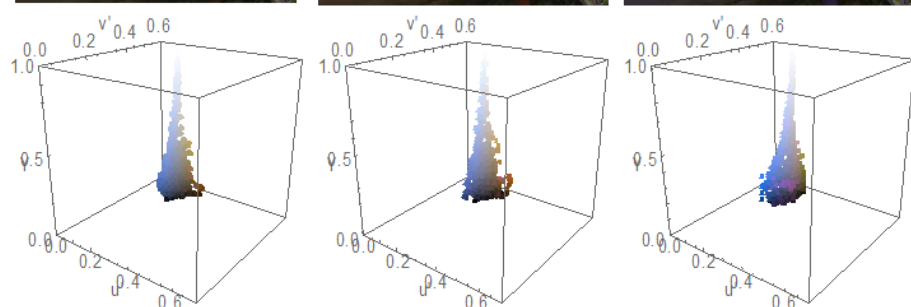
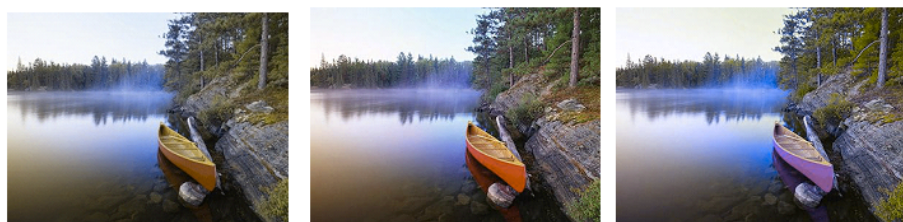


Slika P.5.2. Test slika 3 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima

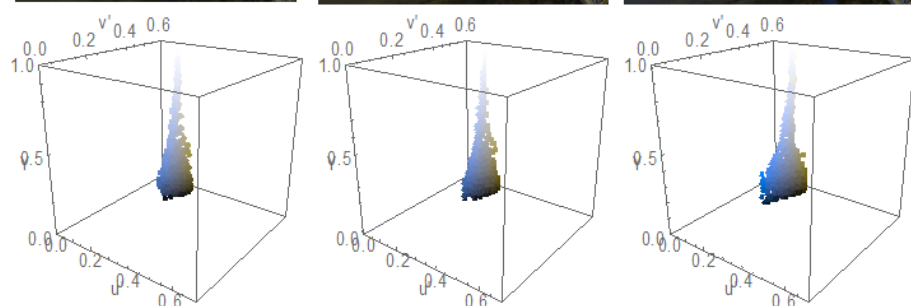
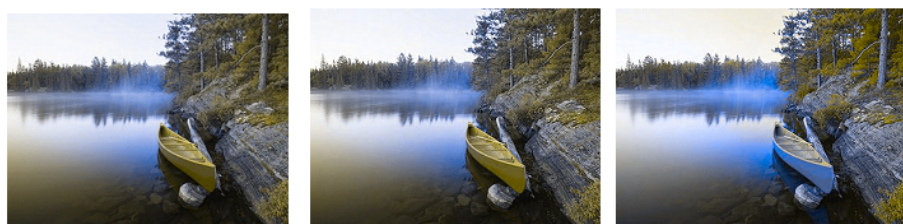
blag protan  
(4 nm)



umeren protan  
(12 nm)

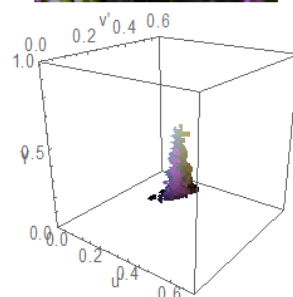
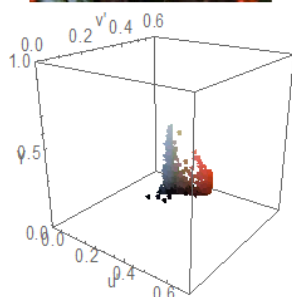
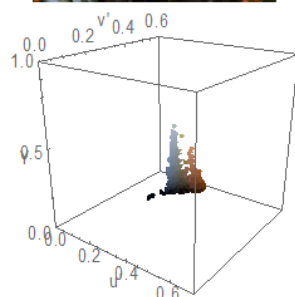
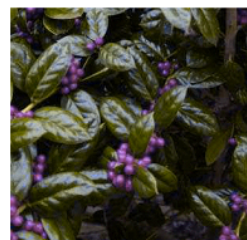


ozbiljan protan  
~protanopija  
(20 nm)

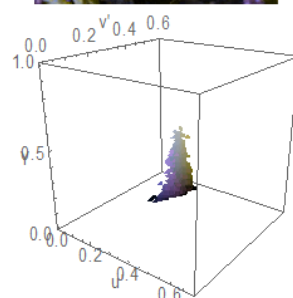
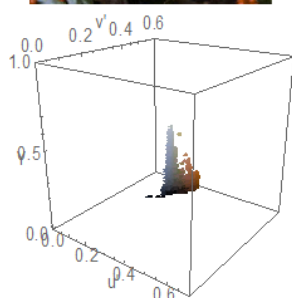
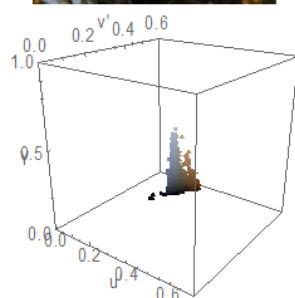
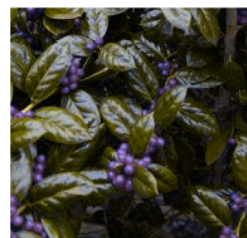
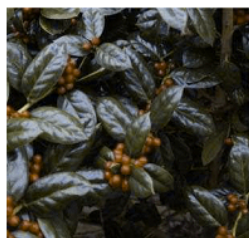


Slika P.5.3. Test slika 4 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima

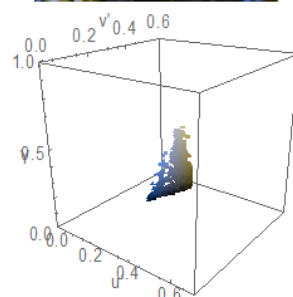
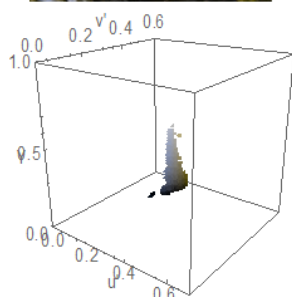
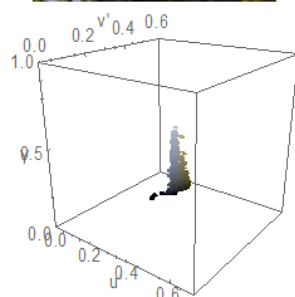
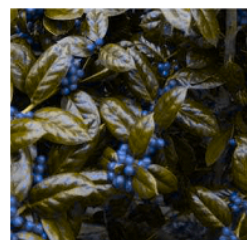
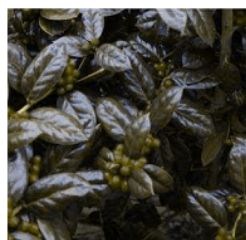
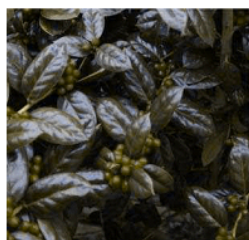
blag protan  
(4 nm)



umeren protan  
(12 nm)

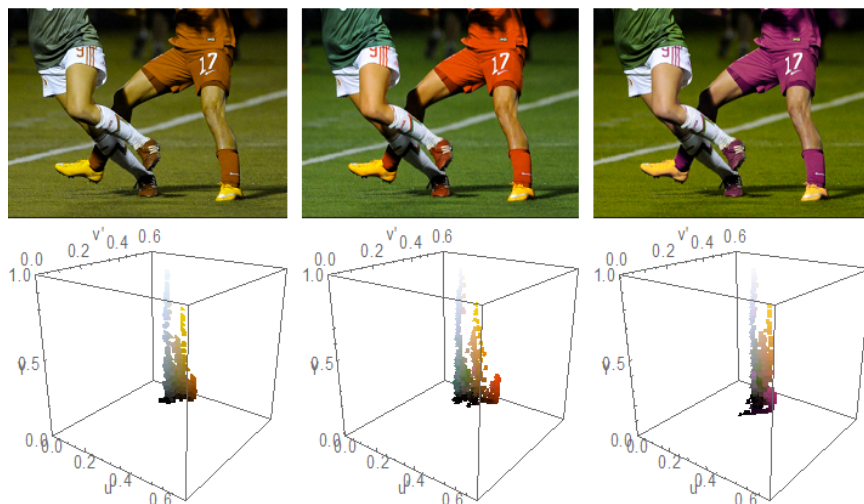


ozbiljan protan  
~protanopija  
(20 nm)

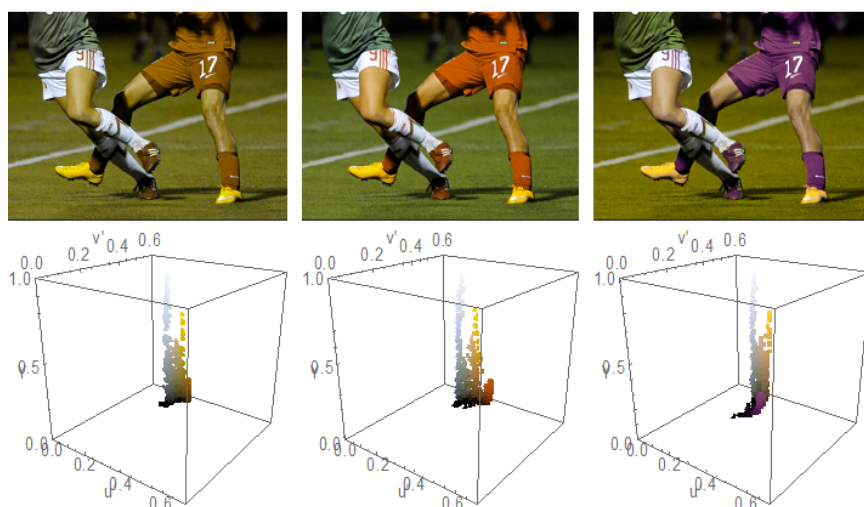


Slika P.5.4. Test slika 5 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima

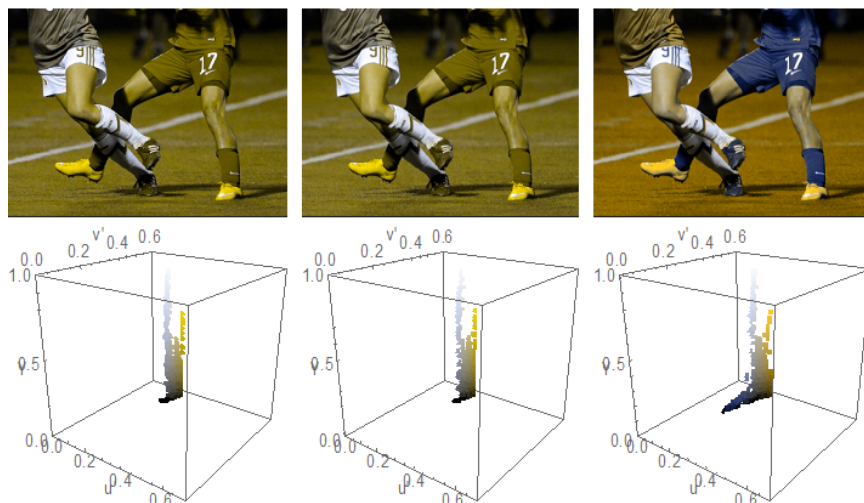
blag protan  
(4 nm)



umeren protan  
(12 nm)

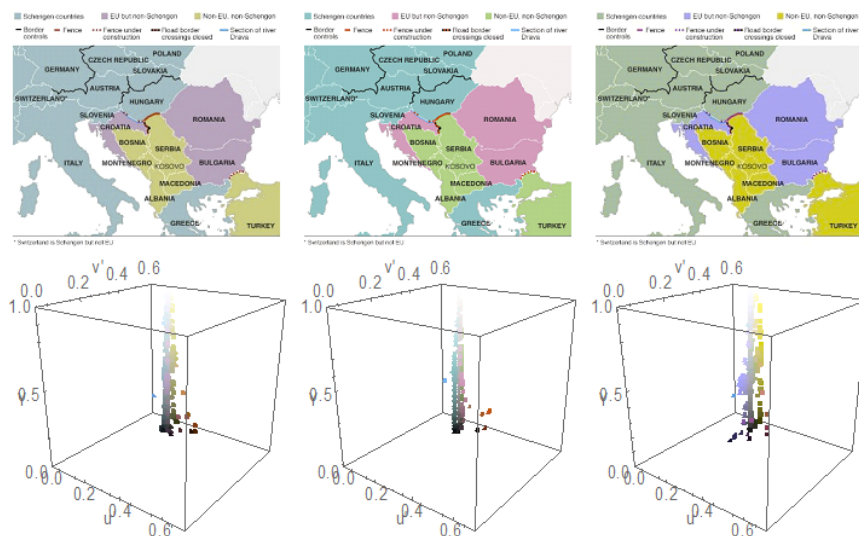


ozbiljan protan  
~protanopija  
(20 nm)

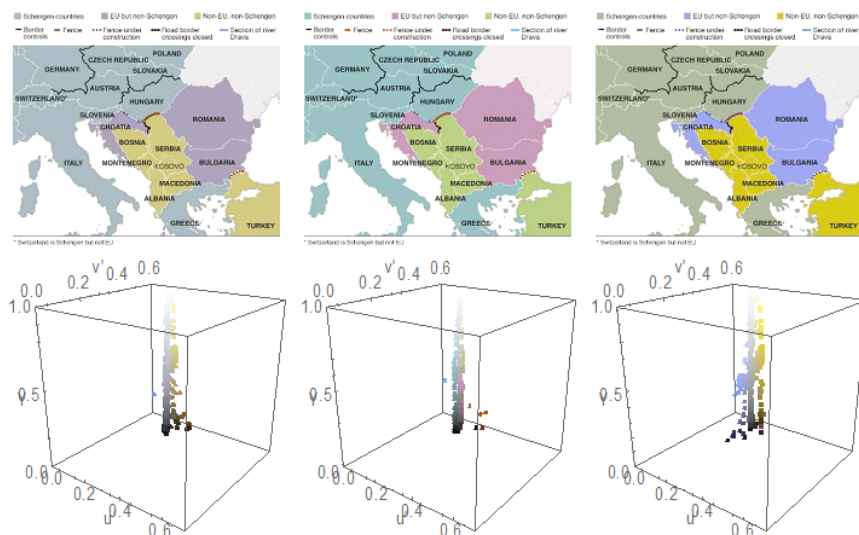


Slika P.5.5. Test slika 6 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima

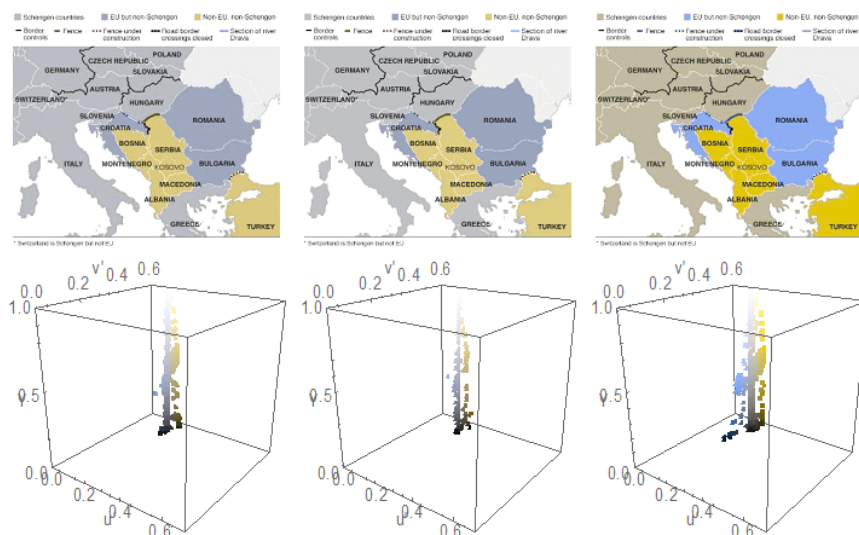
blag protan  
(4 nm)



umeren protan  
(12 nm)

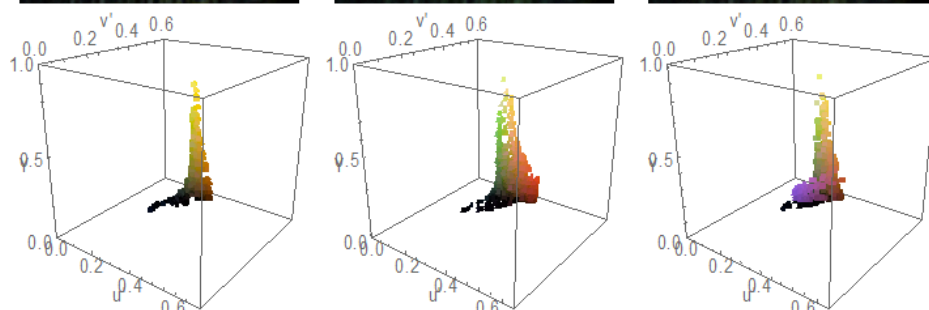
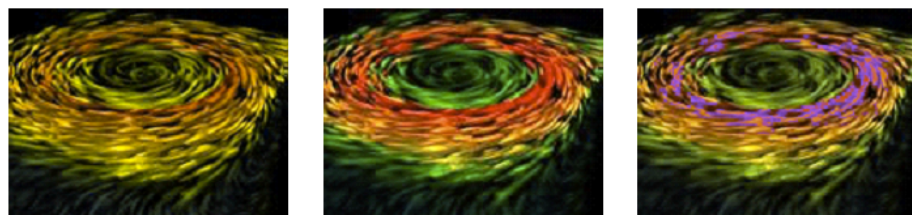


ozbiljan protan  
~protanopija  
(20 nm)

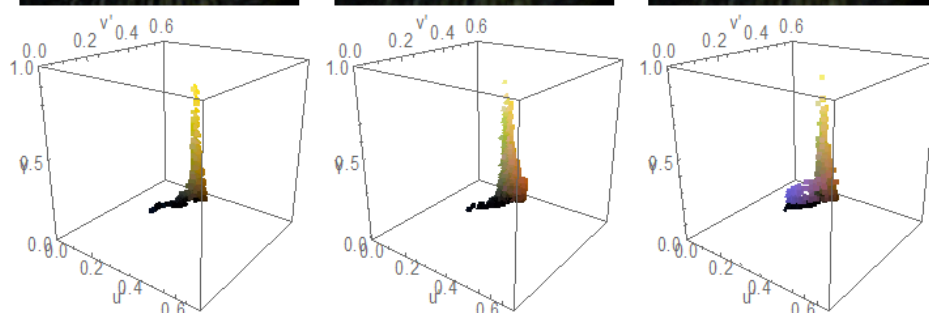
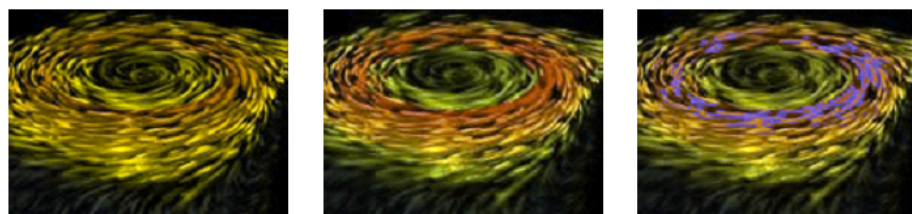


Slika P.5.6. Test slika 7 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima

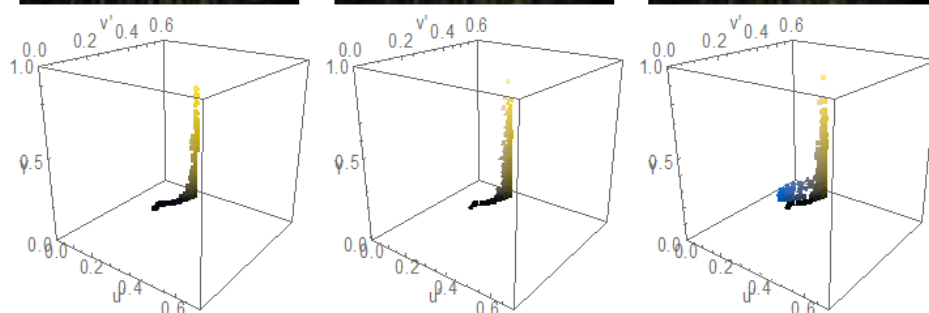
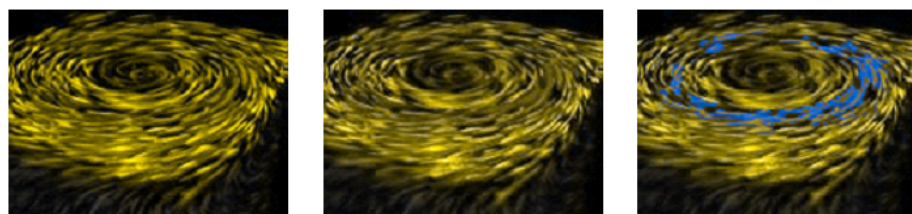
blag protan  
(4 nm)



umeren  
protan  
(12 nm)

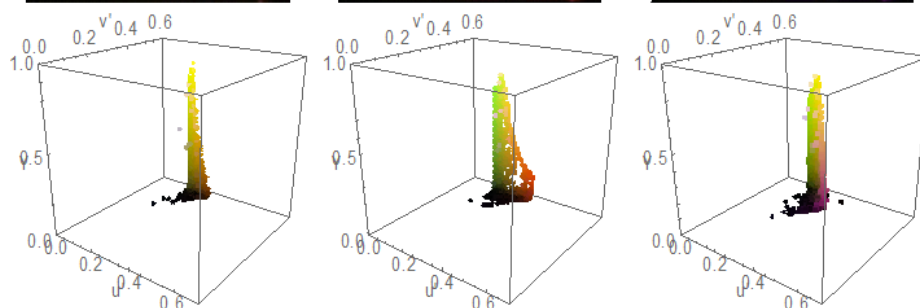
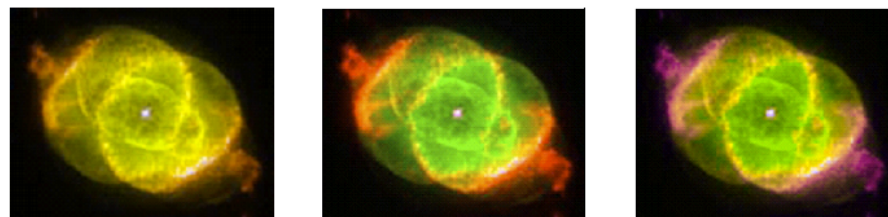


ozbiljan  
protan  
~protanopija  
(20 nm)

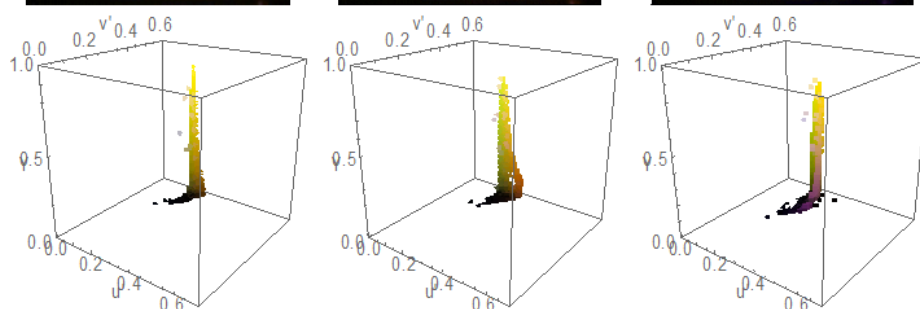
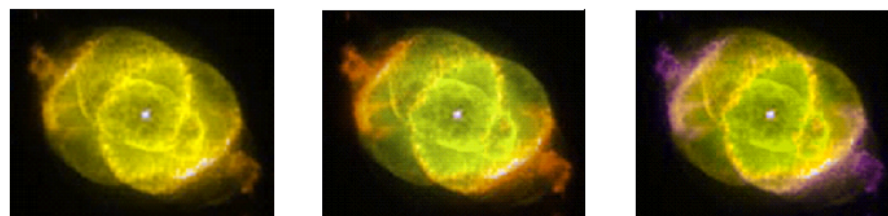


Slika P.5.7. Test slika 8 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima

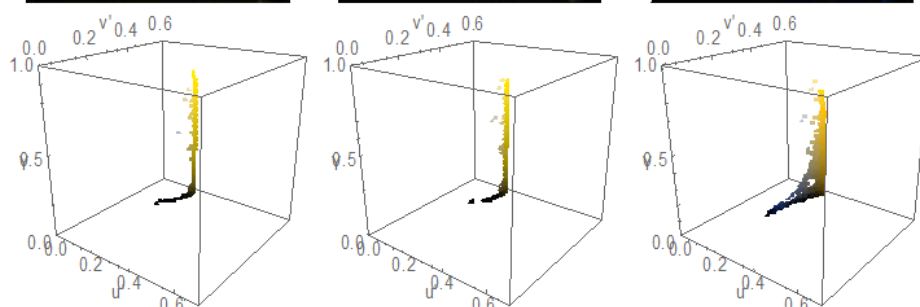
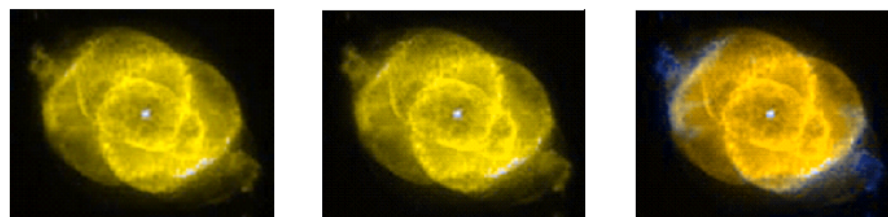
blag protan  
(4 nm)



umeren  
protan  
(12 nm)



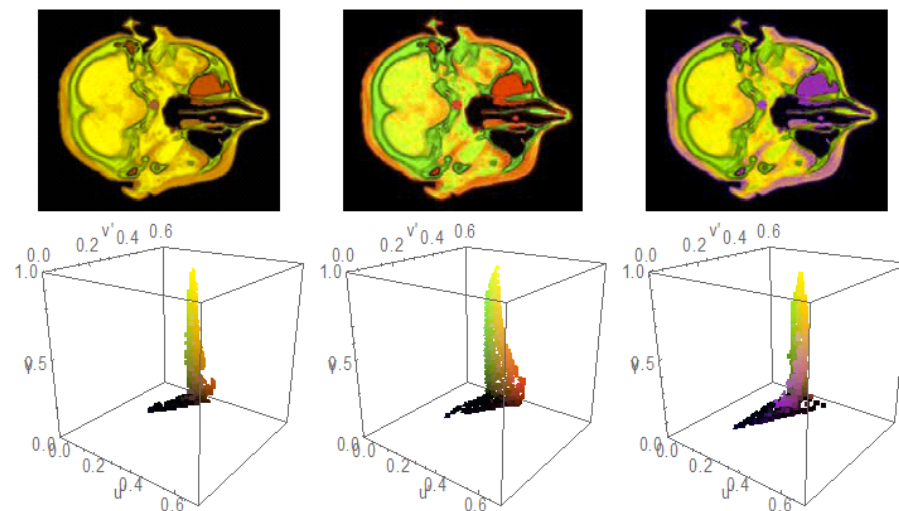
ozbiljan  
protan  
~protanopija  
(20 nm)



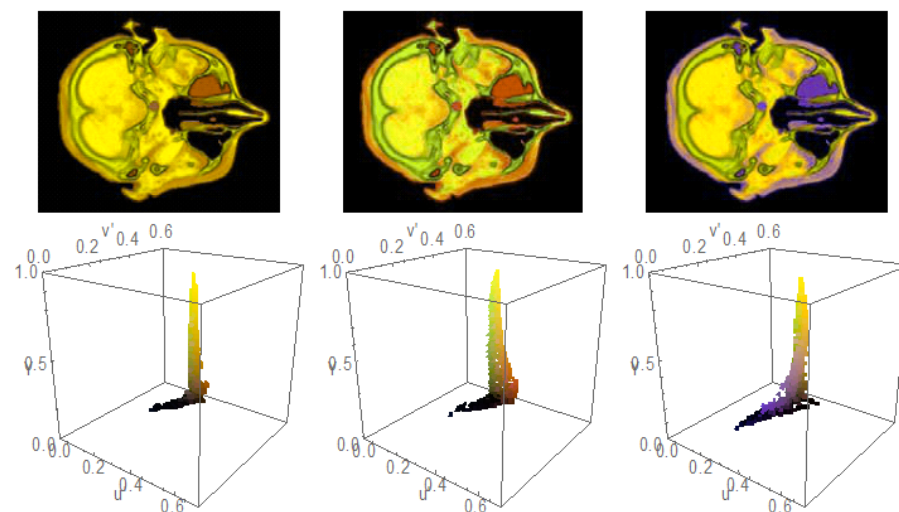
Slika P.5.8. Test slika 9 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima



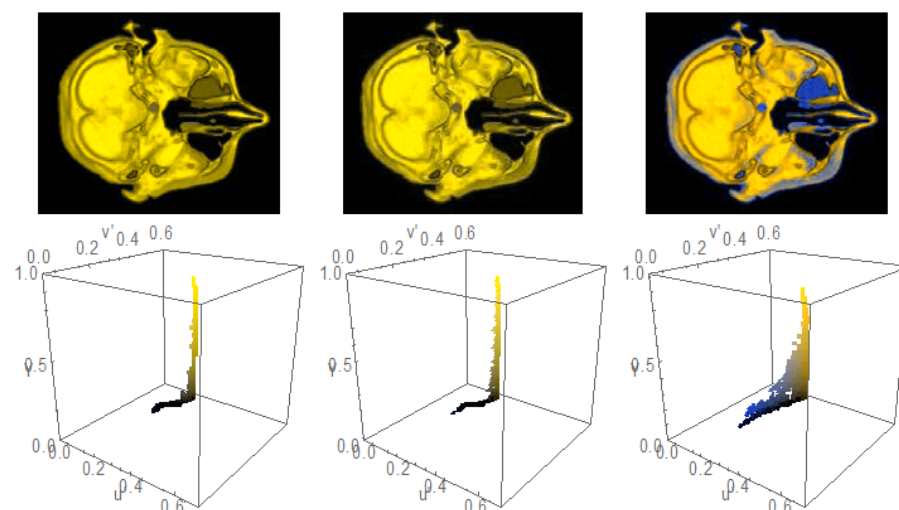
blag protan  
(4 nm)



umeren protan  
(12 nm)

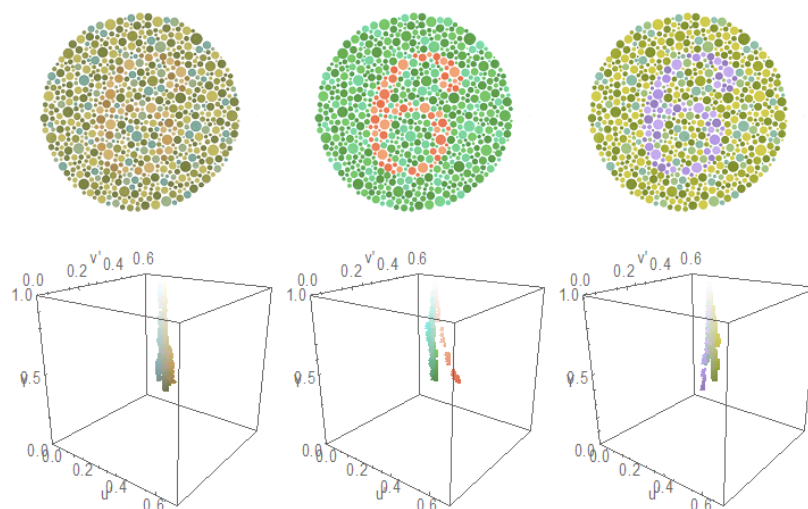


ozbiljan protan  
~protanopija  
(20 nm)

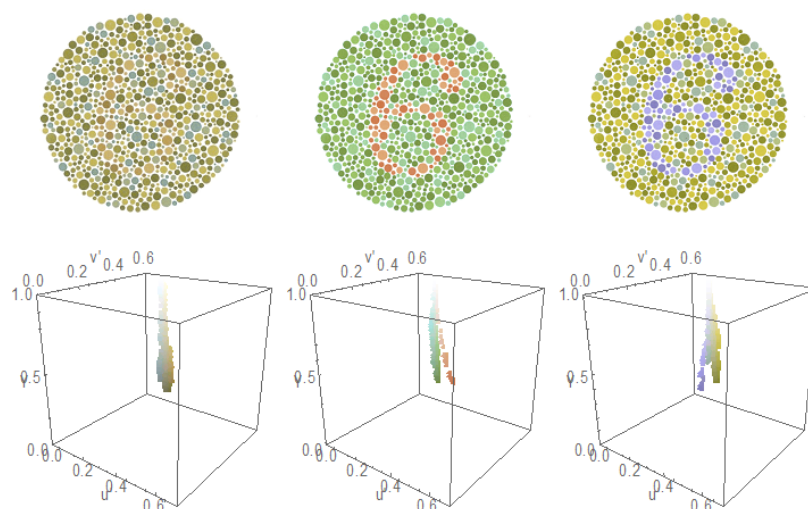


Slika P.5.9. Test slika 10 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima

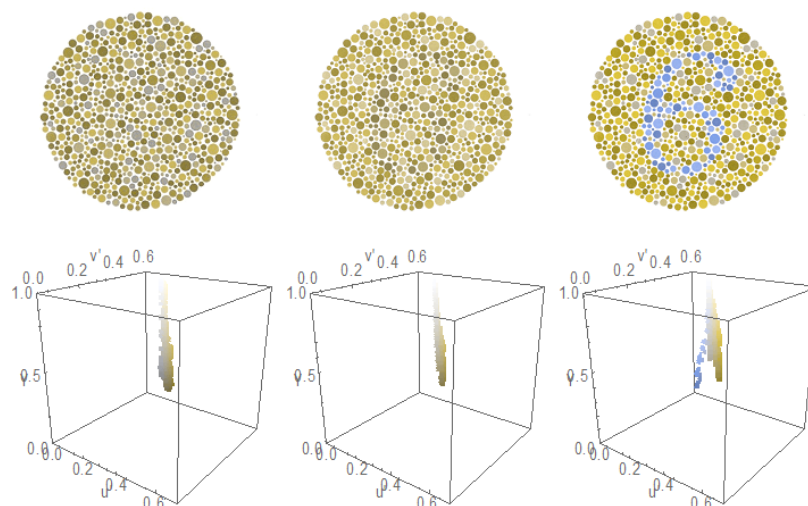
blag protan  
(4 nm)



umeren protan  
(12 nm)

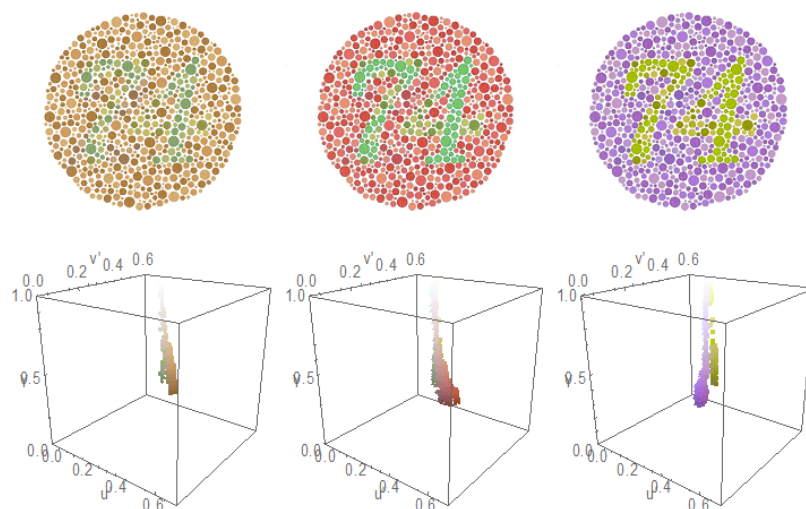


ozbiljan protan  
~protanopija  
(20 nm)

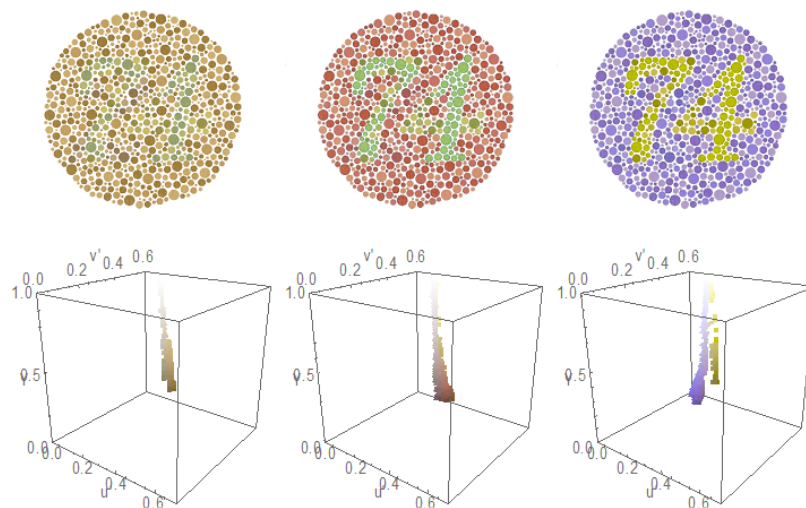


Slika P.5.10. Test slika 11 – Protanske simulacije sa korespondirajućim gamutima

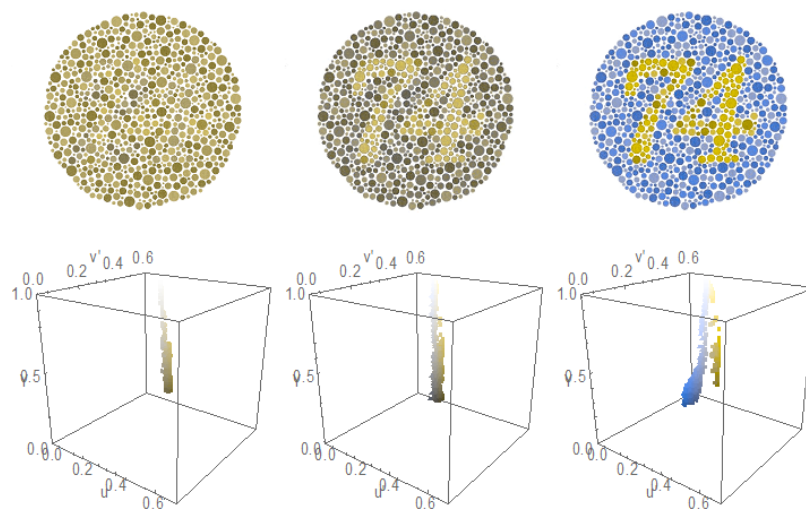
blag protan  
(4 nm)



umeren protan  
(12 nm)

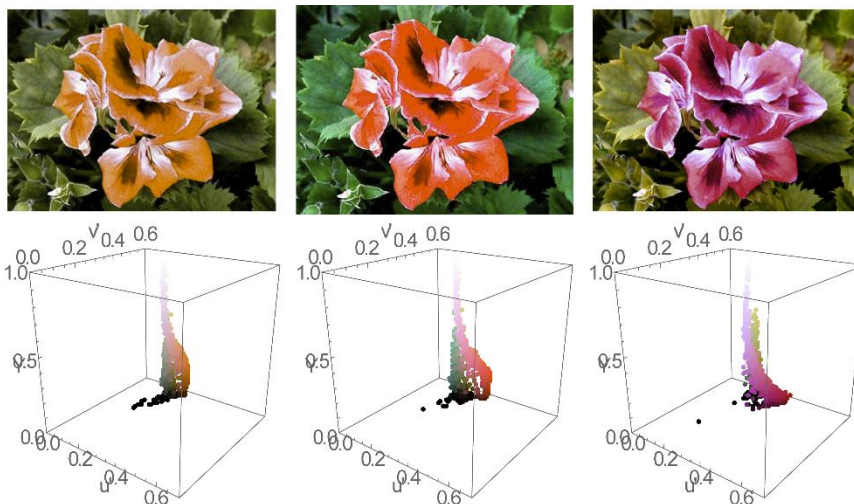


ozbiljan protan  
~protanopija  
(20 nm)

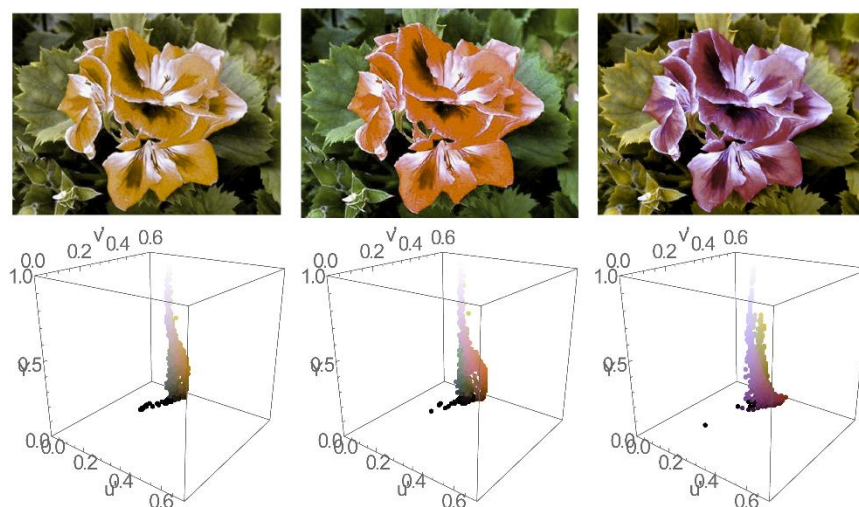


Slika P.5.11. Test slika 12 – Protan simulacije sa korespondirajućim gamutima

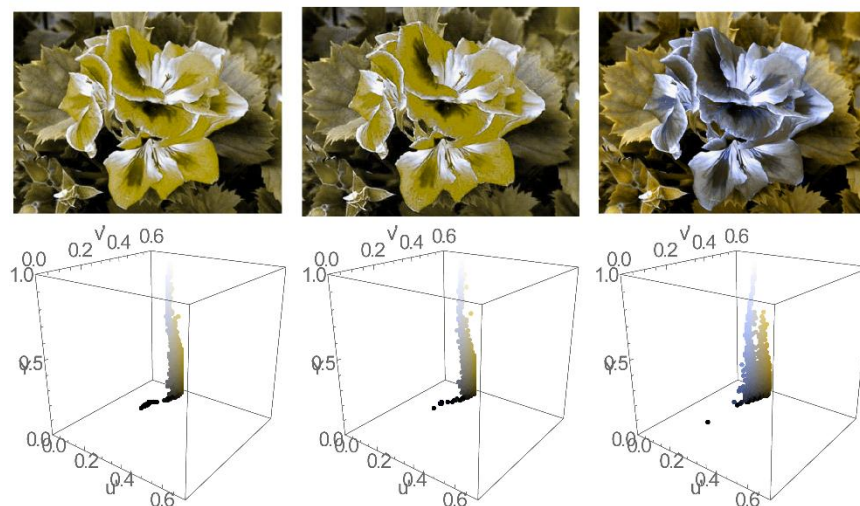
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)

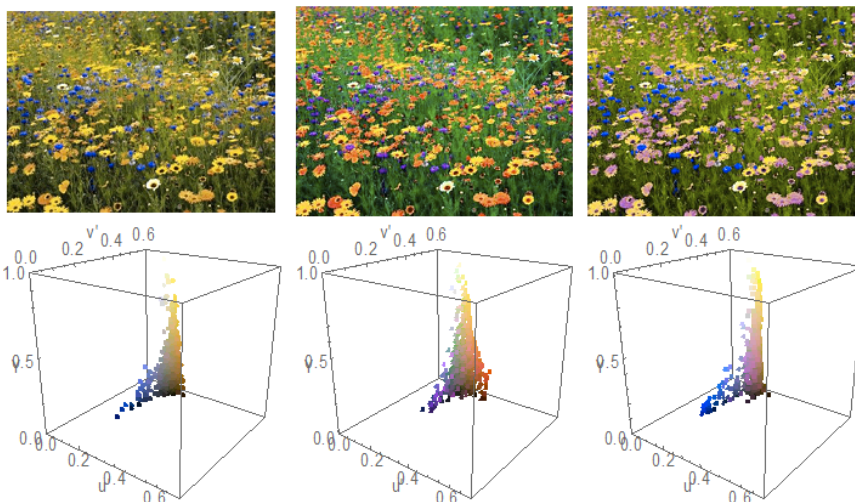


ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)

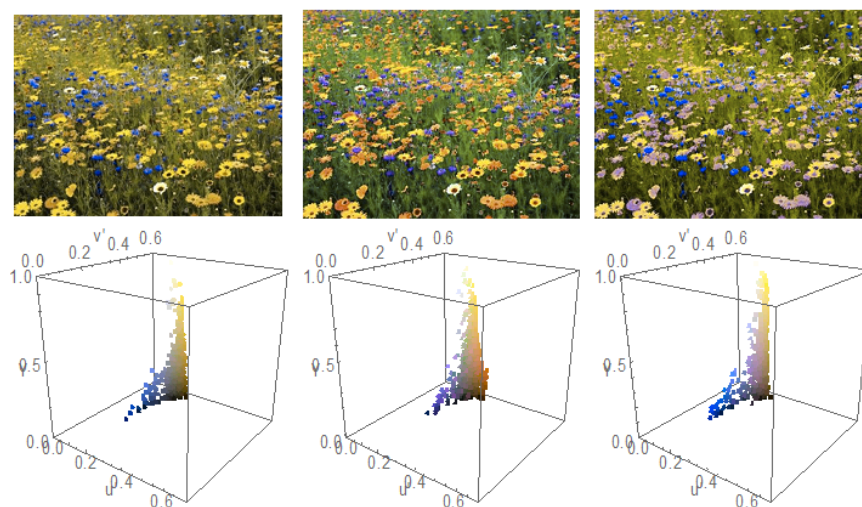


Slika P.5.12. Test slika 1 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima

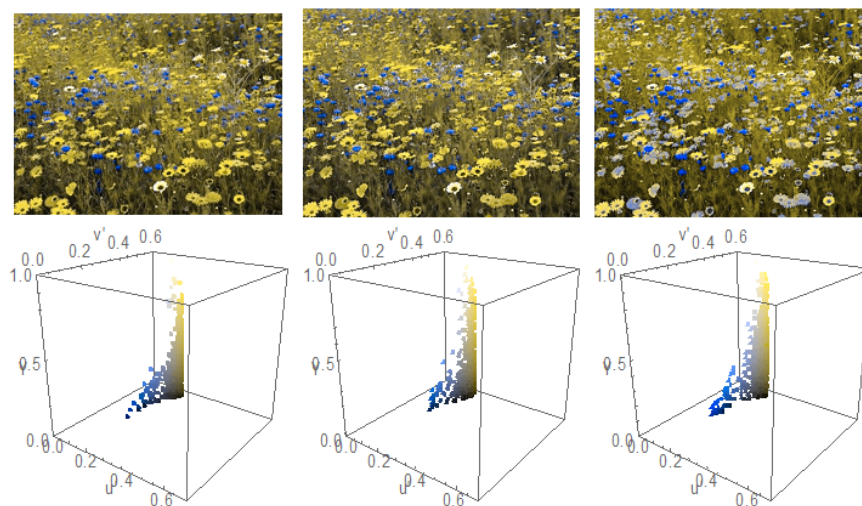
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)

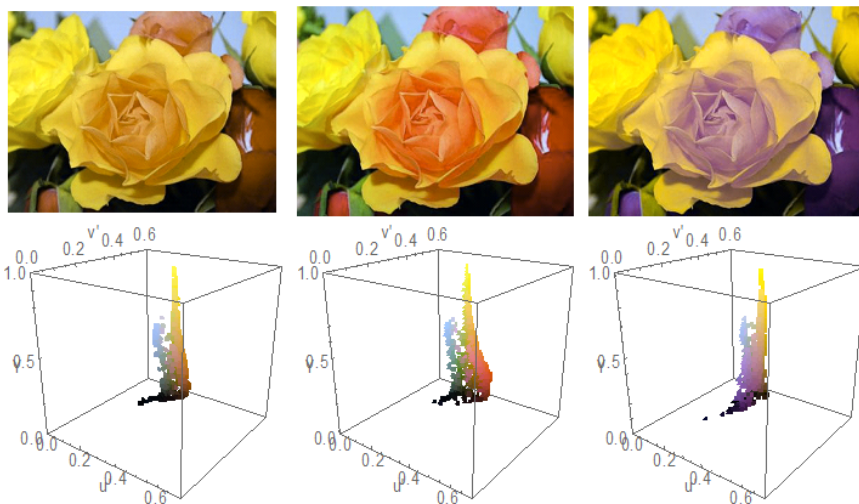


ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)

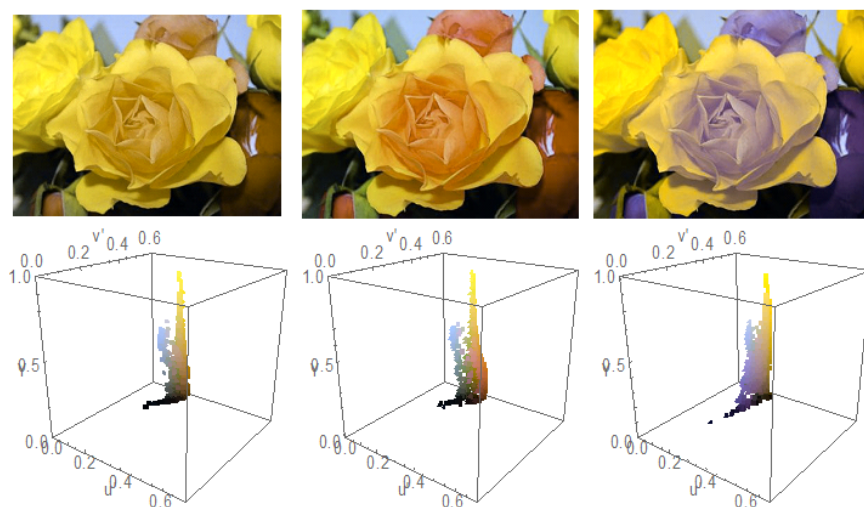


Slika P.5.13. Test slika 2 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima

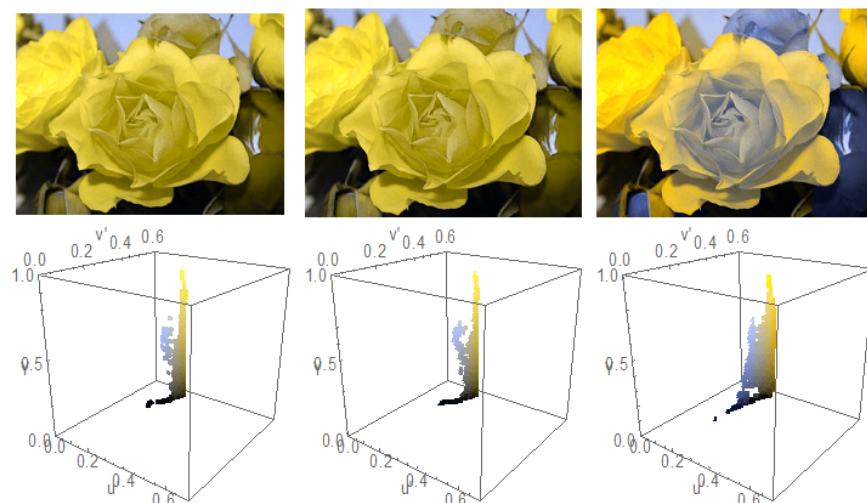
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)

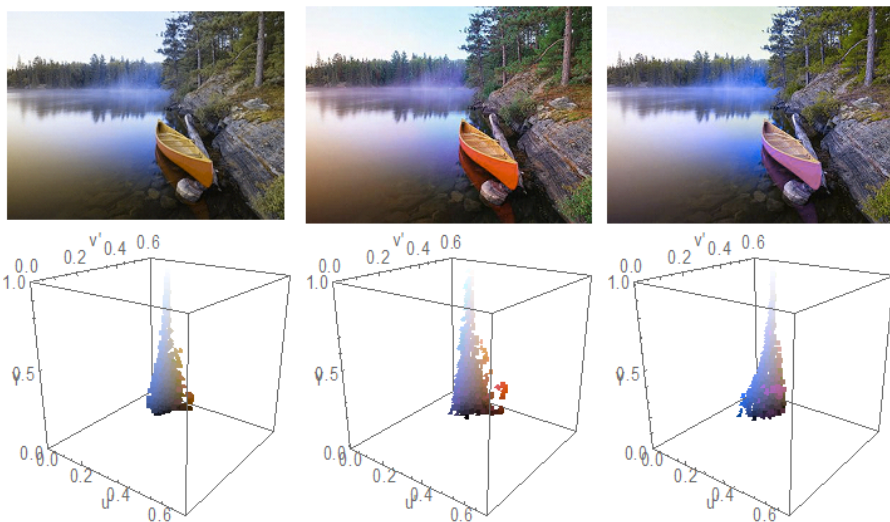


ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)

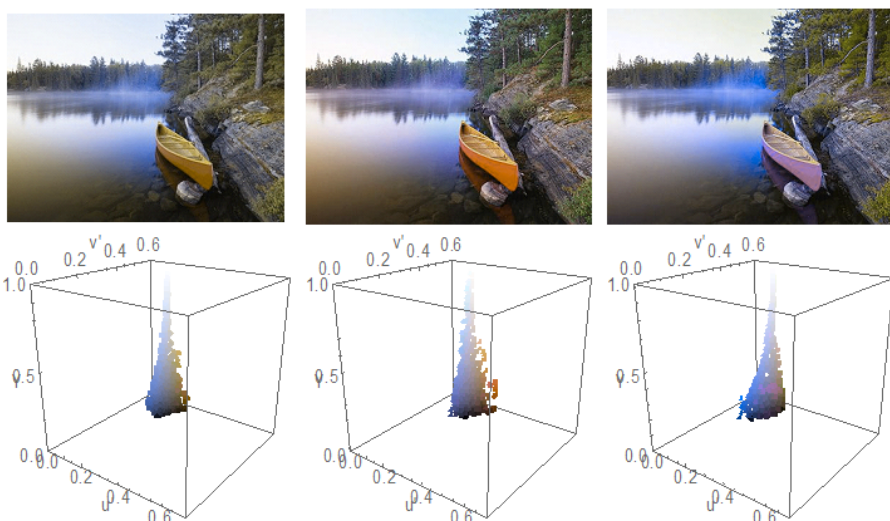


Slika P.5.14. Test slika 3 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima

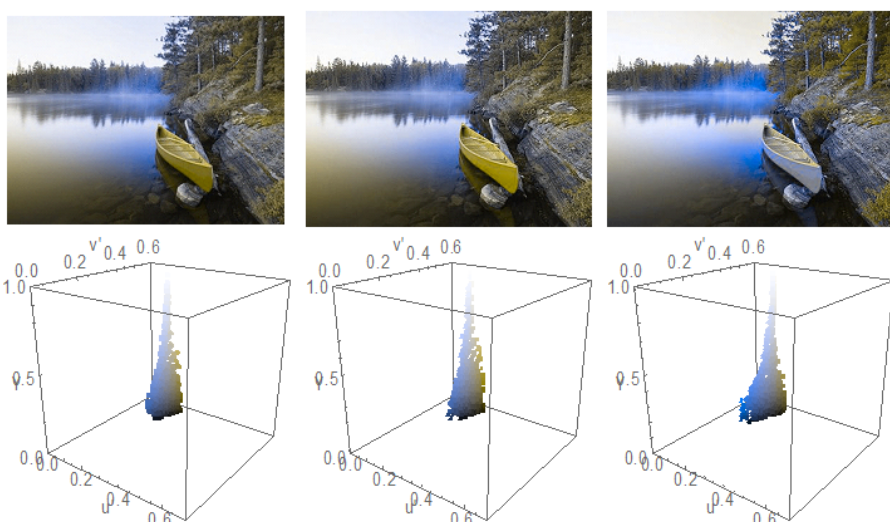
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)

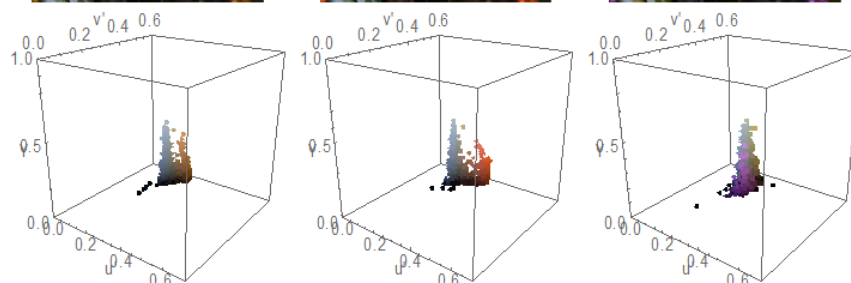
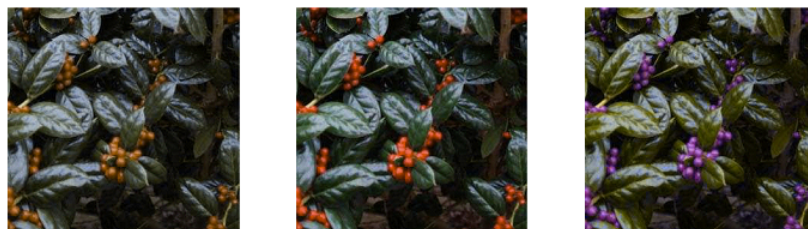


ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)

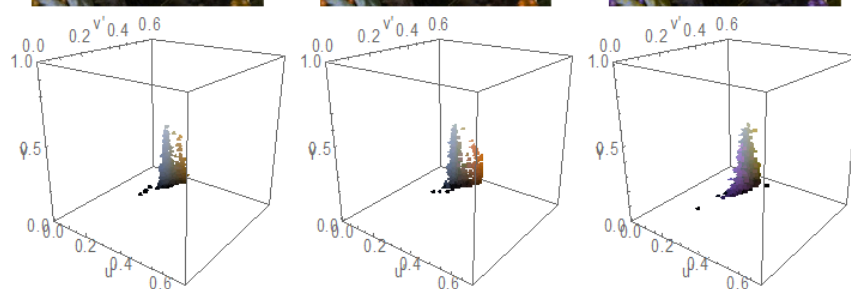
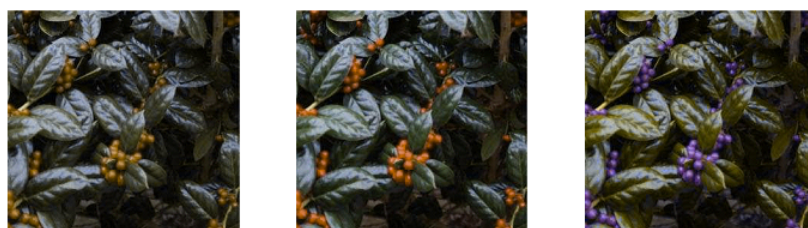


Slika P.5.15. Test slika 4 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima

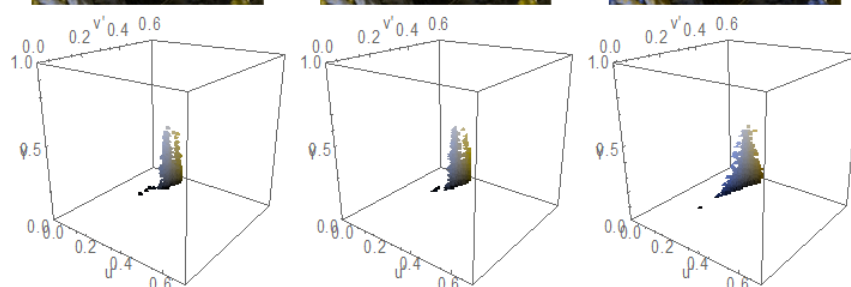
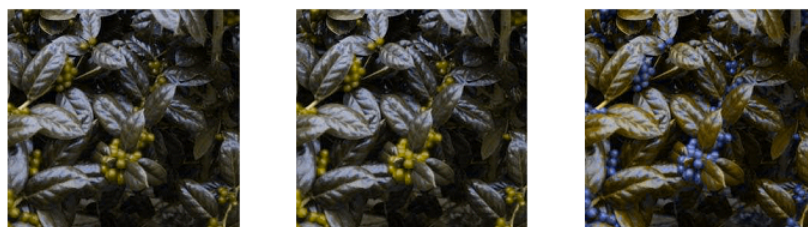
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)



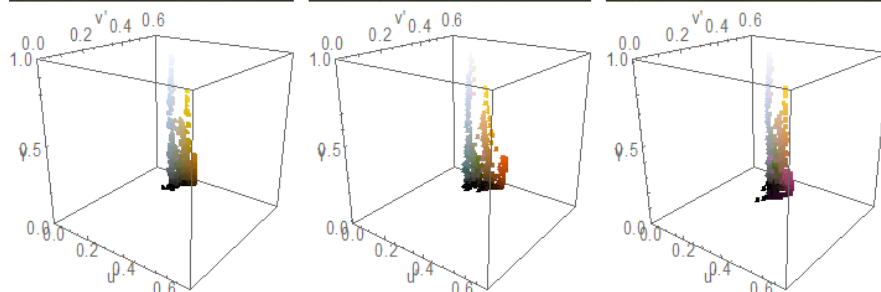
ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)



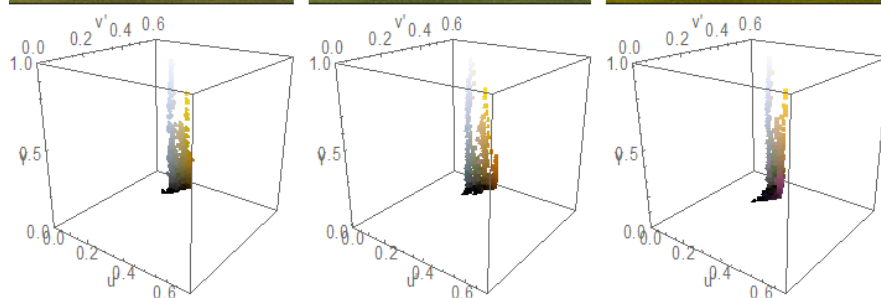
Slika P.5.16. Test slika 5 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima



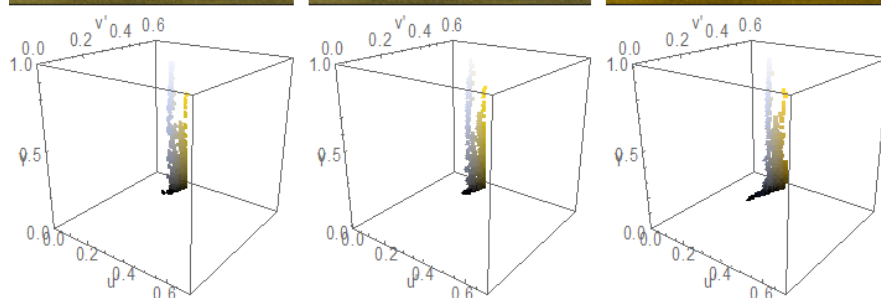
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)

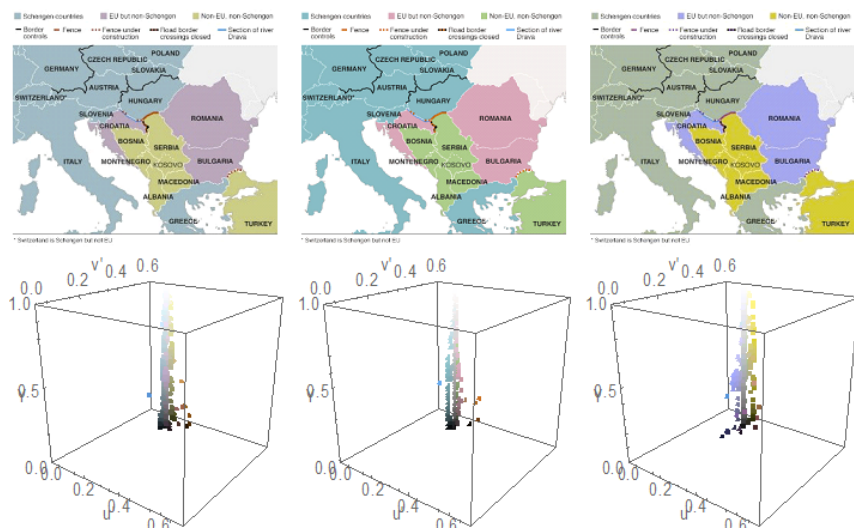


ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)

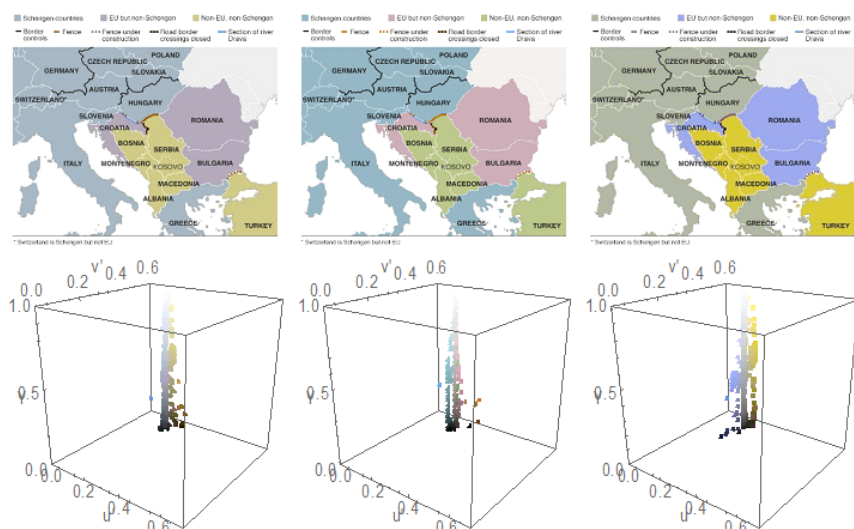


Slika P.5.17. Test slika 6 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima

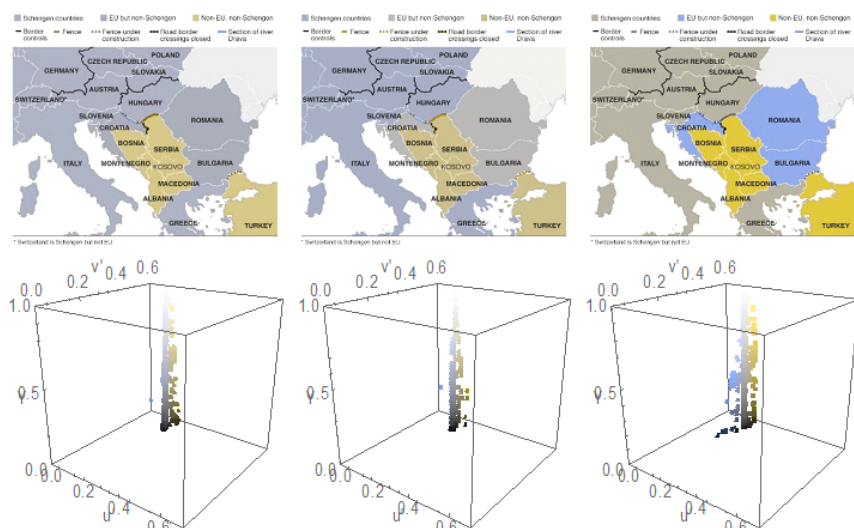
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)

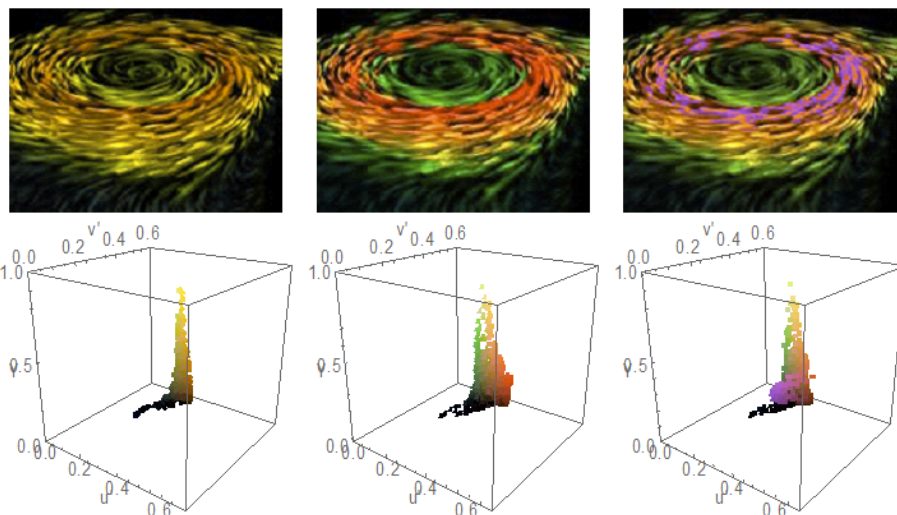


ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)

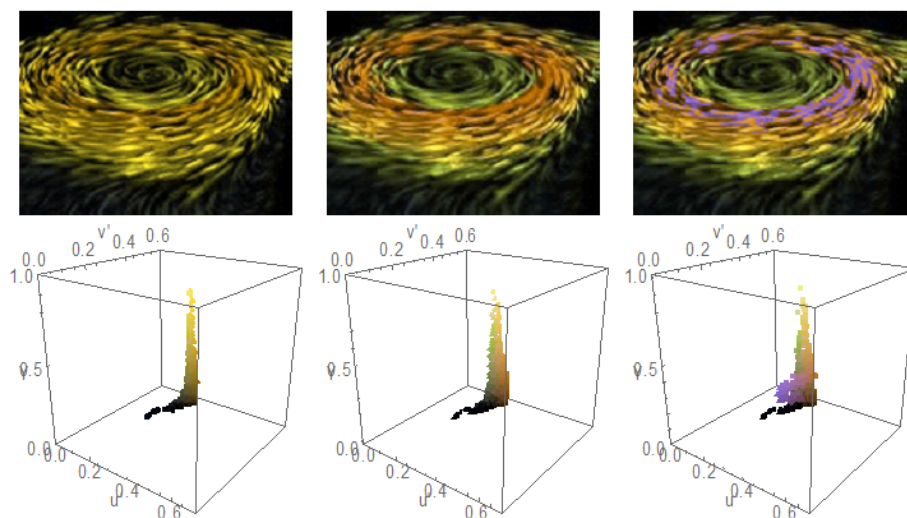


Slika P.5.18. Test slika 7 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima

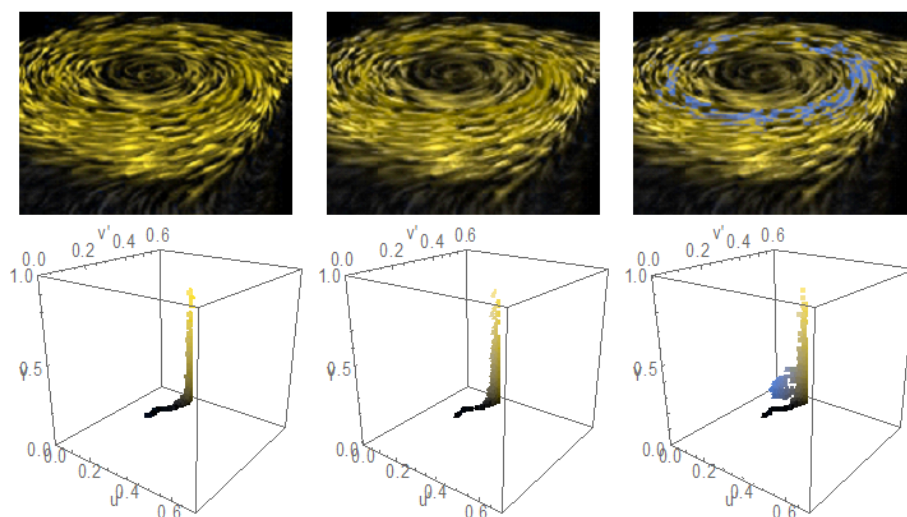
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)

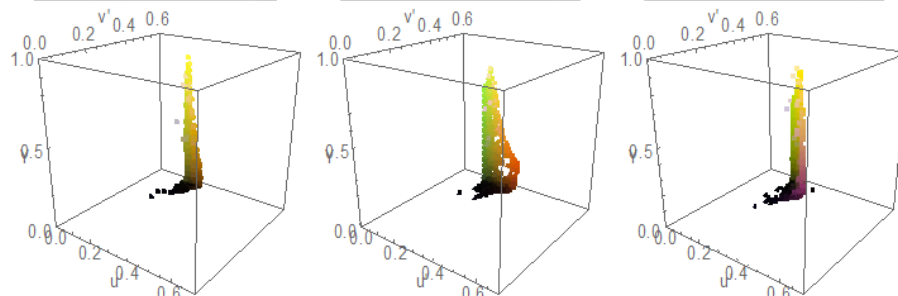
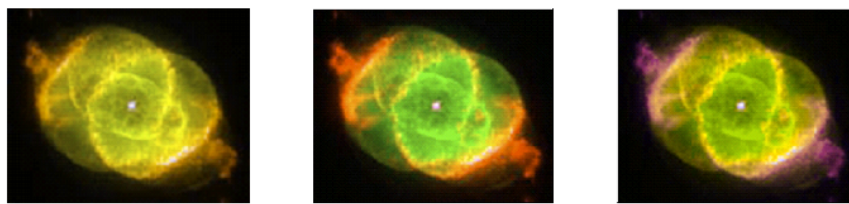


ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)

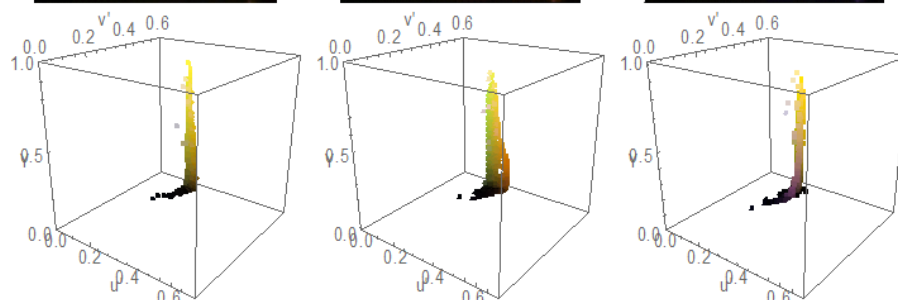
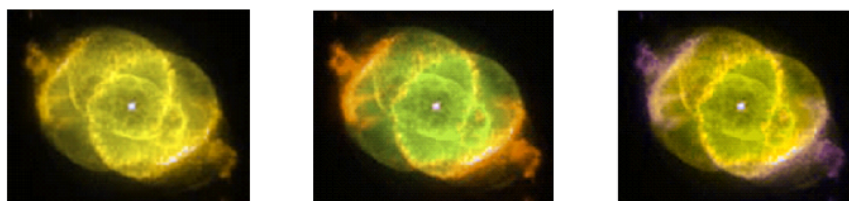


Slika P.5.19. Test slika 8 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima

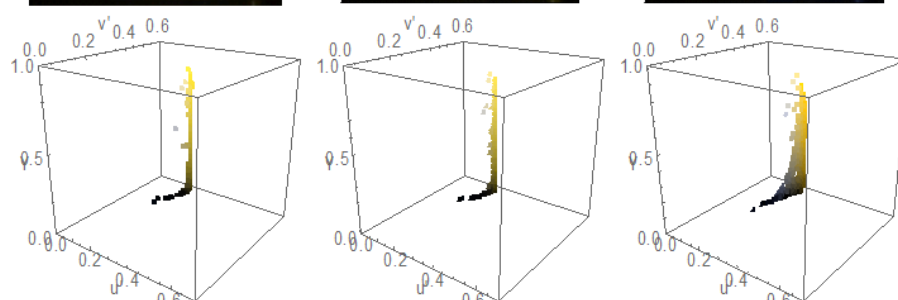
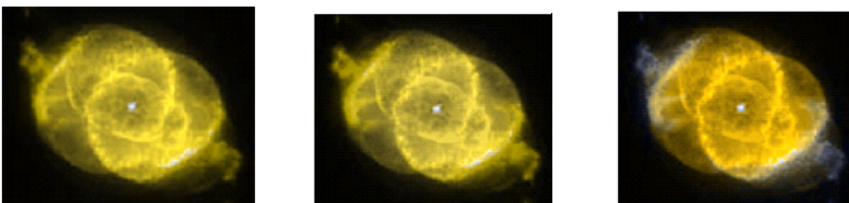
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)

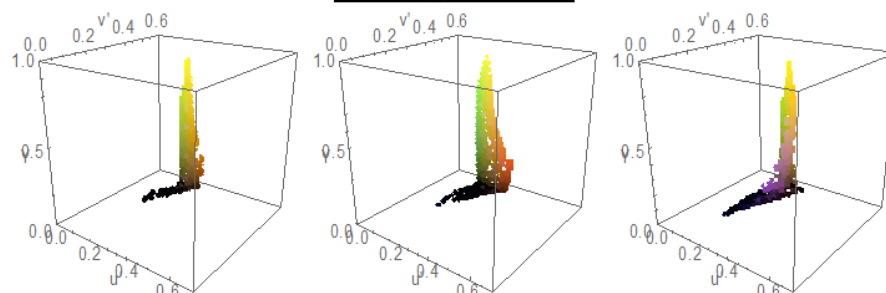
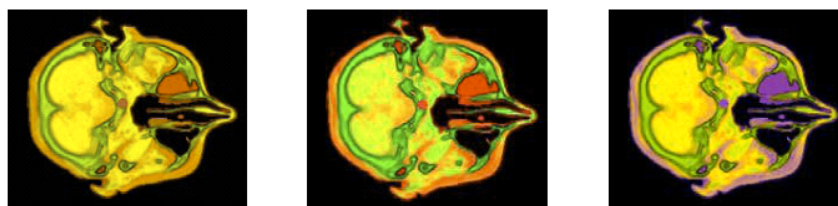


ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)

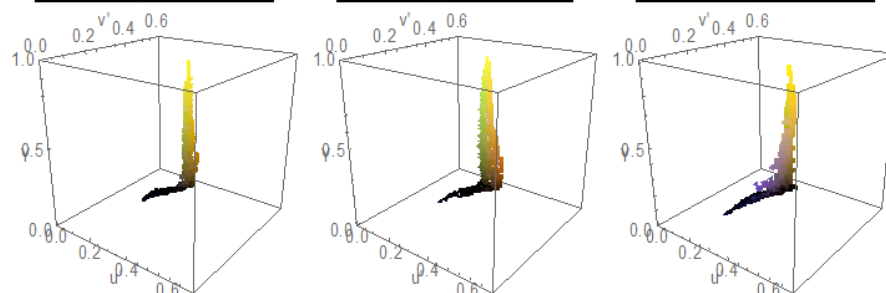
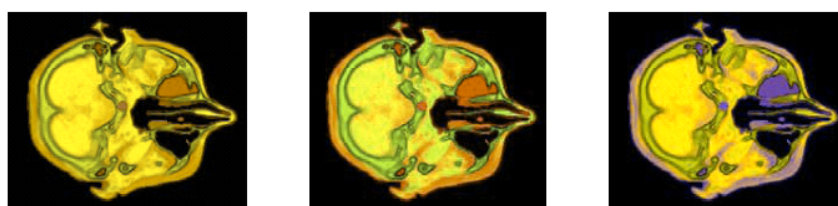


Slika P.5.20. Test slika 9 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima

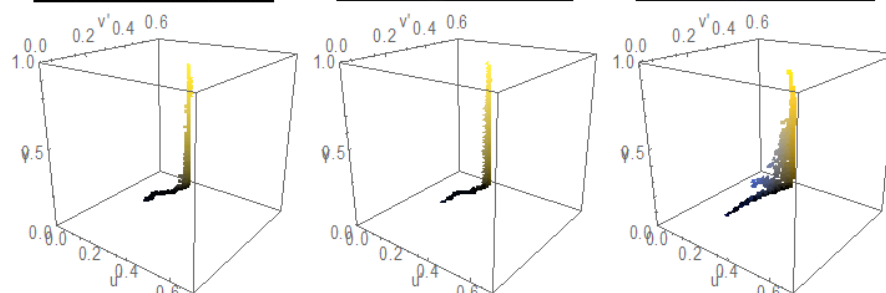
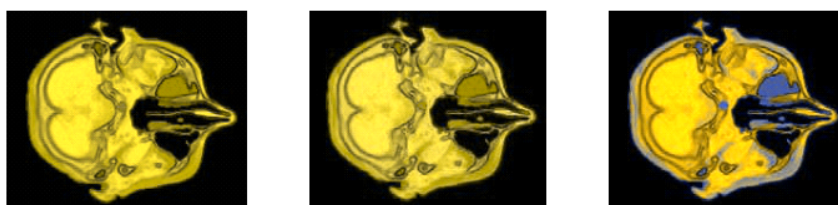
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)

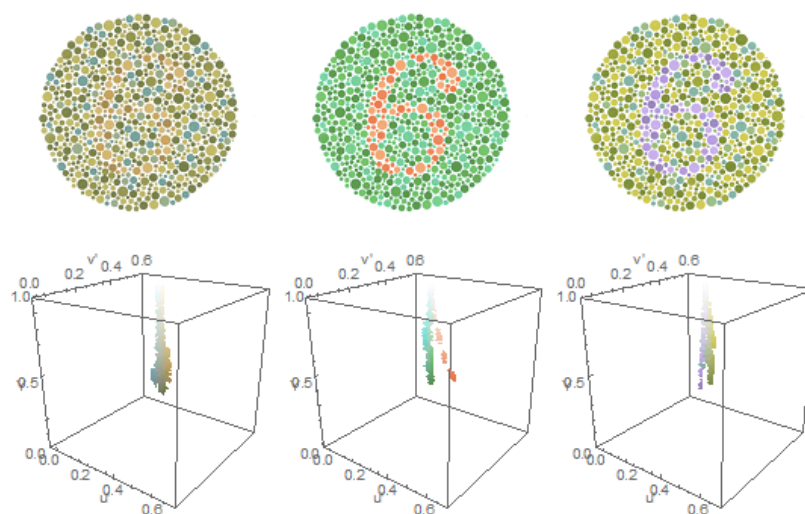


ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)

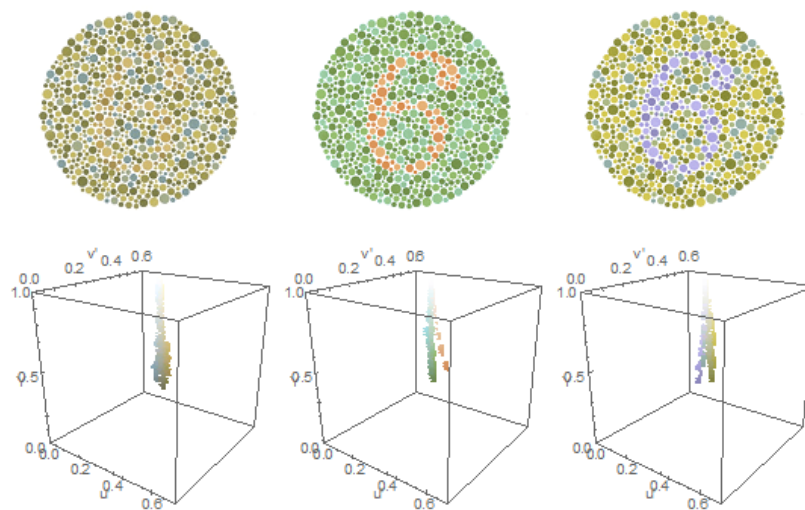


Slika P.5.21. Test slika 10 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima

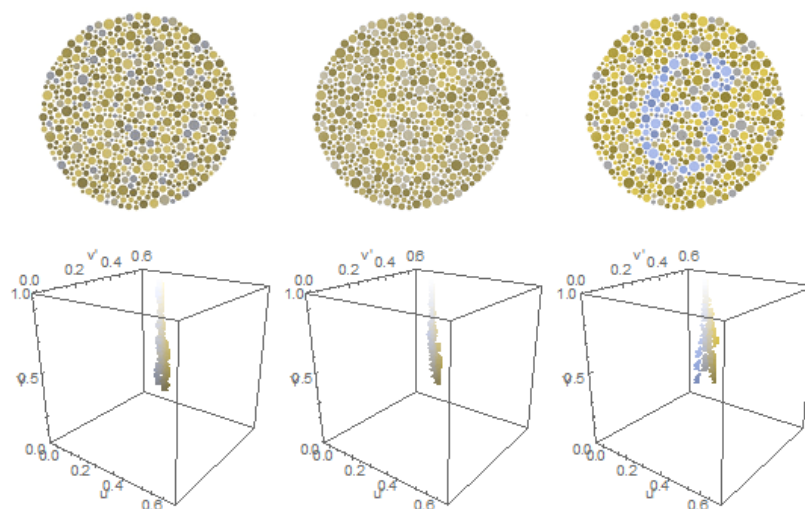
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)

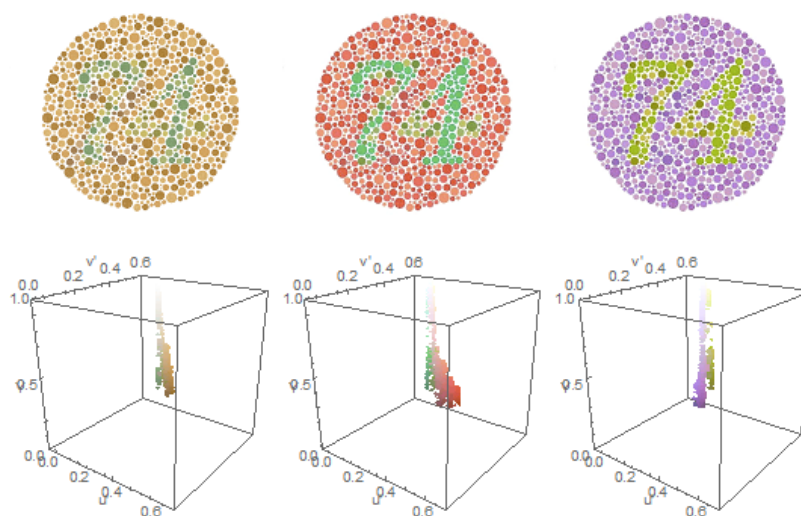


ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)

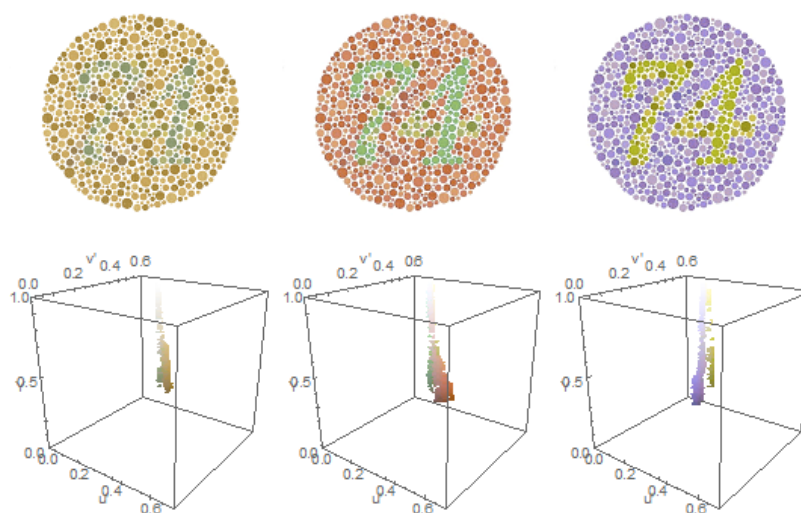


Slika P.5.22. Test slika 11 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima

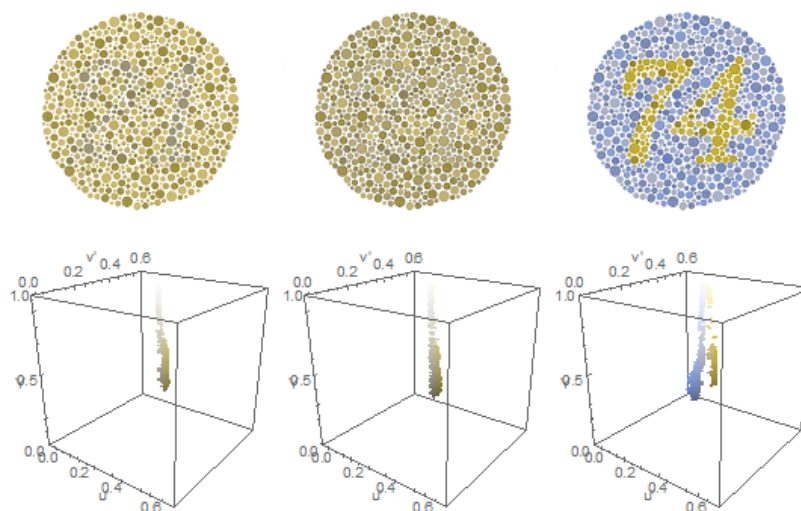
blag deutan  
(4 nm)



umeren deutan  
(12 nm)



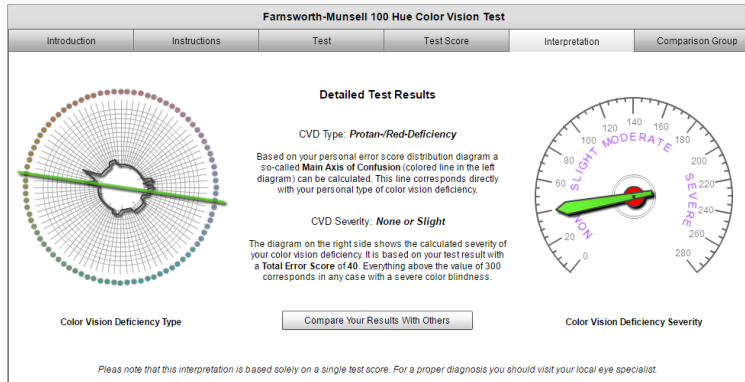
ozbiljan deutan  
~deuteranopija  
(20 nm)



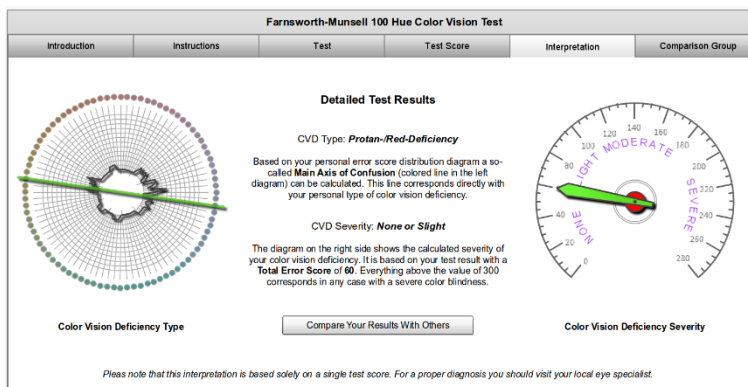
Slika P.5.23. Test slika 12 – Deutan simulacije sa korespondirajućim gamutima

## PRILOG P.6

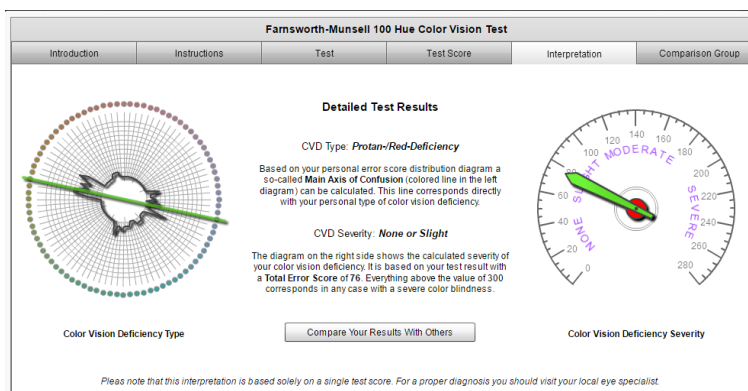
### Rezultati FM 100 hue testa - Protan ispitanici



Slika P.6.1. Blag protan poremećaj (test skor 40)

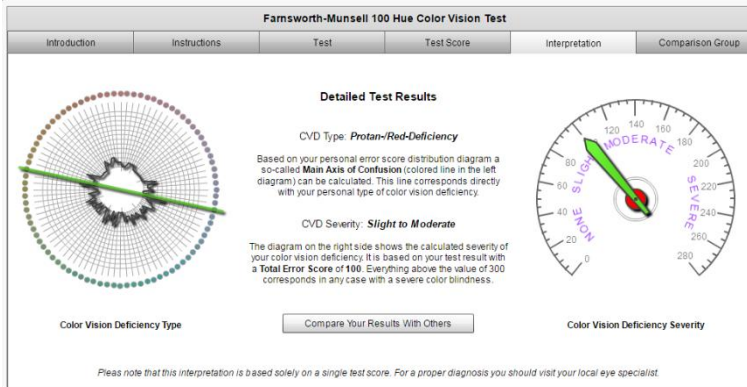


Slika P.6.2. Blag protan poremećaj (test skor 60)

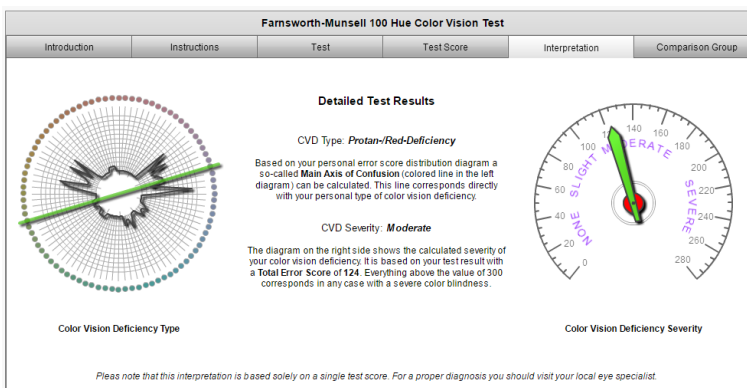


Slika P.6.3. Blag protan poremećaj (test skor 76)

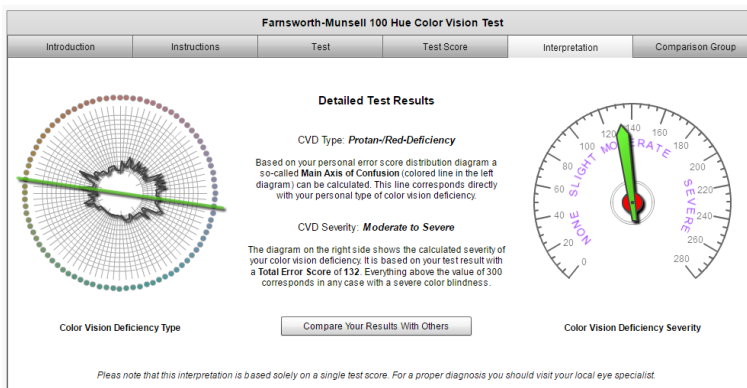




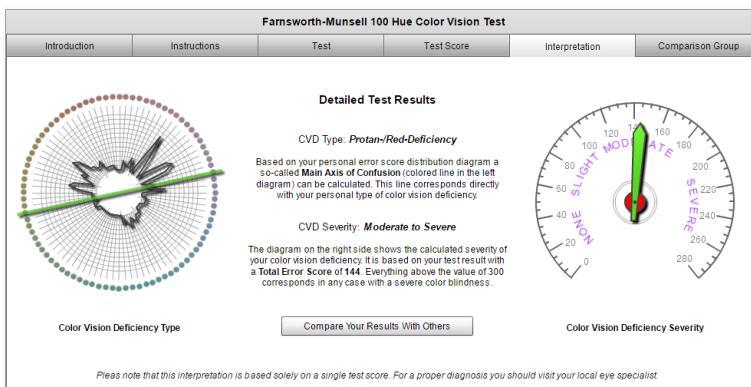
Slika P.6.4. Blag protan poremećaj (test skor 100)



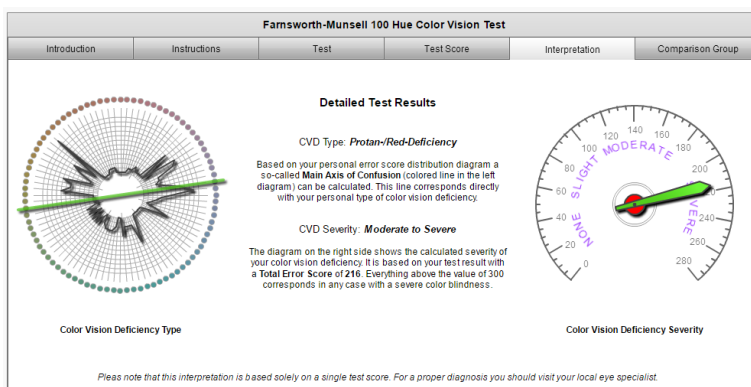
Slika P.6.5. Umeren protan poremećaj (test skor 124)



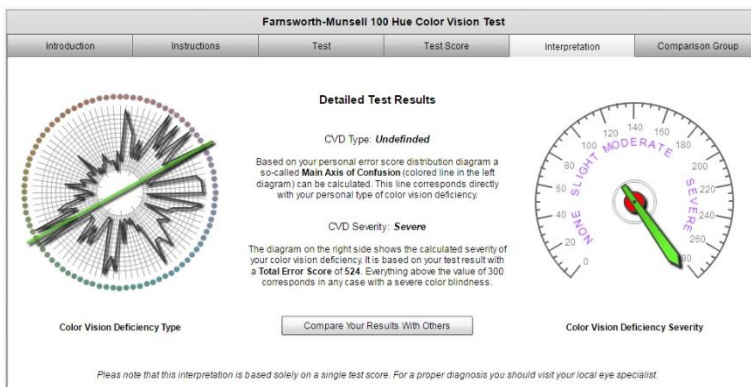
Slika P.6.6. Umeren protan poremećaj (test skor 132)



Slika P.6.7. Umeren protan poremećaj (test skor 144)

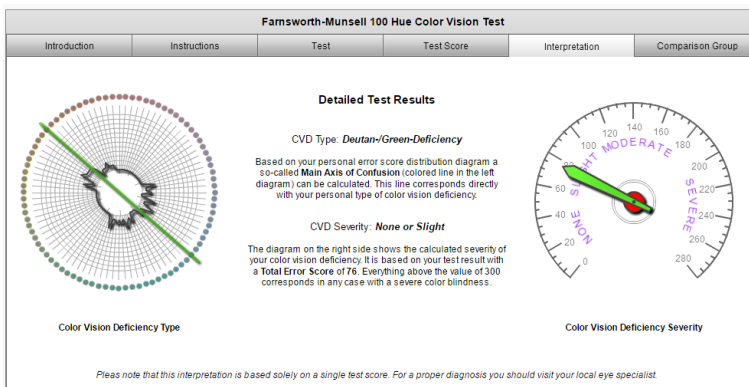


Slika P.6.8. Ozbiljan protan poremećaj (test skor 216)

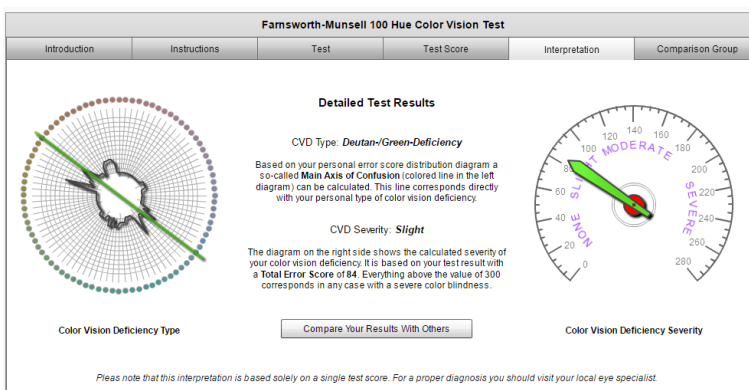


Slika P.6.9. Ozbiljan protan poremećaj (test skor >280)

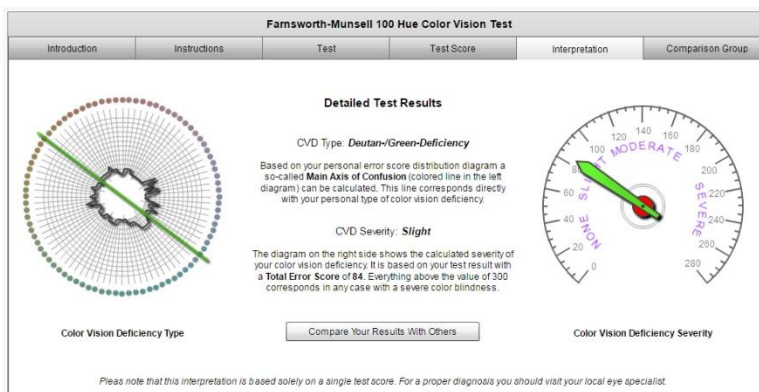
## Rezultati FM 100 hue testa - Deutan ispitanici



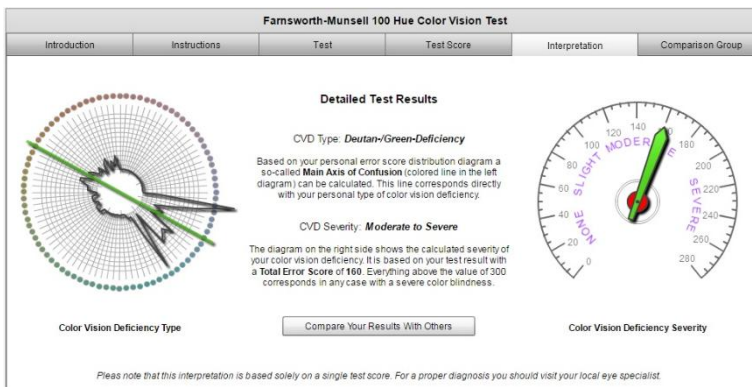
Slika P.6.10. Blag deutan poremećaj (test skor 76)



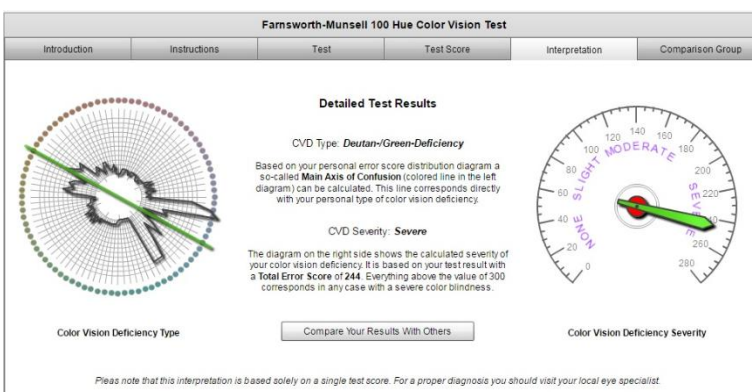
Slika P.6.11. Blag deutan poremećaj (test skor 84)



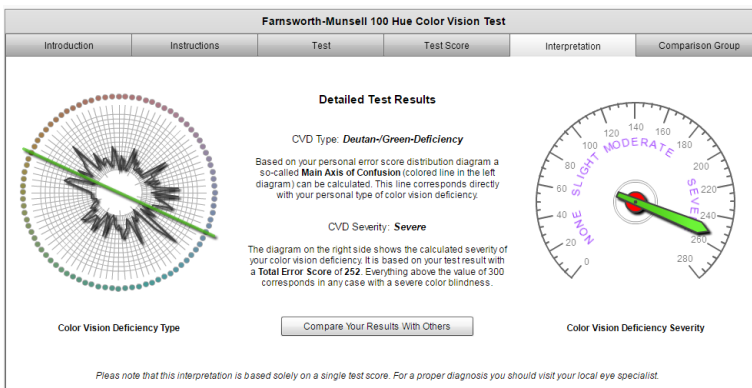
Slika P.6.12. Blag deutan poremećaj (test skor 84)



Slika P.6.13. Umeren deutan poremećaj (test skor 160)



Slika P.6.14. Ozbiljan deutan poremećaj (test skor 244)



Slika P.6.15. Ozbiljan deutan poremećaj (test skor 252)

*Tabela P.6.1. Poređenje rezultata ispitanika na Farnsworth-Munsell 100 Hue testu (TS- test skor) i kalibracionom testu ( $\epsilon$ - indeks težine PVB)*

<b>Ispitanici</b>	<b>FM 100 Hue test</b>	<b>Kalibracioni test</b>
1	blag protan, TS=40	protan, $\epsilon=0.6$
2	blag protan, TS=60	deutan, $\epsilon=0.4$
3	blag protan, TS=76	deutan, $\epsilon=0.5$
4	blag protan, TS=100	protan, $\epsilon=0.4$
5	umeren protan, TS=132	protan, $\epsilon=0.6$
6	ozbiljan protan, TS>280	protan, $\epsilon=0.9$
7	blag deutan, TS=76	deutan, $\epsilon=0.5$
8	blag deutan, TS=84	deutan, $\epsilon=0.5$
9	umeren deutan, TS=160	deutan, $\epsilon=0.7$
10	ozbiljan deutan, TS=244	deutan, $\epsilon=0.8$

# 11. BIOGRAFIJA SA BIBLIOGRAFIJOM

**Ime i prezime** *Neda Milić*

**Datum rođenja** *11.01.1986.*

## **Obrazovanje**

2009-2016 *Doktorske akademske studije,  
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka,  
Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn*

2004-2009 *Osnovne akademske – bečelor studije i  
Diplomske akademske – master studije,  
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka,  
Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn*

2006-2012 *Osnovne akademske – bečelor studije,  
Univerzitet u Novom Sadu, Ekonomski fakultet,  
Poslovni informacioni sistemi*

## **Kretanje u poslu**

2010-2012 *Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka,  
Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn,  
saradnik u nastavi*

2012- *Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka,  
Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn,  
asistent-master*

## **Učešće na projektima**

2010-2016 *Istraživač u okviru Projekta tehnološkog razvoja (broj 35027)  
“Razvoj softverskog modela za unapređenje znanja i  
proizvodnje u grafičkoj industriji“*

Septembar, 2015 *Član tehničkog komiteta CIE TC 1-89 „Enhancement of Images  
for Colour Defective Observers“*

## **Bibliografija**

### **Spisak rezultata M13 - Monografska studija/poglavlje u knjizi M11 ili rad u tematskom zborniku vodećeg međunarodnog značaja (1)**

1. **Milić N.**, Novaković D., Milosavljević B.: Book title: Color Image and Video Enhancement; Chapter title: Enhancement of image content for observers with colour vision deficiencies, Springer, 2015, str. 315-343, ISBN 978-3-319-09362-8

### **Spisak rezultata M21 - Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (1)**

1. Vladić G., Novaković D., Kašiković N., Avramović D., **Milić N.**: Color appearance of textile materials applied to various geometrical shapes, Textile Research Journal, 2014, Vol. 84, No 11, pp. 1191-1199, ISSN 0040-5175, UDK: DOI: 10.1177/0040517513517968

### **Spisak rezultata M23 - Rad u međunarodnom časopisu (5)**

1. **Milić N.**, Hoffmann M., Tómacs T., Novaković D., Milosavljević B.: A Content-Dependent Naturalness Preserving Daltonization Method for Dichromatic and Anomalous Trichromatic Color Vision Deficiencies, Journal of Imaging Science and Technology, 2015, Vol. 59, No 1, ISSN 1062-3701
2. Novaković D., **Milić N.**, Milosavljević B.: Animated vs. Illustrated Software Tutorials: Screencasts for Acquisition and Screenshots for Recalling, The International Journal of Engineering Education, 2013, Vol. 29, No 4, pp. 1013-1023, ISSN 0949-149X
3. Pál (Apro) M., Novaković D., Pál S., Dedijer S., **Milić N.**: Colour Space Selection for Entropy-based Image Segmentation of Folded Substrate Images, Acta Polytechnica Hungarica, Journal of Applied Sciences, 2013, Vol. 10, No 1, pp. 43-62, ISSN 1785-8860
4. Kašiković N., Novaković D., **Milić N.**, Vladić G., Zeljković Ž., Stančić M.: Thermovision and spectrophotometric analysis of ink volume and material characteristics influence on colour changes of heat treated printed substrates, Tehnicki vjesnik -Technical Gazette, 2015, Vol. 22, No 1, pp. 33-41, ISSN 1330-3651, UDK: DOI: 10.17559/TV-20130928115500
5. Kašiković N., Novaković D., Karlović I., Vladić G., **Milić N.**: Colourfastness of Multilayer Printed Textile Materials to Artificial Light Exposure, Acta Polytechnica Hungarica, Journal of Applied Sciences, 2015, Vol. 12, No 1, pp. 161-173, ISSN 1785-8860, UDK: DOI 10.12700/APH.12.1.2015.1.10

### Spisak rezultata M33 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (22)

1. **Milić N.:** Development of plug-in for simulation of different types of colour vision deficiency and enhancement of the image for viewers with Protanopia and Deuteranopia, 3. "Printig Future Days" international IARIGARI student conference on print and media technology, Chemnitz: University of Technology, Institute for Print and Media Technology, 2-5 Novembar, 2009, pp. 315-322, ISBN 978-3-89700-108-4
2. **Milić N., Milosavljević B., Slavuj R.:** The colour mapping method based on the Lch colour space for simulating textile printed texture images, 5. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, Graphic Engineering and Design, 11-12 Novembar, 2010, pp. 167-172, ISBN 978-86-7892-294-7
3. Slavuj R., **Milić N.:** A soft-proofing method of printed textiles with a simulation of texture, 5. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, Graphic Engineering and Design, 11-12 Novembar, 2010, pp. 279-284, ISBN 978-86-7892-294-7
4. **Milić N., Milosavljević B., Novaković D.:** The evaluation of effects of the different multimedia combinations on E-learning outcomes, 5. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Faculty of Technical Science, Department of Graphic Engineering and Design, 11-12 Novembar, 2010, pp. 349-356, ISBN 978-86-7892-294-7
5. **Milić N., Novaković D., Tomić I.:** Effects of display gamma and the viewing conditions on the appearance of colours viewed on LCD monitors, 14. "Blaž Baromić" International Conference on printing, design and graphic communications, Senj: Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, 6-9 Oktobar, 2010, pp. 259-266, ISBN 978-953-7644-06-2
6. **Milić N., Novaković D., Zeljković Ž.:** Development of plug-in for optimizing colours of graphic and web designs for persons with dichromatic vision deficiencies, 11. AIC 2011 Midterm Meeting of the International Colour Association (AIC) - Interaction of Colour & Light in the Arts and Sciences, Zurich: pro/colore, 7-10 Jun, 2011, pp. 576-579, ISBN 978-3-033-02929-3
7. **Milić N.:** The LCH colour mapping method as a tool for precise soft proof for the digitally printed textile products, 4. "Printig Future Days" international Scientific Conference on print and Media Technology for junior scientists and PhD students, Chemnitz: Chemnitz University of Technology, 7-10 Novembar, 2011, pp. 25-30, ISBN 978-3-86135-623-3



8. Novaković D., Kašiković N., Vladić G., **Milić N.**: Maintenance of Graphic Machines, 7. Simpozijum o konstruisanju, oblikovanju i dizajnu – KOD, Balatonfured: Faculty of Technical Sciences — Novi Sad, Serbia, 24-26 Maj, 2012, pp. 493-496, ISBN 978-86-7892-399-9
9. Vladić G., Kašiković N., Avramović D., **Milić N.**: Printing as a Tool for Product Customization, 7. Simpozijum o konstruisanju, oblikovanju i dizajnu – KOD, Balatonfured: Faculty of Technical Sciences — Novi Sad, Serbia, 24-26 Maj, 2012, pp. 497-500, ISBN 978-86-7892-399-9
10. Novaković D., Vladić G., Kašiković N., **Milić N.**: Metode objektivnog meranja boje i upravljanje bojom pri štampi tekstilnih proizvoda, 3. Tendencije razvoja i inovativni pristup u tekstilnoj industriji Dizajn, Tehnologija, Menadžment, Beograd: Visoka tekstilna strukovna škola za dizajn, tehnologiju i menadžment, 7-8 Jun, 2012, pp. 130-134, ISBN 978-86-87017-17-7
11. **Milić N.**, Kašiković N., Vladić G., Dedijer S.: Ekranski prikaz i simulacija tekstilnih materijala štampanih sito štamparskim postupkom, 3. Tendencije razvoja i inovativni pristup u tekstilnoj industriji Dizajn, Tehnologija, Menadžment, Beograd: VISOKA TEKSTILNA STRUKOVNA ŠKOLA ZA DIZAJN, TEHNOLOGIJU I MENADŽMENT, 7-8 Jun, 2012, pp. 112-117, ISBN 978-86-87017-17-7
12. Kašiković N., Vladić G., **Milić N.**, Avramović D.: Influence of Ink Layers and Different Materials on the Colour Fastness to Rubbing, 6. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 15-16 Novembar, 2012, pp. 165-170, ISBN 978-86-7892-457-6
13. Vladić G., Kašiković N., Avramović D., **Milić N.**: Color Differences of Process Colors as Predictors of Secondary Mixtures, Red, Green, and Blue in Digital Textile Printing, 6. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 15-16 Novembar, 2012, pp. 213-217, ISBN 978-86-7892-457-6
14. **Milić N.**, Dedijer S., Pál (Apro) M., Pavlović Ž.: The statistical analysis of processing conditions' influence on the surface roughness of flexo printing plate , 6. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad, 15-16 Novembar, 2012, pp. 141-150, ISBN 987-86-7892-457-6
15. Vladić G., Kašiković N., Novaković D., **Milić N.**, Avramović D.: Predikcija reprodukcije sekundarnih mešavina boja na osnovu rezultata reprodukcije procesnih boja u

- digitalnoj štampi papirnih podloga, 19. International Symposium in the field of pulp, paper, packaging and graphics, Zlatibor: Tehnološkometalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 25-28 Jun, 2013, pp. 83-87, ISBN 978-86-7401-304-5
16. **Milić N.**, Novaković D., Majnarić I., Vladić G.: Quality testing of tactile braille prints reproduced with UV ink jet technology, 10. Conference of Chemists, Technologists and Environmentalists of Republic of Srpska, Banja Luka: Univerzitet u Banjoj Luci, 15-16 Novembar, 2013, pp. 560-567
  17. Vladić G., Sadžakov M., Kašiković N., **Milić N.**, Stančić M.: Uticaj štampanih boja na doživljenu vrednost tekstilnog proizvoda, 4. Tendencije razvoja i inovativni pristup u tekstilnoj industriji Dizajn, Tehnologija, Menadžment, Beograd: Visoka tekstilna strukovna škola za dizajn, tehnologiju i menadžment, 6-7 Jun, 2014, pp. 107-112, ISBN 978-86-87017-30-6
  18. Kašiković N., Pál (Apro) M., Milošević R., **Milić N.**, Jurišić B.: Influence of textile washing treatment on readability of QR codes, 7. INTERNATIONAL Symposium on Graphic Engineering and Design GRID, Novi Sad: FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES, DEPARTMENT OF GRAPHIC ENGINEERING AND DESIGN, 13-14 Novembar, 2014, pp. 119-125, ISBN 978-86-7892-645-7
  19. Vladić G., Avramović D., Sadžakov M., **Milić N.**, Kecman M.: The influence of packaging shape on perceived product value and consumer niche, 7. INTERNATIONAL Symposium on Graphic Engineering and Design GRID, Novi Sad: FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES DEPARTMENT OF GRAPHIC ENGINEERING AND DESIGN, 13-14 Novembar, 2014, pp. 461-466, ISBN 978-86-7892- 645-7
  20. **Milić N.**, Kašiković N., Novaković D.: The influence of viewing conditions on colour gamut of red-green vision deficiencies, 7. INTERNATIONAL Symposium on Graphic Engineering and Design GRID, Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, 13-14 Novembar, 2014, pp. 317-323, ISBN 978-86- 7892-647-1
  21. **Milić N.**, Novaković D., Kašiković N., Vladić G., Avramović D.: The automated customization of SVG content for users with colour vision deficiencies, 46. Annual International Conference on Graphic Arts and Media Technology, Management and Education, Atina: Hellenic Union of Graphic Arts and Media Technology Engineers, 25-29 Maj, 2014, pp. 168-178, ISBN 978-618-81734-0-8

22. **Milić N.**, Novaković D., Kašiković N., Dedijer S.: Enhancing employability and competitiveness in graphic and creative industries using blended learning environment, 1. WBCInno International conference, Novi Sad, 18 Septembar, 2015

#### **Spisak rezultata M53 - Rad u naučnom časopisu (7)**

1. **Milić N.**, Novaković D., Karlović I.: Razvoj i implementacija softverskog modula za pomoć osobama sa poremećajem viđenja boja, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2009, Vol. 24, No 7, pp. 2350-2353, ISSN 0350-428X 1.
2. **Milić N.**, Novaković D.: Effects of display gamma and illuminant on the appearance of colours viewed on LCD monitors, Acta Graphica, 2010, Vol. 1, No 4, pp. 21-29, ISSN 0353-4707, UDK: 655.3.062.22
3. **Milić N.**, Novaković D., Kašiković N.: Measurement uncertainty in colour characterization of printed textile materials, JGED Journal of Graphic Engineering and Design, 2011, Vol. 2, No 2, pp. 16-25, ISSN 2217- 379X, UDK: 655:535.65
4. Vladić G., Kašiković N., Avramović D., **Milić N.**: Pet Bottle Design, Correlation Analysis Of Pet Bottle Characteristics Subjective Judgment, JGED Journal of Graphic Engineering and Design, 2012, Vol. 3, No 4, pp. 9-14, ISSN 2217-379X, UDK: 658.512.2.87:014.11:621.798.147
5. Avramović D., Zeljković Ž., **Milić N.**, Vladić G.: Evaluating Web browser graphics rendering system performance by using dynamically generated SVG, JGED Journal of Graphic Engineering and Design, 2012, Vol. 3, No 1, pp. 15-22, ISSN 2217-379X, UDK: 655:004.738.52:004.773 5.
6. Pap S., Novaković D., Dedijer S., **Milić N.**: Vizuelizacija boje odštampane na materijalu sa teksturom sito tehnikom štampe, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2012, Vol. 6, pp. 1209-1212, ISSN 0350-428X, UDK: 655.1
7. Klisarić V., Novaković D., **Milić N.**: Ispitivanje taktilnih otisaka sa brajevim pismom reprodukovanih UV Ink Jet tehnologijom štampe, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2013, No 7, pp. 1302-1306, ISSN 0350-428X, UDK: 655.3