

LATVIJAS UNIVERSITĀTE



RENĀRS TRUKŠA

**METODE UN MODELIS SARKANI-ZAĻĀS ANOMĀLĀS
TRIHROMATIJAS IZVĒRTĒŠANAI**

PROMOCIJAS DARBS

Doktora grāda iegūšanai fizikas nozarē

Apakšnozare: Medicīniskā fizika

Rīga, 2024

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes, Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē

Optometrijas un redzes zinātnes nodaļā laika posmā no 2013. gada līdz 2023. gadam



Eiropas Sociālā fonda projekts „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē ” Nr.2009/0138/ 1DP/1.1.2.1.2./ 09/IPIA/ VIAA/004.

Darbs sastāv no ievada, 5 nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta, 2 pielikumiem.

Darba forma: disertācija fizikas nozarē, medicīniskās fizikas apakšnozarē

Darba zinātniskais vadītājs: Dr. phys., docents, Jānis Dzenis

Darba recenzenti:

- 1) Dr. habil. phys. Māris Ozoliņš, profesors, Latvijas Universitāte
- 2) Dr. phys. Aleksejs Kataševs, profesors, Rīgas Tehniskā Universitāte
- 3) Dr. Joao Linhares , profesors, Minho Universitāte

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2024. gada 2. februārī, Jelgavas ielā 3, 501. telpā, Latvijas Universitātes Fizikas, astronomijas un mehānikas zinātņu nozares promocijas padomes atklātā sēdē

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4.

LU Fizikas, astronomijas un mehānikas specializētās promocijas padomes priekšsēdētājs Dr. habil. phys. Ruvins Ferbers

promocijas padomes sekretāre Sintija Siliņa

ANOTĀCIJA

Darba mērķi ir izveidot tehniski vienkāršu datorizēto krāsu redzes testu hromatiskās jutības izvērtēšanai personām ar un bez krāsu redzes deficītiem. Izvērtēt L un M vāļišu fotopigmentu fizikālo īpašību ietekmi sarkani-zaļās anomālās trihromatijas gadījumos uz sniegumu krāsu sakārtošanas uzdevumos.

Darbā aprakstīti datorizētā krāsu redzes testa uzbūves un darbības principi. Metodes apraksts ietver dinamiskā un statiskā testa stimula uzbūves principus, krāsu kalibrēšanas algoritmus, psihofizikālās metodes, kas tika izmantotas, lai noskaidrotu hromatiskās izšķirtspējas sliekšņu vērtības, algoritmu, kas tika pielietots, lai noskaidrotu minimālās izšķiršanas elipses parametrus, kas raksturo pētījuma dalībnieku krāsu izšķirtspēju kopumā. Pētījuma dalībnieku sniegums, kas konstatēts ar datorizēto krāsu redzes testu, tika salīdzināts ar tādiem krāsu redzes testiem kā FM100, CAD un anomaloskopa testu. Rezultātu analīze apstiprina, ka datorizētās testa modifikācijas, kas satur statisku un dinamisku stimulu, jutība sasniedz 100%, savukārt *specifitāte* sasniedz 82% un 100%. Statiskās un dinamiskās testa versijas jutība un specifitāte tika aprēķināta pieņemot, ka personai tiek konstatēts sarkani-zaļais krāsu redzes deficīts gadījumos, ja sarkani-zaļā krāsu oponentā kanāla sliekšņu vērtībai atbilstošā hromatiskā distance ir lielāka vai vienāda ar 0,00335 vienībām statiskā stimula gadījumā un lielāka vai vienāda ar 0,0114 vienībām dinamiskā stimula gadījumā CIE_{xy} krāsu telpā.

Balstoties uz Yaguchi et al. 2018. gada pētījumā ierosināto modeli, kas paredzēts, lai modelētu krāsu uztveri anomālās trihromatijas gadījumos, un *Vingrys&KingSmith* 1988. gada pētījumā ierosināto metodi, kas paredzēta krāsu sakārtošanas testu rezultātu analīzei, izveidots modelis, kas korekti paredz D15 krāsu kauliņu sakārtošanas secības atkarībā no L un M fotoreceptoru absorbcijas maksimumu spektrālās diferences. Izveidotais modelis korekti paredz kā protan tā deitan raksturīgās D15 testa krāsu kauliņu sakārtošanas secības, kā arī krāsu deficīta smaguma pakāpes pieaugumu samazinoties spektrālajai differencei starp L un M vāļišu pigmentu absorbcijas maksimumiem. Līdztekus konstatēts, ka samazinoties spektrālajai differencei starp L un M pigmentiem konstatē krāsu atšķirību vērtību samazināšanos starp secīgajiem D15 testa kauliņiem, kas norāda uz vispārēju krāsu izšķirtspējas pazemināšanos. Izstrādātais modelis paredz, ka kļūdas D15 krāsu sakārtošanas testā netiek pieļautas, ja spektrālā difference starp L un M vāļišu receptoriem ir lielāka kā 10-12 nm, kas ir saskaņā ar konvencionālo krāsu uztveres teoriju, tiesa, krāsu uztveres modelis neiekļauj visus krāsu uztveri ietekmējošos faktoros, jo personas ar vāji izteiktiem krāsu redzes deficītiem nereti spēj sekmīgi veikt D15 krāsu redzes testu nepieļaujot kļūdas.

Atslēgas vārdi: Krāsu redzes novērtēšana, datorizētie krāsu redzes testi, krāsu redzes deficīti, hromatiskā jutība

ABSTRACT

The **goal** is to develop a technically simple computerised colour vision test to assess chromatic sensitivity in normal and anomalous trichromacy. Evaluate the effects of the physical properties of the L and M cone photopigments in anomalous red-green trichromacy on performance in colour-ordering tasks.

The paper describes the design and operating principles of the computerized color vision test. The description of the method includes the design principles of the dynamic and static test stimulus, color calibration algorithms, psychophysical methods for determining chromatic sensitivity thresholds, the algorithm for determining the parameters of the minimum resolution ellipse, that characterizes the color resolution of the study participants in general. The study participants' performance determined with the computerized color vision test was compared with color vision tests such as the FM100, CAD, and the anomaloscope test. Analysis of the results confirmed that the sensitivity of the computerized test modification with static and dynamic stimuli reached 100%, while the specificity reached 82% and 100%. The sensitivity and specificity of the static and dynamic versions of the test were calculated assuming that a person is diagnosed with red-green color vision deficiency if the chromatic distance corresponding to the threshold of the red-green color channel is greater than or equal to 0,00335 units in the case of a static stimulus and greater than or equal to 0,0114 units in the CIExy color space in the case of the dynamic stimulus.

Based on the model proposed by *Yaguchi et al. (2018)* for modelling color perception in anomalous trichromacy and the method of Vingrys and KingSmith (1988) for analysing the results of color arrangement tests, a model was created that correctly predicts the order of arrangement of the D15 caps depending on the spectral properties of the L- and M-cone photoreceptors. The model correctly predicts the order of the D15 test caps as well as the increase in the severity of the color deficiency as the spectral difference between the pigments of the L and M cones decreases. It is found that as the spectral difference between the L and M pigments decreases, the color difference values between successive D15 test caps also decrease, indicating an overall decrease in color resolution. The developed model predicts that errors in the D15 color arrangement test will not be detected if the spectral difference between L and M cone receptors is greater than 10-12 nm, which is consistent with conventional color perception theory. However, the color perception model does not account for all factors that affect color perception, as individuals with weak color vision deficits are often able to successfully perform the D15 color arrangement test without making errors.

Keywords: colour vision assessment, computerized colour vision tests, colour vision deficiency, chromatic sensitivity

Saturs

Termini un saīsinājumi	8
1. IEVADS.....	11
1.1. Ievads un tēmas aktualitāte	11
1.2. Darba mērķi un uzdevumi.....	12
1.3. Darba novitāte	13
1.4. Autora ieguldījums	14
2. LITERATŪRAS PĀRSKATS.....	15
2.1. Krāsu uztveres teorijas.....	15
2.1.1. Trihromātiskā krāsu uztveres teorija	15
2.1.2. Oponentā krāsu uztveres teorija.....	16
2.1.3. Duālā krāsu uztveres teorija.....	16
2.1.4. Tīklenes receptoru univariācijas princips	19
2.2. Krāsu telpas.....	20
2.2.1. CIExy krāsu telpa	20
2.2.2. Oponentās krāsu telpas	26
2.3. Krāsu redzes deficīti	27
2.3.1. Sarkani-zaļā dihromātija.....	28
2.3.2. Dzelteni-zilā dihromātija	30
2.3.3. Sarkani-zaļā anomālā trihromātija.....	31
2.3.4. Monohromāzija.....	33
2.4. Normai atbilstošas krāsu redzes un dzimumu atšķirības	34
2.4.1. Heterozigotiska krāsu redze.....	35
2.4.2. Ar vecumu saistītās hromatiskās jutības izmaiņas.....	36
2.4.3. Acs lēcas gaismas caurlaidības izmaiņas dzīves laikā.....	37
2.4.4. Neuroplastiskie mehānismi	38
2.4.5. Makulas pigments.....	40
2.6. Anomaloskopa tests	42
2.7. Datorizētie krāsu redzes testi	44
2.7.1. CCT (<i>Cambridge Colour vision test</i>) datorizētais krāsu redzes tests	45
2.7.2. CAD (<i>Colour Assesment and Diagnosis</i>) datorizētais krāsu tests.	46

2.8. Konstanto stimulu metode	47
2.9. Adaptīvās metodes	49
3. DARBĀ IZMANTOTĀS METODES	51
3.1. Datora monitora kalibrēšana	51
3.2. CCVT testa stimula uzbūve	53
3.3. Izmeklējuma procedūra.....	55
3.4. Hromatiskās jutības vērtību noskaidrošana krāsu oponentajiem kanāliem	57
3.5. Krāsu oponento kanālu funkcijas CIExy krāsu telpā.....	60
3.6. Vingrys&KingSmith metode	62
3.7. FM100 testa kļūdu saskaitīšanas algoritms	64
4. D15 TESTA REZULTĀTU MODELĒŠANA PROTANOMĀLIJAS UN DEITERANOMĀLIJAS GADĪJUMOS	66
4.1. Modelis	66
4.2. Rezultāti	69
4.3. Secinājumi.....	72
5. DATORIZĒTAIS KRĀSU REDZES TESTS	73
5.1. Metode	73
5.2. Rezultāti	75
5.2.1. Mērījumu atkārtojamība.	75
5.2.2. Krāsu izšķirtspēja pirms un pēc 40 gadu vecuma.....	76
5.3. Secinājumi	80
6. DATORIZĒTAIS KRĀSU REDZES TESTS – CCVT.....	81
6.1. Pētījuma dalībnieki un eksperiments	81
6.2. CCVT tests.....	81
6.3. Hromatiskā izšķirtspēja cilvēkiem bez krāsu redzes	84
6.4. Datorizētā krāsu redzes testa CCTV rezultāti cilvēkiem ar krāsu redzes deficītiem.....	88
6.5. Secinājumi	90
NOBEIGUMS.....	91
AIZSTĀVĀMĀS TĒZES	93
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	94
AUTORA PUBLIKĀCIJU SARAKSTS.....	101

1.Pielikums	103
2.Pielikums	105
PATEICĪBAS	108

Termini un saīsinājumi

a, b	hromatiskās krāsu koordinātes CIE Lab krāsu telpā
$by(\lambda)$	dzeltēni-zilā krāsu oponentā kanāla spektrālā funkcija
BY	dzeltēni-zilā krāsu oponentā kanāla signāla intensitāte
C	Parametrs, kas V&K metodes ietvaros, raksturo pacienta vai pētījuma dalībnieka sniegumu krāsu sakārtošanas testā.
CAD	datorizētais krāsu redzes tests "Colour Assessment and Diagnosis"
CCT	datorizētais krāsu redzes tests "Cambridge Colour vision Test"
CCVT	datorizētais krāsu redzes tests "Computerized Colour Vision Test"
CIE Lab	organizācijas "International Commission on Illumination" ierosinātā krāsu telpa. Krāsu telpa balstās un oponentes principiem. Pieņem, ka krāsu telpa no uztveres viedokļa ir homogēna. Krāsu telpu izmanto, lai raksturotu gaismu izstarojošus objektus.
CIE LUV	organizācijas "International Commission on Illumination" ierosinātā krāsu telpa. Homogēna krāsu telpa, kas tiek izmantota, lai raksturotu gaismu atstarojošus stimulus.
CIE xy	organizācijas "International Commission on Illumination" ierosinātā krāsu telpa, kas balstās uz krāsu saskaņošanas funkcijām $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$
D15	krāsu sakārtošanas tests, kas izveidots balstoties uz FM100 krāsu sakārtošanas testu.
DS15	krāsu sakārtošanas tests, kas izveidots balstoties uz D15 krāsu sakārtošanas testu. DS15 testa stimulu spožums ir lielāks kā D15 testa stimuliem, savukārt piesātinājums mazāks kā D15 testa stimuliem.
ΔE	krāsu atšķirību mērs CIE Lab krāsu telpā.
FM100 -	krāsu sakārtošanas tests "Farnsworth–Munsell 100 hue test"
HRR	pseidoizohromatisko plašu tests. HRR - Hardy, Rand, Rittler
$I(\lambda)$	gaismas avota starojuma spektrs
I_{max}	parametrs, kas V&K metodes ietvaros, raksturo pacienta vai pētījuma dalībnieka sniegumu krāsu sakārtošanas testā. Nepieciešams, lai aprēķinātu parametrus C un S.
I_{max0}	parametrs, kas V&K, metodes ietvaros, raksturo pacienta vai pētījuma dalībnieka sniegumu krāsu sakārtošanas testā, ja netiek pieļautas kļūdas.
I_{min}	parametrs, kas V&K metodes ietvaros, raksturo pacienta vai pētījuma dalībnieka sniegumu krāsu sakārtošanas testā. Nepieciešams, lai aprēķinātu parametrus C un S.

ipRGC	ganglionāro šūnu tips tīklenē “Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells”, kas integrē tīkienes receptoru signālus un ar tajā esošā fotopigmenta melanopsīna starpniecību nodrošina tiešu atbildes reakciju uz gaismas stimulu.
k_L, k_M, k_S	L, M, S vāļišu spektrālās jutības normalizācijas koeficienti
L^*	hromatiskajiem un ahromatiskajiem stimuliem atbilstošās gaišuma vērtības CIELUV un CIELab krāsu telpās.
L-ala	L vāļišu fotopigments, kura spektrālās jutības funkcijas absorbcijas maksimums nobīdīts par 5 nm redzamās gaismas īso viļņu virzienā, salīdzinot ar L-ser fotopigmenta absorbcijas maksimumu.
L-ser	L vāļišu fotopigments, kura spektrālās jutības funkcijas absorbcijas maksimums nobīdīts par 5 nm redzamās gaismas garo viļņu virzienā, salīdzinot ar L-ala fotopigmenta absorbcijas maksimumu.
$LēcaOD(\lambda)$	acs lēcas gaismas caurlaidības spektrs
LGN-	laterāli genikulārais ķermenis
$lum(\lambda)$	ahromātiskā kanāla spektrālā funkcija
$\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$	normalizētas L, M, S vāļišu spektrālās jutības funkcijas
M-ala	M vāļišu fotopigments, kura spektrālās jutības funkcijas absorbcijas maksimums nobīdīts par 5 nm redzamās gaismas īso viļņu virzienā, salīdzinot ar M-ser fotopigmenta absorbcijas maksimumu.
M-ser	M vāļišu fotopigments, kura spektrālās jutības funkcijas absorbcijas maksimums nobīdīts par 5 nm redzamās gaismas garo viļņu virzienā, salīdzinot ar M-ala fotopigmenta absorbcijas maksimumu.
$MPOD(\lambda)$	makulas pigmenta gaismas caurlaidības spektrs
$L(\lambda), M(\lambda), S(\lambda)$	L, M, S vāļišu fotoreceptoru gaismas absorbcijas funkcijas
$\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$	gaismas avotu, kas tika izmantoti krāsu saskaņošanas eksperimentos, gaismas viļņu garumu vērtības.
L_{OD}, M_{OD}, S_{OD}	L, M, S vāļišu fotopigmentu optiskā blīvuma vērtības
p	varbūtība, ar kādu pētījuma dalībnieks vai pacients, korekti identificē testa stimulu.
PG(d), PR(d), DG(d), DR(d), TY(d), TB(d)	hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas ar CCVT testa dinamisko testa stimulu, protanopijas zaļajā, protanopijas sarkanajā, deiteranopijas zaļajā, deiteranopijas sarkanajā, tritanopijas dzeltenajā un tritanopijas zilajā virzienā krāsu telpā.
PG(s), PR(s), DG(s), DR(s), TY(s), TB(s)	hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas ar CCVT testa statisko testa stimulu, protanopijas zaļajā, protanopijas sarkanajā, deiteranopijas zaļajā, deiteranopijas sarkanajā, tritanopijas dzeltenajā un tritanopijas zilajā virzienā krāsu telpā.

RG	sarkani-zaļā krāsu oponentā kanāla signāla intensitāte
$rg(\lambda)$	sarkani-zaļā krāsu oponentā kanāla spektrālā funkcija
R, G, B	krāsu saskaņošanas funkciju uz $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ integrālsummas
S	parametrs, kas V&K metodes ietvaros, raksturo pacienta vai pētījuma dalībnieka uzrādītās krāsu kauliņu sakārtošanas atbilstību noteiktam krāsu redzes deficīta veidam.
$S_L(\lambda), S_M(\lambda), S_S(\lambda)$	L, M, S vāļišu fotopigmentu spektrālās jutības funkcijas, kas modelētas balstoties uz Lamb 1995 gada publikācijā ierosinātajiem vienādojumiem.
SNU	Standart Normal Units. Mērvienība, kas CAD datorizētajā krāsu redzes testā, tiek izmantota, lai raksturotu pacientu sniegumu, t.i., hromatisko jutību.
TL1	Parametrs, kas, Pokorny 1987 ierosinātā modeļa ietvaros, raksturo acs lēcas gaismas caurlaidības samazināšanos vecumā pēc 20 gadiem.
TL2	Parametrs, kas, Pokorny 1987 ierosinātā modeļa ietvaros, raksturo nemainīgo acs lēcas gaismas absorbcijas spektra daļu, kas nemainās vecumā pēc 20 gadiem.
U^*, V^*	hromatiskajiem un ahromatiskajiem stimuliem atbilstošās krāsu koordinātes CIELUV krāsu telpā
u, v –	hromatiskajiem un ahromatiskajiem stimuliem atbilstošās koordinātes CIELuv krāsu telpā
u', v'	hromatiskajiem un ahromatiskajiem stimuliem atbilstošās koordinātes CIELu'v' krāsu telpā
u'_n, v'_n	references gaismas avotam atbilstošās krāsu koordinātes CIELu'v' krāsu telpā.
$V(\lambda)$	funkcija, kas raksturo relatīvo spožuma uztveri redzamās gaismas spektra daļā.
X, Y, Z	hromatiskajiem un ahromatiskajiem stimuliem atbilstošās CIExy krāsu telpas integrālsummas
X_n, Y_n, Z_n	references gaismas avotam atbilstošās integrālsummas CIExy krāsu telpā
Y_R, Y_G, Y_B	datora monitora sarkanā, zaļā un zilā krāsu kanāla spožuma vērtības.
$\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$	krāsu saskaņošanas funkcijas.
x, y, z	hromatiskajiem un ahromatiskajiem stimuliem atbilstošās koordinātes CIExy krāsu telpā.
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	CIExy sistēmas krāsu saskaņošanas funkcijas.

1. IEVADS

1.1. Ievads un tēmas aktualitāte

Aptuveni 8% no cilvēku populācijas konstatē sarkani-zaļos krāsu redzes deficītus, kas ietekmē šo personu spēju savstarpēji izšķirt specifiskus stimulus. Agrīna krāsu redzes deficītu identificēšana ir būtiska, lai savlaicīgi izvēlētos atbilstošāku nākotnes profesiju, kurā spēja izšķirt krāsainus stimulus nav izšķirošana salīdzinājumā ar tādām nozarēm kā medicīna, transports vai dizains. Mūsdienās sarkani-zaļos krāsu redzes deficītus pārsvarā konstatē sākumskolas un vidusskolas vecumā (Steward&Cole, 1989).

Šobrīd krāsu redzes izmeklējumos plaši tiek izmantoti pseidoizohromatisko plašu testi kā HRR (Bailey et al., 2004) un Ishihara (Dain, 2004), kuru izpildes nosacījumi viegli uztverami, kā arī izmeklējums noris relatīvi ātri. Tiesa, neskatoties uz daudzām pseidoizohromatisko plašu testu priekšrocībām, pseidoizohromatisko plašu testi nenodrošina iespēju savstarpēji izšķirt anomālās trihromatijas un dihromātijas gadījumus (Cole et al., 2006). Pseidoizohromatisko plašu testu dizainiem ir divi būtiski trūkumi, proti, hromatiskās jutības sliekšņu vērtības ne vienmēr tieši korelē ar krāsu redzes deficīta smaguma pakāpi, kā arī veidojot pseidoizohromatisko plašu testus nevar pieņemt, ka krāsu redzes deficīta neskartie fotonpigmenti visām personām ar protan un deitan krāsu redzes deficītiem grupas ietvaros ir ekvivalenti, t.i., visas personas ar protan vai deitan tipa krāsu redzes deficītiem nevar pilnīgi izvērtēt stimulus, kas atbilst vienai konfūzijas līnijai (Davidoff et al., 2016). Šobrīd par nozares standartu sarkani-zaļās krāsu redzes izmeklējumiem tiek uzskatīts anomaloskopa tests, kas nodrošina iespēju savstarpēji izšķirt kā protan un deitan tā arī dihromātijas un anomālās trihromatijas deficītu gadījumus, tiesa, anomaloskopa tests ikdienā tiek izmantots retos gadījumos. Daļu augstāk minēto krāsu redzes testiem piemītošo problēmu risina tādi datorizētie krāsu redzes testi kā CAD (Barbur, 2004) un CCT (Regan et al., 1994), kas nodrošina iespēju identificēt kā sarkani-zaļos tā dzelteni-zilos krāsu redzes deficītu gadījumus (Regan et al., 1994, Barbur et al., 1994), kā arī nodrošina iespēju identificēt dzīves laika iegūtus krāsu redzes deficītus (O'Neill-Biba et al., 2010), krāsu redzes deficītus kā sekas iedzimtām saslimšanām (Simunovic et al., 1998) un monitorēt krāsu redzes izmaiņas dzīves laikā (Barbur & Rodriguez-Carmona, 2015; Paramei, 2012; Paramei&Oakley, 2014). Tiesa, arī datorizētie krāsu redzes testi ikdienas krāsu redzes pārbaudēs tiek izmantoti reti, jo šo testu ekspluatācijai nepieciešams komplikēts tehniskais nodrošinājums, kas sevi neattaisno primāras veselības aprūpes speciālistu praksēs. Šī pētījuma ietvaros ir izveidots datorizēts krāsu redzes tests, kas nodrošina iespēju

identificēt sarkani-zaļos krāsu redzes deficītus, izmantojot relatīvi vienkāršu tehnisko nodrošinājumu.

Krāsu redzes deficītu problemātika ir aktuāla vairāk nekā 200 gadu, par ko liecina rakstītie avoti, kas datējami ar 1794. gadu (Cole, 2004). Par cik krāsu redzes deficīti ir pārmantojami un šobrīd vēl joprojām nav pieejama terapija, lai novērstu krāsu redzes deficītu ietekmi uz spēju izšķirt krāsainus stimulus, ir sagaidāms, ka krāsu redzes, krāsu redzes deficītu un uztveres problemātika būs aktuāla arī nākamajām paaudzēm. Pēdējo desmitgažu pētījumi norāda uz potenciālu radīt terapeitiskas metodes, kas ievērojami uzlabotu spēju izšķirt krāsainos stimulus cilvēkiem ar krāsu redzes deficītiem, mainot tīklenes fotoreceptoros esošo fotopigmentu gaismas absorbcijas īpašības. Tiesa, minētās metodes efektivitāte ir apstiprināta tikai laboratorijas apstākļos ar dzīvniekiem, kā arī terapija nav sertificēta cilvēkiem (Mancuso et al., 2009; Neitz & Neitz, 2014).

Pētījumu rezultāti viennozīmīgi neapstiprina krāsu redzes deficītu ietekmi uz akadēmisko sniegumu, proti, *Cumberland et al.* 2004. gadā veiktajā pētījumā nekonstatē būtisku krāsu redzes deficītu ietekmi uz sekmēm un tālāko karjeras attīstību, tiesa, būtiski minēt, pēdējos 20 gados gan ikdienā, gan akadēmiskajā vidē krāsainos stimulus izmanto ievērojami biežāk. *Cole et al.* pētījumā konstatēts, ka tikai 7-10% cilvēku ar krāsu redzes deficītiem, spēja atšķirt un identificēt krāsainos stimulus būtiski neatšķiras no normas, savukārt vairums cilvēku ar krāsu redzes deficītiem pieļauj izmērāmi vairāk kļūdu mijiedarbojoties ar krāsainiem stimuliem (Cole et al., 2004).

Standarta krāsu redzes testu izgatavošanai ir nepieciešamas tādas tehnoloģijas kā krāsainā druka un specifiski gaismas avoti, pēc kurām pieprasījums turpina samazināties sakarā ar alternatīvu tehnoloģiju plašu pieejamību. Periodiski veicot atstarotās gaismas mērījumus no drukāto krāsu redzes testu platēm, ir apstiprināta pakāpeniska drukāto krāsu redzes testu plašu degradācija (Hyon et al, 2005), kā arī ir apstiprināts, ka viena modeļa krāsu redzes testi var izmērāmi atšķirties viens no otra (Lee&Honson, 2003). Turpretī krāsu redzes pārbaudes ar datorizētajiem krāsu redzes testiem var sekmīgi veikt pēc atbilstošas datora monitora krāsu kalibrēšanas.

1.2. Darba mērķi un uzdevumi

Mērķis ir izveidot tehniski vienkāršu datorizēto krāsu redzes testu hromatiskās jutības izvērtēšanai personām ar un bez krāsu redzes deficītiem. Izvērtēt L un M vāļišu fotopigmentu fizikālo īpašību ietekmi sarkani-zaļās anomālās trihromatijas gadījumos uz sniegumu krāsu sakārtošanas uzdevumos.

Darba uzdevumi:

1. Izveidot testa stimulu, kas nodrošina iespēju izmeklēt krāsu redzi kā ar dinamisku tā ar statisku testa stimulu.
2. Pielāgot un integrēt krāsu kalibrēšanas algoritmus programmatūrā, lai nodrošinātu korektu krāsaino stimulu attēlošanu uz datora ekrāna krāsu redzes izmeklējumu laikā.
3. Izveidot un aprobēt psihofizikālo metodi hromatiskās jutības izvērtēšanai. Pielāgot elipšu parametru aprēķinu metodes, lai raksturotu hromatisko izšķirtspēju sarkani-zaļajam un dzelteni-zilajam krāsu oponentajam kanālam.
4. Balstoties uz eksistējošiem modeļiem krāsu redzes deficītu simulēšanai izveidot modeli, lai izvērtētu fotopigmentu fizikālo īpašību ietekmi uz krāsu uztveri sarkani-zaļās anomālās trihromatijas gadījumos.

1.3. Darba novitāte

1. Izstrādāts datorizēts krāsu redzes tests, kas nodrošina iespēju ar augstu jutību un specifitāti savstarpēji izšķirt normālās trihromatijas gadījumus no sarkani-zaļo krāsu redzes deficītu gadījumiem. CCVT tests uzrāda sakrītošus rezultātus ar tādiem nozarē atzītiem krāsu redzes testiem kā CAD un anomaloskopa tests.
2. CCVT testa tehniskie risinājumi sniedz iespēju veikt krāsu redzes izmeklējumu bez nepieciešamības pēc augsti kvalificēta personāla un tehniskā nodrošinājuma, kas nodrošina iespēju veikt krāsu redzes skrīningu skolās, optometristu un oftalmologu praksēs, iekšlietu un aizsardzības resora iestādēs, individuāli sekot krāsu redzes izmaiņām atsevišķu acu un vispārēju organisma saslimšanu gadījumos.
3. Izveidots datorizētais krāsu redzes tests, kas nodrošina iespēju veikt krāsu redzes izmeklējumu ar stimulu, kas satur dinamisku vai statisku kontrasta troksni. CCVT testa stimulš nodrošina iespēju mijiedarboties ar dažādām redzes uztveres mehānismiem, kas potenciāli nodrošina plašākas iespējas izmeklēt iedzimtus un iegūtus krāsu redzes deficītus.
4. Izmantojot Yaguchi et al. 2018 gadā izstrādāto modeli, kas nodrošina iespēju modelēt krāsu uztveres īpatnības sarkani-zaļo krāsu redzes deficītu gadījumos, un Vingrys&KingSmith 1988 gadā ierosināto inerces momentu metodi, kas sniedz iespēju izvērtēt sniegumu krāsu sakārtošanas testos, apstiprināts, ka sniegumu D15 krāsu redzes testā sarkani-zaļās anomālas trihromatijas gadījumos var izskaidrot ar spektrālajām atšķirībām starp L un M vāļišu fotoreceptoru pigmentiem.

1.4. Autora ieguldījums

Autors ir izstrādājis datorizētā krāsu redzes testa stimulu, veicis datora monitora spektrālos mērījumus un integrējis krāsu kalibrēšanas algoritmus krāsu redzes testa programmatūrā, adaptējis un testējis psihofizikālās metodes, kas nepieciešamas, lai noskaidrotu hromatiskās jutības slietņus, izveidojis algoritmu, lai noskaidrotu minimālās izšķiršanas elipses parametrus un aprēķinātu sarkani-zaļā un dzelteni-zilā krāsu oponentā krāsu kanāla hromatiskās izšķirtspējas slietņus. Hromatiskās jutības mērījumus ar datorizētā krāsu redzes testa sākotnējo versiju veica Aija Livzāne, savukārt mērījumus ar uzlaboto datorizētā krāsu redzes versiju veica autors. Autors ir izstrādājis modeli balstoties uz *Yaguchi* et al. modeli, kas paredzēts, lai modelētu sarkani-zaļo krāsu redzes deficītu uztveri, un *Vingrys&KingSmith* inerces momentu metodi, lai demonstrētu L un M vāļšu spektrālo īpašību ietekmi uz sniegumu D15 krāsu sakārtošanas testā.

2. LITERATŪRAS PĀRSKATS

2.1 Krāsu uztveres teorijas

2.1.1. Trihromatiskā krāsu uztveres teorija

Pirmie pētījumi krāsu redzes jomā saistās ar *Isaac Newton* darbu „*Opticks*”. *Isaac Newton* apstiprināja, ka baltas gaismas avots satur vairākas savstarpēji atšķirīgas spektrālās komponentes. Balstoties uz novērojumiem, *Isaac Newton* izvirzīja hipotēzi, ka redzamajai gaismai nepiemīt īpašība krāsa, turpretī gaismu veido specifisks enerģijas sadalījums, kas redzes uztverē ierosina tās vai citas krāsas sajūtu (Knoblauch, 2002). Līdztekus gaismas īpašību pētījumiem, *Isaac Newton* ir izveidojis vienu no pirmajām krāsu telpām – “*Newton colour circle*”, kā arī eksperimentāli apstiprinājis krāsu metamērismu. Ar krāsu metamērismu saprot redzes uztveres fenomenu, kad divi spektrāli atšķirīgi stimuli no redzes uztveres viedokļa ir savstarpēji neizšķirami. Kā trihromatiskās krāsu teorijas pamatlicēju uzskata *Thomas Young*. *Thomas Young* izteica hipotēzi, ka krāsu uztveri var izskaidrot ar pieņēmumu, ka krāsu uztveri nodrošina trīs spektrāli atšķirīgi receptori, kuru gaismas absorbcijas funkcijas savstarpēji nepārklājas. Saskaņā ar *Thomas Young* ierosinājumu jebkuru krāsu sajūtu var raksturot ar trīs spektrāli atšķirīgu fotoreceptoru tipu ierosinājuma līmeņu kombināciju. Būtisku ieguldījumu trihromatiskās teorijas attīstībā ir devuši *Hermann von Helmholtz* un *James Clerk Maxwell* eksperimentāli apstiprinot trihromatiskās krāsu uztveres korektumu. Zinātnieki apstiprināja, ka krāsu saskaņošanas eksperimentu rezultātus var izskaidrot ar pieņēmumu, ka tīklenes fotoreceptori nav spektrāli selektīvi, t.i., to gaismas absorbcijas funkcijas savstarpēji pārklājas.

Trihromatiskā krāsu uztveres teorija nodrošina iespēju izskaidrot krāsu saskaņošanas eksperimentu rezultātus, tomēr šī krāsu uztveres teorija pilnībā neizskaidro krāsu redzes deficītu gadījumus un tādus uztveres fenomenus kā krāsu pēcefekts. Tādus krāsu redzes deficītu veidus kā protanopija, deiteranopija un tritanopija nevar izskaidrot pieņemot, ka krāsu redzes deficītu gadījumos iztrūkst sarkanās, zaļās un zilās krāsas uztvere. Protanopijas un deiteranopijas gadījumos novēro iztrūkstošu spēju izšķirt krāsainos stimulus redzamās gaismas vidējo un garo gaismas viļņu daļā, savukārt tritanopijas gadījumos konstatē grūtības izšķirt redzamās gaismas īso viļņu stimulus no redzamās gaismas vidējo un garo viļņu gaismas stimuliem.

Krāsu uztveres eksperimentos tika konstatēts, ka pēc ilgstošas hromatiska stimula apskates novēršot skatu uz ahromatisku stimulu, rodas hromatiska stimula sajūta, kura krāsa ir komplementāra hromatiskajam stimulam, kas tika apskatīts eksperimenta sākumā. Ar

komplementāriem krāsu stimuliem, saskaņā ar aditīvo krāsu saskaitīšanas principu, saprot divus spektrāli atšķirīgus gaismas avotus, kuru summa redzes uztveres sistēmā izraisa ahromātiska stimula sajūtu. Iepriekš minēto redzes uztveres fenomenu sauc par krāsu pēcefektu, kuru nevar izskaidrot ar trihomātisko krāsu uztveres teoriju. Mūsdienās krāsu pēcefektu ir pieņemts skaidrot ar krāsu oponento uztveres teoriju.

2.1.2. Oponentā krāsu uztveres teorija

Ievērojot, ka tādas krāsu sajūtas kā sarkana un zaļa, dzeltena un zila, nekad nepastāv vienlaikus viena stimula ietvaros, *Ewald Hering* ierosināja, ka krāsu redzes uztveres procesu var izskaidrot ar trīs antagonistiskiem mehānismiem. Zinātnieks izteica pieņēmumu, ka ar trīs antagonistiskiem mehānismiem tiek izvērtēts vai stimulēts satur vairāk zaļo vai sarkano, zilo vai dzelteni, gaišo vai tumšo krāsu komponenti. *Jameson & Hurvich* 1957. gada pētījumā LGN tika identificēti neironi, kuru aktivitāte pēc tīklenes fotoreceptoru stimulācijas ar noteikta spektrālā sastāva stimuliem, ir sakrītoša ar teorētiski paredzēto krāsu antagonistisko mehānismu funkcijām. Krāsu antagonistisko mehānismu eksistence apstiprināta ne tikai ar fizioloģiskām metodēm, bet arī ar fizioloģiskām metodēm (De Valois et al., 1966). Ar abām metodēm iegūtie rezultāti principiāli neatšķiras, tomēr krāsu antagonistisko kanālu spektrālās funkcijas, kas iegūtas ar abām metodēm, ir savstarpēji atšķirīgas (Mollon, 1997).

Mūsdienās apstiprināts, ka sarkani-zaļā krāsu antagonistiskā kanāla signālu veido salīdzinot L un M vāļišu reģistrētos signālus, savukārt dzelteni-zilā krāsu antagonistiskā kanāla signālu veido salīdzinot S vāļišu signālu intensitāti pret L un M vāļišu signālu summu. Ahromātiskā kanāla signālu veido summējot L un M vāļišu signālus, t.i., pieņem, ka S vāļišu signāli būtiski neietekmē spožuma uztveri. Oponentā krāsu uztveres teorija nodrošina iespēju izskaidrot sarkani-zaļo un dzelteni-zilo krāsu redzes deficītiem raksturīgo hromātiskās izšķirtspējas samazinājumu, t.i., pieņem, ka krāsu redzes deficītu gadījumos ir samazināta vai iztrūkstoša kāda no krāsu antagonistisko mehānismu funkcijām, nevis iztrūkstoša krāsas sajūta kā to pieņem trihromātiskās teorijas ietvaros. Līdztekus krāsu redzes deficītu skaidrojumiem, oponentā krāsu uztveres teorija skaidro ar krāsu uztveri saistītus fenomenus, kā krāsu pēcefekts un hromātiskā adaptācija.

2.1.3. Duālā krāsu uztveres teorija

Ar krāsu uztveri saistītie fenomeni līdz pagājušā gadsimta piecdesmitajiem gadiem tika skaidroti ar trihromātisko vai oponento krāsu uztveres teoriju, tiesa, neviena no minētajām teorijām pārliecinoši neizskaidro krāsu uztveres procesus kopumā. Tīklenes anatomiskās uzbūves pētījumu

aizsākumi ir meklējami tālajā 1860 gadā, kad *Schultze* tīklenē identificēja divu tipu receptorus - vāļītes un nūjiņas. Pagājušā gadsimta sešdesmitajos gados cilvēku tīklenēs tika identificēti trīs spektrāli atšķirīgi fotoreceptoru tipi (Marks et al., 1964), savukārt *Hubel&Wiesel* pētījumos tika identificēti neironi, kuru aktivitāti pēc stimulācijas spektrāli selektīviem stimuliem var skaidrot ar krāsu oponento teoriju (Wiesel&Hubel, 1966). *Hubel&Wiesel* ierosināja, ka vāļīšu fotoreceptori veido neirālās struktūras - receptīvos laukus, kas nodrošina iespēju izšķirt apkārtējās vides objektu spektrālās īpašības, kā arī identificēt to robežas. Veicot kā fizioloģiskus (Derrington et al., 1984; Reid&Shapley, 1992) tā psihofizikālus (Hurvich&Jameson, 1957) eksperimentus, tika apstiprināta divu krāsu oponento kanālu eksistence, tiesa, tika konstatētas arī atšķirības starp krāsu oponento kanālu novietojumu krāsu telpā psihofizikālos un fizioloģiskos eksperimentos (Mollon, 2006). Lai izskaidrotu atšķirības starp psihofizikālo un fizioloģisko eksperimentu rezultātiem, De Valois & De Valois ierosināja papildināt krāsu uztveres modeli ar papildus krāsu informācijas apstrādes posmu, kurā L un M vāļīšu signāliem tika pievienoti S vāļīšu signāli (De Valois & De Valois, 1993; Guth, 1991). Krāsu redzes eksperimentos ir apstiprināts, ka dažādo vāļīšu fotoreceptoru tipu skaits ne vienmēr ir sakrītošs ar krāsu antagonistisko kanālu skaitu. Nereti tiek ierosināts, ka pieaugot spektrāli atšķirīgo fotoreceptoru skaitam, būtiski uzlabojas spēja izšķirt krāsainos stimulus, tiesa, minētais apgalvojums nav apstiprināts, jo hromatiskā signāla izšķiršanai ir nepieciešams papildus neirālais mehānisms (Jacobs, 2018).

Jacobs 1984. gada pētījumā tika noskaidrots, ka *saimiri sciureus* sugas vīriešu kārtas primātiem ir dihromātisks krāsu redzes raksturs, t.i., to tīklenēs var konstatēt S tipa un L vai M tipa vāļīšu receptorus, savukārt sievietes kārtas pārstāvju vidū konstatēti gadījumi, kad tīklenē ir sastopami visi trīs spektrāli atšķirīgie fotoreceptoru tipi, kas šajā gadījumā nodrošina būtiski labāku krāsu izšķirtspēju (Jacobs, 1984, Mollon et al., 1984). Proti, tika gūts apstiprinājums, ka primātu gadījumā papildus spektrāli atšķirīgs fotoreceptora tips nodrošina būtisku labāku spēju izšķirt krāsainos stimulus, kas veicināja izvirzīt dažādas hipotēzes, lai izskaidrotu augsto smadzeņu plasticitāti. Ievērojot, ka sarkani-zaļā krāsu oponentā kanāla telpas izšķirtspēja būtiski neatšķiras no ahromātiskā kanāla izšķirtspējas, tika ierosināts, ka sarkani-zaļais krāsu oponentais kanāls ir izveidojies balstoties uz ahromātiskā kanāla neirālā mehānisma bāzes (Martin et al., 2011). Tiesa, lai izskaidrotu kā ahromātiskie signāli tiek izšķirti no sarkani-zaļā krāsu oponentā kanāla signāliem, tika ierosināts, ka augstākos krāsu informācijas apstrādes centros noris papildus tīklenes signālu apstrāde, lai atdalītu abas augstāk minētās informācijas plūsmas (De Valois& De Valois, 1993).

Mūsdienu adaptīvās optikas un acu kustību izsekošanas tehnoloģijas nodrošina iespēju veikt eksperimentus, kuru ietvaros individuāli tiek stimulēti atsevišķi vāļišu fotoreceptori. Izmantojot adaptīvās optikas un acu kustību izsekošanas tehnoloģijas kā arī psihofizikālās metodes, tika konstatēts, ka stimulējot L un M vāļišu receptorus ar 532 nm gaismas avotu, pētījuma dalībnieki vairumā gadījumu ziņo, ka minētais stimulē izraisa ahromātiskas krāsas sajūtu. Individuāla L un M vāļišu receptoru stimulācija bieži izraisa ahromātiska stimula sajūtu pat tādos gadījumos, ja L fotoreceptora apkārtnē pārsvarā atrodas M vāļišu fotoreceptori un otrādi, kas ir pretrunā konvencionālajai krāsu uztveres teorijai, jo minētais fotoreceptoru izvietojums paredz ideālos apstākļus receptīvajiem laukiem, kas nepieciešami, lai nodrošinātu sarkani-zaļo krāsu oponenci (Sabesan et al. , 2016; Patterson et al., 2019). Neirālās struktūras tīklenē, kas nodrošina iespēju detektēt objektu spektrālās īpašības un fiziskās robežas, sauc par receptīvajiem laukiem. Tīklenes receptīvajiem laukiem izdala divas sensorās zonas – centrālo un perifēro zonu, kur perifērā zona atrodas koncentriski ap centrālo zonu. Tīklenes centrālajā daļā receptīvo lauku centrālo receptīvo zonu veido viens vāļišu receptors, kas nodod signālu vienai bipolārajai šūnai, kas savukārt nodod signālu tālāk uz vienu ganglionāro šūnu modulējot tās elektrisko signālu frekvenci. Tīklenē izšķir divu tipu paralēlās informācijas pārraides plūsmas - ON un OFF. ON plūsmu veido fotoreceptori, ON-bipolārās un ON-ganglionārās šūnas, savukārt OFF plūsmu veido fotoreceptori, OFF-bipolārās un OFF-ganglionārās šūnas. ON tipa bipolāro šūnu membrānas potenciāls pieaug pieaugot apgaismojuma intensitātei, savukārt OFF tipa bipolāro šūnu gadījumā membrānas potenciāls apgaismojuma intensitātei pieaugot samazinās. ON tipa ganglionāro šūnu elektrisko signālu frekvence pieaug, savukārt OFF tipa ganglionāro šūnu elektrisko signālu frekvence samazinās pieaugot apgaismojuma intensitātei. Receptīvā lauka perifērijā esošo vāļišu receptoru signālus integrē un modulē neironu tips tīklenē, ko sauc par horizontālajām šūnām. Horizontālās šūnas integrē vāļišu fotoreceptoru signālus un sniedz atgriezenisko saiti tiem, lai nodrošinātu optimālu vāļišu receptoru atbildi atbilstoši vidējam tīklenes apgaismojuma līmenim. Cilvēku tīklenēs ir identificētas divu tipu horizontālās šūnas – HI un HII. HI un HII tipa horizontālās šūnas integrē visu trīs spektrāli atšķirīgo fotoreceptoru signālus. HI horizontālās šūnas ar atgriezeniskās saites starpniecību primāri regulē L un M vāļišu signālu intensitāti, savukārt HII horizontālās šūnas primāri nodrošina atgriezenisko saiti S vāļītēm (Wässle, 2004). Ievērojot to, ka S vāļišu signāli ar HII horizontālo šūnu starpniecību var modulēt ON un OFF bipolāro šūnu membrānas potenciālu, *Neitz&Neitz* ierosina modeli, kas sniedz relatīvi vienkāršu skaidrojumu kā iespējama krāsu redzes rakstura maiņa no dihromātiska uz trihromātisku, un kā tiek organizēta ahromātiskās un

hromatiskās informācijas pārvade no tīklenes uz augstākām smadzeņu struktūrām (Neitz&Neitz, 2017).

Neitz&Neitz ierosina, ka ar HII horizontālo šūnu starpniecību summējot S vāļišu signālus, kas ir antagonistiski L bipolāro šūnu signālam, var paredzēt receptīvos laukus, kuru centrālās sensorās zonas veido L-ON un S-OFF, L-OFF un S-ON vāļišu signāli, kas nodrošina dzeltenu un zilu stimulu identificēšanu. Zinātnieku ierosinātais modelis paredz, ka iepriekš minēto receptīvo lauku centros L vāļītes aizstājot ar M vāļītēm, receptīvo lauku centrālās sensorās zonas veido M-ON un S-OFF, M-OFF un S-ON vāļišu signāli, kas nodrošina zaļu un sarkanu stimulu identificēšanu. *Neitz&Neitz* modelis sniedz relatīvi vienkāršu skaidrojumu tam, kā cilvēku un primātu tīklenēs palielinot spektrāli atšķirīgo fotoreceptoru skaitu no 2 līdz 3, ir iespējams būtiski uzlabot krāsu izšķirtspēju (Patterson et al., 2019). Palielinoties izpratnei par hromatiskās informācijas apstrādes procesiem tīklenē un augstākos hromatiskās informācijas apstrādes centros, tiek ierosināti jauni modeļi, kas sniedz iespējas pilnveidot sapratni par hromatiskās informācijas apstrādes procesiem. Šobrīd eksistējošie krāsu uztveres modeļi paredz, ka krāsu uztveri nodrošina ne tikai tīklenē esošie vāļišu un nūjiņu fotoreceptori, bet arī ipRGC ganglionārās šūnas, kas ne tikai integrē, bet arī uztver apkārtējās vides spektrālo informāciju (Aranda& Schmidt, 2021).

2.1.4. Tīklenes receptoru univariācijas princips

Cilvēkiem bez krāsu redzes deficītiem tīklenē var konstatēt trīs spektrāli atšķirīgus fotopigmentus, kas nodrošina gaismas absorbciju redzamās gaismas spektra daļā fotopiskos un mezopiskos apgaismojuma apstākļos. Univariācijas princips paredz, ka katrs fotoreceptors, kas satur noteiktu fotopigmenta tipu, ir “krāsu akls”, proti, pēc fotona absorbcijas fotopigmentos informācija par fotonam atbilstošo gaismas viļņa garumu tiek zaudēta. Tiesa, gaismas fotona absorbcijas iespējamība noteiktā fotopigmenta tipā ir atkarīga no gaismas fotona viļņa garuma un tīklenes fotoreceptoru gaismas absorbcijas funkcijām. Atsevišķo tīklenes fotoreceptoru signāls ir atkarīgs ne tikai no gaismas fotonu gaismas viļņa garuma, bet arī no absorbēto gaismas fotonu skaita laika vienībā katrā no spektrāli atšķirīgajiem tīklenes fotoreceptoru tipiem. Tīklenē esošos fotoreceptorus var pieņemt par gaismas fotonu skaitītājiem, proti, vāļišu signāla intensitāte ir atkarīga gaismas fotonu plūsmas, kas tiek absorbēta fotopigmentos (Mollon, 1982). Salīdzinot atsevišķo vāļišu fotoreceptoru signālu intensitāti augstākos krāsu informācijas apstrādes centros, tiek iegūta informācija par stimula spektrālo sastāvu.

2.2. Krāsu telpas

2.2.1. CIE_{xy} krāsu telpa

Krāsu telpas nodrošina iespēju objektīvi raksturot no apkārtējās vides objektiem atstarotās vai izstarotās gaismas spektru. Lai sistematizētu savus novērojumus, *Isaac Newton* izveidoja vienu no pirmajām krāsu telpām. Zinātnieks ierosināja izvietot krāsainos stimulus apļveida diagrammā, komplementāros krāsu pārus novietojot apļveida diagrammas pretējās pusēs. Saskaņā ar aditīvo krāsu saskaitīšanas principu, par komplementāru krāsu pāri sauc hromatiskus stimulus, kuru kombinācija redzes uztveres sistēmā rada ahromatiska stimula sajūtu. Aditīvais krāsu saskaitīšanas princips skaidro kā tiek veidota noteiktas krāsas sajūta, izmantojot divus vai vairāk spektrāli atšķirīgus gaismas avotus. Minētais princips tiek plaši izmantots, lai nodrošinātu korektu krāsu attēlošanu, izmantojot tādas gaismu izstarojošas ierīces kā TV un datoru monitoru ekrānus.

Būtisku ieguldījumu krāsu uztveres teorijā ir devis *Grassmann* (Knoblauch, 2002), kas, balstoties uz *Thomas Young* trihromatisko krāsu uztveres teoriju, formulēja principus, kas nodrošina iespēju paredzēt novērojumus krāsu saskaņošanas eksperimentos. *Hermann Helmholtz* un *James Maxwell* eksperimentāli apstiprināja, ka jebkuru krāsu sajūtu var iegūt kombinējot trīs spektrāli atšķirīgus krāsainus stimulus, tiesa, ievērojot, ka jebkuru divu no trijiem krāsaino stimulu kombinācija nevar radīt trešajam stimulam atbilstošās krāsas sajūtu. *Guild* un *Wright*, balstoties uz trihromatiskās krāsu teorijas principiem, ierosināja noskaidrot krāsu saskaņošanas funkcijas, kas nodrošina iespēju ieviest vienotus standartus, kas var tikt izmantoti, lai raksturotu krāsainos stimulus (Fairman et al., 1997).

Krāsu saskaņošanas eksperimentos testa stimula vienu pusi veido monohromatisks gaismas avots λ_t , savukārt testa stimula otru pusi veido trīs spektrāli atšķirīgu monohromatisku gaismas avotu - $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ summa. Pētījuma dalībnieks tika lūgts izvēlēties trīs spektrāli atšķirīgo $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ gaismas stimulu spožumu tā, lai iegūtu ekvivalentu krāsas sajūtu, kā monohromatiskajam gaismas stimulam λ_t . Tādējādi katram monohromatiskajam stimulam λ_t tika noskaidrots unikāls monohromatisko stimulu $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ spožumu vērtību komplekts. Balstoties uz krāsu saskaņošanas eksperimentiem tika ierosinātas trīs krāsu saskaņošanas funkcijas $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$, kur katra no funkcijām norāda uz atbilstošā gaismas avota $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ spožuma vērtību, lai iegūtu ekvivalentu krāsu sajūtu kā stimulam ar noteiktu gaismas viļņa garumu. Pieņemot, ka vāļišu receptoru gaismas absorbcijas funkcijas savstarpēji būtiski nepārklājas, var izvēlēties trīs monohromatiskus gaismas avotus $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$, kur katrs no tiem primāri tiktu absorbēts vienā no vāļišu receptoriem. Izpildoties

minētajam nosacījumam, var apgalvot, ka jebkura hromatiskā stimula λ_t radīto krāsas sajūtu var aizstāt ar trīs $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ monohromatisko stimulu summu.

Krāsu saskaņošanas eksperimentos tika izmantoti monohromatiski gaismas avoti ar gaismas viļņu garumu vērtībām 435.8, 546.1, 700 nm. Gaismas avotu spektri tika izvēlēti ar nolūku standartizēt krāsu saskaņošanas eksperimentus, t.i., pirmie divi gaismas avoti tika iegūti ar dzīvsudraba tvaiku lampu, savukārt pēdējais tika iegūts ar monohromatora palīdzību. Gaismas avoti ar starojuma spektriem 435.8 un 700 nm primāri tiek absorbēti S un L vāļītēs, savukārt gaismas avots ar starojuma spektru 546.1 nm tiek absorbēts visos trīs vāļiņu tipos, kas atsevišķu stimulu gadījumos liedz iespēju veikt krāsu saskaņošanas uzdevumu. Lai risinātu iepriekš minēto problēmu tika ierosināts, ka gadījumos, kad krāsu saskaņošana, izmantojot trīs spektrāli atšķirīgos stimulus nav iespējama, tad monohromatiskajam testa stimulam λ_t var papildus pievienot kādu no trīs $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ spektrāli atšķirīgajiem gaismas avotiem līdz iegūst vienādu krāsas sajūtu abās testa stimula pusēs.

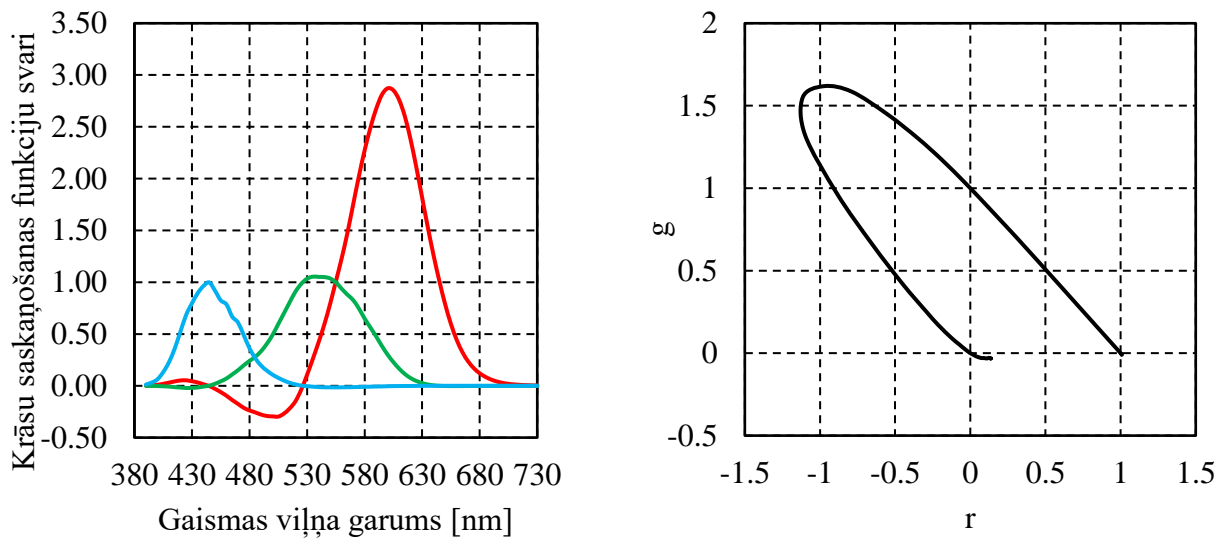
Gadījumos, kad diviem stimuliem atbilstošās R, G, B vērtības (skatīt vienādojumus 2.1-2.3) ir ekvivalentas, stimuli šķiet neizšķirami neskatoties uz to objektīvi konstatējamām spektrālajām atšķirībām. Krāsu saskaņošanas eksperimentos katram no spektrāli atšķirīgajiem gaismas avotiem tika definēts solis, ar kādu tiek palielināts vai samazināts gaismas avota spožums. Soļa vērtības katram gaismas avotam tika izraudzītas tā, lai vienādu R, G, B vērtību gadījumos, pētījuma dalībniekam radītu ahromātiska stimula sajūtu.

$$R = \int_{390}^{830} \bar{r}(\lambda) I(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

$$G = \int_{390}^{830} \bar{g}(\lambda) I(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

$$B = \int_{390}^{830} \bar{b}(\lambda) I(\lambda) d\lambda \quad (2.3)$$

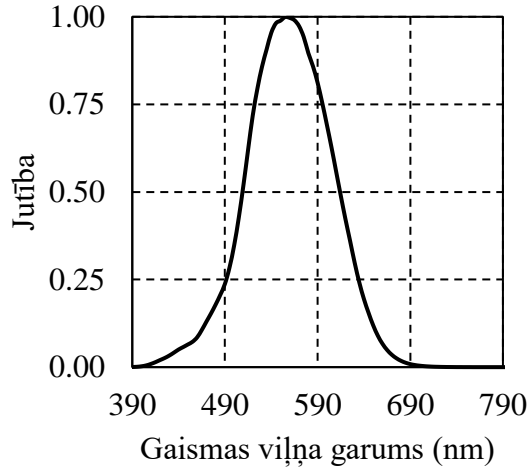
Krāsu telpai, kas tika izveidota balstoties uz $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ krāsu saskaņošanas funkcijām, ir būtiski trūkumi. Negatīvas krāsu saskaņošanas funkciju vērtības liedz iespēju izveidot instrumentus, kas nodrošina iespēju objektīvi noskaidrot apkārtējās vides objekta krāsu. Papildus tika konstatēts, ka krāsu saskaņošanas eksperimentos stimuli abās testa stimula pusēs nereti neatšķiras pēc krāsas, bet atšķiras pēc to spožuma (skatīt att. 2.1.)



2.1 att. Grafikā pa kreisi Stiles&Burch ierosinātās krāsu saskaņošanas funkcijas. Grafikā pa labi RGB krāsu telpas robežas, kas aprēķinātas balstoties uz Stiles&Burch ierosinātajām krāsu saskaņošanas funkcijām $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$.

Lai risinātu iepriekš minētos $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ krāsu saskaņošanas funkciju trūkumus, balstoties uz eksistējošām $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ krāsu saskaņošanas funkcijām, tika definētas trīs citas krāsu saskaņošanas funkcijas $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Krāsu saskaņošanas funkcijām $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ tika izvirzīti sekojoši nosacījumi – krāsu saskaņošanas funkcijas ir pozitīvas visā to definīcijas apgabalā, viena no krāsu saskaņošanas funkcijām atbilst V lamda funkcijai (turpmāk tekstā $V(\lambda)$, Fairman et al., 1997). Krāsu uztveres eksperimentos tika konstatēts, ka cilvēku redzes uztveres sistēma ir maksimāli jutīga uz gaismas avotu ar starojuma spektru 555 nm. $V(\lambda)$ funkcija, kas apraksta relatīvo spožuma uztveri redzamās gaismas spektra daļā, tika noskaidrota izmantojot heterohromatiskā flikera metodi. Eksperimenta ietvaros personai ar 25 Hz nomaiņas frekvenci tiek demonstrēts references stimulā ar gaismas viļņa garumu 560 nm un testa stimulā gaismas viļņa garumu no 390 līdz 830 nm. Personas uzdevums palielināt vai samazināt testa stimula intensitāti līdz brīdim, kamēr konstatē, ka stimula spožums un krāsa saglabājas konstanti, neskatoties uz to, ka pamīšus tiek demonstrēti divi spektrāli atšķirīgi stimuli. Pieņem, ka heterohromatiskā flikera eksperimentā izmantotais stimulā mijiedarbojas tikai ahromātisko kanālu, t.i., relatīvi augstā stimulu nomaiņas frekvence izolē krāsu oponentos kanālus, tādējādi ir iespējams novērtēt redzes uztveres sistēmas relatīvo spožuma jutību atkarībā no gaismas viļņa garuma. Pilnveidojot heterohromatiskā flikera eksperimentu, $V(\lambda)$ funkcija ir vairākkārt koriģēta. Šobrīd par nozares standartu pieņem $V(\lambda)$ funkciju, ko ierosinājuši zinātnieki *Stockman* un *Sharpe* (Stockman&Sharpe, 2000). Saskaņā ar Stockman&Sharpe pētījuma rezultātiem pieņem, ka $V(\lambda)$

funkciju var aproksimēt kā L un M vāļišu absorbcijas spektru summu attiecībā 1,50:1, t.i., $V(\lambda) = 1,50L(\lambda) + M(\lambda)$ (skatīt att. 2.2).



2.2 att. V lamda funkcijas (Stockman&Sharpe, 2000).

Definējot jaunās krāsu saskaņošanas funkcijas $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$, krāsu saskaņošanas funkcijas $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ tika normalizētas tā, lai to vērtību summa visā to definīcijas apgabalā būtu vienāda ar 1 (skatīt 2.4 vienādojumu). Veicot atbilstošo krāsu saskaņošanas funkciju transformāciju, tiek nodrošināts, ka ahromātisku stimulu gadījumā vērtības R, G, B vienmēr ir vienādas. Augstāk minētās krāsu saskaņošanas funkciju korekcijas saglabā visas iepriekš minētās krāsu saskaņošanas funkciju $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ īpašības.

$$\int_{390}^{830} \bar{r}(\lambda) d\lambda = \int_{390}^{830} \bar{g}(\lambda) d\lambda = \int_{390}^{830} \bar{b}(\lambda) d\lambda = \int_{390}^{830} V(\lambda) d\lambda = 1 \quad (2.4)$$

Definējot CIExy krāsu telpas $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ krāsu saskaņošanas funkcijas, tika pieņemts, ka krāsu saskaņošanas funkcija $\bar{y}(\lambda)$ ir ekvivalenta $V(\lambda)$ funkcijai un krāsu saskaņošanas funkcijas $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ ir pozitīvas visā to definīcijas apgabalā. Lai vienkāršotu stimuliem atbilstošo krāsu koordināšu aprēķinu, tika ierosināts maksimizēt $\bar{z}(\lambda)$ krāsu saskaņošanas funkcijas nulles vērtību skaitu redzamās gaismas garo viļņu daļā. Ierosinājums maksimizēt $\bar{z}(\lambda)$ funkcijas nulles vērtību skaitu, nodrošināja iespēju optimizēt krāsu koordināšu aprēķinu, kas bija būtiski pagājušā gadsimta trīsdesmitajos gados, jo aprēķini netika veikti automatizēti.

Grassmann ierosinātie likumi paredz, ka, balstoties uz eksistējošām krāsu saskaņošanas funkcijām, var definēt jaunas krāsu saskaņošanas funkcijas, proti, jaunās krāsu saskaņošanas funkcijas var definēt kā iepriekšējo krāsu saskaņošanas funkciju svērtās summas (skatīt 2.5 vienādojumu). $\bar{y}(\lambda)$, t.i., $\bar{V}(\lambda)$ funkcija tika aproksimēta ar $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ krāsu saskaņošanas funkcijām izmantojot mazāko kvadrātu metodi, t.i., reducējot diferenci starp svērtu $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$

funkciju summu un $\bar{V}(\lambda)$ funkciju. Ievērojot $\bar{y}(\lambda)$ funkcijas radītos ierobežojumus, $\bar{x}(\lambda)$ un $\bar{z}(\lambda)$ krāsu saskaņošanas funkcijām atbilstošās $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ funkciju svērtās summas tika noskaidrotas, pieņemot, ka $\bar{x}(\lambda)$ un $\bar{z}(\lambda)$ krāsu saskaņošanas funkcijas ir pozitīvas visā to definīcijas apgabalā un vienlaikus maksimizējot $\bar{z}(\lambda)$ krāsu saskaņošanas funkcijas nulles vērtību skaitu redzamās gaismas garo viļņu spektra daļā.

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,49 & 0,31 & 0,2 \\ 0,17690 & 0,8124 & 0,01063 \\ 0 & 0,01 & 0,99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Balstoties uz CIExy krāsu saskaņošanas funkcijām, jebkuru krāsaino stimulu var raksturot ar trīs CIExy sistēmas vērtībām X, Y, Z, kur Y vērtības norāda stimulam atbilstošo spožuma vērtību objektīvi izmērāmās mērvienībās (skatīt vienādojumus 2.6-2.8).

$$X = \int_{390}^{830} I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (2.6)$$

$$Y = \int_{390}^{830} I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2.7)$$

$$Z = \int_{390}^{830} I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

CIExy krāsu telpas X, Y, Z vērtības praksē tiek lietotas reti. Lai nodrošinātu iespēju attēlot stimuliem atbilstošās vērtības grafiski, t.i., plaknē, ir ierosināts izmantot vērtības x un y, kas tiek aprēķinātas balstoties uz krāsainajam stimulam atbilstošajām X, Y, Z vērtībām. Stimuliem atbilstošās z vērtības uzskatāmības labad parasti neattēlo, jo ir viegli aprēķināmas, zinot x un y vērtības, (skatīt vienādojumus 2.9-2.12).

$$x = X/(X + Y + Z) \quad (2.9)$$

$$y = Y/(X + Y + Z) \quad (2.10)$$

$$z = Z/(X + Y + Z) \quad (2.11)$$

$$z = 1 - x - y \quad (2.12)$$

CIExy krāsu telpa nodrošina iespēju objektīvi raksturot krāsainos stimulus ar trīs koordinātēm x, y, Y, tomēr krāsainajiem stimuliem atbilstošās CIExy krāsu telpas vērtības ne vienmēr korekti atspoguļo uztveres atšķirības dažādiem stimuliem. Pētījumos ir apstiprināts, ka CIExy krāsu telpa ir nehomogēna, proti, ekvivalenta distance starp diviem hromatisko stimulu pāriem CIExy krāsu telpā nerezultējas ar ekvivalentām krāsu atšķirībām no uztveres viedokļa. Lai risinātu minēto problēmu tika ierosinātas krāsu telpas CIELuv un CIELu'v' (skatīt vienādojumus

2.13-2.16). CIELuv krāsu telpa tika definēta balstoties uz *Judd* (Judd, 1935) un *MacAdams* (MacAdams, 1937) hromatiskās izšķirtspējas mērījumu rezultātiem. CIExy krāsu telpas X, Y, Z parametru transformācija uz CIELuv krāsu telpas parametriem u un v, nodrošina iespēju korektāk attēlot atšķirības starp stimuliem. Pilnveidojot CIELuv krāsu telpu, tika ierosināta CIELu'v' telpa, kas nodrošina iepriekš minētās problēmas optimālāku risinājumu. CIExy, CIELuv un CIELu'v' telpām konstatē nepilnību, t.i., pieaugot krāsaino stimulu spožumam, novēro krāsainajam stimuliem atbilstošo piesātinājuma vērtību samazināšanos.

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (2.13)$$

$$v = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad (2.14)$$

$$u' = u \quad (2.15)$$

$$v' = 1.5 * v = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (2.16)$$

Lai izveidotu krāsu telpu, kas no uztveres viedokļa korekti sistematizē krāsainos stimulus, balstoties uz MacAdams eksperimentu rezultātiem, tika ierosināts veikt stimulu hromatisko un spožuma vērtību transformāciju. Krāsu telpās kā CIELUV un CIELab jēdziens spožums ir aizstāts ar jēdzienu gaišums. Būtiski minēt, ka abi minētie jēdzieni nav ekvivalenti. Stimula spožuma vērtība objektīvi raksturo no stimula atstarotās vai izstarotās gaismas daudzumu, savukārt ar jēdzienu gaišums tiek raksturots objekta relatīvais spožums attiecībā pret references gaismas avotu. CIELUV krāsu telpas gadījumā tiek ierosināts raksturot stimula hromatiskās īpašības ar vērtībām U^* un V^* , savukārt stimuliem atbilstošās gaišuma vērtības ar parametru L^* . Krāsu telpu CIExy, CIELuv, CIELu'v' gadījumā netiek ņemta vērā fona apgaismojuma spektrālā sastāva ietekme uz stimulu uztveri, savukārt CIELUV krāsu telpas gadījumā, veicot stimulu krāsu koordināšu aprēķinus, tiek ņemtas vērā fona apgaismojuma spektrālās īpašības u'_n un v'_n un spožums Y_n (skatīt vienādojumus 2.17-2.19).

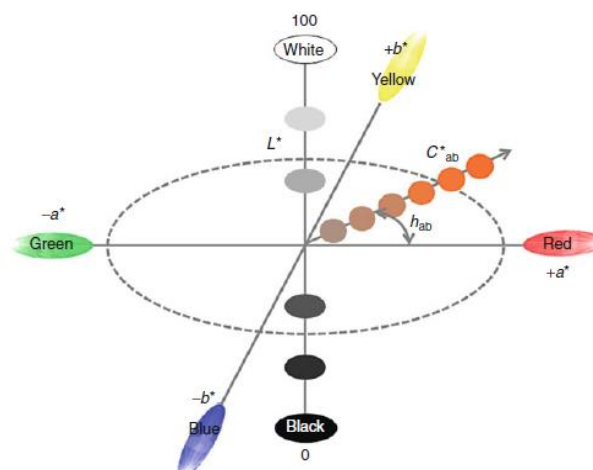
$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad (2.17)$$

$$U^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad (2.18)$$

$$V^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad (2.19)$$

2.2.2. Oponentās krāsu telpas

Pagājušā gadsimta sākumā *Albert Henry Munsell* ierosināja sistematizēt krāsainos stimulus un izveidoja krāsu telpu, kurā katru stimulu raksturo ar trīs parametriem – gaišumu, piesātinājumu un toni, t.i., *lightness, chroma, hue*. Munsell sistēmā stimulu gradācija no uztveres viedokļa izvēlēta tā, lai atšķirības starp katriem diviem sekojošiem stimuliem katrā no asīm būtu ekvivalentas no uztveres viedokļa. 1976. gadā CIE ierosināja divas krāsu telpas, kas ir atvasinātas no CIE_{xy} krāsu telpas, CIE_{Lab} un CIE_{LUV}. CIE_{Lab} krāsu telpa ir paredzēta, lai raksturotu gaismu atstarojošus stimulus, savukārt CIE_{LUV} krāsu telpa paredzēta gaismu izstarojošu stimulu raksturošanai (Cheung, 2012). Minētās krāsu telpas paredzētas, lai nodrošinātu iespēju kvantēt atšķirības starp krāsainajiem stimuliem (skatīt vienādojumu 2.23). Lai raksturotu stimulu gaišumu, tiem atbilstošās spožuma vērtības tiek salīdzinātas attiecībā pret fona spožumu jeb references spožumu Y_n , kas CIE_{Lab} un CIE_{LUV} krāsu telpu gadījumos ir gaismas avota, ar kuru tiek apgaismoti krāsainie stimuli, maksimālā spožuma vērtība (skatīt att. 2.3) un datora monitorā iebūvētā gaismas avota maksimālais spožums. Matemātiskās sakarības, kas raksturo stimulu gaišumu CIE_{LUV} un CIE_{Lab} krāsu telpās, tiek aprēķinātas ar matemātisku sakarību, kas noskaidrota aproksimējot *Munsell* sistēmas ahromātiskajiem stimuliem atbilstošās *Munsell* sistēmas gaišuma vērtības un stimuliem atbilstošās spožuma vērtības ar kubsaknes funkciju (skatīt vienādojumus 2.17, 2.20). Stimuliem atbilstošo hromatisko koordināšu aprēķins CIE_{Lab} krāsu telpā pretstatā CIE_{LUV} krāsu telpai ir balstīts uz oponences principiem, t.i. stimulu hromatiskās koordinātes tiek aprēķinātas kā diference starp stimulu raksturojošām X un Y, Y un Z integrāļsummām, kas normalizētas attiecībā references gaismas avotam atbilstošajām X_n, Y_n, Z_n vērtībām (skatīt vienādojumus 2.21 un 2.22). Nereti, tiek pieņemts, ka CIE_{Lab} krāsu telpas a un b asis norāda uz virzieniem krāsu telpā, kas izolē sarkani-zaļo un dzelteni-zilo krāsu kanālu, tiesa, minētais apgalvojums nav patiess.



1.3. att. CIE Lab krāsu telpa

$$L = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (2.20)$$

$$a = 500 \left(\left(\frac{X}{X_N} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_N} \right)^{1/3} \right) \quad (2.21)$$

$$b = 200 \left(\left(\frac{Y}{Y_N} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_N} \right)^{1/3} \right) \quad (2.22)$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta L^2} \quad (2.23)$$

2.3. Krāsu redzes deficīti

Pieņem, ka angļu ķīmiķis *Jonh Dalton*, ir viens no pirmajiem zinātniekiem, kas aprakstījis krāsu redzes deficītu gadījumus cilvēkiem. *Jonh Dalton* sava darba “*Extraordinary facts relating to the vision of colours*” ir centies aprakstīt un izskaidrot pašam piemītošo krāsu redzes deficītu. Veicot darba pienākumus laboratorijā, *Jonh Dalton* konstatēja, ka neizšķir ķīmiskos reaģentus pēc to krāsām. Zinātnieks izvirzīja hipotēzi, lai skaidrotu individuālo krāsu redzes deficītu. *Jonh Dalton* uzskatīja, ka viņa acu struktūrās ir ievērojami palielināta gaismas absorbcija redzamās gaismas īso un vidējo viļņu daļās. Tiesa, pēc zinātnieka nāves veiktā autopsijā izvirzītā hipotēze netika apstiprināta (Pease, 2007). Ir izdarīti centieni skaidrot krāsu redzes deficītus izmantojot *Thomas Jung* trihromatisko un *Ewald Herring* oponento krāsu uztveres teorijas. Protan, deitan un tritan krāsu redzes deficītus trihromatiskās krāsu teorijas ietvaros sākotnēji skaidroja ar iztrūkstošu jutību redzamās gaismas garo, vidējo un īso viļņu spektra daļās. Tiesa, apgalvojums nav korekts, jo cilvēkiem ar krāsu redzes deficītiem vairumā gadījumu novēro samazinātu spēju izšķirt dažāda

spektrālā sastāva stimulus noteiktās redzamās gaismas spektra daļās, nevis iztrūkstošu gaismas jutību kādā no redzamās gaismas spektra daļām. Trihromatiskās teorijas krāsu redzes deficītu skaidrojums no mūsdienu skatupunkta daļēji atbilst patiesībai, jo dihromātiskas krāsu redzes deficītu gadījumos konstatē samazinātu spektrāli atšķirīgo vāļišu pigmentu skaitu, t.i., cilvēkiem ar protanopiju, deitranopiju un tritonopiju var konstatēt tikai M un S, L un S, L un M vāļišu pigmentus nevis L, M un S vāļišu pigmentus. Skaidrojot krāsu redzes deficītus ar oponento krāsu teoriju pieņem, ka protanopijas un deiteranopijas gadījumos nefunkcionē sarkani-zaļais krāsu oponentais kanāls, kas liedz iespēju sekmīgi izšķirt dažāda spektrālā sastāva stimulus redzamās gaismas vidējo un garo viļņu daļās. Savukārt tritanopijas gadījumi tiek skaidroti ar iztrūkstošu dzeltenī-zilo krāsu oponento kanālu, kas liedz iespēju izšķirt stimulus redzamās gaismas īso viļņu daļā. Tiesa, krāsu redzes deficītus nevar izskaidrot tikai ar trihromatisko vai oponento krāsu uztveres teoriju, jo pagājušā gadsimta piecdesmitajos gados tika apstiprināts, ka abas augstāk minētās krāsu uztveres teorijas neizskaidro krāsu uztveres procesu kopumā (Hurvich&Jameson, 1957). Trihromatiskā krāsu teorija skaidro krāsu uztveres procesu tīklenes fotoreceptoru līmenī, savukārt oponentā krāsu teorija skaidro spektrālās informācijas analīzi tīklenes ganglionāro šūnu slānī un laterāli ģenikulārajā ķermenī (De Valois & De Valois, 1993). Mūsdienās ir rasti skaidrojumi arī tādiem krāsu redzes deficītiem kā anomālā trihromatija, vāļišu monohromāzija, pilnīga monohromāzija, atipiska monohromāzija un dzīves laikā iegūtie krāsu redzes deficīti, kas ietver krāsu redzes izmaiņas sakarā ar dažādām saslimšanām, medikamentu blakus efektiem, kaitīgiem dzīvesveida paradumiem.

2.3.1. Sarkani-zaļā dihromātija

Sarkani-zaļo dihromātiska krāsu redzes rakstura iemeslus skaidro ar trīs savstarpēji līdzīgiem mehānismiem. Pieņem, ka cilvēkiem ar dihromātisku krāsu redzes raksturu X hromosomas satur informāciju tikai par vienu fotopigmenta tipu vidējo un garo gaismas viļņu spektra daļā, vai tikai vienu spektrāli atšķirīgu fotopigmenta tipu, vai viena no fotopigmenta aminoskābju sekvencēm satur punktveida mutāciju, kas liedz ekspresēties atlikušajiem fotopigmenta tipiem (*Sharpe, 1999, Neitz et al., 2004*). Pieņem, ka sarkani-zaļās dihromātijas gadījumos L un M vāļišu skaits tīklenē būtiski neatšķiras no personas bez krāsu redzes traucējumiem, t.i., personām ar sarkani-zaļo dihromātiju konstatē iztrūkstošu fotopigmenta tipu nevis iztrūkstošu fotoreceptoru tipu (skatīt att. 2.4). Tiesa, *Carroll et al. 2004.* gada pētījumā, izmantojot adaptīvās optikas priekšrocības, ir noskaidrots, ka personām ar dihromātisku krāsu redzes raksturu var konstatēt kā iztrūkstošu viena

tipa fotoreceptoru tā viena fotopigmentu tipu. Pētījumā tika konstatēts, ka neskatoties uz būtiski samazinātu vālišu receptoru skaitu, redzes asums un acs anatomiskās struktūras atbilst normas gadījumiem.

Pētījumos ir konstatēts, ka cilvēkiem, kam konstatēts krāsu redzes raksturs, kas atbilst protanopijas un deiteranopijas gadījumiem, ir iespējami spektrāli atšķirīgi M un L vālišu fotopigmenti, kas skaidro uztveres atšķirības starp personām, kam konstatēta protanopija un deiteranopija (Alpern & Pugh, 1977; Sanocki et al., 1993; Sharpe et al., 1998; Davidoff et al., 2016). Davidoff et al. 2016 pētījumā konstatēts, ka aptuveni trešdaļai personu ar dihromātisku krāsu redzes raksturu HRR testā krāsu redzes deficīta izteiktība tiek konstatēta kā vidēja nevis smaga, jo veidojot HRR testu ir pieņemts, ka visas personas ar viena tipa krāsu redzes deficīta veidu var korekti izmeklēt ar stimuliem, kas pieder vienai noteiktai konfūzijas līnijai, kas ne vienmēr nodrošina iespēju pilnvērtīgi izvērtēt krāsu redzes deficīta izteiktības pakāpi.

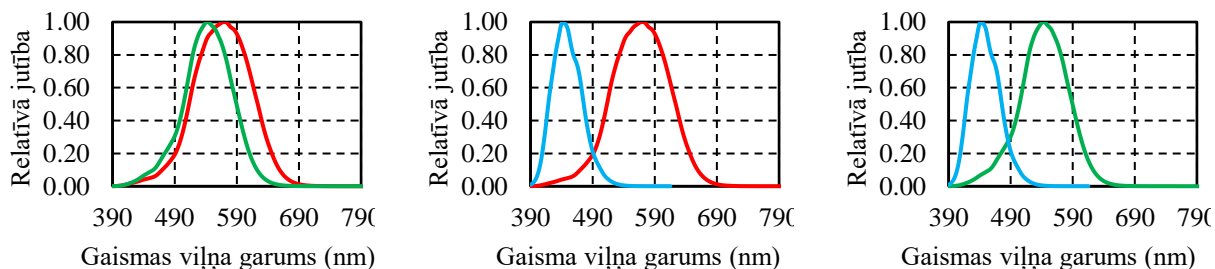
Krāsu redzes izmeklējumos un pētījumos dihromātisks krāsu redzes raksturs tiek konstatēts ar anomaloskopa testu. Protanopijas gadījumā tiek konstatēta iztrūkstoša hromatiskā izšķirtspēja vidējo un garo gaismas viļņu spektra daļā ar jutības samazināšanos garo gaismas viļņu spektra daļā, savukārt deiteranopijas gadījumā tiek konstatēta iztrūkstoša hromatiskā izšķirtspēja vidējo un garo gaismas viļņu spektra daļā. Ir apstiprināts, ka palielinoties anomaloskopa testa stimula izmēriem no 2° līdz 8° redzes lauka, cilvēki ar dihromātisku krāsu redzes raksturu nereti uzrāda krasi atšķirīgus rezultātus. Eksperimentāli ir apstiprināts, ka atsevišķiem pētījumu dalībniekiem, kam konstatēta protanopija un deiteranopija, palielinot testa stimula fiziskos izmērus, novēro hromatiskās izšķirtspējas uzlabojumu, kas raksturīgs anomālās trihromatijas gadījumiem. Minētie novērojumi tiek skaidroti pieņemot, ka hromatisko oponenci nodrošina papildus nūjiņu signāli. Proti, izmantojot 2° lielus testa stimulus, cilvēku tīklenēs ar dihromātisku krāsu redzes raksturu stimulē tikai vienu fotopigmentu tipu vidējo un garo gaismas viļņu daļā, savukārt palielinot testa stimula izmērus līdz 8°, tiek stimulēti arī nūjiņu receptori, kas var sekmēt hromatisko oponenci (Smith & Pokorny, 1977). Neitz et al. 1999 pētījumā tika apstiprināts, ka atsevišķos gadījumos redzes uztveres sistēma spēj detektēt signālu atšķirības starp vālišu fotopigmentiem, kas savstarpēji atšķiras tikai ar fotopigmentu optiskā blīvuma vērtībām, bet ne ar gaismas absorbcijas funkcijām. Atsevišķiem indivīdiem ar protanopijai raksturīgiem M vālišu fotopigmentiem, neskatoties uz identiskiem gaismas absorbcijas spektriem, konstatē būtiskas fotopigmentu optiskā blīvuma vērtību atšķirības, kas nodrošina izmērāmu krāsu izšķirtspējas uzlabojumu salīdzinājumā ar citiem protanopijas gadījumiem.

Vīriešu populācijā, krāsu redzes raksturu, kas atbilst protanopijai un deiteranopijai, konstatē 1,01% un 1,28% gadījumu, savukārt sieviešu vidū dihromātisks krāsu redzes raksturs sastopams ievērojami retāk. Sieviešu populācijā protanopijas un deitaranopijas sastopamības biežums ir ~0,02% un ~0,01% (Sharpe, 1999). Sarkani-zaļās dihromātijas gadījumi sieviešu vidū sastopami ievērojami retāk, jo sievietēm konstatē sarkani-zaļo dihromātiju tikai tajos gadījumos, ja abas X hromosomas satur identisku L vai M vāļišu fotopigmentu gaismas absorbcijas spektru kodējošo informāciju (Neitz&Neitz, 2011).

2.3.2. Dzelteni-zilā dihromātija

Cilvēkiem ar atsevišķu gēnu punktveida mutācijām, kas satur būtisku informāciju, lai nodrošinātu korektu S vāļišu darbību, ir konstatējams iedzimts krāsu redzes deficīts tritanopija (Weitz et al., 1992), tiesa, ir arī identificēti gadījumi, kad atsevišķu ģenētisku mutāciju gadījumos personām novēro progresējošu S vāļišu defektu bez citu tīklenes anatomisko struktūru iesaistes (Baraas et al., 2007). Tritanopijas gadījumos krāsu uztveri nodrošina L un M vāļītes, t.i., pieņem, ka tīklenē S vāļītes nav konstatējamās (skatīt 2.4 att.). Dzelteni-zilo krāsu redzes deficītu sastopamības biežums sieviešu un vīriešu vidū ir aptuveni vienāds, jo S vāļišu pigmentu kodējošā informācija atrodas 7 hromosomā, kas abiem dzimumiem ir vienādā skaitā (Nathans et al., 1986). Tritan krāsu redzes deficīta sastopamības biežums dažādos pētījumos variē robežās no 1:1000 līdz 1:65000 (Sharpe et al., 1999; Deeb, 2004). Dzelteni-zilās dihromātijas gadījumu apstiprināšana ar standarta krāsu redzes testiem nav viennozīmīga. HRR testā ir paredzētas 4 testu plates dzelteni-zilo krāsu redzes deficītu izvērtēšanai, savukārt krāsu sakārtošanas testi kā D15, DS15 un FM100 nodrošina iespēju konstatēt krāsu kauliņu sakārtošanas secības, kas raksturīgas tritan krāsu redzes deficītu gadījumiem. Līdzīgi kā sarkani-zaļo krāsu redzes deficītu gadījumos arī dzelteni-zilos krāsu redzes deficītus var izvērtēt ar anomaloskopa tipa testu, tiesa, testa stimula uzbūve ir būtiski atšķirīga. Vienu testa stimula pusi veido monohromatiski gaismas avoti ar gaismas viļņu garumu vērtībām 470 un 570 nm, savukārt otru pusi veido gaismas avoti ar gaismas viļņu garumu vērtībām 440 un 488 nm (Moreland, 2004). Šī tipa testam ir konstatēti būtiski trūkumi, jo cilvēku sniegumu ievērojami ietekmē gaismas absorbcijas efekti acs lēcā un makulas pigmentā. Anomaloskopa tipa testā, kas balstīts uz Moreland vienādojumu, izvēlētie gaismas stimuli neatbilst tritan krāsu redzes deficītu konfūziju līnijām, kas liedz viennozīmīgi demonstrēt krasi samazinātu krāsu izšķirtspēju tritanopijas gadījumos, kā to ir iespējams demonstrēt ar anomaloskopa tipa testu protanopijas un deiteranopijas gadījumos (Sharpe, 1999). Anomaloskopa tipa testiem, kas balstīti uz Moreland

vienādojumu, ir grūti definēt normas, jo personām bez krāsu redzes deficītiem ir konstatēta ievērojama rezultātu izkliede (Zabel et al., 2021). Lai viennozīmīgi konstatētu dzelteni-zilos krāsu redzes deficītus, ir jāizslēdz tādas saslimšanas kā autosomāli dominantā redzes nerva atrofija (Smith et al., 1973), kā arī tādas saslimšanas kā glaukoma (Pacheco-Cutillas et al., 1999; Pacheco-Cutillas et al., 2002) un cukura diabēts (Abdel-Hay et al., 2018; Feitosa-Santana et al., 2010), jo šajos gadījumos nereti konstatē zili-dzeltenos krāsu redzes deficītus.

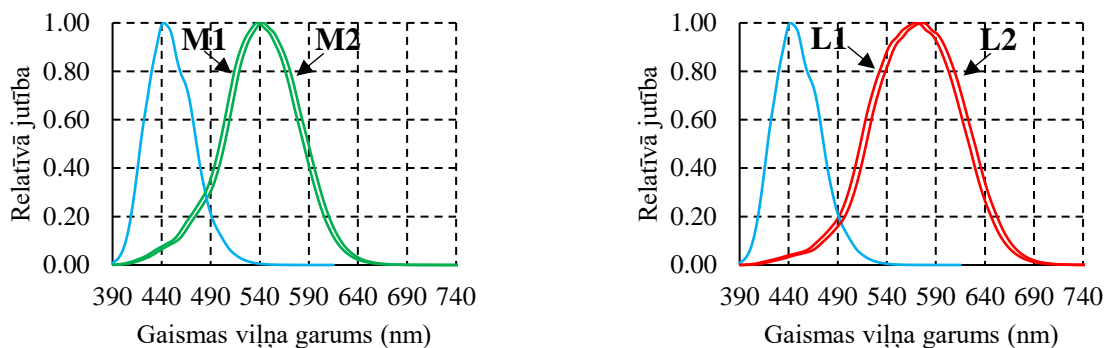


2.4. att. Grafikos no kreisās uz labo pusi ir attēlotas vāļišu fotopigmentu gaismas absorbcijas funkcijas tritanopijas, deiteranopijas un protanopijas gadījumos. Attēli reproducēti pēc (Neitz&Neitz 2000), izmantojot (Stockman & Sharpe, 2000) ierosinātās vāļišu fotoreceptoru pigmentu funkcijas.

2.3.3. Sarkani-zaļā anomālā trihromatija

Deiteranomālija ir biežāk sastopamais krāsu redzes deficīta veids cilvēku populācijā, kas konstatējams 5% vīriešu un tikai 0,003% sieviešu, savukārt protanomālijas sastopamības biežums ir ievērojami zemāks, protanomāliju konstatē 1% vīriešu un 0,02% sieviešu no populācijas (Sharpe, 1999). Protanomālijas un deiteranomālijas gadījumos skaidro ar iztrūkstošiem normai atbilstošiem L un M vāļišu fotopigmentiem (skatīt att. 2.5). Protanomālijas gadījumos konstatē S, M, L' fotopigmentus, kur M un L' fotopigmentu gaismas absorbcijas spektri atšķiras par 2-6 nm, savukārt deiteranomālijas gadījumos konstatē S, M', L fotopigmentus, kur L un M' fotopigmentu gaismas absorbcijas spektri atšķiras 2-9 nm (Deeb, 2005). Krāsu redzes deficītu izteiktību sarkani-zaļās anomālās trihromatijas gadījumos pieņemts skaidrot ar spektrālās proksimitātes hipotēzi. Pieņem, ka krāsu redzes deficīta izteiktība palielinās samazinoties spektrālajai differencei starp L un M vāļišu fotopigmentu absorbcijas maksimumiem (Regan et al, 1994). Neitz et al 1996. gadā veiktajā pētījumā, analizējot deiteranomālijai atbilstošās L un M' fotopigmentu gaismas absorbcijas spektru kodējošās aminoskābju sekvences, apstiprināts, ka samazinoties spektrālajai differencei starp L un M' fotopigmentiem, novēro būtisku kļūdu skaita pieaugumu krāsu redzes testos, kas norāda uz samazinātu hromatisko izšķirtspēju. He&Shevell 1995. gada pētījuma rezultāti liecina, ka lai arī fotopigmentu spektrālajai differencei ir būtiska ietekme uz sniegumu krāsu saskaņošanas

uzdevumos, tomēr fotopigmentu spektrālajai diferencei samazinoties līdz 4 nm, optiskā blīvuma vērtību atšķirībām starp dažādajiem fotopigmentu tipiem ir būtiska ietekme. Optiskā blīvuma vērtībām pieaugot vienam no fotopigmentu tipiem hromatiskā izšķirtspēja būtiski samazinās. Sarkani-zaļās anomālās trihromatijas gadījumos novēro būtiski samazinātu hromatisko izšķirtspēju sarkani-zaļajam krāsu oponentajam kanālam, t.i., protanomālijas gadījumos konstatē 20% un deiteranomālijas gadījumā 50% no hromatiskās izšķirtspējas salīdzinājumā ar normas gadījumiem (Barbur, 2008).



2.5. att. Attēlā pa kreisi attēlota vāļišu fotopigmentu jutība (M1, M2) protanomālijas gadījumā, savukārt attēlā pa labi attēlota vāļišu fotopigmentu jutība (L1, L2) deiteranomālijas gadījumos. Attēli reproducēti pēc (Neitz&Neitz 2000), izmantojot (Stockman & Sharpe, 2000) ierosinātās vāļišu fotoreceptoru pigmentu funkcijas.

Izvērtējot virssliekšņa hromatisko stimulu izšķirtspēju sarkani-zaļās anomālās trihromatijas gadījumos, izmantojot psihofizikālās metodes, ir noskaidrots, ka sarkani-zaļās trihromatijas gadījumos var konstatēt būtiski labāku virssliekšņa hromatisko stimulu izšķirtspēju nekā to paredz spektrālā diference starp vāļišu receptoriem, kas nodrošina gaismas uztveri redzamās gaismas vidējo un garo viļņu daļā. Minētos novērojumus skaidro ar pieņēmumu, ka sarkani-zaļās anomālās trihromatijas gadījumos ir iespējama hromatisko signālu pastiprināšana augstākos vizuālās informācijas apstrādes centros (Knoblauch et al., 2020; Boehm 2014). Tregillus et al. 2021. gada veiktajā pētījumā apstiprināts, ka primārajā vizuālās informācijas apstrādes zonā V1 ir novērojamas būtiskas hromatisko signālu atšķirības starp cilvēkiem normālas un anomālās trihromatijas gadījumos, savukārt augstākos vizuālās informācijas apstrādes centros V2v un V3v augstāk minētās atšķirības starp abām grupām nekonstatē. Augstāk minētie novērojumi norāda uz iespēju, ka hromatiskie signāli var tikt pastiprināti augstākajos smadzeņu centros.

Literatūras avotos nereti tiek minēts trešais anomālās trihromatijas veids – tritanomālija. Anomālās tritanomālijas gadījumos skaidro ar būtiski samazinātu spektrālo diferenci starp S un M vāļišu fotopigmentu absorbcijas maksimumiem. Normas gadījumos spektrālā diference starp S un M vāļišu absorbcijas maksimumiem ir ~100 nm, tiesa literatūras avotos nav dokumentētu

gadījumu, kas apstiprinātu būtisku S vālišu fotopigmentu gaismas absorbcijas spektru nobīdi redzamās gaismas vidējo un garo viļņu virzienā. Izmantojot adaptīvās optikas priekšrocības, Baraas et al. 2007. gadā veiktajā pētījumā tika noskaidrots, ka iedzimti tritan tipa deficīti vairumā gadījumu progresē cilvēka dzīves laikā. Pētījumā tika konstatēts, ka tritan tipa deficītus var izskaidrot ar progresējošu S vālišu funkcijas zudumu.

2.3.4. Monohromāzija

Monohromātiskās krāsu redzes gadījumus iedala – nūjiņu monohromāzijā, S vālišu monohromāzijā un atipiskā monohromāzijā. Nūjiņu monohromāzijas gadījumos pilnībā iztrūkst visi trīs vālišu fotoreceptoru tipi, t.i., gaismas jutību nodrošina tikai nūjiņas, savukārt S vālišu monohromāzijas gadījumos tīklenē līdztekus nūjiņu fotoreceptoriem konstatē arī S vālītes. Atipiskās monohromāzijas gadījumi nav viennozīmīgi apstiprināti, t.i., šajos gadījumos pieņem, ka cilvēku tīklenēs ir konstatējamas L vai M vālītes, t.i., iztrūkst S un M vai S un L vālītes. S vālišu un nūjiņu monohromāzijas gadījumos fotopiskos apgaismojuma apstākļos konstatē vāju hromatisko izšķirtspēju, savukārt mezopiskos apgaismojuma apstākļos S vālišu monohromātu krāsu izšķirtspēja ir salīdzināma ar krāsu izšķirtspēju dihromātiskas krāsu redzes gadījumos, jo S vālišu monohromātu gadījumā mezopiskos apgaismojuma apstākļos vienlaikus darbojas kā S vālītes tā nūjiņas. Diemžēl S vālišu un nūjiņu monohromāzijas gadījumos līdztekus samazinātai hromatiskajai izšķirtspējai konstatē samazinātu redzes asumu, centrālu skotomu, nistagmu un ekscentrisku fiksāciju (Pascual-Camps, 2018; Moskowitz et al, 2009). Par cik S-vālišu monohromāzijas gadījumos tiek skartas L un M vālītes, tad sagaidāms, ka šī krāsu redzes deficīta sastopamības biežums ir 0,01% vīriešu un 0,0000001% sieviešu populācijā. S – vālišu monohromāzijas sastopamības biežums sieviešu un vīriešu populācijā aprēķināts noskaidrojot teorētisko sastopamības biežumu abiem sarkani-zaļās dihromātijas veidiem vienai personai. Atipiskās monohromāzijas gadījumi nav pārliecinoši apstiprināti, jo šajos gadījumos sagaidāms, ka personai iztrūkst krāsu izšķirtspēja bez jebkādiem citiem redzes funkciju traucējumiem. Teorētiskie aprēķini liecina, ka atipiskās monohromāzijas gadījumu sastopamības biežums populācijā ir 0,00001%. Atipiskās monohromāzijas sastopamības biežums aprēķināts pieņemot, ka personas hromosomas satur informāciju par fotopigmentiem, kas kodē krāsu redzes deficītu gadījumus tritanopiju un protanopiju vai tritanopiju un deiteranopiju (Sharpe et al., 1999).

2.4. Normai atbilstošas krāsu redzes un dzimumu atšķirības

Daļā sabiedrības valda uzskats par ievērojamām krāsu redzes atšķirībām starp sievietēm un vīriešiem. Minētais apgalvojums tiek pamatots ar divām objektīvām atradnēm, t.i., krāsu redzes deficītu sastopamības biežums sieviešu vidū ir mazāks, un sievietēm ir ievērojami bagātāks vārdu krājums, lai raksturotu krāsainos stimulus. Pētījumu rezultāti apstiprina, ka vīriešu populācijā sarkani-zaļo krāsu redzes deficītu sastopamības biežums ir ~16 reizes augstāks nekā sieviešu populācijā, kā arī ir apstiprināts, ka sievietēm ir ievērojami bagātāks vārdu krājums, lai aprakstītu un savstarpēji izšķirtu krāsainos stimulus (Rich, 1977; Nowaczyk, 1982; Thomas, 1978). Tiesa, salīdzinot sniegumu krāsu redzes testos starp sievietēm un vīriešiem, kam nav konstatēti krāsu redzes deficīti, un no tālākas analīzes izslēdzot sievietes krāsu redzes deficītu nesējas, būtiskas atšķirības starp dzimumiem nav novērojamas (Hood et al., 2006), tiesa, Rodríguez-Carmona et al., 2008 gada pētījumā konstatēts, ka CAD testā sieviešu grupai konstatētas statistiski būtiski augstākas RG hromatiskās jutības sliekšņu vērtības.

Izvērtējot sniegumu krāsu redzes testos cilvēku populācijai bez krāsu redzes deficītiem, ir apstiprināts, ka sieviešu un vīriešu grupas uzrādītie rezultāti liecina par būtiskām atšķirībām grupas ietvaros. Zinot, ka sievietēm ir divas X hromosomas, kur gadījumos, ja viena no X hromosomām satur informāciju par L un M fotopigmentiem, kas atbilst normas gadījumiem, un otra, kas satur informāciju par traucētu krāsu redzi, tad sieviešu gadījumā krāsu redzes deficīts neizpaužas. Ja protan un deitan krāsu redzes deficītu sastopamības biežums vīriešu populācijā ir 2,01% un 6,28%, tad sagaidāms, ka protan un deitan krāsu redzes deficītu nesēju sastopamības biežums sieviešu populācijā ir 3,69% un 11,52%. Izslēdzot krāsu redzes deficītu un krāsu redzes deficītu nesēju gadījumus, var pieņemt, ka ~84,11% un ~91,71% no sieviešu un vīriešu populācijas krāsu redze atbilst normālās trihromatijas gadījumiem (skatīt 1. pielikumu). Tiesa, salīdzinot iepriekš minēto grupu sniegumu grupas un starp grupu ietvaros konstatē statistiski būtiskas atšķirības (Pardo et al., 2007). Pētījumos ir apstiprināts, ka vīriešu populācijā ir konstatējamas divas spektrāli atšķirīgas L un M fotopigmentu versijas. Ir noskaidrots, ka L un M vāļišu fotopigmentu kodējošos gēnos aminoskābēm atsevišķās pozīcijās ir būtiska ietekme uz fotopigmentu gaismas absorbcijas funkcijām, piemēram, L un M fotopigmentus kodējošā aminoskābju 180 pozīcijā alanīnu aizstājot ar serīnu, konstatē L fotopigmenta gaismas absorbcijas spektru nobīdi redzamās gaismas garo viļņu virzienā. Sanocki et al. 1993 pētījumā ir konstatēts, ka L-ser fotopigmenta gaismas absorbcijas spektrs ir par 2,6 līdz 4,3 nm nobīdīts redzamās gaismas garo viļņu virzienā salīdzinājumā ar L-ala fotopigmenta modifikāciju. Minētās atradnes ir būtiskas, jo L-ser un L-ala fotopigmentu

sastopamības biežums vīriešu populācijā sasniedz 62% un 38% (Winderickx et al., 1992). He&Shevell 1994 gada pētījumā konstatēts, ka snieguma atšķirības anomaloskopa testā var skaidrot pieņemot, ka vīriešu populācijā ir iespējamas L fotopigmentu gaismas absorbcijas spektru atšķirības līdz 5 nm un/vai L fotopigmentu optiskā blīvuma atšķirības. Par cik sievietēm ir divas X hromosomas to tīklenēs var konstatēt kā vienu L fotopigmenta modifikāciju tā abas L fotopigmenta modifikācijas vienlaikus. Balstoties uz pieņēmumu, ka 84,11% sieviešu populācijas ir tikai normai atbilstoši L un M fotopigmentu varianti, un zinot, ka L-ser un L-ala fotopigmentu versiju sastopamības biežums ir 62% un 38%, tad var paredzēt, ka ~40% (39,63%) sieviešu populācijas ir konstatējami trīs spektrāli atšķirīgi fotopigmentu tipi redzamas gaismas vidējo un garo gaismas viļņu daļā. Neitz et al 1998. gada pētījumā, veicot spektrālos mērījumus cilvēku donoru tīklenēm ir apstiprināts, ka sieviešu tīklenēs aptuveni 50% gadījumu ir konstatējamas abas L fotopigmentu versijas. M fotopigmenta M-ala versija cilvēku populācijā bez krāsu redzes deficītiem ir sastopama ievērojami biežāk nekā M-ser versija, t.i., 94% un 6% gadījumu. Balstoties uz augstāk minēto var pieņemt, ka nelielai daļai sieviešu populācijas ir 4 fotopigmentu tipi, kas nodrošina gaismas absorbciju redzamās gaismas vidējo un garo viļņu daļā.

2.4.1. Heterozigotiska krāsu redze

Balstoties uz pieņēmumu, ka vīriešu populācijā protan un deitan krāsu redzes deficītu sastopamības biežums ir 2,01% un 6,28%, tad sagaidāms, ka sieviešu populācijā 3,69%, 11,52%, 0,25% gadījumu ir protan, deitan, protan un deitan krāsu redzes deficītu nesēji (skatīt 1. pielikumu). Būtiski izšķirt, ka krāsu redzes deficītu gadījumos ir jāizšķir vai personas X hromosomas satur informāciju par fotopigmentiem, kas atbilst sarkani-zaļās dihromātijas vai anomālās trihromātijas gadījumiem. Sievietēm, kuru X hromosomas satur informāciju par anomālajai trihromātijai atbilstošajiem fotopigmentiem, ir sagaidāmi vismaz 4 spektrāli atšķirīgi fotopigmentu tipi. Par cik vāji izteiktas anomālās trihromātijas gadījumos paredz ~10-12 nm spektrālo diferenci starp L un M vāļišu fotopigmentu absorbcijas maksimumiem, tad šo personu tīklenēs ir konstatējami 3 būtiski atšķirīgi fotopigmentu tipi, kas nodrošina gaismas absorbciju redzamās gaismas vidējo un garo gaismas viļņu daļā. Jordan&Mollon 1993 gada ierosināja, hipotēzi par tetrahromātisku krāsu redzi. Zinātnieki izvirzīja pieņēmumu, ka papildus fotopigments var nodrošināt papildus krāsu oponento kanālu. Tiesa, hipotēze, par tetrahromātisku krāsu redzi nav pārliecinoši apstiprināta. Nereti tiek pieņemts, ka fotopigmentu skaitam ir tieša korelāciju ar krāsu oponento kanālu skaitu. Jacobs 1984 gada pētījumā konstatēts, ka sieviešu kārtas primātiem ar diviem spektrāli atšķirīgiem fotopigmentu tipiem konstatē dihromātisku krāsu redzes raksturu, savukārt fotopigmentu skaitam

pieaugot līdz 3 konstatē trihromatisku krāsu redzes raksturu, t.i., būtiski labāku krāsu izšķirtspēju. Tiesa, cilvēku populācijā fotopigmentu skaitam pieaugot no 3 līdz 4 būtiskus uzlabojumus krāsu izšķirtspējai nenovēro. Ja spektrāli atšķirīgo fotopigmentu skaits būtu noteicošais faktors krāsu dimensiju skaitam, tad tetrahromātiska krāsu redze sieviešu populācijā būtu bieži sastopama, jo teorētiskie aprēķini apstiprina, ka ~40% no sieviešu populācijas tīklenēs ir S un M fotopigmenti, kā arī divas spektrāli atšķirīgas L fotopigmentu versijas. Dihromātisku krāsu redzes deficītu nesēju gadījumos paredz 3 spektrāli atšķirīgus fotopigmentu tipus. Pētījumu rezultāti liecina, ka sievietes deitan krāsu redzes deficītu nesējas pieļauj vairāk kļūdu pseidoizohromatisko plašu testos (Baraas, 2008; Jordan&Mollon, 1993), kā arī to uzrādītie sarkani-zaļajam krāsu oponentajam krāsu kanālam atbilstošie RG hromatiskās jutības sliekšņi CAD testā ir 60% augstāki nekā kontroles grupai (Konstantakopoulou et al., 2012). Tiesa, protan krāsu redzes deficītu nesējiem konstatē par 28% zemākas RG hromatiskās jutības sliekšņu vērtības salīdzinājumā ar kontroles grupu. Atšķirības sniegtā krāsu redzes testos starp protan un deitan krāsu redzes deficītiem skaidro balstoties uz pieņēmumu, ka protan krāsu redzes deficītu nesēju gadījumos sagaidāmā L un M vāļišu daudzumu attiecība ir savstarpēji līdzīgāka, t.i., ~1:2, savukārt deitan krāsu redzes deficītu nesēju gadījumos 5:1. L un M vāļišu daudzumu attiecības krāsu redzes deficītu nesēju gadījumos aprēķinātas pieņemot, ka katra X hromosoma kodē L un M vāļišu pigmentu daudzumu attiecību 2:1 (Hood et al., 2006). Gunther&Dobkins 2002 veiktajā pētījumā konstatēts, ka cilvēkiem ar līdzīgākām L:M vāļišu daudzumu attiecībām konstatē zemākas sarkani-zaļajam krāsu oponentajam kanālam atbilstošās sliekšņu vērtības, t.i., jo L un M vāļišu daudzumu attiecība tuvāk proporcijai 1:1, jo augstāka sarkani-zaļā krāsu oponentā kanāla izšķirtspēja. Teorētiskie aprēķini paredz, ka 0,25% sieviešu X hromosomas satur informāciju par protan un deitan krāsu redzes deficītiem. Augstāk minētajos gadījumos sarkani-zaļie krāsu redzes deficīti neizpaužas par, cik tīklenē ir kā L tā M tipa fotoreceptori (Tait&Carrol, 2009). Protan un deitan krāsu redzes deficītu nesēju gadījumos ir sagaidāms, ka visi sieviešu kārtas pēcnācēji ir obligāti sarkani-zaļo krāsu redzes deficītu nesēji, savukārt visiem vīriešu kārtas pēcnācējiem ir sagaidāms kāds no sarkani-zaļajiem krāsu redzes deficītiem.

2.4.2. Ar vecumu saistītās hromatiskās jutības izmaiņas

Pateicoties redzes sistēmas spējai adaptēties apkārtējās vides apstākļiem, vairumam no mums šķiet, ka mūsu spēja izšķirt krāsainos stimulus saglabājas nemainīgi augsta visā dzīves garumā, kas ir tikai daļēji patiess apgalvojums. Pētījumi liecina, ka pastāv neiroplastiski mehānismi, kas kompensē gaismas absorbcijas efektus preretinālajās struktūrās, jo pretējā gadījumā pieaugot

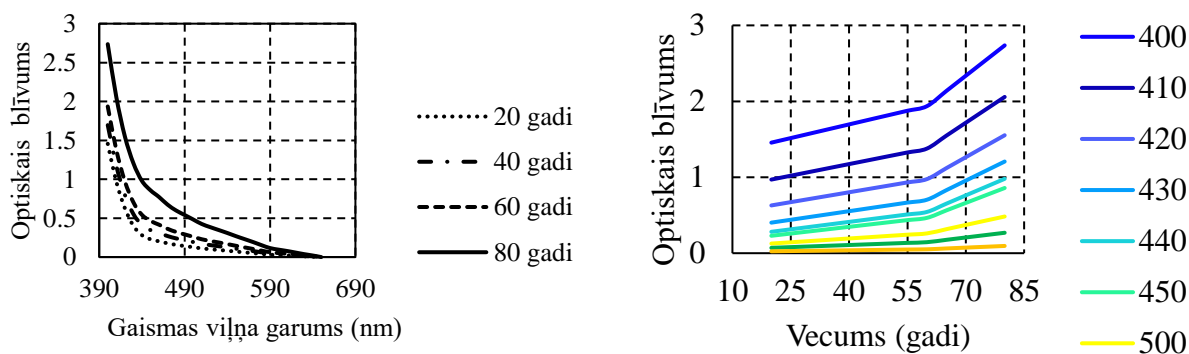
vecumam un palielinoties spektrāli selektīvai gaismas absorbcijai redzamās gaismas īso viļņu spektra daļā, apkārtējās vides objekti šķīst "dzeltenāki", kas neatbilst patiesībai. Ir konstatēts, ka pieaugot vecumam būtiski samazinās acs lēcas gaismas caurlaidība (Weale 1988; Pokorny 1987), zīlītes diametrs sašaurinās (Guillon et al, 2016), vāļīšu fotoreceptoru gaismas absorbcijas efektivitāte (Werner&Steele, 1988) un tīklenes ganglionāro šūnu skaits samazinās (Curcio&Drucker, 1993). Pētījumu rezultāti norāda, ka cilvēku sniegumu krāsu redzes eksperimentos ietekmē ne tikai fizioloģiskas un anatomiskas izmaiņas acs audos un struktūrās, bet arī izmaiņas augstākos vizuālās informācijas centros. Veicot krāsu redzes izmeklējumus ar tādiem krāsu redzes testiem kā FM-100 (Verriest, 1963, Knoblauch et al.,1987, Kinnear&Sahraie, 2002), CCT (Paramei, 2012; Paramei&Oakley, 2014), CAD (Knoblauch et al., 2001; Barbur&Rodriguez-Carmona, 2016), ir konstatēts, ka krāsu izšķirtspēja turpina uzlaboties vecuma grupā no 18 līdz 30 gadiem, savukārt vecuma grupā 30-40 būtiskas krāsu izšķirtspējas atšķirības nekonstatē un vecuma grupā pēc 40 gadiem novēro pakāpenisku hromatiskās jutības sliekšņu paaugstināšanos visos virzienos krāsu telpā. Barbur&Rodriguez-Carmona 2016 gada pētījumā apstiprināts, ka vecuma grupā virs 40 gadiem hromatiskās jutības sliekšņu vērtības sarkani-zaļajam un dzelteni-zilajam krāsu oponentajam kanālam pieaug par ~1% un ~1,6% desmitgadē. Straujāks hromatiskās jutības sliekšņu vērtību pieaugums dzelteni-zilajam krāsu oponentajam kanālam tiek skaidrots ar redzamās gaismas īso viļņu daļas paaugstinātu absorbciju acs lēcā, zīlītes diametra sašaurināšanos, fotoreceptoru jutības samazināšanos un ar vecumu saistītām fizioloģiskām izmaiņām tīklenē pieaugot vecumam. Krāsu izšķirtspējas uzlabošanās gados jauniem cilvēkiem skaidro ar redzes uztveres sistēmas nobriešanu un labāku krāsu redzes testu izpildes nosacījumu izpratni.

Hromatiskās jutības sliekšņu paaugstināšanos ar pieaugošu vecumu nevar izskaidrot tikai ar acs lēcas gaismas caurlaidības samazināšanos un fotoreceptoru jutības samazināšanos. Gao un Hollyfield pētījuma rezultāti norāda, ka vāļīšu fotoreceptoru skaits foveolā būtiski nesamazinās pieaugot vecumam, savukārt nūjiņu un tīklenes ganglionāro šūnu skaits samazinās, kas var skaidrot hromatiskās jutības sliekšņu vērtību paaugstināšanos gados vecākiem dalībniekiem.

2.4.3. Acs lēcas gaismas caurlaidības izmaiņas dzīves laikā

Pokorny et al., 1987 ierosināja bilineāru modeli, kas skaidro acs lēcas gaismas absorbcijas izmaiņas atkarībā no vecuma. Modelis satur divas komponentes TL_1 un TL_2 . Komponente TL_1 raksturo acs lēcas gaismas caurlaidības samazināšanos vecumā pēc 20 gadiem, savukārt komponente TL_2 raksturo nemainīgo acs lēcas gaismas absorbcijas spektra daļu, kas nemainās vecumā pēc 20 gadiem. Modelis nodrošina iespēju novērtēt gaismas absorbcijas daudzumu acs lēcā

redzamās gaismas spektra daļā no 390 līdz 640 nm vecuma grupās no 20 līdz 60 gadiem un cilvēkiem vecākiem par 60 gadiem. Piedāvātais modelis demonstrē, ka gaismas absorbcija acs lēcā graduāli pieaug vecumā no 20 līdz 60 gadiem, savukārt vecuma grupā pēc 60 gadiem paredz ievērojamu gaismas absorbcijas palielināšanos. Modelis atspoguļo ne tikai acs lēcas gaismas absorbcijas izmaiņas dzīves laikā veseliem cilvēkiem, bet arī cilvēkiem ar pirmā tipa cukura diabētu. Cukura diabēta gadījumos tiek ierosināts izmantot modeļa modifikāciju, kas paredzēta cilvēkiem vecumā pēc 60 gadiem, tiesa, lai aprēķinātu lēcas absorbcijas profilu izmanto nevis pacienta vecumu, bet 60 gadi plus cik gadu kā konstatēts cukura diabēts. Ir konstatēta tendence, ka redzamās gaismas spektra īso viļņu daļā absorbējas ievērojami vairāk gaismas kā redzamās gaismas vidējo un garo viļņu daļās neatkarīgi no vecuma. Pieaugot vecumam, straujāku gaismas absorbcijas pieaugumu acs lēcā novēro redzamās gaismas īso viļņu daļā, savukārt redzamās gaismas garo gaismas viļņu daļā gaismas absorbcijas izmaiņas acs lēcā pieaugot vecumam ir ievērojami mazākas (skatīt att. 2.6). Gaismas absorbcijas palielināšanos acs lēcā skaidro ne tikai lēcas materiāla spektrālās absorbcijas īpašību izmaiņām, bet arī ar lēcas fizisko izmēru palielināšanos dzīves laikā (Wang et al., 2022). Gaismas absorbcijas palielināšanos acs lēcā sakarā ar tās fizisko izmēru palielināšanos var aprakstīt izmantojot Beer-Lambert likumu.



2.6. att. Grafikā pa labi attēlota gaismas absorbcija vecuma grupām 20, 40, 60 un 80 gadiem redzamās gaismas diapazonā no 390 līdz 640 nm. Grafikā pa kreisi attēlota gaismas absorbcija (gaismai ar viļņa garumiem 400, 450, 500, 550, 600 un 640 nm) acs lēcā atkarībā no vecuma. Grafiki izveidoti balstoties uz Pokorny *et al.*, 1987 ierosināto acs lēcas gaismas absorbcijas modeli.

2.4.4. Neuroplastiskie mehānismi

Wuerger 2013. gada pētījumā ir apstiprināts, ka spēja izšķirt virssliekšņa stimulus vairumā gadījumu saglabājas nemainīgi augsta vecuma grupā no 18 līdz 75 gadiem, tiesa, pieaugot vecumam, novēro krāsu izšķirtspējas sliekšņu vērtību pieaugumu. Pētījumos ir apstiprināts, ka virssliekšņu stimulu uztvere ir relatīvi nemainīga dzīves laikā. Krāsu oponento kanālu atbildes reakcija uz stimulu tiek aprēķināta kā starpība starp dažādo vāļišu receptoru reģistrētajiem

signāliem. Ir apstiprināts, ka, pieaugot indivīdu vecumam, novēro vienmērīgu visu vāļišu fotoreceptoru funkciju degradāciju, kas izskaidro stabilu krāsu oponento kanālu darbību visā dzīves garumā. Proti, ja atsevišķo vāļišu receptoru tipu jutība samazinās vienādā apjomā, tad šo receptoru signālu diference saglabājas nemainīga (Wuerger, 2013; Werner, 1996). Krāsu redzes pētījumu rezultāti liecina, ka mūsu krāsu uztveres mehānismi spēj kompensēt pieaugošos gaismas absorbcijas efektus acs lēcā un samazinātu fotoreceptoru jutību, par ko liecina relatīvi nemainīga krāsu uztvere visā dzīves laikā. Redzes uztveres sistēma spēj adaptēties, t.i., saglabāt krāsu konstantumu arī tajos gadījumos, ja tiek konstatētas būtiskas apgaismojuma spektrāla sastāva izmaiņas, piemēram, balta papīra lapa vienmēr izskatās balta neatkarīgi no gaismas avota spektrālā sastāva. Ilgstošas adaptācijas pētījumi liecina, ka redzes uztveres sistēma spēj ne tikai adaptēties pēkšņām apgaismojuma spektrālā sastāva vai intensitātes izmaiņām, bet arī mainīt krāsu uztveri, analizējot apkārtējās vides spektrālo informāciju ilgākos laika periodos. Krāsu uztveres sistēmas spēja adaptēties ir būtiska, lai sekmīgi izšķirtu apkārtējās vides objektus dažādos apgaismojuma apstākļos (Neitz et al., 2002). Pētījumos ir apstiprināts, ka ne vien gados jaunu (Neitz et al., 2002), bet arī vecāku cilvēku (Werner et al., 2003) redzes uztveres sistēma spēj adaptēties būtiskām apgaismojuma spektrālā sastāva izmaiņām. Werner et al. 2003. gada pētījumā tika konstatēts, ka cilvēkiem ar kataraktas izraisītām izmaiņām acs lēcā, ir nepieciešama izmērāmi lielāka īso vāļišu receptoru stimulācija, lai radītu ahromātiska stimula sajūtu salīdzinājumā ar gados jauniem cilvēkiem. Atkārtojot eksperimentu pēc kataraktas operācijas, tika konstatēts, ka, adaptējoties kataraktas izraisītajām gaismas caurlaidības izmaiņām acs lēcā, ir novērojama ievērojami samazināta jutība uz redzamās gaismas vidējo un garo viļņu daļu, par ko liecina pētījuma dalībnieku ahromātiskajam stimulam atbilstošās krāsu koordinātes. Veicot atkārtotus ahromātiskā punkta mērījumus 3 mēnešu pēc kataraktas operācijas, tika konstatēts, ka redzes uztveres sistēma ir spējusi adaptēties, proti, pētījuma dalībniekiem konstatētas normai atbilstošas ahromātiskā punkta krāsu koordinātes. Līdzīgas atradnes konstatētas pētījumos ar gados jauniem cilvēkiem, kuru apkārtējās vides apgaismojums tika mainīts divos veidos, t.i., telpu apgaismošanai izmantojot gaismas avotus, kas būtiski atšķiras no standarta baltās gaismas avotiem, vai ar brillēm, kurās iestrādāti spektrāli selektīvi filtri. Pētījuma ietvaros tika apstiprināts, ka atgriežoties vidē ar normai atbilstošo apgaismojumu, krāsu redzes izmaiņas ir konstatējamas līdz pat 2 nedēļām pēc eksperimenta, kas apstiprina redzes uztveres spēju pielāgoties apkārtējās vides apgaismojuma izmaiņām (Neitz et al., 2002). Neitz et al. 2002. gada pētījuma rezultāti ierosina, ka adaptācija noris augstākajos krāsu informācijas apstrādes centros. Pētījumā tika konstatēts, ka, aizklājot vienu aci

un uzturoties vidē ar būtiski izmainītiem apgaismojuma apstākļiem, līdzīgas krāsu uztveres izmaiņas ir konstatējamas arī aizklātajā acī, kas netika stimulēta ar apgaismojumu, kas ir būtiski atšķirīgs no standarta apgaismojuma. Savukārt Werner et al. 2003. gada pētījumā līdzīgu atradni neapstiprina. Periodiski izmeklējot kataraktas pacientu, kam kataraktas operācija abās acīs veikta ar 8 mēnešu intervālu, nenovēro, ka kataraktas skartā acs būtiski ietekmētu krāsu redzes pieredzi. Minētā atradne liecina, ka neirālais substrāts ilgtermiņa krāsu adaptācijas mehānismiem atrodas zemākos hromatiskās informācijas apstrādes centros nekā ierosināts Neitz et al. 2002. gada pētījumā. Būtiski ievērot, ka abu eksperimentu gadījumā ir ievērojamas atšķirības, t.i., Neitz et al. 2002. gada pētījumā adaptācijas perioda ilgums bija 10-24 dienas, savukārt Werner et al. 2003. gada pētījumā pacientiem katarakta attīstījās pakāpeniski ievērojami ilgākā laika posmā, kā arī periods starp abu acu kataraktas operācijām bija ievērojami ilgāks.

2.4.5. Makulas pigments

Cilvēku tīklenes centrālajā daļā ir konstatējami kartenoīdu grupas pigmenti luteīns, zeaksantīns un mezo-zeaksantīns, kas veido makulas pigmentu. Tiek pieņemts, ka makulas pigments nodrošina tīklenes centrālās daļas protektīvo funkciju, jo absorbē gaismu redzamās gaismas īso viļņu daļā un samazina oksidatīvo stresu (Loskutova et al., 2013). Eksperimentāli ir apstiprināts, ka vidējās makulas pigmenta optiskā blīvuma vērtības tīklenes centrālajā daļā cilvēku populācijā ir robežās no 0,21 līdz 0,49 (Stringham&Stringham, 2015), savukārt jau 8° grādus no tīklenes centra makulas pigments nav konstatējams. Pētījumu rezultāti liecina, ka makulas pigmenta optiskā blīvuma vērtības ievērojami variē cilvēku populācijā, kā arī makulas pigmentu daudzumu tīklenē būtiski ietekmē dzīvesveida paradumi (Hammond, 1996, Kirby et al., 2010) un uzturs (Hammond et al., 1997; Nolan et al., 2007). Makulas pigmenta ietekme uz fotoreceptoru tīklenes centrālajā daļā nav viennozīmīgi apstiprināta. Hammond et al pētījumā tika novērots, ka pieaugot pētījuma dalībnieku vecumam konstatē samazinātu makulas pigmenta optisko blīvumu un S vāļišu jutību. Balstoties uz augstāk minētajām atradnēm, tika ierosināts, ka makulas pigments nodrošina S vāļišu protektīvo funkciju (Hammond et al., 1998). Werner et al. 2000 gada pētījumā konstatē relatīvu zemu sakarību starp pētījuma dalībnieku vecumu un makulas pigmenta optiskā blīvuma vērtībām, kas liedz apstiprināt makulas pigmenta protektīvo funkciju. Pētījuma autori ierosina, ka S vāļišu jutības izmaiņas starp personām ar būtiski atšķirīgām makulas pigmenta optiskā blīvuma vērtībām var izskaidrot pieņemot, ka palielinoties makulas pigmenta optiskajam blīvumam, S vāļišu signāli tiek selektīvi pastiprināti, lai kompensētu palielinātos gaismas absorbcijas efektus. Makulas pigmenta koncentrācija tīklenes audos būtiski ietekmē krāsu

saskaņošanas eksperimentu rezultātus, tiesa, līdzīgas atradnes attiecībā uz hromatiskās jutības mērījumiem nav konstatētas. Rodriguez-Carmona et al. 2006 gada pētījumā ir apstiprināts, ka 12 mēnešu periodā ikdienā lietojot uztura bagātinātājus, kas satur luteīnu un zeoksantīnu, ir novērojams būtisks makulas pigmenta koncentrācijas pieaugums tīklenē, kas nerezultējas ar būtiski samazinātu hromatisko izšķirtspēju. Pētījuma autori apstiprina, ka pretstatā sagaidāmajam dzeltenī-zilā krāsu oponentā kanāla jutība nesamazinās, savukārt sarkani-zaļā krāsu oponentā kanāla gadījumā novēro nelielu hromatiskās jutības paaugstināšanos. Rodriguez-Carmona et al. pētījumā veiktie aprēķini apstiprina, ka makulas pigmenta optiskā blīvuma vērtībām pieaugot no 0 līdz 1 vienībai, būtiski neietekmē tīklenes fotoreceptoru jutību fotopiskos apgaismojuma apstākļos. Pētījuma rezultāti apstiprina makulas pigmenta koncentrācijas relatīvi nelielo ietekmi uz sniegumu krāsu redzes testos, kas balstīti uz hromatiskās jutības mērījumiem. Zinātnieki paredz, ka personām ar ievērojami augstāku makulas pigmenta koncentrāciju tīklenē, iespējams hromatiskās jutības samazinājums samazinoties testa stimulu intensitātei. Pieņem, ka samazinoties apgaismojuma līmenim, indivīdiem, kuru tīklenēs makulas pigmenta koncentrācija ir augstāka, ir sagaidāms augstāks neirālā trokšņa līmenis, kas samazina hromatisko izšķirtspēju.

2.5. Krāsu sakārtošanas testi

Krāsu sakārtošanas testu uzbūves principi ir krasi atšķirīgi no tādiem krāsu redzes testiem kā HRR, Ishihara, CAD, CCT vai anomaloskopa tests. Krāsu sakārtošanas testi nav paredzēti, lai izvērtētu hromatisko jutību noteiktos virzienos krāsu telpā vai izvērtētu spektrālās atšķirības starp dažādajiem vāļišu fotoreceptoriem, turpretī krāsu sakārtošanas testiem izvērtē krāsu izšķirtspēju kopumā. Izvērtējot pētījuma dalībnieku vai pacientu izvēlētās krāsu kauliņu sakārtošanas secības, ir iespējams noskaidrot vai krāsu redze atbilst normai, vai kādam no zināmajiem krāsu redzes deficītiem. *Farnsworth* ierosināja izveidot krāsu redzes testu izmantojot *Munsell* sistēmas krāsainos stimulus ar gaišuma vērtību 5 un piesātinājuma vērtību 4 vienības. *Munsell* krāsu telpā izšķir 10 krāsu toņus - zils, zili-zaļš, zaļš, dzeltenī-zaļš, dzeltens, dzeltenī-sarkans, sarkans, violeti-sarkans, violets un violeti-zils. Katram atsevišķajam krāsu tonim atbilst 10 dažādi krāsaini stimuli, proti, katram piesātinājuma un gaišuma līmeņu pārim atbilst 100 stimulu. *Munsell* krāsu sistēmas stimuli izraudzīti tā, lai vienas krāsu dimensijas, t.i., tonis, gaišums un piesātinājums, ietvaros secīgie stimuli atbilstu tikko pamanāmā sliekšņa definīcijai. *Munsell* sistēmas stimuli ir izvēlēti tā, lai personas bez krāsu redzes deficītiem, secīgo stimulu atšķirības varētu konstatēt ~50% gadījumu. Ievērojot, ka atsevišķus krāsainos stimulus ir būtiski grūtāk izšķirt, *Farnsworth* samazināja

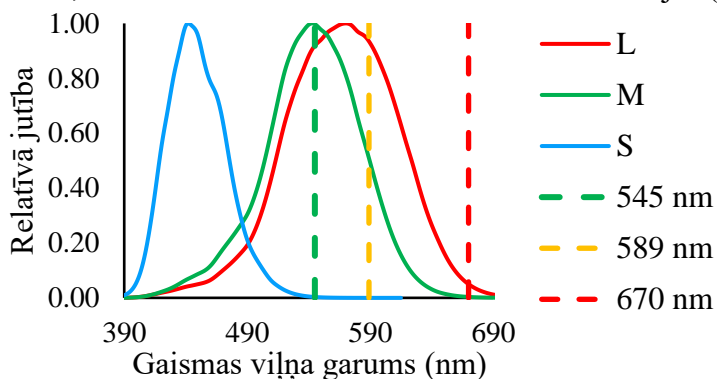
krāsaino stimulu skaitu no 100 uz 85. FM100 krāsu redzes tests satur 4 krāsu kauliņu komplektus, kur pirmais no tiem satur 22 kauliņus, savukārt pārējie trīs komplekti pa 21 vienam kauliņam katrs. Katrs FM100 testa komplekts satur divus enkurkauliņus jeb references kauliņus, kas novietoti katra komplekta sākumā un beigās. Persona, kas veic krāsu redzes izmeklējumu, haotiski izvieta viena komplekta kauliņus un sniedz instrukcijas kā izpildāms krāsu sakārtošanas tests. Pētījuma dalībnieks vai pacients tiek instruēts sakārtot krāsainos kauliņus starp abiem enkurkauliņiem tā, lai jebkuri divi blakus esošie kauliņi būtu pēc iespējas līdzīgāki viens otram. Pētījumu dalībnieku sniegumu FM100 krāsu redzes testā var izvērtēt izmantojot kā vienkāršas kļūdu skaitīšanas metodes tā arī komplicētas metodes, kas nodrošina iespēju detalizētāk izvērtēt pacientu vai pētījuma dalībnieku sniegumu (Kitahara, 1984; Allan, 1985; Smith et al., 1985; Knoblauch, 1987; Vingrys&KingSmith, 1988).

D15 tests ir FM100 testa atvasinājums, kas satur 15 no 85 FM100 testa kauliņiem. D15 testa kauliņi ir izvēlēti, tā lai atsevišķi kauliņu pāri atbilstu protan, deitan un tritan konfūziju līnijām (Evans et al., 2020). D15 krāsu sakārtošanas tests tika radīts, lai identificētu personas ar dihromātisku krāsu redzes raksturu no personām, kuru krāsu redze atbilst normai, vai gadījumiem, kad konstatējami vāji vai vidēji izteikti krāsu redzes traucējumi. D15 krāsu redzes testa jutība ir zema, proti, aptuveni 50% gadījumu cilvēki ar vāji un vidēji izteiktiem krāsu redzes deficītiem spēj sekmīgi sakārtot testa stimulus bez kļūdām. DS15 testā izmantoto stimulu gaišuma un piesātinājuma vērtības ir 8 un 2, kas padara testu grūtāk izpildāmu, tiesa, metodes jutība būtiski neuzlabojas. D15 un DS15 testus izmanto, lai izvērtētu iegūtus krāsu redzes deficītus, kas ir kā sekas acu un vispārējām organisma saslimšanām, kaitīgiem dzīvesveida paradumiem vai darba vides apstākļiem.

2.6. Anomaloskopa tests

Anomaloskopa tests tiek uzskatīts par precīzāko metodi, lai diagnosticētu un izšķirtu sarkani-zaļās krāsu redzes deficītu veidus. Metode nodrošina iespēju konstatēt sarkani-zaļās dihromātijas gadījumus protanopiju un deiteranopiju, kā arī anomālās trihromātijas gadījumus protanomāliju un deiteranomāliju. Anomaloskopa testa stimuluss ir eliptisks un aizņem 2° redzes lauku, t.i., stimulss tiek projicēts foveolas apgabalā, kur vāļišu fotoreceptoru blīvums un jutība ir visaugstākā. Anomaloskopa testa stimulu veido trīs monohromātiski gaismas avoti ar gaismas viļņa garumiem 545, 589 un 670 nm. Gaismas avotu spektrālās īpašības izvēlētas tā, lai gaismas avots ar gaismas viļņa garumu 545 nm primāri tiktu absorbēts M vāļišu receptoros un gaismas avots ar gaismas viļņa garumu 670 nm L vāļišu fotoreceptoros, savukārt gaismas avots ar gaismas viļņa garumu 589 nm

tiek absorbēts kā L tā M vāļišu receptoru fotopigmentos. Būtiski minēt, ka anomaloskopa gaismas avotu spektri izraudzīti tā, lai maksimāli izvairītos no S vāļišu stimulācijas (skatīt att. 2.7).



2.7. att. Anomaloskopa testa gaismas avoti. Grafiks reproducēts pēc Squire et al., 2005.

Anomaloskopa testa stimuluss sastāv no divām daļām, proti, anomaloskopa testa stimula augšējā daļu veido gaismas avoti ar gaismas viļņa garumiem 545 un 670 nm, savukārt apakšējā daļu veido gaismas avots ar gaismas viļņa garumu 589 nm. Krāsu redzes izmeklēšanas laikā ar anomaloskopa testu, pacients tiek lūgts veikt krāsu saskaņošanas uzdevumu, proti, izvēlēties gaismas avotu ar gaismas viļņu garumiem 545, 589 un 670 nm intensitātes tā, lai testa stimula augšējā un apakšējā daļa būtu neizšķirama viena no otras. Anomaloskopa testā gaismas avotu ar gaismas viļņu garumiem 545 un 670 nm intensitātes tiek regulētas vienlaikus. 545 un 670 nm gaismas avotu starojuma intensitātes izvēlētas tā, lai cilvēkiem ar deiteranopiju (cilvēkiem ar minēto krāsu redzes deficīta veidu redzamās gaismas vidējo un garo gaismas viļņu daļā ir tikai viens krāsu jutīgs fotoreceptora tips – L vāļītes) abi augstāk minētie gaismas avoti nebūtu izšķirami ne tikai pēc to krāsas, bet arī pēc to spožuma. Palielinot gaismas avota ar gaismas viļņa garumu 545 nm starojuma intensitāti, proporcionāli tiek samazināta gaismas avota ar gaismas viļņa garumu 670 nm starojuma intensitāte un otrādi, lai saglabātu konstantu kopējo absorbētās gaismas intensitāti L vāļišu fotopigmentos. Anomaloskopa darbības principus var izskaidrot balstoties uz univariācijas principu, proti, ja L un M vāļišu receptoros kopējā absorbētā gaismas intensitāte no gaismas avotiem ar gaismas viļņu garumiem 545 un 670 nm ir sakrītoša ar absorbēto gaismas intensitāti no gaismas avota ar gaismas viļņa garumu 589 nm, tad abi stimuli ir savstarpēji neizšķirami (skatīt vienādojumus 2.24 un 2.25).

$$I_{589}M_{589} = I_{545}M_{545} + I_{670}M_{670} \quad (2.24)$$

$$I_{589}L_{589} = I_{545}L_{545} + I_{670}L_{670} \quad (2.25)$$

Tiesa, sniegumu anomaloskopa testā ietekmē ne tikai L un M vāļišu fotopigmentu gaismas absorbcijas īpašības, bet arī preretinālās absorbcijas apjoms (skatīt vienādojumu 2.27), L un M vāļišu fotopigmentu gaismas absorbcijas efektivitāte, t.i., optiskais blīvums. L un M vāļišu gaismas

absorbcijas efektivitāti raksturo L un M vāļišu fotopigmentiem atbilstošās optiskā blīvuma vērtības un ekstincijas spektru vērtības noteiktām gaismas viļņu garumu vērtībām (skatīt vienādojumu 2.28). Apvienojot vienādojumus 2.24 un 2.25 vienādojumos 2.26-2.28, var konstatēt, ka personas sniegumu anomaloskopa testā raksturo gaismas avotu ar gaismas viļņu garumu vērtībām 545 un 670 nm intensitāšu proporcija (skatīt vienādojumus 2.26-2.28) (He&Shevell, 1994).

$$\frac{I_{670}}{I_{545}} = \frac{M_{589}L_{545} - L_{589}M_{545}}{L_{589}M_{670} - M_{589}L_{670}} \quad (2.26)$$

$$\frac{I_{670}}{I_{545}} = \frac{T_{589}M_{589}T_{545}L_{545} - T_{589}L_{589}T_{545}M_{545}}{T_{589}L_{589}T_{670}M_{670} - T_{589}M_{589}T_{670}L_{670}} = \frac{T_{545}(M_{589}L_{545} - L_{589}M_{545})}{T_{670}(L_{589}M_{670} - M_{589}L_{670})} \quad (2.27)$$

$$\frac{I_{670}}{I_{545}} = \frac{T_{545} \left((1 - e^{MOD\epsilon_M(589)})(1 - e^{L_{OD}\epsilon_L(545)}) - (1 - e^{L_{OD}\epsilon_L(589)})(1 - e^{MOD\epsilon_M(545)}) \right)}{T_{670} \left((1 - e^{L_{OD}\epsilon_L(589)})(1 - e^{MOD\epsilon_M(670)}) - (1 - e^{MOD\epsilon_M(589)})(1 - e^{L_{OD}\epsilon_L(670)}) \right)} \quad (2.28)$$

Gadījumos, ja persona neizšķir visas iespējamās 670 un 545 nm gaismas avotu kombinācijas no gaismas avota ar gaismas viļņa garumu 589 nm konstatē deiteranopiju. Protanopijas gadījumos gadījumus konstatē līdzīgi, tiesa, pieaugot 670 nm gaismas avota intensitātei jāsamazina 589 nm gaismas avota intensitāte, lai visas 670 un 545 nm gaismas avotu spožuma kombinācijas šķistu neizšķiramas no gaismas avota ar gaismas viļņa garumu 589 nm. Protanomālijas gadījumos konstatē tendenci palielināt gaismas avota ar gaismas viļņa garumu 670 nm intensitāti virs normas, savukārt deiteranomālijas gadījumos novēro tendenci izvēlēties augstāku gaismas avota ar gaismas viļņa garumu 545nm intensitāti nekā normas gadījumos, lai veiktu krāsu saskaņošanas uzdevumu.

2.7. Datorizētie krāsu redzes testi

Līdztekus tādiem konvencionālajiem krāsu redzes testiem kā HRR un Ishihara pseidoizohromatisko plašu tests, anomaloskopa tests, krāsu sakārtošanas testi D15 un FM-100, ir izveidoti datorizētie krāsu testi kā CAD (*Colour Assesement and Diagnosis*), CTT (*Cambridge Colour Test*), Waggoner CCVT (*Computerized Colour Vision Test*). Drukātie krāsu redzes testi vairumā gadījumu tiek izmantoti redzes skrīningā un rutīnas krāsu redzes pārbaudēs, lai konstatētu personas krāsu redzes atbilstību normai. Pseidoizohromatisko plašu testi, pateicoties to priekšrocībām, ir visbiežāk praksē izmantotās metodes krāsu redzes izmeklēšanai. Pseidoizohromatisko plašu testi ne vienmēr nodrošina iespēju identificēt krāsu redzes deficīta veidu un izteiktību, sekot krāsu redzes izmaiņām dzīves laikā, kā arī pseidoizohromatisko plašu testu gadījumā nav izslēgta iespēja, ka persona traucētu krāsu redzi var iemācīties sekmīgi veikt krāsu redzes izmeklējumu. Būtisks drukāto krāsu redzes testu trūkums ir specializēta gaismas avota nepieciešamība, lai nodrošinātu pilnvērtīgu krāsu redzes izmeklējumu. Par cik drukāto krāsu redzes

testu stimulu krāsu nosaka no testu platēm atstarotās gaismas intensitāte un spektrālais sastāvs, korektam krāsu redzes izmeklējumam ir nepieciešams specifisks gaismas avots, lai drukāto krāsu redzes testu stimulu krāsas tiktu attēlotas korekti. Datorizēto krāsu redzes testu gadījumā hromatisko stimulu attēlošana nav atkarīga no apkārtējās vides apgaismojuma, t.i., pēc monitora kalibrēšanas krāsu attēlošanas precizitāte ir atkarīga tikai no ierīces. Šobrīd ir pieejamas vienkāršotas datorizēto krāsu redzes testu versijas kā Waggoner (Ng et al., 2015) un *CAD Web-based* (Seshadri et al., 2005), kas primāri paredzētas krāsu redzes skrīningam, kā arī komplicēti krāsu redzes testi kā CAD un CCT. Datorizēto testu versijas CAD un CCT tiek izmantotas, lai konstatētu krāsu redzes deficīta veidu un izteiktību, kā arī lai izvērtētu krāsu redzes izmaiņas sakarā ar normālu novecošanas procesu. Izmantojot datorizētos krāsu redzes testus, ir iespējams konstatēt un monitorēt krāsu redzes izmaiņas, kas ir kā sekas ar acīm saistītām saslimšanām vai medikamentu lietošanas blakusparādībām. Datorizētajos krāsu redzes testos tiek izmantoti stimuli, kas var saturēt kā statiskas -CCT tā arī dinamiskas -CAD komponentes.

2.7.1. CCT (*Cambridge Colour vision test*) datorizētais krāsu redzes tests

CCT stimul ir veidots balstoties uz *Stilling* un *Chibret* principiem, t.i., testa stimula fonu un krāsaino stimulu veido dažāda izmēra un spožuma elipses. Krāsainais testa stimul izveidots *Landolt C* stimula formā, testa stimula ārējais un iekšējais diametrs ir 4,3° un 2,1°, savukārt testa stimula atvērums ir 1° grāds redzes lauka 2,40 metru attālumā. Katrs testa stimul tiek demonstrēts 4 sekundes, kuru laikā pētījuma dalībnieks vai pacients tiek lūgts identificēt *Landolt C* stimula atvēruma pozīciju nospiežot atbilstošo pogu uz pults. CCT testam ir paredzētas divas izmeklējumu procedūras – “Trivector” un “Elipse”. “Trivector” procedūras ietvaros hromatiskā jutība tiek izvērtēta virzienos krāsu telpā, kuros primāri ir jutīgas L, M un S vāļītes, savukārt “Elipse” testa gadījumā tiek noskaidroti trīs minimālo izšķirtspējas elipšu parametri, kuru centra koordinātes atrodas uz tritan krāsu redzes deficītam atbilstošās konfūziju līnijas (Regan et al., 1994, Paramei, 2012). Minimālas izšķirtspējas elipses parametri – minimālais un maksimālais rādiuss, elipses asu rotācijas leņķis, tiek noskaidrots veicot hromatiskās jutības mērījumu 20 virzienos krāsu telpā, kas vienmērīgi izvietoti ap testa stimula fonam atbilstošajam koordinātēm. Krāsaino testa stimulu piesātinājums krāsu redzes izmeklējuma laikā tiek regulēts ar *multiple random staircase* metodi balstoties uz pētījuma dalībnieka vai pacienta iesniegtajām atbildēm. Hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tiek noskaidrotas jauktā secībā demonstrējot hromatiskos stimulus, kas atbilst dažādajiem virzieniem krāsu telpā. Analizējot pētījuma dalībnieka vai pacienta atbilžu korektumu, krāsaino

testa stimulu piesātinājums tiek palielināts vai samazināts līdz brīdim, kad tiek fiksēta sliekšņu vērtība. Krāsu redzes izmeklējums tiek pārtraukts brīdī, kad noskaidrotas 11 hromatiskās jutības sliekšņu vērtības katrā no virzieniem krāsu telpā. Hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tiek noskaidrotas aprēķinot vidējo vērtību no pēdējām 6 hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām. Gadījumos, ja eksperimenta dalībnieks nepareizi identificē testa stimulu ar maksimālo intensitāti 5 reizes pēc kārtas, tad tiek fiksēts, ka šajā krāsu virzienā hromatiskās izšķirtspējas vērtība ir ārpus datora monitora krāsu gammas (Regan et al., 1994).

2.7.2. CAD (*Colour Assessment and Diagnosis*) datorizētais krāsu tests.

CAD testa stimulu veido 225 kvadrātiski lauciņi, t.i., testa stimula fons ir kvadrātiskas formas un satur 15 rindas ar kvadrātiskiem lauciņiem, pa 15 lauciņiem katrā rindā. Kopējais testa stimula izmērs ir 8° redzes lauka pa vertikāli un horizontāli, savukārt hromatiskais testa stimuluss ir izveidots no 5x5 lauciņu matricas un aizņem 2° redzes lauka. Testa stimula fona spožums ir 34 cd/m² (x=0,305, y=0,323), savukārt individuālajiem lauciņiem var tikt piešķirta kāda no 64 spožuma vērtībām robežās no 25,5 līdz 42,5 cd/m². Ja CCT testā hromatiskā stimula maskēšanai tiek izmantoti *Chibret* un *Stilling* ierosinātie principi, tad CAD testa gadījumā hromatisko signālu maskēšana tiek panākta ar dinamiska kontrasta trokšņa palīdzību, t.i., katra testa stimula lauciņa spožuma vērtība tiek mainīta ik pēc 0,05 sekundēm (Barbur et al., 1994). Hromatiskās jutības mērījums ar CAD krāsu redzes testu tiek veikts 16 virzienos krāsu telpā. Pretstatā CCT testam CAD testā krāsu virzienu izvietojums krāsu telpā nav vienmērīgs. CAD testa gadījumā hromatiskā jutība tiek izvērtēta virzienos krāsu telpā, kam atbilst leņķiskās vērtības 60°, 64°, 140°, 145°, 150°, 165°, 170°, 175°, 240°, 244°, 320°, 325°, 330°, 345°, 350° un 355° grādi. Četri no virzieniem, t.i., 60°, 64°, 240° un 244°, ir paredzēti, lai izvērtētu dzeltenī-zilā krāsu oponentā krāsu kanāla izšķirtspēju, savukārt pārējie 12 krāsu virzieni ir paredzēti, lai izvērtētu sarkani-zaļā krāsu oponentā krāsu kanāla izšķirtspēju.

Krāsainais stimulss var pārvietoties pa vienu no divām diagonālēm, t.i., no testa stimula fona kreisā augšējā stūra uz labo apakšējo stūri vai otrādi, vai no labā augšējā stūra uz kreiso apakšējo stūri vai otrādi. Krāsainā stimula demonstrācija ilgst aptuveni 1 sekundi. Pēc testa stimula demonstrācijas pacients vai pētījuma dalībnieks tiek lūgts ziņot, uz kuru no stūriem pārvietojās krāsainais stimulss, nospiežot atbilstošo pogu uz pults, kas savienota ar datoru. Hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tiek noskaidrotas izmantojot *multiple random staircase* metodi, t.i., krāsainie testa stimuli, kas atbilst dažādajiem krāsu virzieniem tiek demonstrēti jauktā secībā. Mērījums tiek

turpināts līdz brīdīm, kamēr tiek noskaidroti hromatiskās jutības sliekšņi visos 16 virzienos krāsu telpā. Mērījumu datus pieņemts aprakstīt ar minimālās izšķiršanas elipsēm, kur elipses asu rotācijas leņķis norāda uz virzienu krāsu telpā, kurā hromatiskā jutība ir viszemākā. Balstoties uz minimālās izšķiršanas elipses regresijas modeli, tiek aprēķinātas hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas atbilst sarkani-zaļajam (RG) un dzelteni-zilajam (BY) krāsu oponentajam kanālam. Hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tiek aprēķinātas krāsu virzienos CIE_{xy} krāsu telpā, kas atbilst leņķiskajām vērtībām 334° un 67°. Pētījuma dalībnieku un pacientu sniegums CAD testā tiek vērtēts SNU vienībās (*Standard Normal Units*), kur viena RG un BY SNU vienība atbilst vidējai sliekšņu vērtībai, ko uzrādījuši cilvēki bez krāsu redzes deficītiem. CAD testa RG un BY SNU vienību vērtības aprēķinātas balstoties uz 330 indivīdu uzrādīto sniegumu CAD testā (Barbur&Rodriguez-Carmona, 2017).

2.8. Konstanto stimulu metode

Konstanto stimulu metode ir viena no *Fechner* ierosinātajām psihofizikālajām metodēm, kuru var pielietot, lai noskaidrotu kā absolūto sliekšņu tā atšķirību sliekšņu vērtības. Psihofizikā ar absolūtā sliekšņa vērtību saprot minimālo stimula intensitāti, kas nepieciešama, lai korekti detektētu stimulu 50% gadījumu ņemot vērā eksperimentā izmantotā piespiedu izvēļu dizaina atbilstošo uzminēšanas varbūtību. Savukārt ar atšķirību sliekšni definē kā minimālo detektējamo intensitāšu atšķirību starp diviem stimuliem, kas nepieciešama, lai korekti detektētu stimulu ar zemāko vai augstāko intensitāti 50% gadījumu ņemot vērā eksperimentā izmantotā piespiedu izvēļu dizaina atbilstošo uzminēšanas varbūtību.

Lai noskaidrotu absolūtā sliekšņa vērtības, izmantojot konstanto stimulu metodi, pētījuma vai eksperimenta dalībniekam tiek demonstrēti vismaz 5 dažādu intensitāšu stimuli, kur katrs stimuluss tiek demonstrēts vismaz 20 reizes. Pēc stimula demonstrācijas pētījuma dalībnieka atbilde tiek reģistrēta un analizēta, t.i., tiek izvērtēts, vai iesniegtā atbilde ir korekta. Testa stimulu intensitātes izvēlas tā, lai pētījuma vai eksperimenta dalībnieks, stimulu ar zemāko un augstāko intensitāti korekti detektētu 10% un 90% gadījumu. Atlikušo stimulu intensitātes izvieta ekvivalentos intervālos starp minimālo un maksimālo testa stimulu intensitāti. Konstanto stimulu metodē testa stimuli ar dažādām intensitātēm tiek demonstrēti jauktā secībā, kas eksperimenta dalībniekam liedz iespēju paredzēt nākamā testa stimula intensitāti, proti, paredzēt vai testa stimula intensitāte pieaugs vai samazināsies. Tiesa, lai noskaidrotu sliekšņu vērtības ar konstanto stimulu metodi ir nepieciešams liels mērījumu skaits, kas prasa ievērojamu eksperimenta dalībnieku koncentrēšanos un laiku. Eksperimenta dalībniekiem tiek demonstrēti stimuli, kas atbilst ne tikai

sliekšņa vai zemsliekšņa stimuliem, bet arī virssliekšņa stimuliem, kas lielākoties ir identificējami vienmēr. Eksperimenta ietvaros tiek noskaidrots, ar cik lielu varbūtību pētījuma dalībnieks vai pacients spēj identificēt stimulus ar noteiktu intensitāti. Balstoties uz iepriekš minētajiem eksperimentu rezultātiem, tiek noskaidrota psihometriskā funkcija. Psihometriskā funkcija matemātiska sakarība, kas apraksta sakarību starp stimula detektēšanas varbūtību atkarībā no stimula intensitātes. Lai nodrošinātu augstu mērījumu atkārtojamību, nav pietiekami konstatēt vai eksperimenta dalībnieks var korekti identificēt vai detektēt stimulu, jo šajā gadījumā ir būtiska loma ir eksperimenta dalībnieka izvēlētajai kritērija vērtībai. Ar kritērija vērtību saprot stimula intensitāti, kuru pārsniedzot pētījuma dalībnieks vai pacients apstiprina stimula eksistenci. Šāda tipa eksperimentiem ir būtisks trūkums, jo eksperimenta dalībnieka izvēlēta kritērija vērtība un eksperimenta dalībnieka sniegumam atbilstošā sliekšņu vērtība vairumā gadījumu nav ekvivalentas. Lai izvairītos no minētās problēmas ir ierosināts papildināt eksperimentu dizainu ar piespiedu izvēļu testiem. Proti, tā vietā, lai ziņotu par vai stimul ir/nav detektējams, pētījuma dalībnieks ir tiek lūgts norādīt, vai stimul atrodas datora monitora labajā vai kreisajā pusē, vai kādā no četriem kvadrantiem u.tml. Gadījumā, ja sliekšņu vērtības tiek noskaidrotas ar konstanto stimulu metodi, kas papildināta ar piespiedu izvēļu testu, tad obligāti veic eksperimentālo datu korekciju, lai ievērotu, ka izmantojot piespiedu izvēļu testus pareizo atbildi ir iespējams uzminēt ar iepriekšdefinētu varbūtību. Uzminēšanas varbūtība ir atkarīga no demonstrējamā testa stimula alternatīvu skaita. Ja testa stimul var tikt demonstrēts vienā no četrām iepriekš definētām pozīcijām, tad pastāv iespēja, ka pētījuma vai eksperimenta dalībnieks ar 25% varbūtību var iesniegt korektu atbildi arī tad, ja neizšķir vai nespēj detektēt stimulu. Konstanto stimulu metodes datus koriģē izmantojot *Abbot* ierosināto sakarību (skatīt vienādojumu 2.29). Vienādojumā 2.29 ar $f^*(x), f(x), p_g$ pieņem koriģēto stimulu detektēšanas varbūtību, objektīvi konstatēto stimulu detektēšanas varbūtību un uzminēšanas varbūtību.

$$f^*(x) = f(x)(1 - p_g) + p_g \quad (2.29)$$

Atkarībā no eksperimenta un izmeklējamās sensorās modalitātes, sakarība starp testa stimulu intensitātēm un to detektēšanas varbūtībām tiek aprakstīta ar kādu no psihometrisko funkciju veidiem - *Weibull* funkciju, normālsadalījuma kumulatīvo funkciju, *logistic* funkciju (Kingdom&Prins, 2016). Balstoties uz psihometriskās funkcijas modeli, tiek noskaidrota psihometriskās funkcijas inversā funkcija, kas nodrošina iespēju noskaidrot stimula detektēšanas varbūtībai atbilstošo stimulu intensitāti.

2.9. Adaptīvās metodes

Izmantojot adaptīvo stimulu metodes, var ievērojami samazināt mērījumu skaitu, lai noskaidrotu absolūto vai diferencu sliekšņu vērtības. Adaptīvo metožu gadījumos katra nākamā demonstrējamā stimula intensitāte ir atkarīga, vai iepriekšējais stimul ir pareizi/nepareizi detektēts. Ja eksperimenta dalībnieks spēj detektēt stimulu, tad stimula intensitāte sekojošajam stimulam tiek samazināta, gadījumos, ja stimul netiek detektēts, tad sekojošā stimula intensitāte tiek paaugstināta. Vienu no pirmajām adaptīvajām metodēm – *method of limits*, piedāvāja *Fechner*. Limitu metodei izdala divus gadījumus *method of descending limits* un *method of ascending limits*. Pirmajā gadījumā eksperiments tiek uzsākts ar stimula intensitāti, kas ir ievērojami augstāka par absolūtā sliekšņa intensitāti. Katra nākamā stimula intensitāte tiek samazināta līdz brīdim, kamēr eksperimenta dalībnieks spēj identificēt stimulu. Otrajā gadījumā mērījums tiek uzsākts ar stimula intensitāti, kas ievērojami zemāka par absolūtā sliekšņa intensitāti. Stimula intensitāte tiek palielināta, kamēr eksperimenta dalībnieks spēj detektēt stimulu. Izmantojot limitu metodi, sliekšņu noskaidrošanas procedūra tiek atkārtota vairākas reizes, kur ieteicamais mērījumu skaits ir lielāks par sešiem (Kingdom&Prins, 2016). Sliekšņa vērtība tiek iegūta aprēķinot vidējo sliekšņu vērtību. Ir konstatēts, ka izmantojot limitu metožu *descending* un *ascending* variantus, nereti novēro pazeminātas un paaugstinātas sliekšņu vērtības. Kā risinājumu limitu metodes trūkumiem tika piedāvāta trepju metode – *staircase method*. Lai noskaidrotu sliekšņu vērtības ar trepju metodi, parasti mērījums tiek uzsākts ar virssliekšņa stimulu, kura intensitāte tiek samazināta līdz brīdim, kamēr pacients spēj identificēt stimulu, t.i., līdzīgi kā descendējošo limitu metodē. Brīdī, kad noskaidrota stimula intensitāte, kuru eksperimenta dalībnieks neidentificē, stimula intensitāte tiek fiksēta un nākamā stimula vērtība tiek izraudzīta lielāka par iepriekšējo, t.i., kā ascendējošo limitu metodē. Stimulu intensitāte tiek palielināta līdz brīdim, kad pacients spēj identificēt stimulu. Iegūtais rezultāts tiek fiksēts, un mērījums tiek turpināts, samazinot stimula intensitāti. Mērījumi tiek turpināti, kamēr iegūst iepriekš definētu sliekšņu vērtību skaitu. Sliekšņu vērtību parasti aprēķina kā vidējo lielumu no noskaidrotajām sliekšņu vērtībām.

Pieņem, ka atkarībā no izvēlētajiem kritērijiem, lai samazinātu vai palielinātu demonstrējamā stimula intensitāti, ir atkarīga varbūtība, uz kuru konverģē sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas ar adaptīvajām neparametriskajām metodēm. Gadījumos, ja tiek izmantota 1 up/ 1 down trepju metode, t. i., testa stimula intensitāte tiek palielināta vai samazināta, ja eksperimenta dalībnieks iesniedz vienu nepareizu vai pareizu atbildi. 1 up/1 down metodes gadījumā pieņem, ka iegūtā sliekšņa vērtība atbilst 50% detektēšanas varbūtībai. Pieņemot, ka iespēja iesniegt korektu atbildi

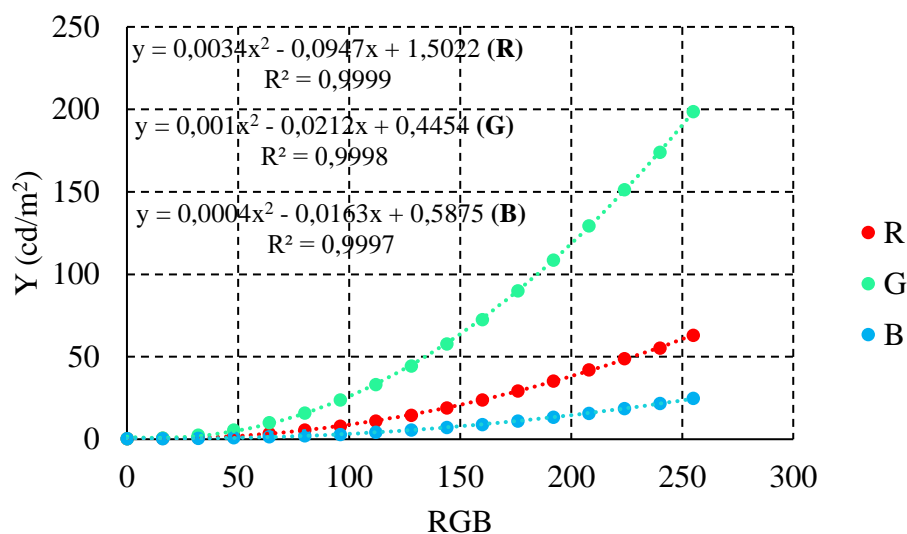
ir p , tad iespēja kļūdīties ir $1-p$. Sliekšņa vērtībai atbilstošo varbūtību *1 up/ 1 down* metodes gadījumā noskaidro aprēķinot ar kādu varbūtību pareizas un kļūdainas atbildes iesniegšanas varbūtība ir ekvivalenta, t.i., $p=1-p$, no kurienes $p=0.5$. Tiesa, lai noskaidrotu sliekšņu vērtības, kuru detektēšanas varbūtība ir virs 50%, tiek izmantotas *1 up/ n down* adaptīvās neparametriskās metodes. *1 up/ n down* metožu gadījumā sakarība starp iespēju sniegt korektu un kļūdainu atbildi ir $p^n = (1 - p)(1 + p + \dots + p^{n-1})$, kuru vienkāršojot iegūst izteiksmi $p = \sqrt[n]{0,5}$. Proti, palielinot pareizo secīgo atbilžu skaitu, kas jauzrāda eksperimenta dalībniekam, lai nākamais stimulants tiktu demonstrēts ar zemāku intensitāti, sliekšņu vērtībai atbilstošā detektēšanas varbūtība pieaug, t.i., pareizo atbilžu sērijas garumam pieaugot no 1 līdz 5 sliekšņu vērtībām atbilstošās detektēšanas varbūtības ir 50%, 71%, 79%, 84% un 87%. Gadījumos, ja nepieciešams noskaidrot sliekšņu vērtības, kas atbilst detektēšanai varbūtībai zem 50%, tiek rekomendēts izmantot transformētās adaptīvās metodes (Levitt, 1971). Adaptīvo transformēto metožu gadījumā kritēriji, kas nosaka vai stimula intensitāte ir jāsamazina vai jāpalielina, ietver kā pareizas tā nepareizas atbildes. Adaptīvo metožu gadījumā pieņem, ka attiecībā uz psihometrisko funkciju izpildās sekojoši nosacījumi – psihometriskā funkcija ir monotona, t.i., pieaugot stimula intensitātei, stimula detektēšanas varbūtība pieaug, psihometriskās funkcijas parametri nemainās mērījuma laikā, pētījuma vai eksperimenta dalībnieka sniegtās atbildes nav savstarpēji atkarīgas viena no otras, proti, iesniedzot katru nākamo atbildi eksperimenta dalībnieki neietekmējas no iepriekš sniegtajām atbildēm vai novērojumiem (Levitt, 1971).

Adaptīvo neparametrisko metožu gadījumā ir būtiski norādīt, par cik daudz testa stimula intensitāte tiek samazināta vai palielināta, ja tiek konstatēta pareiza vai nepareiza atbilde. Vairumā gadījumu izvēlas fiksētu soļa vērtību, ar kādu tiek samazināta vai palielināta demonstrējamā stimula intensitāte. Minētais risinājums nav optimāls, jo vairumā gadījumu tiks demonstrēti virssliekšņa stimuli, kas nav efektīvi. Adaptīvo metožu gadījumos nereti izmanto mainīgu soļa vērtību, proti, mērījumu uzsāk ar relatīvi lielu soļa vērtību, kas tiek pakāpeniski samazināta, kamēr eksperimenta dalībnieks nepieļauj kļūdas. *García-Pérez et al.* katrai no *1 up/ n down* metodēm ir noskaidrojis atbilstošās soļa vērtības, lai palielinātu vai samazinātu testa stimula intensitāti, lai nodrošinātu, ka sliekšņu vērtība, kas noskaidrota ar atbilstošo adaptīvo neparametrisko metodi, atbilstu teorētiski paredzētajai sliekšņa vērtības detektēšanas varbūtībai (*García-Pérez, 1998*).

3.DARBĀ IZMANTOTĀS METODES

3.1. Datora monitora kalibrēšana

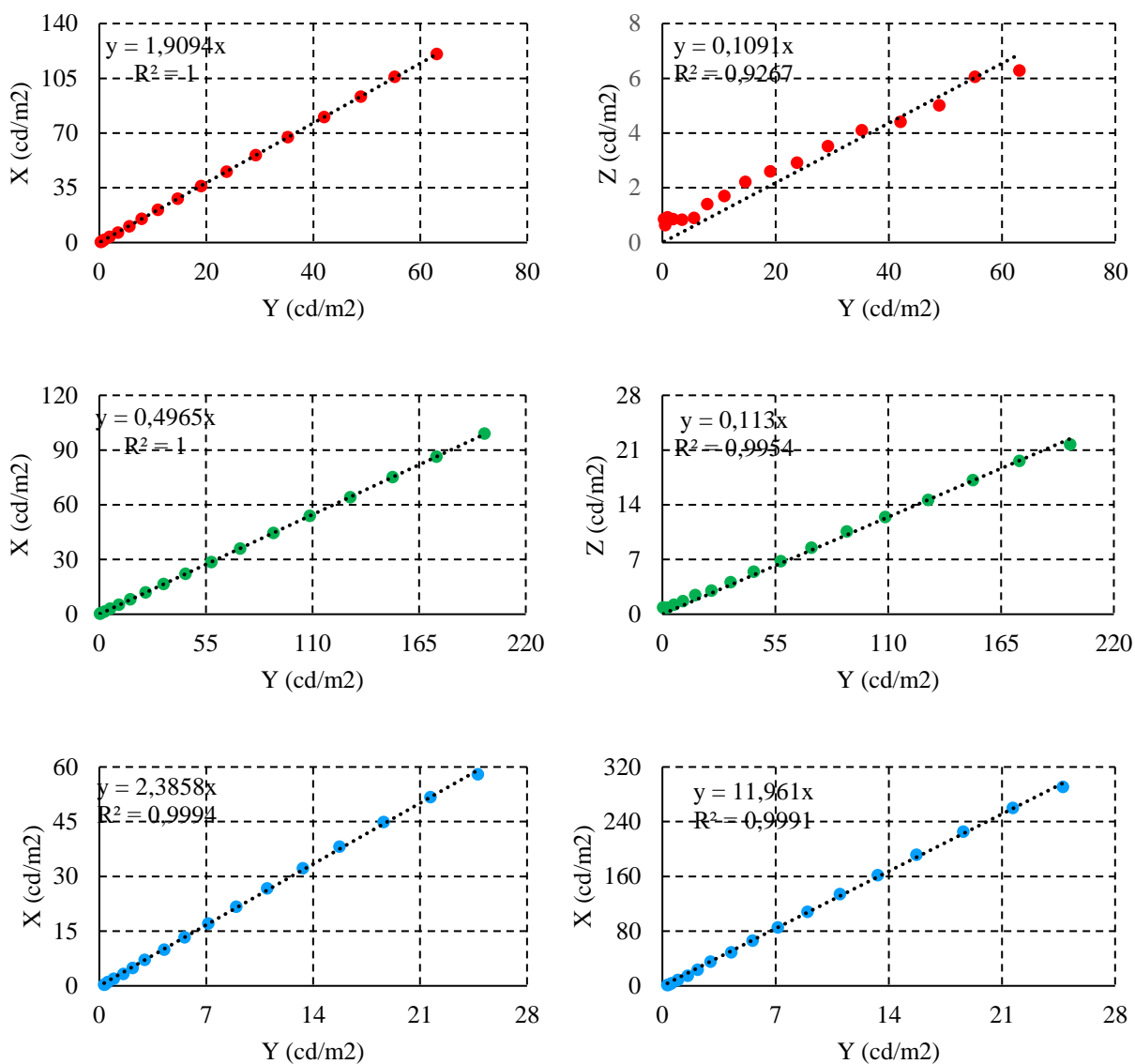
Lai nodrošinātu korektu krāsu attēlošanu, katrs no datora monitora krāsu kanāliem tika individuāli kalibrēts. Uz datora monitora tika demonstrēti stimuli ar RGB vērtībām no 0 līdz 255 vienībām ar soli 16 vienības. Katrs no atsevišķajiem 17 stimuliem, katram no krāsu kanāliem, tika mērīts vismaz 3 reizes. (skatīt att. 3.1). Mērījumi tika veikti ar radiospektrometru PR-655, kas nodrošina iespēju noskaidrot hromatisku un ahromatisku stimulu spektrālo sastāvu, spožumu kandelās uz kvadrātmetru, un stimula raksturojošos parametrus CIExy krāsu telpā - X, Y, Z.



3.1.att. Sakarības starp krāsu kanālu RGB vērtībām un tām atbilstošajām spožuma vērtībām, kas izteiktas cd/m^2 . Nepārtrauktās funkcijas (skatīt līniju grafikus sarkanā, zaļā un zilā krāsā) attēlo regresijas modeļus, kas apraksta sakarības starp krāsu kanālu RGB vērtībām un tām atbilstošo spožumu.

Krāsaino stimulu spektrālo sastāvu nosaka datora monitora visu trīs krāsu kanālu - R, G, B savstarpējā mijiedarbība, t.i., mainot katra krāsu kanāla individuālo spožumu tiek mainīts krāsainā stimula spektrālais sastāvs. Krāsainajam stimulam atbilstošās R, G, B sistēmas vērtības tika aprēķinātas balstoties uz pieņēmumu, ka krāsainā stimula CIExy sistēmas parametrus var aprēķināt summējot individuāliem krāsu kanāliem atbilstošos CIExy sistēmas parametrus balstoties uz aditīvo krāsu saskaitīšanas principu. Balstoties uz radiometriskajiem mērījumiem, kas veikti ar ierīci PR-655, tika apstiprināts, ka starp krāsu kanāliem atbilstošajām Y un X, Y un Z vērtībām pastāv tieša lineāra sakarība. Ievērojot, ka visos gadījumos ir konstatējama augsta korelācija, t.i., $R \approx 1$, tiesa, izņemot sakarību starp sarkanā krāsu kanāla Z un Y vērtībām, kuru gadījumā $R=0.9267$, var pieņemt, ka lineārās regresijas koeficientu sakarībām, kas apraksta likumsakarības starp

integrālsummām Y un X, Y un Z var noskaidrot izmantojot sakarības $k_x = X/Y$ un $k_z = Z/Y$. Koeficientus k_x un k_z katram krāsu kanālam aprēķina, izmantojot integrālsummu X, Y, Z vērtības, kas atbilst katra krāsu kanāla maksimālajai intensitātei (skatīt attēlu 3.2).



3.2. att. Grafikos attēlotas sakarības starp RGB krāsu kanālu Y un X, Y un Z vērtībām. Lineārās regresijas analīze norāda uz ciešu lineāru sakarību starp krāsu kanāliem atbilstošajām CIExy sistēmas vērtībām.

Balstoties uz augstāk minētajiem pieņēmumiem, katra stimula, kas tika demonstrēts uz datora ekrāna krāsu redzes izmeklējumu laikā, atbilstošajām CIExy sistēmas x, y, Y vērtībām tika aprēķinātas atbilstošākās katra krāsu kanāla RGB sistēmas vērtības. Ievērojot, ka starp katra krāsu kanāla X un Y, Z un Y pastāv lineāras sakarības, tad nezināmo skaitu no 9 var samazināt līdz 3 (skatīt vienādojumus 3.1 un 3.2).

$$\begin{aligned}
X &= X_R + X_G + X_B = \frac{x_R}{y_R} Y_R + \frac{x_G}{y_G} Y_G + \frac{x_B}{y_B} Y_B \\
Y &= Y_R + Y_G + Y_B \\
Z &= Z_R + Z_G + Z_B = \frac{z_R}{y_R} Y_R + \frac{z_G}{y_G} Y_G + \frac{z_B}{y_B} Y_B
\end{aligned}
\rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{z_R}{y_R} & \frac{z_G}{y_G} & \frac{z_B}{y_B} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Y_R \\ Y_G \\ Y_B \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

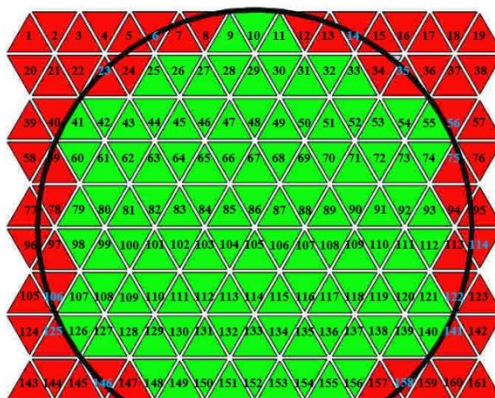
$$\begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{z_R}{y_R} & \frac{z_G}{y_G} & \frac{z_B}{y_B} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_R \\ Y_G \\ Y_B \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Lai aprēķinātu krāsainā stimula x, y, Y vērtībām atbilstošākās RGB sistēmas vērtības, izmantojot vienādojumu 3.2, tika noskaidrotas atbilstošākās katra individuālā krāsa kanāla spožuma vērtības Y_R, Y_G un Y_B . Zinot katra krāsu kanāla spožuma vērtības un regresijas modeļu koeficientus, kas apraksta sakarības starp individuālo krāsu kanālu spožuma vērtībām un to RGB sistēmas vērtībām, tika aprēķinātas stimulam ar CIE_{xy} sistēmas vērtībām x, y un Y atbilstošākās RGB vērtības (skatīt vienādojumu 3.3, att. 3.2).

$$\begin{aligned}
Y_R &= a_R R^2 + b_R R + c_R \rightarrow R = \frac{-b_R + \sqrt{b_R^2 - 4a_R(c_R - Y_R)}}{2a_R} \\
Y_G &= a_G G^2 + b_G G + c_G \rightarrow G = \frac{-b_G + \sqrt{b_G^2 - 4a_G(c_G - Y_G)}}{2a_G} \\
Y_B &= a_B B^2 + b_B B + c_B \rightarrow B = \frac{-b_B + \sqrt{b_B^2 - 4a_B(c_B - Y_B)}}{2a_B}
\end{aligned} \quad (3.3)$$

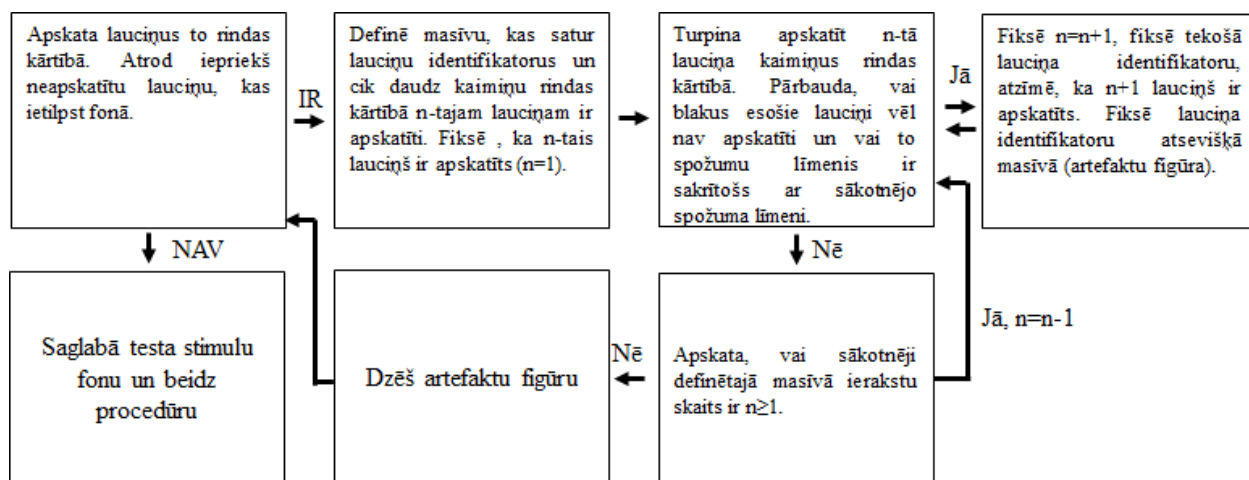
3.2. CCVT testa stimula uzbūve

CCVT testa stimulš nodrošina iespēju izmeklēt hromatiskās jutības sliekšņu vērtības ar dažādos virzienos krāsu telpā kā ar dinamisku tā statisku testa stimulu. Testa stimula fons un mērķa stimulš ir eliptiskas formas un sastāv no daudziem vienādmalu trīsstūriem. Krāsu redzes testa programmā iestrādātās funkcijas nodrošina iespēju ģenerēt dažāda izmēra un detalizācijas CCVT



3.3. att. CCVT testa stimula lauciņu matrica

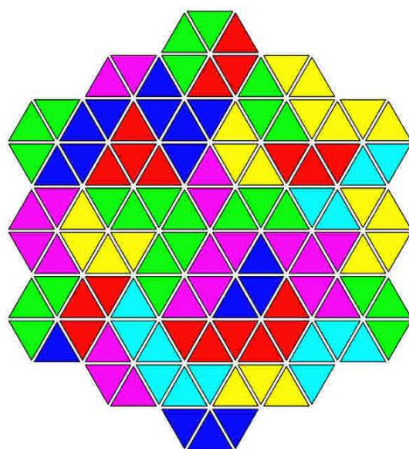
testa stimulus atkarībā no veicamā mērījuma specifikas. Testa stimula izveides procesu var iedalīt 4 posmos - trīsstūru matricas izveide, testa stimula fonam atbilstošo trīsstūru atlase, gaišuma līmeņu piešķiršana testa stimula fona veidojošiem trīsstūriem, artefaktu figūru identificēšana un dzēšana testa stimula fonā. Katram testa stimula lauciņam atbilstošās koordinātes un blakus esošo lauciņu identifikatori, t.i., lauciņi, kam ir viena kopēja mala, piemēram, 100 lauciņa blakus esošie lauciņi ir ar numuriem 99, 101 un 81 (skatīt att. 3.3.), tika aprēķināti ņemot vērā lauciņa malas un kopējo testa stimula izmēru. Testa stimula fona lauciņu koordinātes tiek ģenerētas pieņemot, ka fons tiks aizpildīts no kreisās un labo pusi, virzienā no augšanas uz leju. Fonam atbilstošie lauciņi tiek atlasīti analītiski noskaidrojot, vai visas lauciņa virsotnes atrodas riņķa līnijas ar parametriem x_0 , y_0 un R iekšpusē (skatīt att. 3.3). Šī pētījuma ietvaros tika izmantots testa stimuluss un krāsainais stimulss ar izmēru 5° un 1° grādi redzes lauka 1.40 metru attālumā. Lai nodrošinātu kontrasta troksni ahromātiskajiem un krāsainajiem stimuliem tika piešķirtas kāda no 9 spožuma vērtībām – 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42 cd/m^2 . Testa stimulss tika attēlots uz ahromātiska fona ($x=0,2997$, $y=0,3130$) ar spožumu 34 cd/m^2 . Testa stimula vidējais spožums ir ekvivalents fona apgaismojumam, t.i., katra no 9 spožuma vērtībām tika piešķirta vienādam skaitam testa stimulu veidojošo trīsstūru. Spožuma vērtības katram no trīsstūriem tika piešķirtas izmantojot gadījuma skaitļu ģeneratoru. Lai izvairītos no artefaktu figūru veidošanās, t.i., viena spožuma līmeņa lauciņu sakopojumiem testa stimulā, tika izveidota funkcija, kas automātiski identificē un “dzēš” artefaktu figūras. Artefaktu dzēšanas funkcija maina atsevišķu artefaktu figūru spožuma vērtības, lai izslēgtu gadījumus, kad blakus atrodas divi lauciņi ar ekvivalentu spožuma vērtību (skatīt att. 3.4, 3.5).



3.4. att. Artefaktu figūru identificēšanas un dzēšanas algoritma shēma

Pielietojot iepriekš minēto algoritmu tiek sagatavotas vairākas testa stimula fona sagataves, kas tiek izmantotas, lai ģenerētu kā dinamisko tā statisko testa stimulu. Statiskie stimuli tiek veidoti

modificējot iepriekš izveidoto testa stimulu fonu sagatavju kopijas, t.i., pēc tā kad analītiski identificēti lauciņi, kas atbilst krāsainajam testa stimulam, tiem sākotnēji piešķirtās ahromātiskās krāsu vērtības tiek aizstātas hromatiskajām krāsu vērtībām. Dinamiskā stimula gadījumā, lai radītu ilūziju par krāsainu pārvietojušos stimulu, atkarībā no testa stimula pārvietošanas no viena kadra uz otru tiek lokalizēti krāsainajam stimulam atbilstošie lauciņi un tiem atbilstošās ahromātiskās krāsu vērtības tiek aizstātas ar hromatiskām krāsu vērtībām. Balstoties uz zinātnisko literatūru, krāsainā stimula pārvietošanās ātrums dinamiskās testa stimula versijas gadījumā tika izvēlēts 4 grādi/s (Barbur, 2004).

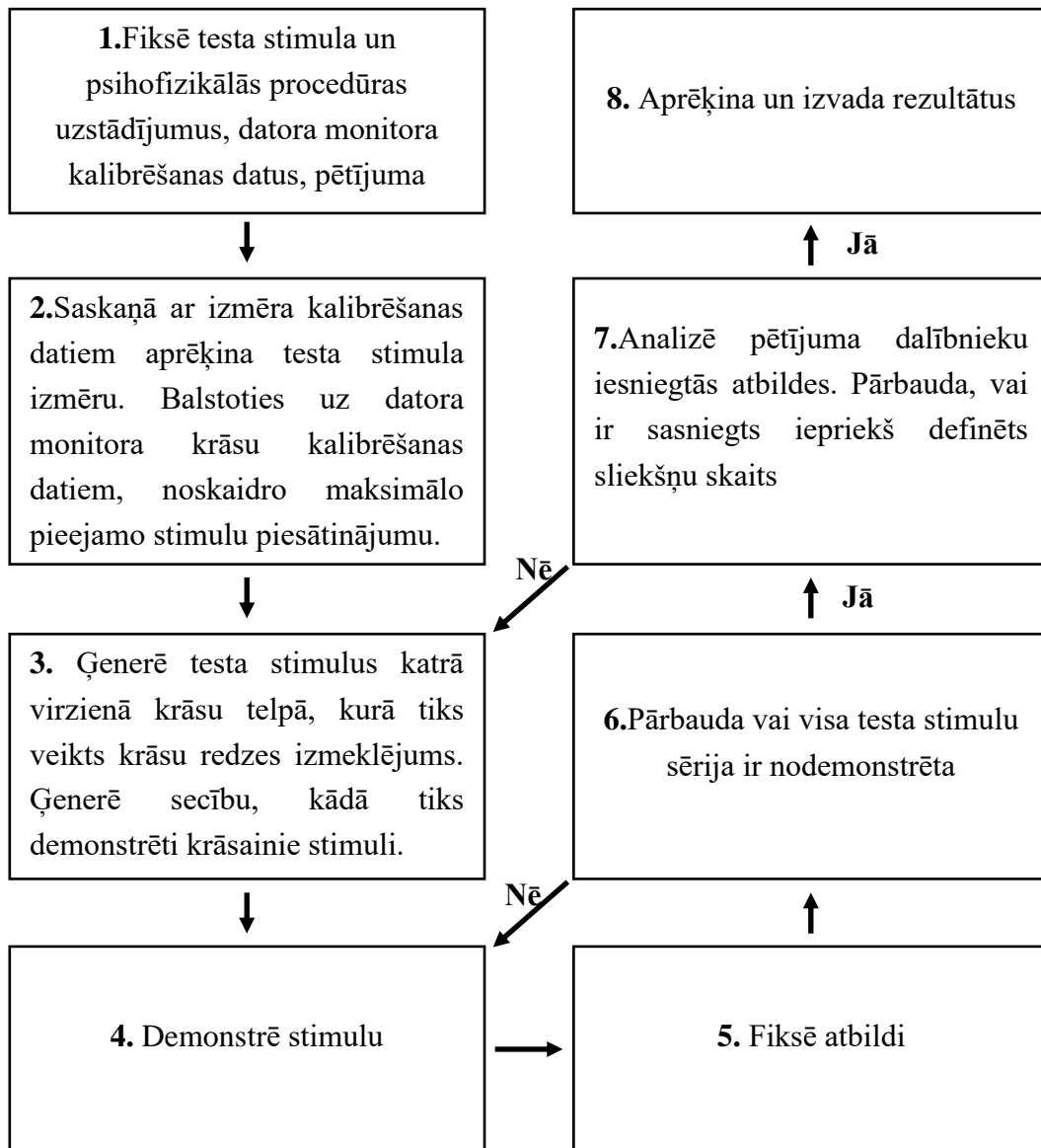


3.5. att. Ilustratīvs piemērs ar artefaktu figūrām testa stimula fonā. Šajā piemērā krāsas ir izmantotas, lai identificētu lauciņus ar ekvivalentām spožuma vērtībām.

3.3. Izmeklējuma procedūra

Krāsu redzes izmeklējuma procedūru var iedalīt 8 soļos, kas nepieciešami, lai veiktu krāsu redzes izmeklējumu. Pirms uzsākt izmeklējumu pētījuma dalībnieks vai pacients tiek lūgts norādīt savu vecumu un dzimumu, veikt datora ekrāna fizisko izmēru kalibrēšanu, izvēlēties testa stimula veidu (skatīt att. 3.6, 1. solis). Pirms uzsākt krāsu redzes izmeklējumu, balstoties uz datora monitora kalibrēšanas datiem, tiek noskaidrots maksimālais pieejamais piesātinājums katrā no virzieniem krāsu telpā, kuros tiek veikts krāsu redzes izmeklējums, katrā spožuma līmenī (skatīt att. 3.6, 2. solis). Pirms mērījuma uzsākšanas katrā virzienā krāsu telpā, kurā tiks veikts hromatiskās jutības mērījums, tiek piešķirts identifikators, t.i., skaitliska vērtība no 1 līdz n. Lai nodrošinātu pēc iespējas objektīvāku mērījumu, pirms testa stimulu demonstrācijas tiek izlozēta kārtība, kādā tiks demonstrēti stimuli, kas pieder dažādiem virzieniem krāsu telpā. Balstoties uz ievaddatiem un datora monitora krāsu kalibrēšanas datiem, tiek ģenerēta testa stimulu sērija, t.i., katrā virzienā krāsu telpā viens stimuluss (skatīt att. 3.6, 3. solis). Lai uzsāktu izmeklējuma procedūru, pētījuma dalībnieks uz tastatūras vai pults nospiež pogu “Enter”, pēc kā tiek demonstrēts pirmais stimuluss.

Pētījuma dalībnieks tiek mudināts iesniegt atbildi 3 sekunžu laikā no stimula demonstrēšanas brīža statiskā stimula gadījumā un 3 sekunžu laikā pēc stimula demonstrācijas dinamiskā stimula gadījumā. Krāsu redzes testa aplikācijā ir pieļauta iespēja, ka dinamiskā testa stimula gadījumā pētījuma dalībnieks drīkst iesniegt atbildi arī testa stimula demonstrācijas laikā (skatīt att. 3.6, 4. solis). Brīdī, kad tiek reģistrēta pētījuma dalībnieka atbilde, tiek noskaidrots, vai visa testa stimula sērija ir nodemonstrēta (skatīt att. 3.6, 5 un 6 solis). Gadījumos, kad visi testa stimuli ir nodemonstrēti un pētījuma dalībnieka atbildes reģistrētas, tiek veikta pētījuma dalībnieka atbilžu analīze. Hromatiskās jutības sliekšņu vērtības ar CCVT krāsu redzes testu tiek noskaidrotas izmantojot *multiple random staircase* metodi. Hromatiskās jutības izmeklējums tiek veikts secīgi demonstrējot dažādiem krāsu virzieniem atbilstošos stimulus, kur demonstrējamo testa stimulu intensitāti nosaka adaptīvā neparimetriskā metode 1 up/ 2 down. Testa stimula intensitāte noteiktā virzienā krāsu telpā tiek samazināta, ja saņemtas divas secīgas korektas atbildes, savukārt ja tiek konstatēta kļūda testa stimula intensitāte tiek paaugstināta. Lai konstatētu stimula, kas pieder noteiktam virzienam krāsu telpā, atbilstību sliekšņa kritērijam, tiek apskatītas pēdējās divas pētījuma dalībnieka vai pacienta atbildes, kas attiecās uz noteiktā hromatiskā sastāva stimulu. Gadījumā, ja pēdējiem diviem stimuliem ar dažādām intensitātēm konstatēta viena pareiza un viena nepareiza atbilde, tad iepriekš pēdējā testa stimula intensitāte tiek reģistrēta kā hromatiskās jutības sliekšņu vērtība, turpretī, ja pētījuma dalībnieks, iesniedzot atbildes, ir divas reizes kļūdījies vai atbildējis pareizi, tad testa stimulu intensitāte tiek palielināta vai samazināta. Līdztekus tiek kontrolēts, vai noteiktā virzienā krāsu telpā ir iegūts iepriekš definēts sliekšņu vērtību skaits. Ņemot vērā visu augstāk minēto, tiek konstatēts vai sekojošā testa stimula intensitāte ir jāsamazina/jāpalielina, vai hromatiskās jutības izmeklējums noteiktā virzienā krāsu telpā ir jāturpina (skatīt att. 3.6, 7. solis). Gadījumā, ja sasniegts iepriekš definēts hromatiskās jutības sliekšņu vērtību skaits, tad izmeklējums tiek pārtraukts un veikta mērījumu rezultātu matemātiskā apstrāde (skatīt att. 3.6, 8 solis).



3.6. att. CCTV testa izmeklējuma procedūras norise.

3.4. Hromatiskās jutības vērtību noskaidrošana krāsu oponentajiem kanāliem

Krāsu redzes izmeklējuma laikā ar CCVT datorizēto krāsu redzes testu tiek noskaidrotas 10 sliekšņu vērtības 10 virzienos krāsu telpā. Lai noskaidrotu vidējo hromatiskās jutības sliekšņu vērtību, katram krāsu virzienam atbilstošās hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tika sakārtotas pieaugošā secībā, savukārt vidējā sliekšņu vērtība tika aprēķināta kā vidējais lielums no 6 mazākajām hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām noteiktā virzienā krāsu telpā. Zinot vidējo hromatiskās jutības sliekšņu vērtību katrā virzienā jeb hromatisko distanci, tika aprēķinātas hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām atbilstošās CIE_{xy} sistēmas koordinātes x un y . Lai vienkāršotu minimālās elipses parametru aprēķinu pieņem, ka i -tajam virzienam krāsu telpā atbilst hromatiskās jutības sliekšņu vērtība, kurai savukārt atbilst stimuls ar CIE_{xy} sistēmas koordinātēm x_i un y_i .

Tādu datorizēto krāsu redzes testu kā CAD un CCT rezultāti tiek reprezentēti ar minimālās izšķiršanas elipsi, t.i., otrās kārtas funkciju, kas raksturo hromatisko izšķirtspēju dažādos virzienos krāsu telpā. Pieņem, ka minimālās elipses centra koordinātes atbilst datora monitora baltā punkta vērtībām x_0 , y_0 , un distanču summa starp hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām atbilstošajām koordinātēm x_i , y_i un elipsi ir minimālā iespējamā. Lai vienkāršotu tālākos aprēķinus, tiek ierosināts transponēt elipses centra koordinātes no (x_0, y_0) uz $(0,0)$. Minētā procedūra tiek realizēta atņemot monitora baltā punkta koordinātes (x_0, y_0) no hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām atbilstošajām stimulu koordinātēm x_i , y_i . Koriģētās sliekšņu vērtībām atbilstošās stimulu koordinātes turpmāk tekstā tiek apzīmētas ar x'_i , y'_i .

Lai noskaidrotu minimālās izšķiršanas elipses parametrus, tiek noskaidrota minimālā distance starp hromatiskās jutības sliekšņu vērtību koordinātēm (x'_i, y'_i) un krāsu virzienam atbilstošās taisnes krustpunktu ar elipsi (xk_i, yk_i) . Krustpunkts starp krāsu virzienam atbilstošo taisni un elipsi tiek aprēķināts divos soļos.

Pirmajā solī noskaidrojot krustpunktu ar koordinātēm (xk_i, yk_i) starp taisni, kas rotēta pulksteņrādītāj virzienā par leņķi θ (skatīt vienādojumu 3.4) un elipsi ar rādīsu vērtībām r_x un r_y (skatīt vienādojumus 3.5 un 3.6). Lai noskaidrotu augstāk minētās taisnes krustpunktus ar elipsi, kuras asis rotētas par leņķi θ , tiek veikta krustpunkta koordināšu (xk_i, yk_i) rotācija pretēji pulksteņrādītāj virzienam par leņķi θ (skatīt vienādojumus 3.7 un 3.8). Ievērojām, ka vienādojumi 3.5 un 3.6 paredz divus krustpunktus elipsei ar taisni, kas jāņem vērā aprēķinot distanci starp punktiem (x'_i, y'_i) un (xk_i, yk_i) .

$$k = \tan\left(\operatorname{atan}\left(\frac{y_i}{x_i}\right) - \theta\right) \quad (3.4)$$

$$xk_i = \frac{\sqrt{(r_x r_y)^2}}{\sqrt{r_y^2 + r_x^2 k_i^2}} = \frac{r_x r_y}{\sqrt{r_y^2 + r_x^2 k_i^2}} \quad (3.5)$$

$$yk_i = \frac{k_i r_x r_y}{\sqrt{r_y^2 + r_x^2 k_i^2}} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} xk_i &= x_i \cos(\theta) - y_i \sin(\theta) = \frac{r_x r_y \cos(\theta) - k_i r_x r_y \sin(\theta)}{\sqrt{r_y^2 + r_x^2 k_i^2}} = \\ &= \frac{r_x r_y}{\sqrt{r_y^2 + r_x^2 k_i^2}} (\cos(\theta) - k_i \sin(\theta)) \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} yk_i &= x_i \sin(\theta) + y_i \cos(\theta) = \frac{r_x r_y \sin(\theta) + k_i r_x r_y \cos(\theta)}{\sqrt{r_y^2 + r_x^2 k_i^2}} = \\ &= \frac{r_x r_y}{\sqrt{r_y^2 + r_x^2 k_i^2}} (\sin(\theta) + k_i \cos(\theta)) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Lai noskaidrotu distanci starp un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībai atbilstošajām koordinātēm (x'_i, y'_i) un krāsu virzienam atbilstošās taisnes un elipses krustpunktu un (xk_i, yk_i) , tiek ierosināts aprēķināt starpību dif_i starp distancēm d'_i un dk_i . Parametrs d'_i ir distance starp punktiem (x_0, y_0) un (x'_i, y'_i) , savukārt parametrs dk_i ir distance starp punktiem (x_0, y_0) un (xk_i, yk_i) (skatīt vienādojumus 3.9-3.11). Izmantojot augstāk minēto ierosinājumu nav nepieciešamības pārliicināties vai aprēķiniem izmantota atbilstošā krāsu virziena un elipses krustpunkta koordināte (xk_i, yk_i) , kuras šajā gadījumā ir divas.

$$dk_i^2 = xk_i^2 + yk_i^2 = \left(\frac{r_x r_y}{\sqrt{r_y^2 + r_x^2 k_i^2}} (\cos(\theta) - k_i \sin(\theta)) \right)^2 + \left(\frac{r_x r_y}{\sqrt{r_y^2 + r_x^2 k_i^2}} (\sin(\theta) + k_i \cos(\theta)) \right)^2 = \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(r_x r_y)^2}{r_y^2 + r_x^2 k_i^2} (1 + k_i^2) \\ d_i^2 &= (x'_i)^2 + (y'_i)^2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$dif_i = \sqrt{dk_i^2 - d_i^2} \quad (3.11)$$

Lai noskaidrotu potenciālo rādīusu vērtību apgabalu, tika noskaidrota maksimālā un minimālā distance d_{max} un d_{min} starp sliekšņu vērtībām atbilstošo stimulu krāsu koordinātēm un minimālās elipses centra koordinātēm. Rādīusu vērtību apgabals tika definēts robežās no $0.5 * d_{min} \leq r_{1,2} \leq 2 * d_{max}$, savukārt elipses kordinātu plaknes asu rotācijas leņķis tika definēts robežās no $0^{\circ} \leq \theta \leq 180^{\circ}$. Lai noskaidrotu elipses parametrus r_x , r_y un θ , tika noskaidrota minimālā distanču summa starp distancēm d_i un dk_i , caurskatot visus iespējamus rādīusu vērtību pārus ar soli $\frac{|2d_{max}-0.5d_{min}|}{1000}$ vienības vērtību apgabalā $0,5 * d_{min} \leq r_{1,2} \leq 2 * d_{max}$ un elipses asu rotācijas leņķu vērtības ar soli $0,18^{\circ}$ vērtību apgabalā no $0^{\circ} \leq \theta \leq 180^{\circ}$ (skatīt 3.12 vienādojumu).

$$\langle r_x, r_y, \theta \rangle = \min \left(\sum_{i=1}^{n=10} dif_i \right) \quad (3.12)$$

3.5. Krāsu oponento kanālu funkcijas CIExy krāsu telpā

Pacienta vai eksperimenta dalībnieka sniegumu CCT testā raksturo ar minimālās izšķiršanas elipses parametriem – minimālais un maksimālais rādīuss un elipses asu rotācijas leņķis. Turpretī sniegumu CAD testā raksturo hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas aprēķinātas, balstoties uz minimālās elipses regresijas modeli, RG un BY virzienos krāsu telpā. RG virzienā krāsu telpā hromatisko stimulu uztveri primāri nodrošina L un M vāļītes, savukārt BY virzienā krāsu telpā stimulu uztveri nodrošina S vāļītes. Pētījuma dalībnieka sniegums, t.i., hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas raksturo sarkani-zaļā un dzelteni-zilā krāsu kanāla izšķirtspēju, tika aprēķinātas balstoties uz elipses regresijas modeli. Hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tika noskaidrotas aprēķinot distanci starp elipses centru un krustpunktu starp taisni, kas raksturo sarkani-zaļo vai dzelteni-zilo krāsu kanālu, un minimālās izšķiršanas elipsi. Virziens CIExy krāsu telpā, kas atbilst sarkani-zaļajam krāsu oponentajam kanālam tika aprēķināts, pieņemot, ka S vāļīšu ierosinājums saglabājas konstants kā hromatiskajiem tā ahromātiskajiem stimuliem, savukārt virziens, kas atbilst dzelteni-zilajam krāsu oponentajam kanālam tika aprēķināts, pieņemot, ka starpība starp L un M vāļīšu signāliem saglabājas konstanta kā ahromātiskajiem tā hromatiskajiem stimuliem. Sakarības starp vāļīšu receptoru ierosinājuma līmeni un tiem atbilstošās stimulu koordinātes CIExy krāsu telpā tika raksturotas ar Hunt-Pointer-Estravez transformācijas matricu (skatīt 3.13vienādojumu).

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4002 & 0,7076 & -0,0808 \\ -0,2263 & 1,1653 & 0,0457 \\ 0 & 0 & 0,9182 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Lai vienkāršotu tālākos aprēķinus Hunt-Pointer-Estravez transformācijas matricas koeficienti, tika aizstāti ar simboliem – a, b, c, d, e, f, g (skatīt 3.14 vienādojumu). Pieņem, ka ahromātiskajam stimulam CIExy krāsu telpā atbilst integrālsummas X_n , Y_n , Z_n . Balstoties uz vienādojumu 3.14, un sakarībām starp CIExy sistēmas parametriem tiek ierosināts vienādojums 3.15, kas apraksta stimulu kopu, kuras S vāļišu ierosinājuma līmenis ir konstants. Veicot 3.15 vienādojuma algebriskus pārveidojumus iegūstam 3.16 vienādojumu, kas apraksta virzienu CIExy krāsu telpā, kurā S vāļišu ierosinājuma līmenis saglabājas konstants.

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$S_w = gZ_n = \frac{(1-x-y)gY_n}{y} \quad (3.15)$$

$$y = -x \frac{Y_n}{Z_n + Y_n} + \frac{Y_n}{Z_n + Y_n} \quad (3.16)$$

Dzelteni-zilajam krāsu oponentajam kanālam atbilstošais virziens krāsu telpā tika noskaidrots pieņemot, ka ierosinājumu diference starp L un M vāļišu signāliem saglabājas konstanta, t.i., stimulu uztveri nodrošina S vāļītes (skatīt vienādojumus 3.17-3.19).

$$L_n - M_n = X_n(a - d) + Z_n(c - f) \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} -M &= X(a - d) + Z(c - f) = \frac{Y_n x}{y} (a - d) + \frac{Y_n(1 - x - y)}{y} (c - f) = \\ &= \frac{Y_n}{y} (x(a - d - c + f) + y(c - f) + (c - f)) \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$Ly = x \frac{Y_n(a - d - c + f)}{X_n(a - d) + (Y_n + Z_n)(c - f)} + \frac{(c - f)Y_n}{X_n(a - d) + (Y_n + Z_n)(c - f)} \quad (3.19)$$

Pieņemot, ka ahromātiskais stimulam atbilstošās integrālsummas ir sakrītošas ar standartizētajam gaismas avotam D6500 atbilstošajiem CIExy krāsu telpas parametriem, tika noskaidrotas lineārās funkcijas, kas nodrošina iespēju raksturot sarkani-zaļā un dzelteni-zilā krāsu kanāliem atbilstošās funkcijas (skatīt vienādojumus 3.20 un 3.21).

$$y = -0,4787x + 0,4787 \quad (3.20)$$

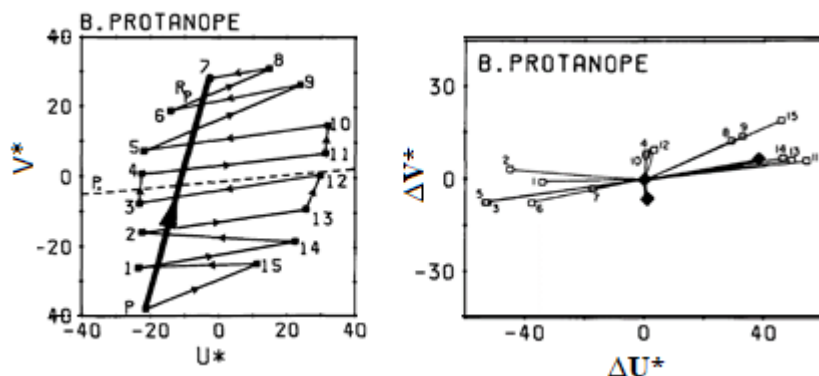
$$y = 2,2736x - 0,3819 \quad (3.21)$$

Salīdzinot krāsu oponentajiem kanāliem atbilstošās leņķiskās vērtības, kas noskaidrotas balstoties uz vienādojumiem 3.20 un 3.21, var konstatēt, ka šajā un Barbur&Rodriguez-Carmona 2016. gada publikācijā minētās vērtības ir savstarpēji sakrītošas, t.i., $\sim 334,42^\circ$ un 334° , $\sim 66,26^\circ$ un 67° .

3.6. Vingrys&KingSmith metode

Pacientu un pētījuma dalībnieku sniegumu D15 un DS15 krāsu sakārtošanas testos var izvērtēt izmantojot tādas metodes kā grafisko (Atchison et al., 1991) un Bowman metodi (Bowman, 1982), savukārt FM100 krāsu sakārtošanas testa rezultāti tiek analizēti ar Kinnear (Kinnear, 1970) un Smith et al. (Smith et al, 1985) ierosinātajam metodēm. Vingrys&KingSmith metode nodrošina iespēju izvērtēt pētījuma dalībnieku un pacientu uzrādīto sniegumu tādos krāsu sakārtošanas testos kā D15, DS15 un FM100. Vingrys&KingSmith (turpmāk tekstā V&K) metode nodrošina iespēju analītiski izvērtēt pētījuma dalībnieku un pacientu sniegumu, t.i., noteikt potenciālo krāsu redzes deficīta veidu - protan, deitan un tritan, kā arī krāsu redzes deficīta izteiktību un specifiskumu.

V&K metode balstās uz krāsu atšķirību vektoru analīzi, kas apraksta krāsu kauliņu krāsu atšķirības, starp secīgajiem kauliņiem pētījuma dalībnieka vai pacienta uzrādītajai krāsu kauliņu sakārtošanas secībai. Pētījuma dalībnieku uzrādītajām krāsu kauliņu sakārtošanas secībām tiek aprēķināti krāsu atšķirību vektori starp secīgajiem krāsu kauliņiem krāsu kauliņu sakārtošanas secībā (skatīt att. 3.7). Lai vienkāršotu V&K metodes aprēķina algoritma izklāstu pieņem, ka i-tajam krāsu atšķirību vektoram atbilst CIELUV krāsu telpas koordinātes $(\Delta U_i^*, \Delta V_i^*)$. Vingrys&KingSmith ierosina noskaidrot lineārās funkcijas slīpuma koeficientu, minimizējot distanču summu starp krāsu atšķirību vektoriem atbilstošajām koordinātēm un regresijas modelim atbilstošo lineāro funkciju. Balstoties uz iepriekš minēto metodes aprakstu, var secināt, Vingrys&KingSmith piedāvātais aprēķina algoritms ir ekvivalents lineārās regresijas veidam – ortogonālā lineārā regresija (skatīt 2. pielikumu).



3.7. att. Attēlā pa kreisi attēlotas D15 testa krāsu kauliņu koordinātes CIELUV krāsu telpā un krāsu kauliņu sakārtošanas secība pacientam ar protanopiju. Attēlā pa kreisi ar bultām attēloti krāsu diferenci vektoru starp secīgajiem D15 testa kauliņiem pacienta izvēlētajā krāsu kauliņu sakārtošanas secībā. Attēla pa labi attēloti relatīvie krāsu atšķirību vektori, kas atbilst pacienta ar protanopiju izvēlētajai D15 krāsu kauliņu sakārtošanas secībai (Vingrys&KingSmith, 1988).

Saskaņā ar V&K metodi pieņem, ja regresijas modeļa slīpuma koeficientam atbilstošā leņķiskā vērtība A (skatīt 3.22 vienādojumu) ir no -4° līdz -17° , 3° līdz 17° , vai $A < -70^\circ$ grādiem, konstatē deitan, protan vai tritan tipa krāsu redzes deficītu.

$$\tan(2A) = \frac{\sum 2\Delta U_i^* \Delta V_i^*}{\sum (\Delta U_i^*)^2 - (\Delta V_i^*)^2} \quad (3.22)$$

Lai izskaidrotu C un S koeficientu aprēķinu, kas raksturo krāsu redzes deficīta smagumu un specifiskumu, V&K metodes ietvaros tiek izmantoti jēdzieni minimālā un maksimālā inerces momentu summa. Ar inerces momentu summu saprot distanču summu starp relatīvajiem krāsu atšķirību vektoriem atbilstošajām koordinātēm līdz lineārai funkcijai (skatīt vienādojumu 3.23). Inerces momentu summu aprēķina pieņemot, ka taisnes virziena koeficientam atbilstošās leņķiskās vērtības ir A un $A+90^\circ$, ja $A < 0$ vai A un $A-90^\circ$, ja $A > 0$. Veicot inerces momentu summu aprēķinus ar abām leņķiskajām vērtībām, noskaidro inerces momentu summas I_1 un I_2 , kur lielāko no tām pieņem par I_{\max} , un mazāko I_{\min} .

$$I = \sum (\Delta V_i^* \cos(A) - \Delta U_i^* \sin(A))^2 \quad (3.23)$$

Koeficientu C aprēķina kā attiecību starp maksimālo inerces momentu summu, kas atbilst personas uzrādītajai krāsu kauliņu sakārtošanas secībai I_{\max} un maksimālo inerces momentu summu, kas atbilst korektai krāsu kauliņu sakārtošanas secībai $I_{\max 0}$ (skatīt 3.24 vienādojumu). Koeficientu S aprēķina kā attiecību starp maksimālo un minimālo inerces momentu summu, kas atbilst pacienta vai pētījumu dalībnieka uzrādītajai krāsu kauliņu sakārtošanas secībai (skatīt 3.25 vienādojumu). Iedzimu krāsu redzes deficītu gadījumos konstatē relatīvi augstas C un S koeficientu vērtības, t.i.,

augstākas nekā divas vienības. Gadījumos, ja pētījuma dalībnieks vai pacients uzrāda krāsu kauliņu sakārtošanas secību, kurai atbilst augsta C koeficienta un vienlaikus zema S koeficienta vērtība norāda uz dzīves laikā iegūtu krāsu redzes deficītu. Minētais rezultāts liecina, ka persona pieļauj daudz nespecifiskas kļūdas, kas nav raksturīgas iedzimtu krāsu redzes deficītu gadījumos.

$$C = \sqrt{\frac{I_{max}}{I_{max0}}} \quad (3.24)$$

$$S = \sqrt{\frac{I_{max}}{I_{min}}} \quad (3.25)$$

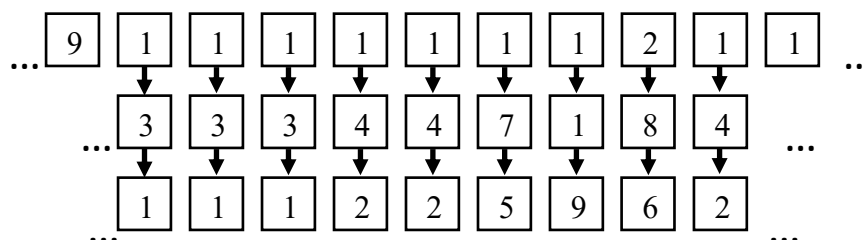
3.7. FM100 testa kļūdu saskaitīšanas algoritms

Šī pētījuma ietvaros FM100 krāsu sakārtošanas testa rezultāti tika analizēti izmantojot Kinneare (Kinneare, 1970) un Smith (Smith et al., 1985) ierosinātās kļūdu skaitīšanas metodes, kas balstās uz FM100 krāsu kauliņiem atbilstošo numuru analīzi. Pieņem, ka krāsu atšķirības starp secīgajiem FM100 testa kauliņiem ir 1 JND (*Just noticeable difference*) vienība, t.i., krāsu kauliņu krāsu atšķirības atbilst tikko izšķiramajam sliekšnim cilvēkiem bez krāsu redzes deficītiem. Izmantojot kļūdu skaitīšanas metodi, katram kauliņam atbilstošās kļūdas apjoms tiek aprēķināts kā absolūtā diference starp i-tā un tam blakus esošo kauliņu numuriem (skatīt att. 3.8). Gadījumā, ja, sakārtojot FM100 testa kauliņus, pētījuma dalībnieks vai pacients nepieļauj kļūdas, tad katra atsevišķā kauliņa kļūdas apjoms ir 2 JND vienības. Lai novērtētu relatīvo kļūdu apjomu i-tā kauliņa novietojumam pētījuma dalībnieka vai pacienta izvēlētajā FM100 testa krāsu kauliņu secībā, no absolūtās blakus esošo kauliņu numuru diferencu summas atņem 2 JND vienības (skatīt 3.26 vienādojumu).

$$Kļūda_i = |numurs_i - numurs_{i+1}| + |numurs_i - numurs_{i-1}| - 2 \quad (3.26)$$

Ja kopējais kļūdu skaits visiem 85 FM100 testa kauliņiem nepārsniedz 20 vienības, tad pieņem, ka personas krāsu izšķirtspēja ir labāka par statistiski vidējo, ja kļūdu skaits ir robežās no 20 līdz 100 vienībām, tad konstatē, ka personas krāsu izšķirtspēja atbilst normai, ja kopējais kļūdu skaits pārsniedz 100 vienības, tad personas uzrādītais rezultāts liecina par būtiski samazinātu izšķirtspēju salīdzinājumā ar normu. Kinneare 1970 gada pētījumā ierosinātā kļūdu skaitīšanas metode nodrošina iespēju identificēt personas, kurām ar augstu varbūtību ir krāsu redzes deficīti, tomēr metode nenodrošina iespēju izšķirt vai pieļautās kļūdas ir raksturīgas samazinātas sarkani-zaļā vai dzeltenī –zilā krāsu kanāla izšķirtspējas gadījumiem. Lai noskaidrotu sarkani-zaļajam un

dzeltenī-zilajam krāsu kanālam atbilstošo kļūdu skaitu, Smith ierosina summēt FM100 testa kauliņiem ar numuriem 13-33 un 55-75 atbilstošās kļūdu vērtības, lai aprēķinātu kopējo kļūdu skaitu, kas raksturīgas sarkani-zaļajam krāsu kanālam, savukārt dzeltenī-zilajam krāsu kanālam raksturīgās kļūdas tiek aprēķinātas summējot krāsu kauliņiem ar numuriem 1-12, 34-54, 76-85 atbilstošās kļūdu vērtības (Smith et al., 1985).

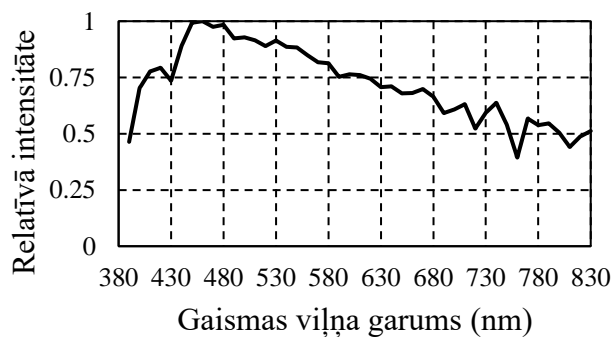


3.8. att. Kinnear ierosinātās kļūdu skaitīšanas metodes *ilustratīvs* piemērs. Pirmajā rindā attēlota pētījuma dalībnieka vai pacienta FM100 testa kauliņu izvēlētajā secībā, otrajā rindā attēlotas krāsu kauliņiem atbilstošās absolūtās blakus esošo kauliņu diferencu summas. Trešajā rindā attēlotas relatīvās FM100 testa krāsu kauliņu secībām atbilstošās kļūdu vērtības. *Ilustrācija* reproducēta balstoties uz Kinnear 1970 publikāciju.

4.D15 TESTA REZULTĀTU MODELĒŠANA PROTANOMĀLIJAS UN DEITERANOMĀLIJAS GADĪJUMOS

4.1. Modelis

D15 tests sastāv no 16 krāsainiem stimuliem - references kauliņa un 15 testa kauliņiem. D15 tests tika radīts, lai identificētu cilvēkus ar dihromātisku krāsu redzes raksturu. Izmantojot D15 testu, var konstatēt arī anomālās trihromatijas gadījumus, tomēr šī testa jutība parasti sasniedz tikai ~50% (Atchison et al., 1991; Dain & Adams, 1990), proti, katras otrās personas ar krāsu redzes deficītiem sniegums neatšķiras no cilvēkiem bez krāsu redzes deficītiem. Šī pētījuma ietvaros tika izveidots matemātisks modelis, lai izvērtētu L un M vālišu fotopigmentu fizikālo īpašību ietekmi uz sniegumu D15 krāsu sakārtošanas testā. D15 testa stimulu krāsas atbilst *Munsell* krāsu sistēmas 5B, 10BG, 5BG, 10G, 5G, 10GY, 5GY, 5Y, 10YR, 2.5 YR, 7.5R, 2.5R, 5RP, 10P, 5P stimuliem. Modelēšanas eksperimentos tika izmantoti Munsell sistēmas stimulu reflektances profili, kuru mērījumus veikuši *Jouni Hiltunen* un *Joni Orava*. Veicot modelēšanas eksperimentu tika pieņemts, ka D15 testa stimuli tiek apgaismoti ar standarta gaismas avotu D6500 (skatīt 4.1 attēlu).



4.1. att. Gaismas avota D6500 starojuma spektrs. Grafiks reproducēts balstoties uz cvrl.org publicētajām standarta gaismas avotu vērtībām.

Gaismas absorbcijas efekti acs lēcā un makulas pigmentā tika modelēti izmantojot *Stockman&Sharpe* (2000) un *Bone et al.* (1992) ierosinātos modeļus. Tīklenes fotoreceptoru gaismas absorbcijas funkcijas tika modelētas izmantojot *Lamb* (1995) ierosināto modeli, kas nodrošina iespēju modelēt tīklenes fotoreceptoru gaismas absorbcijas funkcijas L un M tipa vālišu fotopigmentiem. Zinātniskajā literatūrā ir apstiprināts, ka *Lamb* piedāvātais modelis nevar tikt izmantots, lai modelētu S vālišu fotoreceptoru gaismas absorbcijas funkcijas, tāpēc S vālišu fotoreceptoru gaismas absorbcijas funkcijas tika modelētas izmantojot *Stockman&Sharpe* 2000. gada pētījumā ierosināto S vālišu ierosināto gaismas absorbcijas funkciju. Modelējot fotoreceptoru gaismas absorbcijas funkcijas, tika pieņemts, ka L un M fotopigmentu absorbcijas maksimumi ir

robežās no 530 līdz 560 nm, un optiskā blīvuma vērtības ir 0.4, savukārt S vāļišu fotopigmentu optiskā blīvuma vērtība tika pieņemta 0.3. Vāļišu funkcijas $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ tika noskaidrotas ar vienādojumiem 4.1-4.3, kur ar k_L , k_M , k_S apzīmēti normalizācijas koeficienti, ar $L_{OD}(\lambda)$ un $M_{POD}(\lambda)$ lēcas un makulas pigmenta gaismas absorbcijas funkcijas, savukārt ar L_{OD} , M_{OD} , S_{OD} pieņem vāļišu fotopigmentu optiskā blīvuma vērtības, $S_L(\lambda)$, $S_M(\lambda)$, $S_S(\lambda)$ ir apzīmētas vāļišu fotopigmentu spektrālās jutības funkcijas.

$$\bar{l}(\lambda) = k_L * 10^{-L_{\text{ēcaOD}}(\lambda)} * 10^{-M_{POD}(\lambda)} * (1 - 10^{-L_{OD} * S_L(\lambda)}) \quad (4.1)$$

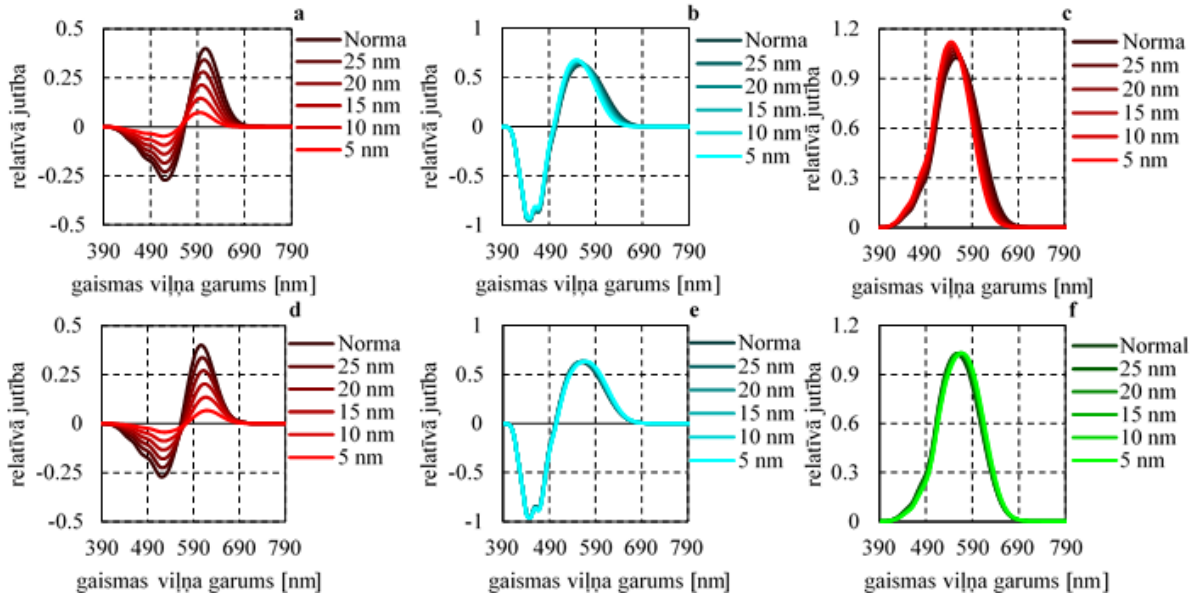
$$\bar{m}(\lambda) = k_M * 10^{-L_{\text{ēcaOD}}(\lambda)} * 10^{-M_{POD}(\lambda)} * (1 - 10^{-M_{OD} * S_M(\lambda)}) \quad (4.2)$$

$$\bar{s}(\lambda) = k_S * 10^{-L_{\text{ēcaOD}}(\lambda)} * 10^{-M_{POD}(\lambda)} * (1 - 10^{-S_{OD} * S_S(\lambda)}) \quad (4.3)$$

Spožuma jeb V lamda funkcija (skatīt $lum(\lambda)$ 4.4 vienādojumā) tika modelēta kā svērtā L un M vāļišu fotoreceptoru signālu summa, savukārt sarkani-zaļā krāsu oponentā funkcija (skatīt $rg(\lambda)$ 4.4 vienādojumā) tika modelēta kā starpība starp L un M vāļišu signāliem, savukārt dzelteni-zilā krāsu oponentā funkcija (skatīt $by(\lambda)$ 4.4 vienādojumā) tika modelēta kā diference starp L un M vāļišu signālu summu un S vāļišu signāliem. Lai ahromātiska stimula gadījumā nodrošinātu ekvivalentu krāsu oponento kanālu ierosinājumu kā cilvēkiem ar tā bez krāsu redzes deficītiem, tika izmantots Yaguchi et al. (2018) ierosinājums veikt L un M vāļišu signālu korekciju ar koeficientiem L_w/L'_w un M_w/M'_w . Vienādojumā 4.4 ar L_w un M_w apzīmē L un M vāļišu ierosinājumu ahromātiska stimula gadījumā, savukārt ar L'_w un M'_w apzīmē L un M vāļišu ierosinājumu cilvēkiem ar sarkani-zaļajiem krāsu redzes deficītiem. Papildus sarkani-zaļā un dzelteni-zilā oponento kanālu signālu vērtības tika normalizētas attiecībā pret V lamda funkcijas vērtību ahromātiska stimula gadījumā (skatīt 4.4 vienādojumu).

$$\begin{bmatrix} lum(\lambda) \\ rg(\lambda) \\ by(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,6899 & 0,3483 & 0 \\ \frac{M_w}{V_w} & \frac{-L_w}{V_w} & 0 \\ \frac{0,6899 * S_w}{V_w} & \frac{0,3483 * S_w}{V_w} & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_w(\lambda)}{L'_w} l(\lambda) \\ \frac{M_w(\lambda)}{M'_w} m(\lambda) \\ s(\lambda) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Lai aprēķinātu D15 testa stimuliem atbilstošās krāsu koordinātes CIExy krāsu telpā krāsu redzes deficītu gadījumos krāsu oponentās funkcijas tika transformētas uz L, M, S vāļišu signāliem. Vāļišu signāli, izmantojot CIE170-2 standartā ierosinātās funkcijas, tika transformēti uz CIExy sistēmas krāsu saskaņošanas funkcijām (skatīt 4.5 vienādojumu un att. 4.2).



4.2. att. Grafikos a, b d un d, c, f attēlotas spektrālās jutības funkcijas sarkani-zaļajam un dzelteni-zilajam krāsu oponentajiem kanāliem un ahromātiskajam kanālam protanomālijas un *deiteranomālijas* gadījumos.

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,9447 & -1,4145 & 0,3648 \\ 0,6899 & 0,3483 & 0 \\ 0 & 0 & 1,9349 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,6899 & 0,3483 & 0 \\ 0,8991 & -0,9955 & 0 \\ 0,4260 & 0,2151 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} lum(\lambda) \\ rg(\lambda) \\ by(\lambda) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

D15 testa kauliņiem atbilstošās integrāļsummas X, Y, Z krāsu redzes deficītu gadījumos tika aprēķinātas ar vienādojumiem 4.6-4.8. Vienādojumos 4.6-4.8 ar I_{D65} apzīmēts gaismas avota D6500 starojuma spektrs, savukārt ar $R_i(\lambda)$ i-tajam D15 testa kauliņam atbilstošais gaismas reflektances profils.

$$\begin{aligned} X_i &= \int_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) (0,8896 lum(\lambda) + 1,6532 rg(\lambda) - 0,3648 by(\lambda)) d\lambda \approx \\ &\approx 0,8896 \sum_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) lum(\lambda) + 1,6532 \sum_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) rg(\lambda) - \\ &- 0,3648 \sum_{390}^{830} by(\lambda) \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$Y_i = \int_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) lum(\lambda) \approx \sum_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) lum(\lambda) \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} Z_i &= \int_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) (1,1948 lum(\lambda) - 1,9348 by(\lambda)) d\lambda \approx \\ &\approx 1,1948 \sum_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) lum(\lambda) - 1,9348 \sum_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) by(\lambda) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Katram D15 testa kauliņam atbilstošās integrālsummas X_i , Y_i , Z_i tika transformētas uz CIELab krāsu telpas L_i , a_i , b_i parametriem. Vienādojumos 4.9-4.11 ar X_N , Y_N un Z_N apzīmētas gaismas avotam D6500 atbilstošās integrālsummas. Stimulu krāsu koordināšu transformācija no CIE_{xy} uz CIELab krāsu telpu tika veikta, lai noskaidrotu krāsu atšķirību vērtības ΔE starp D15 testa stimuliem krāsu redzes deficītu gadījumos (skatīt vienādojumus no 4.9-4.11).

$$L_i = 116 \sqrt[3]{\frac{Y_i}{Y_N}} - 16 \quad (4.9)$$

$$a_i = 500 * \left(\sqrt[3]{\frac{X_i}{X_N}} - \sqrt[3]{\frac{Y_i}{Y_N}} \right) \quad (4.10)$$

$$b_i = 200 * \left(\sqrt[3]{\frac{Y_i}{Y_N}} - \sqrt[3]{\frac{Z_i}{Z_N}} \right) \quad (4.11)$$

D15 testa krāsu kauliņu sakārtošanas secības tika noskaidrotas aprēķinot mazāko krāsu diferenci starp CIELab krāsu koordinātēm $L_{pēdējais}$, $a_{pēdējais}$, $b_{pēdējais}$, kas atbilst pēdējam krāsu kauliņam sakārtotajā krāsu kauliņu secībā, un krāsu koordinātēm L_i , a_i , b_i , kas atbilst D15 testa kauliņiem, kas vēl nav iekļauti sakārtotajā D15 testa kauliņu secībā (skatīt vienādojums 4.12).

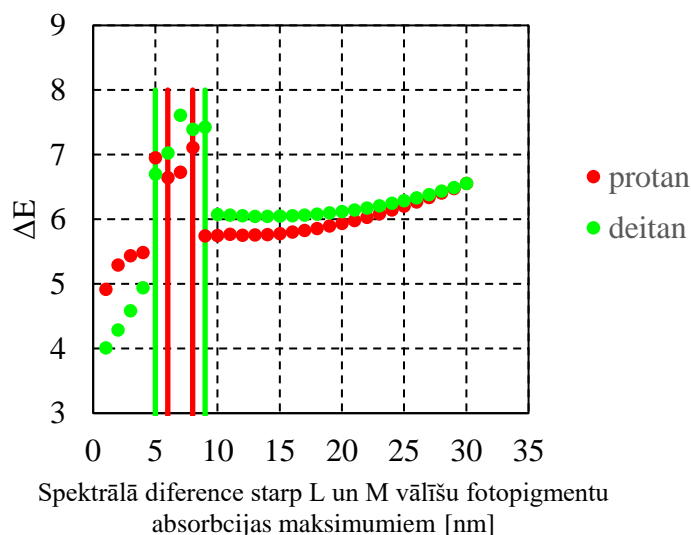
$$\Delta E = \sqrt{(L_{pēdējais} - L_j)^2 + (a_{pēdējais} - a_j)^2 + (b_{pēdējais} - b_j)^2} \quad (4.12)$$

Lai izvērtētu vai aprēķinātas krāsu sakārtošanas secības atbilst protanomālījas un deiteranomālījas gadījumiem, krāsu kauliņu sakārtošanas secības tika analizētas, izmantojot *Vingrys&KingSmith* ierosināto metodi. V&K metode nodrošina iespēju izvērtēt krāsu kauliņu secību atbilstību noteiktam krāsu redzes deficīta veidam un krāsu redzes deficīta izteiktības pakāpei. Saskaņā ar V&K metodi D15 testa kauliņu sakārtošanas secības var raksturot ar trīs parametriem – leņķisko vērtību α un koeficientiem C un S. Leņķiskā vērtība α norāda virzienu krāsu telpā, kurā konstatēta zemākā krāsu izšķirtspēja, savukārt koeficienti C un S norāda krāsu redzes deficīta izteiktību un atbilstību konkrētam krāsu redzes deficīta veidam.

4.2. Rezultāti

Pieņem, ka sarkani-zaļā krāsu redzes deficīta izteiktība ir atkarīga no spektrālās differences starp L un M vāļišu fotoreceptoru absorbcijas maksimumiem, t.i., samazinoties spektrālajai differencei starp L un M vāļišu fotopigmentiem palielinās krāsu redzes deficīta izteiktība.

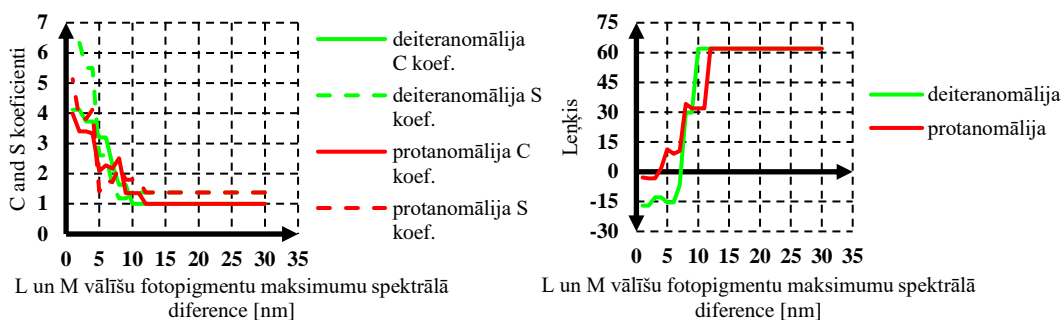
Teorētiskie aprēķini apstiprina, ka samazinot spektrālo diferenci starp L un M vālišu fotopigmentu absorbcijas maksimumiem no 30 līdz 12 nm protanomālijas un no 30 līdz 10 nm deiteranomālijas gadījumos nenovēro kļūdas D15 testa kauliņu sakārtošanas secībām. Iepriekš minētajos gadījumos, samazinoties spektrālajai diferencei starp L un M vālišu fotopigmentiem, konstatē vidējo krāsu atšķirību vērtību samazināšanos starp secīgajiem kauliņiem krāsu kauliņu sakārtošanas secībās, kas noskaidrotas ar matemātisko modeli (turpmāk tekstā vidējā krāsu kauliņu atšķirību vērtība). Samazinot spektrālo diferenci starp L un M vālišu fotopigmentiem no 8 līdz 5 nm protanomālijas gadījumos un no 9 līdz 5 nm deiteranomālijas gadījumā tālāku vidējo krāsu atšķirību vērtību samazināšanos nekonstatē (skatīt att.4.3). Izvērtējot aprēķinātās krāsu kauliņu sakārtošanas secības protanomālijas gadījumos konstatētas tādas kļūdas kā P-15, 1-14, 10-6 un deiteranomālijas gadījumos konstatētas tādas kļūdas kā 2-15, 13-4, 6-11, 12-10, 7-3, kas saskaņā ar Evans et al. (2020) ir raksturīgas atbilstošajiem krāsu redzes deficītu gadījumiem. Vāji izteiktu krāsu redzes deficītu gadījumos izveidotais modelis paredz vienu vai divas kļūdas, kas raksturīgas noteiktam krāsu redzes deficīta veidam, tiesa, kļūdas krāsu kauliņu sakārtošanas secībās atrodas tālu vienu no otras, kas izskaidro arī neraksturīgās kļūdas, un ievērojamu vidējo krāsu atšķirību vērtību pieaugumu, kas noskaidrotas analizējot krāsu kauliņu sakārtošanas secības ar izveidoto modeli.



4.3. att. Spektrālās diferences starp L un M fotopigmentu maksimumiem ietekme uz vidējām krāsu atšķirību vērtībām starp secīgajiem kauliņiem krāsu kauliņu sakārtošanas secībās, kas aprēķinātas ar matemātisko modeli.

Samazinot spektrālo diferenci starp L un M fotopigmentiem no 7 līdz 4 nm protanomālijas un no 7 līdz 1 nm deiteranomālijas gadījumos saskaņā ar V&K ierosināto metodi konstatē krāsu kauliņu sakārtošanas secības, kas raksturīgas protan un deitan deficītu gadījumiem. Spektrālajai diferencei samazinoties mazāk par 3 nm starp L un M vālišu fotopigmentiem izveidotais modelis

protan krāsu redzes deficītu gadījumos paredz krāsu kauliņu sakārtošanas secības, kas raksturīgas deitan tipa krāsu redzes deficītiem. Analizējot ar pētījuma ietvaros izstrādāto modeli paredzētās krāsu kauliņu sakārtošanas secības, ir apstiprināts, ka, samazinoties spektrālajai differencei starp L un M vāļišu fotopigmentiem, palielinās krāsu kauliņu sakārtošanas secībām atbilstošās C un S koeficientu vērtības, kas aprēķinātas ar V&K metodi. Minētie rezultāti apstiprina, ka samazinoties



4.4. att. Grafikā (a) attēlotas sakarības starp spektrālo differencei L un M fotopigmentiem un V&K metodes C un S koeficientiem. Grafikā (b) attēlotas sakarības starp spektrālo differencei L un M fotopigmentiem un leņķiskajām vērtībām, kas atbilst krāsu sakārtošanas secībām, kas noskaidrotas ar V&K metodi.

spektrālajai differencei starp L un M vāļišu fotopigmentiem krāsu redzes deficīta izteiktība palielinās (skatīt att. 4.4).

Pētījumos ir apstiprināts, ka protanomālijas un deiteranomālijas gadījumos L un M vāļišu absorbcijas maksimumiem atbilstošās gaismas viļņu garumu vērtības atšķiras par 2-6 un 2-9 nm (Deeb, 2005), savukārt cilvēkiem bez krāsu redzes deficītiem par ~30 nm. Šī pētījuma ietvaros izveidotais matemātiskais modelis paredz mazāku spektrālās differencei ietekmi starp L un M fotopigmentiem deiteranomālijas un protanomālijas gadījumos. Krāsu kauliņu sakārtošanas secību, kas iegūtas ar pētījuma ietvaros izstrādāto modeli, analīze ar V&K metodi paredz protan un deitan krāsu redzes deficītiem raksturīgas krāsu kauliņu sakārtošanas secības gadījumos, ja spektrālā difference starp L un M vāļišu maksimumiem atbilstošajām gaismas viļņu garumu vērtībām ir mazāka par 7 nm. Vingrys&KingSmith pētījumā konstatēts, ka personas ar protan un deitan tipa deficītiem uzrāda krāsu kauliņu sakārtošanas secības, kurām saskaņā ar V&K metodi atbilst leņķiskās vērtības no +3 līdz +17 un -4 līdz -11 grādi. Pētījumos ir apstiprināts, ka spektrālajai differencei starp L un M fotopigmentiem ir būtiska ietekme uz krāsu redzes deficītu izteiktību. Šī pētījuma ietvaros, modelējot krāsu kauliņu sakārtošanas secības, netika ņemts vērā ka fotopigmentam, kas tieši neizraisa krāsu izšķirtspējas problēmas, t.i., protan deficītu gadījumos M fotopigments un deitan deficītu gadījumos L fotopigments, ir konstatējamas gaismas absorbcijas spektru atšķirības. Proti, ir konstatēts, ka krāsu redzes deficīta neskartajam fotopigmentam ir iespējamas vairākas savstarpēji atšķirīgas modifikācijas. Fotopigmentu gaismas absorbcijas

spektri ir savstarpēji atšķirīgi, kas daļēji skaidro ievērojamās krāsu uztveres īpatnības cilvēkiem ar anomālo trihromatiju. Modelējot krāsu kauliņu sakārtošanas secības tika pieņemts, ka krāsu oponento kanālu uzbūves principi ir ekvivalenti cilvēkiem ar un bez krāsu redzes deficītiem. Boehm et al. 2014. gada pētījumā ir ierosināti alternatīvi modeļi, kas skaidro sarkani-zaļo krāsu oponento kanālu darbību krāsu redzes deficītu gadījumos, tiesa, šobrīd nav rasts viennozīmīgs apstiprinājums vai un kā hromatiskās informācijas analīze atšķiras starp krāsu redzes deficītu un normas gadījumiem. Kā būtisku sniegumu ietekmējošu faktoru min L un M vāļišu daudzumu attiecību tīklenē. Normas gadījumos L un M vāļišu daudzumu attiecība ir 2:1, individuālajām vērtībām svārstoties robežās no 0.4:1 līdz 13:1 (Carroll et al., 2002). Pieņem, ka gadījumos, kad novērojamas krasas L un M vāļišu daudzumu attiecības, konstatē paaugstinātu neirālā trokšņa līmeni sarkani-zaļajā krāsu oponentajā kanālā, kā rezultātā novēro samazinātu hromatisko izšķirtspēju (Barbur et al., 2008).

4.3. Secinājumi

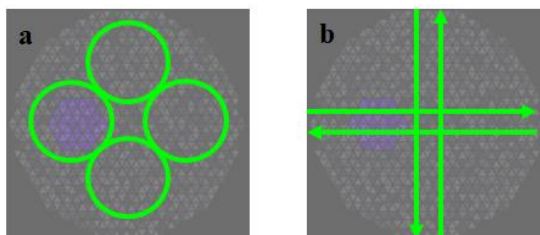
1. Matemātiskais modelis apstiprina L un M fotopigmentu spektrālās diferences ietekmi uz sniegumu D15 krāsu redzes testā cilvēkiem ar sarkani-zaļās krāsu redzes deficītiem – protanomāliju un deiteranomāliju. Samazinoties spektrālajai differencei starp L un M vāļišu pigmentiem, konstatē kļūdu skaita pieaugumu D15 testā, kas raksturīgs noteiktā tipa krāsu redzes deficīta veidam.
2. Pētījuma ietvaros izveidotais matemātiskais modelis ierosina, ka D15 testa krāsu kauliņu sakārtošanas secības, kas atbilst sarkani-zaļās anomālās trihromatijas gadījumiem, var noskaidrot pieņemot, ka krāsu oponentie kanāli funkcionē ekvivalenti normālās un anomālās trihromatijas gadījumos.

5. DATORIZĒTAIS KRĀSU REDZES TESTS

Pētījumā piedalījās 20 dalībnieku vecumā no 21 līdz 77 gadiem (44 ± 4 gadi). Katra pētījuma dalībnieka krāsu redze tika izmeklēta ar pseidoizohromatisko plašu testu HRR un 11 no 20 dalībniekiem krāsu redzes papildus tika izmeklēta ar Oculus HMC anomaloskopu. Pirms pētījuma dalībnieku iesaistes pētījumā tika ievākta potenciālo dalībnieku anamnēze, t.i., pētījumā netika iekļauti dalībnieki ar acu, neiroloģiskām saslimšanām, vai cukura diabētu.

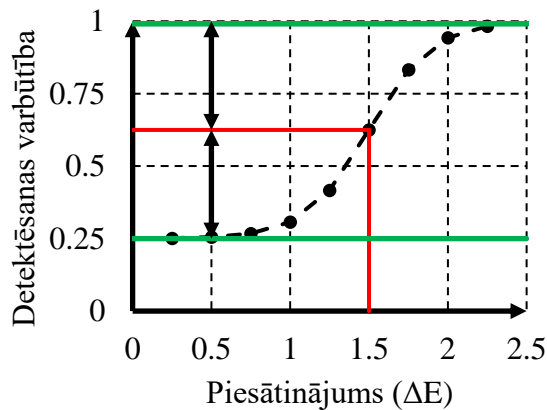
5.1. Metode

Katra pētījuma dalībnieka krāsu redze tika izvērtēta ar datorizētā krāsu redzes testa dinamisko un statisko stimulu divās atsevišķās mērījumu sesijās (skatīt att. 5.1). Datorizētā testa stimula fons 1 metra attālumā ir $9,1^\circ \times 8,9^\circ$ grādi, savukārt krāsainais stimul ir 2° grādi redzes lauka. Saskaņā ar *Kingdom&Prins* (2016) ierosināto piespiedu izvēļu dizaina definīciju tika izmantots 1AFC piespiedu izvēles dizains. Katra stimula demonstrācijas reizē tika demonstrēta viena no četrām stimula alternatīvām. Veicot krāsu redzes izmeklējumu ar statisko testa stimulu, krāsainais stimul tika demonstrēts 1.3 grādus no testa stimula fona centra, savukārt izmeklējot krāsu redzi ar dinamisko testa stimulu krāsainais stimul pārvietojās ar ātrumu 6,3 grādi/sekundē no augšas uz leju vai otrādi un no kreisās uz labo pusi vai otrādi. Pētījuma dalībnieki tika instruēti sniegt atbildi par stimula pozīciju vai pārvietošanās virzienu nospiežot atbilstošo taustiņu uz klaviatūras 3 sekunžu laikā no stimula demonstrēšanas brīža. Lai maskētu hromatisko stimulu, testa stimula fonu un testa stimula veidojošajiem trīsstūriem tika piešķirta viena no 5 spožuma vērtībām – 12, 14, 16, 18, 20 cd/m^2 . Testa stimul tika demonstrēts uz ahromātiska fona ($x=0,3189$ un $y=0,3601$) ar spožumu 16 cd/m^2 . Datorizētā krāsu redzes testa stimuli tika demonstrēti uz Dell U2312 HM monitora, kam tika veikta krāsu kalibrēšana ar hromometru Minolta CS-100A.



5.1.att. CCVT testa statiskā (a) un dinamiskā (b) stimula dizains. *Krāsu redzes izmeklējumos, kuros tika izmantots statiskais testa stimul, pētījuma dalībnieki tika lūgti norādīt krāsainā stimula pozīciju, savukārt veicot izmeklējumus ar dinamisko testa stimulu, pētījuma dalībnieki tika lūgti norādīt krāsainā stimula pārvietošanās virzienu.*

Pētījuma dalībnieku hromatiskā jutība katrā no virzieniem krāsu telpā tika noskaidrota divos posmos, t.i., izmantojot neparametrisko 3 up/1 down metodi un konstanto stimulu metodi. Izmantojot adaptīvo 3 up /1 down metodi tika noskaidrotas aptuvenās hromatiskās jutības sliekšņu vērtības. Lai noskaidrotu hromatiskās jutības sliekšņu vērtības katrā no 6 virzieniem krāsu telpā, tika izmantota konstanto stimulu metode. Balstoties uz rezultātu, kas noskaidrots ar adaptīvo metodi, tika izraudzītas 3 testa stimula vērtības, kuru piesātinājums ir zemāks un augstāks nekā hromatiskās jutības sliekšņa vērtībai, kas noskaidrota ar adaptīvo metodi. Katram pētījuma dalībniekam katrā virzienā krāsu telpā tika demonstrēti stimuli ar 7 dažādiem piesātinājuma līmeņiem, katrs stimulš 20 reizes, proti, vienas mērījumu sesijas laikā katrā virzienā krāsu telpā tika demonstrēti 140 stimulu un kopumā 840 stimulu. Mērījumu sesijas laikā tika noskaidrots, ar cik lielu varbūtību pētījuma dalībnieks korekti identificējis katru no testa stimuliem ar dažādiem piesātinājuma līmeņiem. Balstoties uz mērījumu rezultātiem katram virzienam krāsu telpā tika noskaidrota atbilstošā psihometriskā funkcija, kas apraksta sakarību starp krāsaino stimulu piesātinājumu un to detektēšanas varbūtību. Hromatiskās jutības sliekšņu vērtības katrā no virzieniem krāsu telpā tika noskaidrotas ar atbilstošo psihometriskās funkcijas regresijas modeli, kas raksturo pētījuma dalībnieka sniegumu. Piespiedu izvēļu testa veids, kas tika izmantots šī pētījuma ietvaros, pieļauj, ka pētījuma dalībnieks ar 25% varbūtību var sekmīgi sniegt pareizo atbildi pat tādos gadījumos, ja testa stimula intensitāte ir zemāka par pētījuma dalībnieka hromatiskās jutības sliekšņu vērtību noteiktā virzienā krāsu telpā. Lai objektīvi izvērtētu pētījuma dalībnieka hromatisko jutību, tika veikta pētījuma dalībnieku sniegumu raksturojošo datu korekcija. Balstoties uz psihometriskās funkcijas modeli tika noskaidrota hromatiskās jutības sliekšņu vērtība, kas atbilst detektēšanas varbūtībai 62,5%, t.i., varbūtība, ar kuru pētījuma dalībnieks sniedz korektu atbildi 50% gadījumu ņemot vērā, ka uzminēšanas varbūtība ir 25% (skatīt att.5.2)



5.2. att. Ilustratīvs psihometriskās funkcijas piemērs. Grafikā ar sarkanajām vertikālajām un horizontālajām līnijām norādīta hromatiskās jutības sliekšņu vērtība un tai atbilstošā detektēšanas varbūtība. Ar zaļajām līnijām norādīts sigmoidālās funkcijas vērtību apgabals, savukārt ar melnajām bultām ilustrēts, ka sliekšņa vērtībai atbilstošā relatīvā detektēšanas varbūtība ir 50%. Grafikā hromatiskās jutības sliekšņu vērtība ir 1,5 ΔE vienības, kas atbilst 62,5% detektēšanas varbūtībai.

5.2. Rezultāti

5.2.1. Mērījumu atkārtojamība.

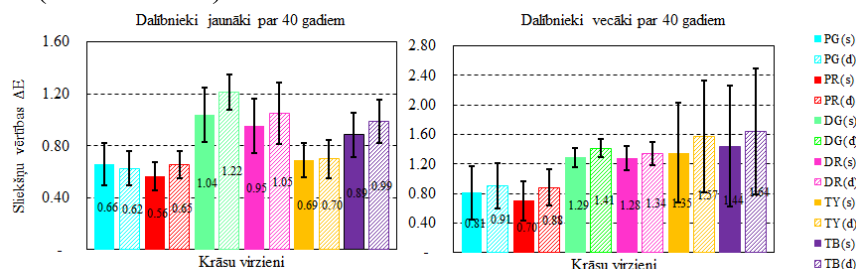
Katrs pētījuma dalībnieks piedalījās divās mērījumu sesijās, kuru ietvaros krāsu redze tika izvērtēta ar datorizētā krāsu redzes testa dinamisko un statisko testa stimulu. Izvērtējot hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas ar statisko testa stimulu tika konstatētas statistiski būtiskas atšķirības starp mērījumu sesijām vienā no virzieniem krāsu telpā, savukārt salīdzinot hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas ar dinamisko testa stimulu statistiski būtiskas atšķirības starp mērījumu sesijām netika konstatētas nevienā no krāsu virzieniem (skatīt tabula 5.1).

5.1. Tabula Hromatiskās jutības mērījumu atkārtojamības analīze ar statisko un dinamisko testa stimulu

Krāsu virziens	Statiskais testa stimul	Dinamiskais testa stimul
PG	$t=-1,18 > t_{0,05; 19}=-2,09$	$t=0,73 < t_{0,05; 19}=2,09$
PR	$t=-0,25 > t_{0,05; 19}=-2,09$	$t=-1,25 > t_{0,05; 19}=-2,09$
DG	$t=0,82 < t_{0,05; 19}=2,09$	$t=1,08 < t_{0,05; 19}=2,09$
DR	$t=0,75 > t_{0,05; 19}=2,09$	$t=0,98 > t_{0,05; 19}=2,09$
TY	$t=-2,48 < t_{0,05; 19}=-2,09$	$t=-0,08 > t_{0,05; 19}=-2,09$
TB	$t=-0,78 < t_{0,05; 19}=2,09$	$t=0,13 > t_{0,05; 19}=2,09$

5.2.2. Krāsu izšķirtspēja pirms un pēc 40 gadu vecuma

Krāsu redzes pētījumos ir apstiprināts, ka vecumā pēc 40 gadiem ir konstatējams pakāpenisks hromatiskās jutības sliekšņu vērtību pieaugums, t.i., pieaugot vecumam, spēja izšķirt krāsainus stimulus samazinās (Barbur&Rodriguez-Carmona, 2015). Tiesa, ar vecumu saistītais hromatiskās izšķirtspējas samazinājums ir ievērojami zemāks nekā krāsu redzes deficītu gadījumos. Šī pētījuma ietvaros izveidotā krāsu redzes testa izšķirtspēja tika izvērtēta salīdzinot sniegumu, kas uzrādīts ar datorizēto krāsu redzes testu, starp divu vecuma grupu pārstāvjiem, t.i., cilvēkiem vecumā līdz un pēc 40 gadiem (skatīt att. 5.3).



5.3. att. Hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas protan, deitan un tritan virzienos krāsu telpā, dalībniekiem jaunākiem un vecākiem par 40 gadiem ar statisko testa stimula versiju - PG (s), PR (s), DG (s), DR (s), TY(s), TB (s) un dinamisko testa stimula versiju PG (d), PR (d), DG (d), DR (d), TY(d), TB (d).

Viens no šī pētījuma mērķiem ir izvērtēt krāsu redzes testa stimula dizaina ietekmi uz hromatisko jutību. Salīdzinot hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas ar dinamisko un statisko testa stimulu, cilvēkiem vecuma grupā līdz 40 gadiem, statistiski būtiskas atšķirības konstatētas tikai vienā no sešiem virzieniem krāsu telpā, kuros tika veikti hromatiskās jutības mērījumi. Savukārt salīdzinot hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas ar abiem testa stimuliem gados vecākajiem dalībniekiem, konstatētas statistiski būtiskas atšķirības sniegumā četros no sešiem virzieniem krāsu telpā, kuros tika veikti hromatiskās jutības mērījumi (skatīt tabula 5.2).

5.2. Tabula Hromatiskās jutības vērtību analīze, kas noskaidrotas ar dinamisko un statisko testa stimulu, vecuma grupu ietvaros.

Krāsu virziens	Vecuma grupa līdz 40 gadiem	Vecuma grupa virs 40 gadiem
PG	$t=0,69 > t_{0,05; 8}=-2,36$	$t=-1,50 > t_{0,05; 11}=-2,20$
PR	$t=-2,35 > t_{0,05; 8}=-2,36$	$t=-1,59 > t_{0,05; 11}=-2,20$
DG	$t=-3,10 < t_{0,05; 8}=-2,36$	$t=-4,05 > t_{0,05; 11}=-2,20$
DR	$t=-1,79 > t_{0,05; 8}=-2,36$	$t=-3,51 < t_{0,05; 11}=-2,20$
TY	$t=-0,11 > t_{0,05; 8}=-2,36$	$t=-3,01 < t_{0,05; 11}=-2,20$
TB	$t=-2,09 > t_{0,05; 8}=-2,36$	$t=-2,69 < t_{0,05; 11}=-2,20$

Salīdzinot hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas ar statisko testa stimulu, starp abām vecuma grupām, konstatētas statistiski būtiskas atšķirības 4 no 6 virzieniem krāsu telpā, savukārt hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar dinamisko testa stimulu, konstatētas statistiski būtiskas atšķirības visos 6 virzienos krāsu telpā starp abām vecumam grupām (skatīt tabula 5.3).

5.3. Tabula Hromatiskās jutības sliekšņu vērtību statistiskā analīze starp dalībniekiem vecumā līdz un pēc 40 gadiem.

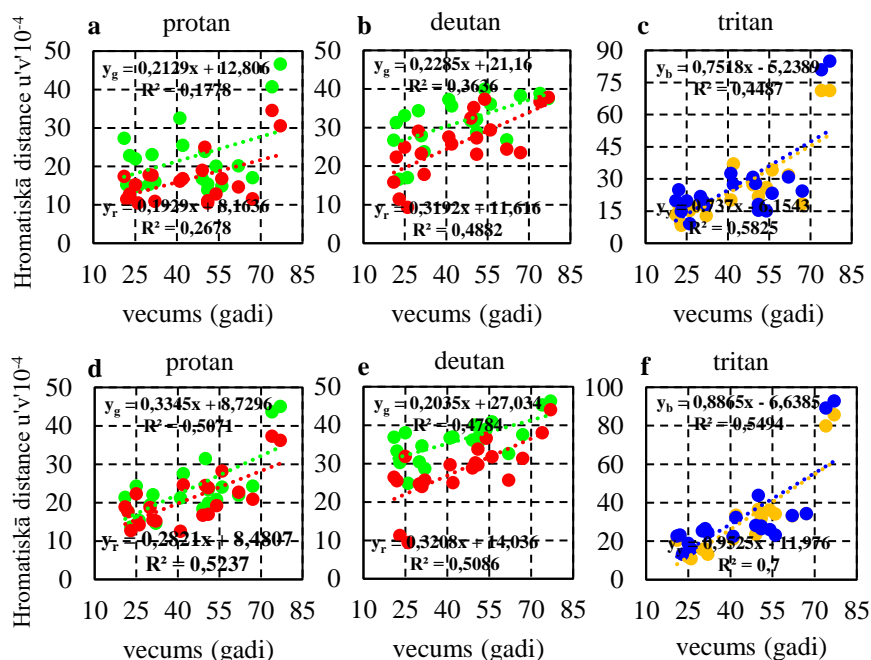
Krāsu virziens	Statiskais testa stimul	Dinamiskais testa stimul
PG	$t=1,22 < t_{0,05; 16} = 2,12$	$t=3,22 > t_{0,05; 18} = 2,10$
PR	$t=1,10 < t_{0,05; 16} = 2,12$	$t=3,34 > t_{0,05; 18} = 2,10$
DG	$t=3,34 > t_{0,05; 18} = 2,10$	$t=2,88 > t_{0,05; 17} = 2,11$
DR	$t=4,05 > t_{0,05; 18} = 2,10$	$t=2,81 > t_{0,05; 16} = 2,12$
TY	$t=3,22 > t_{0,05; 12} = 2,18$	$t=3,58 > t_{0,05; 12} = 2,18$
TB	$t=2,31 < t_{0,05; 12} = 2,18$	$t=2,56 > t_{0,05; 12} = 2,18$

Salīdzinot gados jaunākās dalībnieku grupas sniegumu ar abiem datorizētā testa stimuliem, būtiskas hromatiskās jutības atšķirības nav konstatētas, savukārt gados vecākiem dalībniekiem mērījumu sesijās ar dinamisko testa stimulu konstatētas statistiski būtiski augstākas hromatiskās jutības sliekšņu vērtības. Izvērtējot snieguma atšķirības ar abiem datorizētā testa stimuliem starp abām pētījuma dalībnieku grupām, tika noskaidrots, ka ar dinamisko testa stimulu konstatējamas viennozīmīgas snieguma atšķirības starp abām vecuma grupām.

5.2.3. Vecums un hromatiskā jutība

Veicot krāsu izmeklējumus ar datorizētajiem krāsu redzes testiem, ir konstatēts, ka hromatiskās jutības sliekšņu vērtības pieaug, pieaugot vecumam. Lai izvērtētu sakarību starp vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kā arī lai salīdzinātu šī pētījuma rezultātus ar Wurger et al. (2013) rezultātiem, šajā pētījumā noskaidrotās hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tika transformētas no CIELab uz CIELuv krāsu telpu (skatīt 5.4 att.). Veicot statistisko analīzi starp hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar dinamisko un statisko testa stimulu, starp protanopijas sarkano un zaļo, deiteranopijas sarkano un zaļo, tritanopijas dzelteni un zilo krāsu virzienu, netika konstatētas statistiski būtiskas atšķirības starp hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām deiteranopijas krāsu virzienos, kas noskaidrotas ar statisko testa stimulu, kā arī statistiski būtiskas atšķirības netika konstatētas starp hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas protanopijas krāsu virzienos ar dinamisko testa stimulu. Proti, vairumā gadījumu konstatē būtiskas

atšķirības starp krāsu virzieniem, kas atbilst vienai konfūzijas līnijai, kas liedz apvienot tos vienā grupā, lai vienkāršotu tālāko analīzi.



5.4. att. Sakarības starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar statisko testa stimulu protan (a), deitan (b), tritan (c) un ar dinamisko testa stimulu protan (d), deitan (e), tritan (f) virzienos krāsu telpā.

Ievērojot iepriekš minēto, katrs no 6 krāsu virzieniem tika analizēts atsevišķi. Analizējot regresijas modeļu slīpuma koeficientus, kas apraksta sakarību starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, konstatēts, ka regresijas modeļu slīpuma koeficienti ir statistiski būtiski atšķirīgi no 0 visos gadījumos izņemot sakarību starp hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas protanopijas zaļajā virzienā ar statisko testa stimulu, un pētījuma dalībnieku vecumu (skatīt tabula 5.4).

5.4. Tabula Regresijas modeļu, kas apraksta sakarības starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, statistiskā analīze.

Krāsu virziens	Statiskais testa stimuluss	Dinamiskais testa stimuluss
PG	$t=1,98 < t_{0,05; 18} = 2,10$	$t=4,30 > t_{0,05; 18} = 2,10$
PR	$t=2,57 > t_{0,05; 18} = 2,10$	$t=4,45 > t_{0,05; 18} = 2,10$
DG	$t=3,21 > t_{0,05; 18} = 2,10$	$t=4,06 > t_{0,05; 18} = 2,10$
DR	$t=4,14 > t_{0,05; 18} = 2,10$	$t=4,32 > t_{0,05; 18} = 2,10$
TY	$t=5,01 > t_{0,05; 18} = 2,10$	$t=6,48 > t_{0,05; 18} = 2,10$
TB	$t=3,83 > t_{0,05; 18} = 2,10$	$t=4,68 > t_{0,05; 18} = 2,10$

Wuerger et al. (2013) pētījumā ar CCT testu tika konstatēta statistiski būtiska sakarība starp vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām protan, deitan un tritan virzienos krāsu telpā. Salīdzinot Wuerger et al. (2013) pētījumā noskaidrotos regresijas modeļu slīpuma koeficientus ar atbilstošajiem regresijas modeļu slīpuma koeficientiem, kas noskaidroti šajā pētījumā, statistiski būtiskas atšķirības konstatētas tikai deiteranopijas zaļajā virzienā ar dinamisko testa stimulu (skatīt tabula 5.5).

5.5. Tabula Wuerger et al. (2013) un šajā pētījumā noskaidroto regresijas modeļu slīpuma koeficientu atšķirību novērtējums.

Krāsu virziens	Statiskais testa stimul	Dinamiskais testa stimul
PG	-	$t=0,23 < t_{0,05; 201} = 1,97$
PR	$t=1,60 < t_{0,05; 201} = 1,97$	$t=0,80 < t_{0,05; 201} = 1,97$
DR	$t=1,60 < t_{0,05; 201} = 1,97$	$t=2,13 > t_{0,05; 201} = 1,97$
DR	$t=0,68 < t_{0,05; 201} = 1,97$	$t=0,68 < t_{0,05; 201} = 1,97$
TY	$t=0,99 < t_{0,05; 201} = 1,97$	$t=-0,19 > t_{0,05; 201} = -1,97$
TB	$t=0,74 < t_{0,05; 201} = 1,97$	$t=0,14 < t_{0,05; 201} = 1,97$

Wuerger et al. (2013) pētījumā tika konstatēts, ka, pieaugot vecumam, hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tritan virzienos krāsu telpā pieaug straujāk nekā protan un deitan virzienos krāsu telpā. Salīdzinot regresijas modeļu slīpuma koeficientus, kas apraksta sakarību starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības vērtībām, kas noskaidrotas ar dinamisko un statisko testa stimulu, tika apstiprināts, ka hromatiskās izšķirtspējas sliekšņu vērtības pieaug straujāk tritan virzienos krāsu telpā (skatīt tabula 5.6).

5.6. Tabula Regresijas modeļu slīpuma koeficientu, kas apraksta sakarību starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, statistiskā analīze. Pētījuma rezultātu statistiskā analīze apstiprina, ka hromatiskās jutības sliekšņu vērtības pieaug straujāk pieaugot vecumam tritan virzienos krāsu telpā nekā protan un deitan virzienos krāsu telpā.

Tritan krāsu virzieni	Protan un deitan krāsu virzieni	Statiskais testa stimul	Dinamiskais testa stimul
TY	PG	-	$t=3,72 > t_{0,05; 36} = 2,03$
	PR	$t=3,29 > t_{0,05; 36} = 2,03$	$t=4,19 > t_{0,05; 36} = 2,03$
	DG	$t=3,11 > t_{0,05; 36} = 2,03$	$t=4,82 > t_{0,05; 36} = 2,03$
	DR	$t=2,52 > t_{0,05; 36} = 2,03$	$t=3,84 > t_{0,05; 36} = 2,03$
TB	PG	-	$t=2,70 > t_{0,05; 36} = 2,03$
	PR	$t=2,66 > t_{0,05; 36} = 2,03$	$t=3,03 > t_{0,05; 36} = 2,03$
	DG	$t=2,50 > t_{0,05; 36} = 2,03$	$t=3,49 > t_{0,05; 36} = 2,03$
	DR	$t=2,05 > t_{0,05; 36} = 2,03$	$t=2,78 > t_{0,05; 36} = 2,03$

5.3. Secinājumi

1. Salīdzinot pētījuma dalībnieku uzrādītās hromatiskās jutības sliekšņu vērtības starp divām mērījumu sesijām, kas noskaidrotas ar dinamisko un statisko testa stimulu, statistiski būtiskas atšķirības konstatētas tikai 1 no 6 virzieniem krāsu telpā, kas liecina par labu mērījumu atkārtojamību, kā ar dinamisko tā statisko testa stimulu.
2. Salīdzinot abu pētījuma dalībnieku grupu sniegumu ar abām datorizētā testa versijām, konstatētas statistiski būtiskas atšķirības sniegumā starp abām grupām. Izvērtējot regresijas modeļu slīpuma koeficientus, kas apraksta sakarības starp vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, 5 no 6 virzieniem krāsu telpā konstatēts, ka pētījuma dalībnieku vecumam ir būtiska ietekme uz sniegumu datorizētajā krāsu redzes testā
3. Salīdzinot hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas ar dinamisko un statisko testa stimulu, konstatēts, ka testa stimulu uzbūves atšķirībām nav būtiskas ietekmes uz gados jaunāku pētījuma dalībnieku sniegumu, savukārt gados vecākiem dalībniekiem konstatē augstākas hromatiskās jutības sliekšņu vērtības ar dinamisko testa stimulu. Snieguma atšķirības starp vecuma grupām ar dažādiem testa stimuliem norāda uz dinamiskā un statiskā stimula uztveres atšķirībām.
4. Šī pētījuma ietvaros izveidotais datorizētā testa stimuls un psihofizikālā metode nodrošina kvalitatīvu krāsu redzes izmeklējumu, ko apstiprina sakrītoši rezultāti ar Wurger et al. (2013) pētījumu. Izvērtējot pētījuma dalībnieku sniegumu ar datorizēto krāsu redzes testu, konstatēta statistiski būtiska korelācija starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kā arī konstatēts statistiski būtiski straujāks hromatiskās jutības sliekšņu pieaugums sakarā ar pieaugošo vecumu tritan virzienos krāsu telpā salīdzinājumā ar protan un deitan virzieniem krāsu telpā.

6.DATORIZĒTAIS KRĀSU REDZES TESTS – CCVT

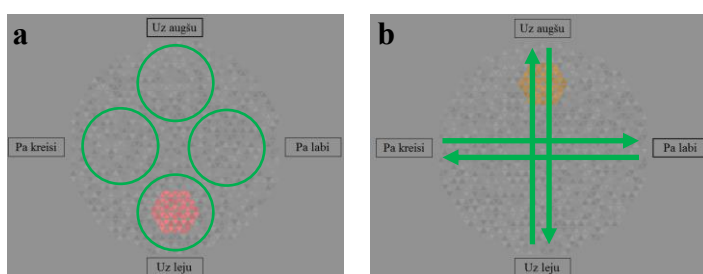
6.1. Pētījuma dalībnieki un eksperiments

Balstoties uz iepriekš veiktā pētījuma iestrādēm tika veikti uzlabojumi datorizētajam krāsu redzes testam, lai vienkāršotu eksperimenta norisi un uzlabotu mērījumu precizitāti. Iepriekšējā testa versijā (P2) hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tika izvērtētas individuāli 6 virzienos krāsu telpā ar adaptīvo neparametrisko metodi 3 up /1 down un konstanto stimulu metodi. Šī pētījuma ietvaros (K1) hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tika izvērtētas izmantojot *multiple random staircase* metodi, kas nodrošina iespēju veikt hromatiskās jutības mērījumus paralēli vairākos virzienos krāsu telpā. Iepriekšējā pētījuma ietvaros hromatiskā jutība tika izvērtēta virzienos krāsu telpā, kas atrodas abus protan, deitan un tritan krāsu redzes deficītiem atbilstošajām konfūziju līnijām, t.i., 6 virzienos krāsu telpā. Balstoties uz Davidoff et al. (2016) pētījuma atziņām, virzienu skaits krāsu telpā, kuros tiek veikti hromatiskās jutības mērījumi tika palielināts no 6 līdz 10, lai uzlabotu mērījumu precizitāti krāsu redzes deficītu gadījumos. Šis pētījums tika veikts ar mērķi izvērtēt uzlabotās krāsu redzes testa versijas (turpmāk tekstā CCVT) jutību un specifitāti, kā arī krāsu redzes izmaiņas dažādās vecuma grupās. Pētījumā piedalījās 72 cilvēku vecumā no 19 līdz 73 bez krāsu redzes deficītiem un 10 cilvēku ar krāsu redzes deficītiem. Pētījuma dalībnieku krāsu redze tika izvērtēta ar HRR, FM100, Oculus HMC anomaloskopu, CAD un CCVT testiem.

6.2. CCVT tests

CCVT testa stimula fons un krāsainais stimuluss ir eliptiskas formas ar diametru 5° un 1° grādi redzes lauka 1,40 metru attālumā. Lai nodrošinātu kontrasta troksni ahromātiskajiem un krāsainajiem stimuliem tika piešķirtas kāda no 9 spožuma vērtībām – 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42 cd/m^2 . Testa stimulss tika attēlots uz ahromātiska fona ($x=0,2997$, $y=0,3130$) ar spožumu 34 cd/m^2 . Testa stimula vidējais spožums ir ekvivalents fona apgaismojumam, t.i., katra no 9 spožuma vērtībām tika piešķirta vienādam skaitam testa stimulu veidojošo trīsstūru. Spožuma vērtības katram no trīsstūriem tika piešķirtas izmantojot gadījuma skaitļu ģeneratoru. Lai izvairītos no artefaktu figūru veidošanās, t.i., viena spožuma līmeņa lauciņu sakopojumiem testa stimulā, tika izveidota funkcija, kas automātiski identificē un “dzēš”, t.i., maina atsevišķu artefaktu figūru spožuma vērtības, lai izslēgtu gadījumus, kad blakus atrodas divi lauciņi ar ekvivalentu spožuma vērtību. Balstoties uz zinātnisko literatūru krāsainā stimula pārvietošanās ātrums dinamiskās testa stimula versijas gadījumā tika izvēlēts 4 grādi/s (Barbur, 2004).

Hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tika izvērtētas 10 virzienos krāsu telpā. Mērījumu sesija katrā no 10 virzieniem krāsu telpā tika uzsākta ar lielāko iespējamo piesātinājuma līmeni, t.i., piesātinājuma līmeni, kas ir pieejams visos spožuma līmeņos noteiktā virzienā krāsu telpā. Veicot hromatiskās jutības mērījumu ar statisko testa stimulu, pētījuma dalībnieki tika lūgti identificēt krāsainā stimula pozīciju attiecībā pret testa stimula fona centru, t.i., uz augšu, pa labi, uz leju vai pa kreisi, nospiežot atbilstošo pogu uz pulsts 3 sekunžu laikā no testa stimula parādīšanās brīža. Izvērtējot krāsu redzi ar dinamisko testa stimulu pētījuma dalībnieki tika lūgti identificēt krāsainā stimula pārvietošanās virzienu, t.i., uz augšu, pa labi, uz leju vai pa kreisi, nospiežot atbilstošo pogu uz pulsts testa stimula demonstrācijas laikā un/vai 3 sekunžu laikā pēc testa stimula demonstrācijas beigām (skatīt att. 6.1).

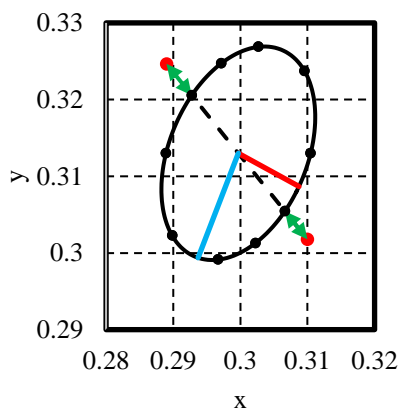


6.1. att. CCVT testa statiskā (a) un dinamiskā (b) stimula dizains. Veicot krāsu redzes izmeklējumu ar statisko testa stimulu, pētījuma dalībnieki tika lūgti norādīt krāsainā stimula pozīciju, savukārt veicot izmeklējumus ar dinamisko testa stimulu, pētījuma dalībnieki tika lūgti norādīt krāsainā stimula pārvietošanās virzienu.

Lai optimizētu krāsu redzes izmeklējumu ar CCVT testu, krāsainā testa stimula piesātinājums tika samazināts par 0,1 Log vienību pēc katras pareizas atbildes. Tiklīdz tika konstatēta kļūda kādā no virzieniem krāsu telpā, testa stimula intensitāte turpmāk tika regulēta balstoties uz adaptīvo neparametrisko metodi *2 up/ 1 down*, t.i., testa stimula piesātinājums noteiktā virzienā krāsu telpā tika samazināts par 0,1 Log vienību, ja tika reģistrētas divas secīgas pareizas atbildes noteiktā virzienā krāsu telpā, savukārt krāsainā stimula piesātinājums tika palielināts, ja tika reģistrēta nekorekta atbilde. Mērījumi visos 10 virzienos krāsu telpā tika veikti paralēli, proti, stimuli, kas atbilst dažādiem virzieniem krāsu telpā tika demonstrēti jauktā secībā. Mērījumi katrā no virzieniem krāsu telpā tika veikti tik ilgi, kamēr tika noskaidrotas 10 hromatiskās jutības sliekšņu vērtības. Lai noskaidrotu vidējo hromatiskās jutības sliekšņu vērtību katrā no virzieniem krāsu telpā, noskaidrotās hromatiskās jutības sliekšņu vērtības tika sakārtotas no mazākās uz lielāko un vidējā hromatiskās jutības vērtība tika noskaidrota kā vidējais no 6 mazākajām hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām. Lai raksturotu hromatisko izšķirtspēju, pētījuma dalībnieku rezultāti tika aprakstīti ar otrās kārtas funkciju – elipsi. Elipses parametri tika izvēlēti tā, lai minimizētu distanču

summu starp hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām atbilstošajām krāsu koordinātēm un elipses vienādojumu 10 virzienos krāsu telpā (skatīt att. 6.2).

Pētījuma dalībnieku sniegums CCVT testā tika raksturots aprēķinot hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, balstoties uz minimālās izšķiršanas elipses regresijas modeli, virzienos krāsu telpā, kuros stimulu uztveri primāri nodrošina sarkan-zaļais un dzelten-zilais krāsu oponentais kanāls. Sarkani-zaļajā virzienā krāsu telpā stimulu uztveri primāri nodrošina L un M vāļītes, savukārt dzelteni-zilajā virzienā krāsu telpā stimulu uztveri nodrošina S vāļītes.



6.1. att. Minimālās izšķiršanas elipses parametru aprēķina ilustratīvs piemērs. Elipses parametrus aprēķina minimizējot hromatisko distanci (skatīt līnijas zaļā krāsā) starp hromatiskās jutības vērtībām atbilstošo testa stimulu krāsu koordinātēm (skatīt sarkanos punktus) un elipses funkciju (skatīt melno līniju).

Lai noskaidrotu vienādojumu CIE_{xy} krāsu telpā, kas apraksta sarkani-zaļo krāsu oponento kanālu, pieņem, ka S vāļīšu ierosinājums saglabājas konstants, t.i., S vāļīšu ierosinājums fonam un krāsainajiem stimuliem neatšķiras. Vienādojums, kas apraksta dzelteni-zilo krāsu oponento krāsu kanālu CIE_{xy} krāsu telpā, tika aprēķināts balstoties uz pieņēmumu, ka L un M vāļīšu ierosinājuma līmeņi testa stimulam un fonam ir ekvivalenti. Krāsu oponentajām funkcijām atbilstošie vienādojumi CIE_{xy} krāsu telpā (skatīt vienādojumus 6.1 un 6.2) tika noskaidroti balstoties uz transformācijas matricu (skatīt vienādojumu 6.3), kas apraksta sakarību starp vāļīšu receptoru LMS ierosinājuma līmeņiem un krāsaino stimulu XYZ vērtībām un augstāk minētajiem pieņēmumiem par krāsu oponento kanālu darbības mehānismiem.

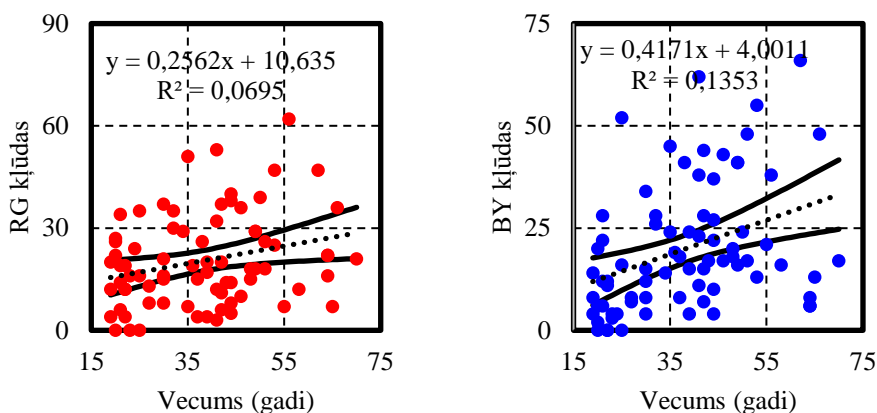
$$y = -0,4787 + 0,4787 \quad (6.1)$$

$$y = 2,2735x - 0,3819 \quad (6.2)$$

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4002 & 0,7076 & -0,0808 \\ -0,2263 & 1,1653 & 0,0457 \\ 0 & 0 & 0,9182 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

6.3. Hromatiskā izšķirtspēja cilvēkiem bez krāsu redzes

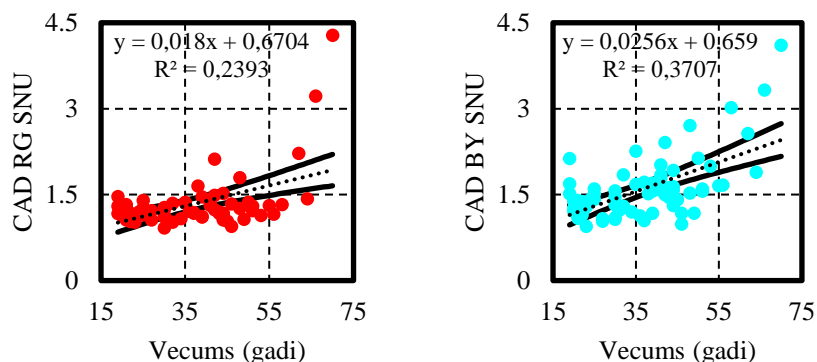
Pētījuma dalībnieku krāsu redze tika izvērtēta ar HHR, CAD, FM100, anomaloskopa un CCVT testiem. Vairākos pētījumos, izmantojot dažādas krāsu redzes izvērtēšanas metodes, ir apstiprināta sakarība starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās izšķirtspējas sliekšņu vērtībām. Šobrīd pieņem, ka vecuma grupā pēc 40 gadiem konstatē pakāpenisku hromatiskās izšķirtspējas samazināšanos. Šajā pētījumā tika izmantoti trīs krāsu redzes testi - FM100, CAD un CCVT, kas nodrošina iespēju izvērtēt vecuma ietekmi uz sniegumu krāsu redzes izmeklējumos. Augstāk minētā analīze ir būtiska, lai izvirzītu kritērijus, kas nodrošina iespēju sekmīgi atšķirt krāsu redzes traucējumu gadījumus no normālās trihromatijas gadījumiem dažādās vecuma grupās. Lai izvērtētu sakarību starp pētījuma dalībnieku sniegumu FM100 krāsu redzes testā un to vecumu, FM100 krāsu redzes testā uzrādītajam krāsu kauliņu sakārtošanas secībām tika aprēķinātas RG un BY kļūdas, t.i., kļūdas, kas raksturo ar sarkani-zaļā un dzelteni-zilā krāsu oponentā kanāla izšķirtspēju. Lineārās regresijas modeļu slīpuma koeficientu, kas apraksta sakarību starp vecumu un FM100 testā pieļautajām RG un BY kļūdām, analīze apstiprina statistiski būtisku sakarību starp pētījuma dalībnieku vecumu un pieļauto kļūdu apjomu. Salīdzinot RG un BY kļūdu skaita pieauguma tempu FM100 testā sakarā ar pieaugošo vecumu statistiski būtiskas atšķirības netika konstatētas (skatīt att. 6.3).



6.2. att. Funkcionālās sakarības starp pētījuma dalībnieku vecumu un RG/BY kļūdu apjomu FM100 krāsu redzes testā. Lineārās regresijas koeficientu analīze apstiprina statistiski būtiskas sakarības starp pētījuma dalībnieku vecumu un pieļauto RG ($t = 2,35 > t_{0,05;74} = 1,99$.) un BY ($t = 3,40 > t_{0,05;74} = 1,99$) kļūdu skaitu FM100 krāsu sakārtošanas testā. Salīdzinot RG un BY kļūdu skaita pieauguma tempu FM100 testā atkarībā no pētījuma dalībnieku vecuma, statistiski būtiskas atšķirības netika konstatētas $t = 0,98 < t_{0,05;148} = 1,97$.

CAD testa statistiskā analīze apstiprina statistiski būtisku korelāciju starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām RG ($t = 4,69 > t_{0,05;68} = 1,99$) un BY ($t = 6,42 > t_{0,05;68} = 1,99$) (skatīt att. 6.4). Tiesa, pretstatā citu pētījumu rezultātiem

statistiski būtiskas atšķirības starp hromatiskās jutības sliekšņu vērtību pieaugumu sarkani-zaļajam un dzelteni-zilajam krāsu oponentajam kanālam sakarā ar pieaugošo vecumu netika konstatētas ($t = 1.39 < t_{0,05;136} = 1.98$) (Barbur&Rodriguez-Carmona, 2015).



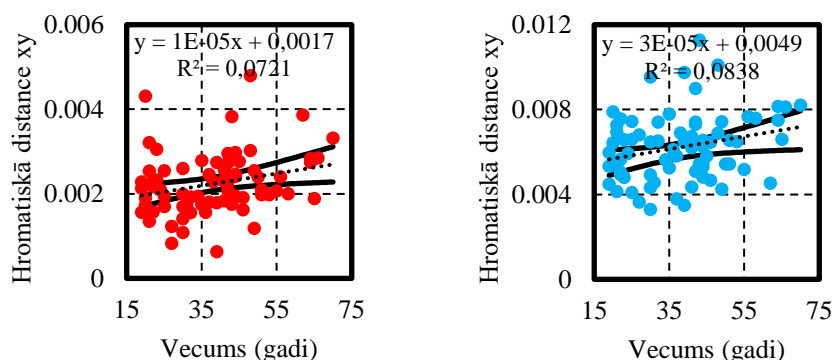
6.3. att. Lineārās regresijas modelis starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar CAD datorizēto krāsu redzes testu.

Pētījuma dalībnieku krāsu redze tika izmeklēta ar CCVT testu, izmantojot kā statisko tā dinamisko testa stimula versiju, 10 virzienos krāsu telpā. Balstoties uz hromatiskās jutības vērtībām atbilstošajām krāsu koordinātēm, tika noskaidroti elipses vienādojuma parametri un hromatiskās jutības vērtības RG un BY, kas atbilst virzieniem krāsu telpā, kuros maksimāli jutīgs sarkani-zaļais un dzelteni-zilais krāsu oponentais kanāls. Salīdzinot RG un BY hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas ar statisko un dinamisko testa stimulu, konstatētas statistiski būtiskas atšķirības RG ($z = -7,23 < z_{0,05} = -1,64$) un BY sliekšņu vērtībām ($z = -6,22 < z_{0,05} = -1,64$). Izvērtējot funkcionālās sakarības starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar statisko un dinamisko testa stimulu, konstatētas statistiski nozīmīgas sakarības visos gadījumos (skatīt tabula 6.1 un att. 6.5, 6.6). Salīdzinot regresijas modeļu slīpuma koeficientus, kas apraksta sakarību starp vecumu un RG sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar statisko un dinamisko testa stimula versiju, statistiski būtiskas atšķirības starp slīpuma koeficientiem nekonstatē ($t = 1,64 < t_{0,05;148} = 1,98$). Ekvivalentus secinājums iegūst salīdzinot regresijas modeļu slīpuma koeficientus, kas apraksta sakarības starp vecumu un BY sliekšņu vērtību pieaugumu, kas konstatēts ar abām testa stimula modifikācijām ($t = 1,58 < t_{0,05;148} = 1,98$). Statistiski būtiskas atšķirības starp lineārās regresijas slīpuma koeficientiem, kas apraksta sakarības starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām RG un BY, kas noskaidrotas ar statisko testa stimulu, netika konstatētas ($t = 1,08 < t_{0,05;148} = 1,98$). Statistiski būtiskas atšķirības starp lineārās regresijas slīpuma koeficientiem, kas apraksta sakarības

starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām RG un BY, kas noskaidrotas ar dinamisko testa stimulu, arī netika konstatētas ($t = 1,76 < t_{0,05;148} = 1,98$).

6.1. Tabula Lineārās regresijas slīpuma koeficientu, kas apraksta sakarības starp vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, statistiskā analīze.

Virziens krāsu telpā	Statiskais testa stimul	Dinamiskais testa stimul
RG	$t = 2,42 > t_{0,05;74} = 1,99$	$t = 4,15 > t_{0,05;74} = 1,99$
BY	$t = 2,28 > t_{0,05;74} = 1,99$	$t = 3,20 > t_{0,05;74} = 1,99$

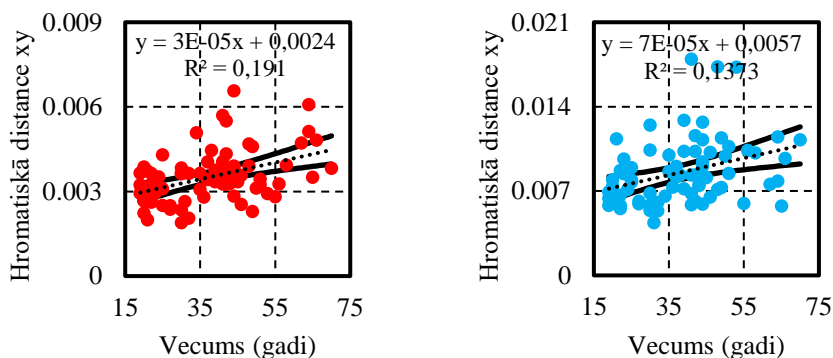


6.4. att. Lineārās regresijas modeļi, kas apraksta sakarības starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatisko izšķirtspēju. Pa kreisi un labi attēlotas sakarības starp vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām RG un BY, kas noskaidrotas ar statisko testa stimulu.

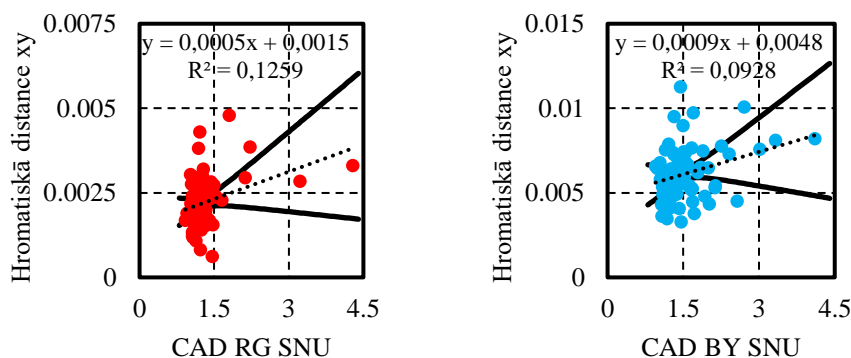
Izvērtējot sakarības starp RG un BY sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar CAD testu un CCVT statiskā testa stimula versijas modifikāciju, tika apstiprināta tieša lineāra sakarība abos gadījumos. Lineārās regresijas modeļu slīpuma koeficienti, kas apraksta sakarības starp abu testu RG ($t = 3,07 > t_{0,05;70} = 1,99$) un BY ($t = 2,68 > t_{0,05;70} = 1,99$) sliekšņu vērtībām ir būtiski atšķirīgi no 0. Statiski būtiskas lineāras sakarības tika konstatētas starp RG ($t = 3,23 > t_{0,05;70} = 1,99$) un BY ($t = 3,29 > t_{0,05;70} = 1,99$) hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar CAD un CCVT testa dinamiskā stimula versiju (skatīt att. 6.7, 6.8). Relatīvi zemo sakarību starp abu testu rezultātiem var skaidrot ar tehniskā nodrošinājuma atšķirībām starp abiem datorizētajiem krāsu redzes testiem, t.i., CAD testā tiek izmantots monitors, kas nodrošina 10 bitu izšķirtspēju katram krāsu kanālam pretstatā 8 bitu izšķirtspējai uz katru krāsu kanālu CCVT testa gadījumā.

Kā otrs snieguma atšķirību ietekmējošs faktors ir krāsu redzes izmeklējuma norise. Lai ierobežotu mērījumu sesijas laiku ar CCVT testu, pētījuma dalībnieki tika rosināti iesniegt atbildi 3 sekunžu laikā pēc stimula parādīšanās brīža testa statiskās modifikācijas gadījumā un 3 sekunžu laikā pēc stimula demonstrācijas beigām testa dinamiskās modifikācijas gadījumā, turpretī CAD

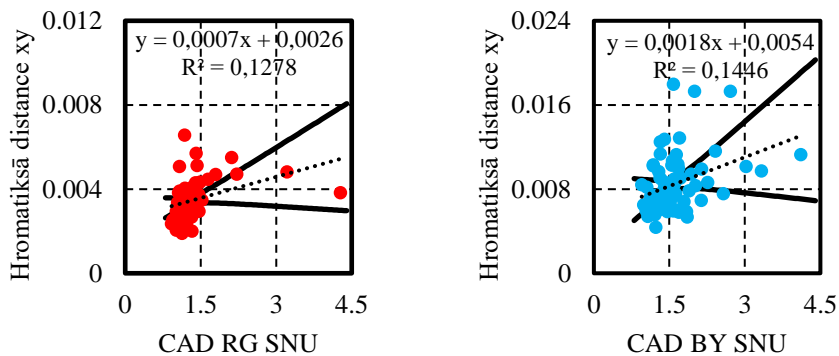
testā atbildes iesniegšanas laiks nav ierobežots. Minētie ierosinājumi CCVT testa gadījumā var potenciāli palielināt nejaušo kļūdu skaitu.



6.6. att. Lineārās regresijas modeļi, kas apraksta sakarības starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatisko izšķirtspēju. Grafikos pa kreisi un labi attēlotas sakarības starp vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar dinamisko testa stimulu.



6.7. att. Grafikos pa kreisi un labi attēlotas sakarības starp RG un BY sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar CAD un CCVT testa statistiskā stimula versiju.

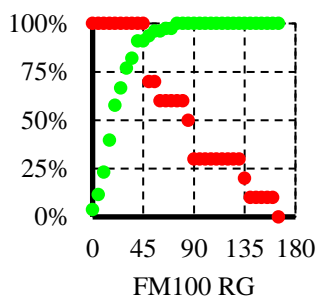


6.8. att. Grafikos pa kreisi un labi attēlotas sakarības starp RG un BY sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar CAD un CCVT testa dinamiskā stimula versiju.

6.4. Datorizētā krāsu redzes testa CCTV rezultāti cilvēkiem ar krāsu redzes deficītiem

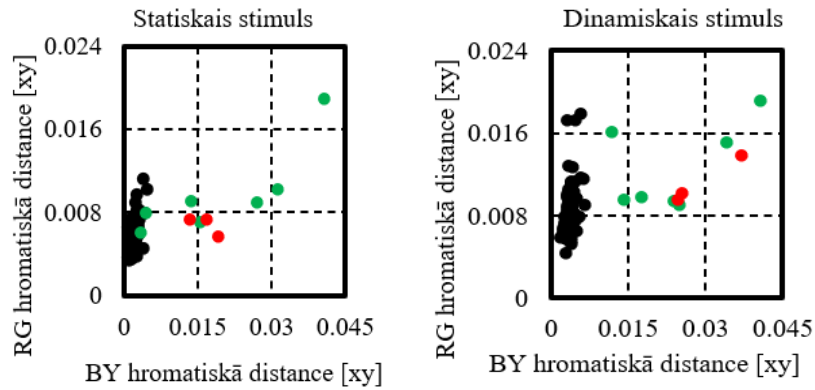
Šī pētījuma ietvaros anomaloskopa tests tika izmantots kā references metode, t.i., visu pētījuma dalībnieku uzrādītie rezultāti citos krāsu redzes testos tika salīdzināti ar anomaloskopa testa konstatētajām atradnēm. Anomaloskopa testā 10 pētījuma dalībniekiem tika konstatēts sarkan-zaļais krāsu redzes deficīts, proti, 7 dalībniekiem tika konstatēta deiteranomālija un 3 protanomālija. Balstoties uz šī pētījuma rezultātiem, var apstiprināt, ka CAD testa jutība sasniedz 100%, jo visi pētījuma dalībnieki ar sarkani-zaļajiem krāsu redzes deficītiem tika identificēti korekti. Salīdzinot CAD un anomaloskopa testa rezultātus krāsu redzes deficītu gadījumos, var konstatēt, ka dalībnieki ar protan krāsu redzes deficītiem tika identificēti korekti visos trīs gadījumos, savukārt 2 no 7 dalībniekiem ar deitan tipa krāsu redzes deficītu tika identificēti kā personas ar protan krāsu redzes traucējumiem.

Izmantojot *Smith et al.* (1973) ierosināto metodi tika aprēķinātas pētījuma dalībnieku FM100 krāsu redzes testā uzrādītajām krāsu kauliņu sakārtošanas secībām atbilstošās RG un BY kļūdas. Balstoties uz šajā pētījumā iegūtajiem rezultātiem par kritērija vērtību, lai identificētu sarkani-zaļos krāsu redzes deficītus, izvēloties $RG \geq 45$, FM100 testa jutība un specifitāte sasniedz 100% un 96% (skatīt att. 6.9).



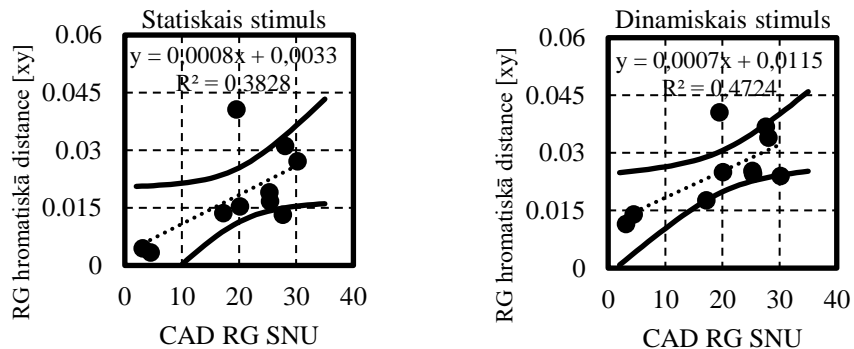
6.9. att. FM100 testa jutība (skatīt sarkanos punktus) un specifitāte (skatīt zaļos punktus) atkarībā no kritērija vērtības, t.i., FM100 testa RG kļūdu vērtības.

Izvērtējot pētījuma dalībnieku sniegumu, kas uzrādīts ar CCVT testu noskaidrots, ka CCVT testa statistiskās stimula versijas jutība un specifitāte ir 100% un 82%, savukārt dinamiskās testa stimula versijas jutība un specifitāte ir 100%. Statiskās un dinamiskās testa versijas jutība un specifitāte tika aprēķināta pieņemot, ka personai tiek konstatēts sarkani-zaļais krāsu redzes deficīts gadījumos, ja RG slietkšņu vērtībai atbilstošā hromatiskā distance ir lielāka vai vienāda ar 0,00335 vienībām statistiskā stimula gadījumā un lielāka vai vienāda ar 0,0114 vienībām dinamiskā stimula gadījumā CIExy krāsu telpā (skatīt att. 6.10).



6.10. att. Grafikos pa kreisi un pa labi attēlotas pētījuma dalībnieku ar un bez krāsu redzes deficītiem krāsu oponento mehānismu sliekšņu vērtības RG un BY, kas noskaidrotas ar CCVT testa stimula statisko un dinamisko versiju. Personu sniegums ar protanomāliju un deiteranomāliju attēlots ar sarkaniem un zaļiem punktiem, savukārt normālās trihromatijas gadījumi attēloti ar melniem punktiem. CCVT testa statistiskajai versijai konstatēta jutība un specifitāte 100% un 82%, savukārt dinamiskajai versijai jutība un specifitāte sasniedz 100%.

Salīdzinot pētījuma dalībnieku ar krāsu redzes deficītiem sniegumu CAD un CCVT testā, kas noskaidrots ar statisko un dinamisko testa versiju, tika konstatēta vidēji cieša korelācija starp abu testu rezultātiem, t.i., 0,69 un 0,62. Tiesa, iegūtais rezultāts jāvērtē piesardzīgi nelielā dalībnieku skaita dēļ. Izvērtējot korelācijas būtiskumu tika apstiprināts, ka korelācija starp CAD un CCVT testa dinamiskā stimula versiju ir statistiski būtiska ($t = 2,68 > t_{0,05;8} = 2,31$), savukārt korelācija starp CAD un CCVT testa statiskā stimula versiju nav statistiski būtiska ($t = 2,23 < t_{0,05;8} = 2,31$) (skatīt att. 6.11).



6.11 .att. Grafikos pa kreisi un pa labi attēlotas sakarības starp RG hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar CAD un CCVT testa statisko un dinamisko versiju cilvēkiem ar sarkani-zaļajiem krāsu redzes deficītiem.

6.5. Secinājumi

1. Cilvēku bez krāsu redzes deficītiem uzrādītais sniegums ar tādiem krāsu redzes testiem kā FM100, CAD un CCVT apstiprina, ka pieaugot vecumam var konstatēt būtisku hromatiskās jutības sliekšņu vērtību pieaugumu. Šī pētījuma ietvaros netika apstiprināts straujāks hromatiskās jutības sliekšņu vērtību pieaugums pieaugot vecumam dzelteni-zilajam krāsu oponentajam kanālam salīdzinājumā ar sarkani-zaļo krāsu oponento kanālu.
2. Statistiskā analīze apstiprina CCVT testa dinamiskās stimula versijas priekšrocības salīdzinājumā ar CCVT testa statiskā stimula versiju. CCVT dinamiskā testa stimula versija nodrošina iespēju ar augstāku jutību un specifitāti savstarpēji atšķirt normālās un anomālās trihromatijas gadījumus salīdzinājumā ar CCVT testa statiskā stimula versiju.
3. CCVT datorizētais krāsu redzes tests nodrošina iespēju identificēt iedzimtus sarkani-zaļo krāsu redzes deficītu gadījumus. Statistiskā analīze apstiprina vidēji ciešu sakarību starp RG hromatiskās jutības vērtībām, kas noskaidrotas cilvēkiem ar krāsu redzes deficītiem ar CAD un CCVT testiem.

NOBEIGUMS

Pētījuma rezultāti ierosina, ka sniegumu D15 krāsu sakārtošanas testā cilvēkiem ar krāsu redzes raksturu, kas atbilst sarkani-zaļās anomālās trihromatijas gadījumiem, var paredzēt pieņemot, ka krāsu oponento kanālu organizācija neatšķiras no normas gadījumiem un ka primārais sniegumu ietekmējošais faktors ir samazināta spektrālā diference starp L un M vāļišu fotopigmentu absorbcijas maksimumiem. Ierosinātais modelis līdztekus L un M fotopigmentu spektrālās diferences efektiem paredz iespēju novērtēt makulas pigmenta un acs lēcas absorbcijas efektu ietekmi uz sniegumu cilvēkiem kā ar tā bez krāsu redzes deficītiem. Modelējot cilvēku ar krāsu redzes deficītiem sniegumu krāsu redzes testos, nereti tiek pieņemts, ka tikai viena fotoreceptora funkcija ir iztrūkstoša vai atšķirīga no normas. Izveidotais modelis paredz iespēju turpmākos pētījumos izvērtēt visu trīs fotopigmentu spektrālo un optiskā blīvuma īpašību ietekmi uz sniegumu krāsu sakārtošanas testos. Krāsu redzes pētījumos ir apstiprināts, ka cilvēkiem kā ar tā bez krāsu redzes deficītiem ir iespējamās krāsas L un M vāļišu daudzumu attiecības, kas būtiski ietekmē sarkani-zaļā krāsu oponentā kanāla izšķirtspēju. Turpmākos pētījumos būtiski ņemt vērā L/M vāļišu daudzumu attiecību efektu, lai korektāk paredzētu atšķirības sniegunā cilvēkiem ar krāsu redzes deficītiem.

Pētījuma ietvaros veiktā analīze apstiprina, ka datorizētais CCVT krāsu redzes tests, neskatoties uz tā relatīvi vienkāršo tehnisko nodrošinājumu, sniedz iespēju sekmīgi identificēt sarkani-zaļo krāsu redzes deficītu gadījumus, ko apstiprina sakrītoši rezultāti, kas noskaidroti ar tādiem krāsu redzes testiem kā FM100, CAD, HRR un anomaloskopa testu. Salīdzinot pētījuma dalībnieku uzrādītos rezultātus dažādās mērījumu sesijās konstatēta augsta mērījumu atkārtojamība kā ar dinamisko tā ar statisko testa stimula versiju. Salīdzinot pētījuma dalībnieku sniegumu, kas konstatēts ar dinamisko statisko testa stimula versiju, ir apstiprinātas būtiskas hromatiskās jutības slietkšņu vērtību atšķirības. Sākotnējos eksperimentos tika izvirzīta un apstiprināta hipotēze, ka testa stimula dizainam ir būtiska ietekme uz gados vecāko pētījuma dalībnieku grupu. Tiesa, veicot atkārtotus mērījumus ar uzlaboto CCVT testa versiju un paralēli ar CAD testu, noskaidrots, ka augstāka korelācija starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatisko jutību konstatēta ar CAD testu nekā ar abām CCVT testa versijām. Minētais rezultāts nedod iespēju viennozīmīgi apstiprināt testa stimula dizaina ietekmi uz sniegumu, kas konstatēts ar CCVT testu. Pētījuma autors pieņem, ka turpmākajos pētījumos ir nepieciešams veikt korekcijas CCVT testa izmeklējuma procedūrai t.i., pētījuma dalībnieka atbildes iesniegšanas laiks tika ierobežots līdz 3 sekundēm, kas iespējams

palielināja gadījuma kļūdu skaitu, turpretī CAD testā pētījuma dalībnieka atbildes iesniegšanas laiks ir neierobežots.

Kā šajā tā citos pētījumos ir apstiprināts, ka pieaugot vecumam novēro hromatiskās izšķirtspējas samazināšanos. Šī pētījuma ietvaros pētījuma dalībnieku krāsu redze līdztekus CCVT testam tika izmeklēta ar CAD un FM100 krāsu redzes testiem, kas nodrošina iespēju salīdzināt vecuma ietekmi uz sarkani-zaļā un dzelteni-zilā krāsu oponentā kanāla izšķirtspējas izmaiņām dažādās vecuma grupās. Pētījumu rezultāti apstiprina, ka dzelteni-zilā krāsu oponentā hromatiskā izšķirtspēja samazinās straujāk pieaugot vecumam nekā sarkani-zaļā krāsu oponentā krāsu kanāla gadījumā. Salīdzinot hromatiskās jutības sliekšņu vērtību pieauguma tempu, kas konstatēts ar FM100, CAD un CCVT testiem sarkani-zaļajam un dzelteni-zilajam krāsu oponentajiem kanāliem, statistiski būtiskas atšķirības netika konstatētas. Krāsu redzes pētījumos ir apstiprināts, ka vecums būtiski ietekmē sniegumu krāsu redzes testos, tiesa, pētījuma dalībnieku vecums tikai daļēji uzskaidro hromatiskās jutības sliekšņu vērtību paaugstināšanos pieaugot vecumam. Šī pētījuma ietvaros hromatiskās jutības sliekšņu vērtību pieaugumu sakarā ar pieaugošo vecumu balstoties uz FM100, CAD, CCVT (statiskais) un CCVT (dinamiskais) testu rezultātiem var izskaidrot 7%, 24%, 7% un 19% sarkani-zaļā krāsu oponenta kanāla gadījumā, savukārt dzelteni-zilā krāsu oponentā kanāla gadījumā 14%, 37%, 8% un 14%. Salīdzinot CAD un CCVT testa rezultātus cilvēkiem bez krāsu redzes deficītiem konstatēta vāja rezultātu korelācija starp abām metodēm un vidēji cieša korelācija cilvēkiem ar krāsu redzes deficītiem. Minētie novērojumi liecina, ka CCVT testa relatīvi zemā krāsu izšķirtspēja salīdzinājumā ar CAD testu, liedz iespēju izvērtēt atšķirības starp personām bez krāsu redzes deficītiem, tomēr CCVT testa izšķirtspēja ir pietiekama, lai identificētu un savstarpēji salīdzinātu sniegumu cilvēkiem ar krāsu redzes deficītiem, kas ir būtiski ikdienas krāsu redzes izmeklējumos.

Kā viens no potenciālajiem CCVT testa pielietojumiem ir krāsu redzes izmeklējumi cilvēkiem ar tādām acu saslimšanām kā diabēts un glaukoma, kas nodrošina papildu iespējas izvērtēt nozīmētās terapijas efektivitāti. Pētījuma ietvaros ar CCVT testu tika sekmīgi identificēti krāsu redzes deficīti diviem skolas vecuma bērniem, kas norāda uz metodes potenciālu nodrošināt krāsu redzes izmeklējumus skolas vecuma bērniem, kas savukārt var sekmēt atbilstošas karjeras izvēli cilvēkiem ar iedzimtiem krāsu redzes deficītiem.

AIZSTĀVĀMĀS TĒZES

1. CCVT testa statiskā stimula versijas jutība un specifitāte sasniedz 100% un 82% (kritērija vērtība 0,00335 xy vienības CIExy krāsu telpā), savukārt CCVT testa dinamiskās stimula versijas jutība un specifitāte sasniedz 100% (kritērija vērtība 0,0114 xy vienības CIExy krāsu telpā). (K1)
2. Konstatēta cieša korelācija starp sarkani-zaļajam krāsu oponentajam kanālam atbilstošajām hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar datorizētajiem krāsu redzes testiem CAD un CCVT indivīdiem, kam konstatēti sarkani-zaļie krāsu redzes deficīti. (K1)
3. CCVT testa dinamiskā un statiskā stimula versijai konstatēta augsta mērījumu atkārtojamība indivīdiem bez krāsu redzes deficītiem. (P2)
4. Ar krāsu redzes testiem FM100, CAD un CCVT konstatēta statistiski būtiska sakarība starp hromatiskās jutības sliekšņu vērtību pieaugumu un indivīdu vecumu. (K1, P2)
5. Sarkani-zaļās anomālās trihromatijas gadījumos sniegums D15 testā ir izskaidrojams ar spektrālās proksimitātes hipotēzi. Piedāvātais modelis paredz, ka samazinoties spektrālajai diferencei starp L un M vāļišu fotopigmentiem, konstatē kļūdu skaita pieaugumu D15 krāsu sakārtošanas testā, kas raksturīgas protanomālijas un deiteranomālijas gadījumiem.(P1)

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- Abdel-Hay, A., Sivaprasad, S., Subramanian, A., & Barbur, J. L. (2018). Acuity and colour vision changes post intravitreal dexamethasone implant injection in patients with diabetic macular oedema. *PloS one*, 13(6)
- Atchison, D. A., Bowman, K. J., & Vingrys, A. J. (1991). Quantitative scoring methods for D15 panel tests in the diagnosis of congenital color vision deficiencies. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry*, 68(1), 41–48.
- Allan D. (1985). Fourier analysis and the Farnsworth-Munsell 100-Hue test. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 5(3), 337–342.
- Alpern, M., & Pugh, E. N., Jr (1977). Variation in the action spectrum of erythrolabe among deuteranopes. *The Journal of physiology*, 266(3), 613–646.
- Aranda, M. L., & Schmidt, T. M. (2021). Diversity of intrinsically photosensitive retinal ganglion cells: circuits and functions. *Cellular and molecular life sciences : CMLS*, 78(3), 889–907.
- Bailey, J.E., Neitz, M., Tait, D.M., Neitz, J. (2004). Evaluation of an updated HRR color vision test. *Vis Neurosci.*, 21(3),431-436.
- Baraas, R. C., Carroll, J., Gunther, K. L., Chung, M., Williams, D. R., Foster, D. H., & Neitz, M. (2007). Adaptive optics retinal imaging reveals S-cone dystrophy in tritan color-vision deficiency. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 24(5), 1438–1447.
- Baraas R. C. (2008). Poorer color discrimination by females when tested with pseudoisochromatic plates containing vanishing designs on neutral backgrounds. *Visual neuroscience*, 25(3), 501–505.
- Barbur J. L., Harlow J., Plant G. T. (1994). Insights into the different exploits of colour in the visual cortex. *Proc. R. Soc. Lond. B.* 258, 327–334.
- Barbur, J. L. (2004). 'Double-blindsight' revealed through the processing of color and luminance contrast defined motion signals. *Progress in brain research*, 144, 243–259.
- Barbur, J. L., Rodriguez-Carmona, M., Harlow, J. A., Mancuso, K., Neitz, J., & Neitz, M. (2008). A study of unusual Rayleigh matches in deutan deficiency. *Visual neuroscience*, 25(3), 507–516.
- Barbur, J., & Rodriguez-Carmona, M. (2015). Color vision changes in normal aging. In A. Elliot, M. Fairchild, & A. Franklin (Eds.), *Handbook of Color Psychology* (Cambridge Handbooks in Psychology, pp. 180-196). Cambridge: Cambridge University Press.
- Barbur, J. L. & Rodriguez-Carmona, M. (2016). Color vision changes in normal aging. In: Elliott, A. J., Fairchild, M. D. & Franklin, A. (Eds.), *Handbook of Color Psychology*, pp. 180-196, Cambridge: Cambridge University Press.
- Barbur, J. L. & Rodriguez-Carmona, M. (2017). Colour vision requirements in visually demanding occupations, *British Medical Bulletin*, 122(1), 51–77
- Boehm, A. E., MacLeod, D. I., & Bosten, J. M. (2014). Compensation for red-green contrast loss in anomalous trichromats. *Journal of vision*, 14(13), 1-17.
- Bone, R. A., Landrum, J. T., Cains, A. (1992). "Optical density spectra of the macular pigment in vivo and in vitro," *Vis. Res.* 32, 105–110.
- Bowman K. J. (1982). A method for quantitative scoring of the Farnsworth Panel D-15. *Acta ophthalmologica*, 60(6), 907–916
- Carroll, J., Neitz, J., & Neitz, M. (2002). Estimates of L:M cone ratio from ERG flicker photometry and genetics. *Journal of vision*, 2(8), 531–542.
- Carroll, J., Neitz, M., Hofer, H., Neitz, J., & Williams, D. R. (2004). Functional photoreceptor loss revealed with adaptive optics: an alternate cause of color blindness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(22), 8461–8466.

- Cheung, V. (2012). Uniform Color Spaces. In: Chen, J., Cranton, W., Fihn, M. (eds) Handbook of Visual Display Technology. Springer, Berlin, Heidelberg
- Cole B. L. (2004). The handicap of abnormal colour vision. *Clinical & experimental optometry*, 87(4-5), 258–275.
- Cole, B. L., Lian, K. Y., & Lakkis, C. (2006). The new Richmond HRR pseudoisochromatic test for colour vision is better than the Ishihara test. *Clinical & experimental optometry*, 89(2), 73–80
- Cumberland, P., Rahi, J.S., Peckham, C.S. (2004) Impact of congenital colour vision deficiency on education and unintentional injuries: findings from the 1958 British birth cohort. *BMJ*, 329(7474),1074-1075.
- Curcio, C. A., & Drucker, D. N. (1993). Retinal ganglion cells in Alzheimer's disease and aging. *Annals of neurology*, 33(3), 248–257.
- Dain, S. J., & Adams, A. J. (1990). Comparison of the standard and Adams desaturated D-15 tests with congenital colour vision deficiencies. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 10(1), 40–45
- Dain S. J. (2004). Clinical colour vision tests. *Clinical & experimental optometry*, 87(4-5), 276–293.
- Davidoff, C., Neitz, M., & Neitz, J. (2016). Genetic Testing as a New Standard for Clinical Diagnosis of Color Vision Deficiencies. *Translational vision science & technology*, 5(5), 1-16.
- Deeb S. S. (2004). Molecular genetics of colour vision deficiencies. *Clinical & experimental optometry*, 87(4-5), 224–229.
- Deeb S. S. (2005). The molecular basis of variation in human color vision. *Clinical genetics*, 67(5), 369–377.
- Derrington, A. M., Krauskopf, J., & Lennie, P. (1984). Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque. *The Journal of physiology*, 357, 241–265.
- De Valois, R. L., Abramov, I., & Jacobs, G. H. (1966). Analysis of response patterns of LGN cells. *Journal of the Optical Society of America*, 56(7), 966–977.
- De Valois, R. L., & De Valois, K. K. (1993). A multi-stage color model. *Vision research*, 33(8), 1053–1065.
- Elliott, D., Whitaker, D., & MacVeigh, D. (1990). Neural contribution to spatiotemporal contrast sensitivity decline in healthy ageing eyes. *Vision research*, 30(4), 541–547.
- Evans, B. E. W., Rodriguez-Carmona, M., Barbur, J. L. (2020). “Color vision assessment-1: visual signals that affect the results of the Farnsworth D-15 test,” *Color Res. Appl.* 46, 7–20.
- Fairman, H.S., Brill, M.H. and Hemmendinger, H. (1997). How the CIE 1931 color-matching functions were derived from Wright- *Stiles&Burch* data. *Color Res. Appl.*, 22: 11-23.
- Feitosa-Santana, C., Paramei, G. V., Nishi, M., Gualtieri, M., Costa, M. F., & Ventura, D. F. (2010). Color vision impairment in type 2 diabetes assessed by the D-15d test and the Cambridge Colour Test. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 30(5), 717–723.
- García-Pérez, M. A. (1998). Forced-choice staircases with fixed step sizes: asymptotic and small-sample properties. *Vision research*, 38(12), 1861–1881.
- Guillon, M., Dumbleton, K., Theodoratos, P., Gobbe, M., Wooley, C. B., & Moody, K. (2016). The Effects of Age, Refractive Status, and Luminance on Pupil Size. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry*, 93(9), 1093–1100.
- Gunther, K. L., & Dobkins, K. R. (2002). Individual differences in chromatic (red/green) contrast sensitivity are constrained by the relative number of L- versus M-cones in the eye. *Vision research*, 42(11), 1367–1378.
- Guth S. L. (1991). Model for color vision and light adaptation. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics and image science*, 8(6), 976–993.
- Hammond, B. R., Jr, Wooten, B. R., & Snodderly, D. M. (1996). Cigarette smoking and retinal carotenoids: implications for age-related macular degeneration. *Vision research*, 36(18), 3003–3009.
- Hammond, B. R., Jr, Johnson, E. J., Russell, R. M., Krinsky, N. I., Yeum, K. J., Edwards, R. B., & Snodderly, D. M. (1997). Dietary modification of human macular pigment density. *Investigative ophthalmology & visual science*, 38(9), 1795–1801.

- Hammond, B. R., Jr, Wooten, B. R., & Snodderly, D. M. (1998). Preservation of visual sensitivity of older subjects: association with macular pigment density. *Investigative ophthalmology & visual science*, 39(2), 397–406.
- Hardy, J. L., Delahunt, P. B., Okajima, K., & Werner, J. S. (2005). Senescence of spatial chromatic contrast sensitivity. I. Detection under conditions controlling for optical factors. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 22(1), 49–59.
- He, J. C., & Shevell, S. K. (1994). Individual differences in cone photopigments of normal trichromats measured by dual Rayleigh-type color matches. *Vision research*, 34(3), 367–376.
- He, J. C., & Shevell, S. K. (1995). Variation in color matching and discrimination among deuteranomalous trichromats: theoretical implications of small differences in photopigments. *Vision research*, 35(18), 2579–2588.
- Hiltunen, J. “Munsell colors matt (Spectrofotometer measured),” <https://sites.uef.fi/spectral/munsell-colors-matt-spectrofotometermeasured>.
- Hood, S. M., Mollon, J. D., Purves, L., & Jordan, G. (2006). Color discrimination in carriers of color deficiency. *Vision research*, 46(18), 2894–2900.
- Hurvich, L. M., Jameson, D. (1957). An opponent-process theory of color vision. *Psychological review*, 64, Part 1(6), 384–404.
- Hyon, J. Y., Lee, J. H., & Wee, W. R. (2005). Shift of colorimetric values in ishihara pseudoisochromatic plates with plate aging. *Korean journal of ophthalmology : KJO*, 19(2), 145–148
- Jacobs G. H. (1984). Within-species variations in visual capacity among squirrel monkeys (*Saimiri sciureus*): color vision. *Vision research*, 24(10), 1267–1277.
- Jacobs G. H. (2018). Photopigments and the dimensionality of animal color vision. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 86, 108–130.
- Jordan, G., & Mollon, J. D. (1993). A study of women heterozygous for colour deficiencies. *Vision research*, 33(11), 1495–1508.
- Judd, D. B. (1935). A Maxwell Triangle Yielding Uniform Chromaticity Scales*. *J. Opt. Soc. Am.* **25**, 24-35
- Lamb, T.D. (1995) “Photoreceptor spectral sensitivities: common shape in the long-wavelength region,” *Vis. Res.* 35, 3083–3091
- Kingdom, F.A.A., Prins, N. (2016). *Psychophysics: A Practical Introduction (Second Edition). Varieties of Psychophysical Procedures (pp:37-54).* Academic Press.
- Kingdom, F.A.A., Prins, N. (2016). *Psychophysics: A Practical Introduction (Second Edition). Varieties of Psychophysical Procedures (pp:60-68).* Academic Press.
- Kinnear P. R. (1970). Proposals for scoring and assessing the 100-Hue test. *Vision research*, 10(5), 423–433.
- Kinnear, P. R., & Sahraie, A. (2002). New Farnsworth-Munsell 100 hue test norms of normal observers for each year of age 5-22 and for age decades 30-70. *The British journal of ophthalmology*, 86(12), 1408–1411.
- Kirby, M. L., Beatty, S., Loane, E., Akkali, M. C., Connolly, E. E., Stack, J., & Nolan, J. M. (2010). A central dip in the macular pigment spatial profile is associated with age and smoking. *Investigative ophthalmology & visual science*, 51(12), 6722–6728.
- Kitahara, K. (1984). An analysis of the Farnsworth-Munsell 100-Hue test. *Documenta Ophthalmologica Proceedings Series*, 39, 233–238
- Knoblauch, K., Saunders, F., Kusuda, M., Hynes, R., Podgor, M., Higgins, K. E., & de Monasterio, F. M. (1987). Age and illuminance effects in the Farnsworth-Munsell 100-hue test. *Applied optics*, 26(8), 1441–1448
- Knoblauch, K. (1987). On quantifying the bipolarity and axis of the Farnsworth-Munsell 100-Hue test. *Investigative ophthalmology & visual science*, 28(4), 707–710.
- Knoblauch, K., Vital-Durand, F., & Barbur, J. L. (2001). Variation of chromatic sensitivity across the life span. *Vision research*, 41(1), 23–36.

- Knoblauch, K. (2002). Color Vision. In Stevens' Handbook of Experimental Psychology, H. Pashler (Ed.), pp:41-75.
- Knoblauch, K., Marsh-Armstrong, B., & Werner, J. S. (2020). Suprathreshold contrast response in normal and anomalous trichromats. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 37(4), A133–A144.
- Konstantakopoulou, E., Rodriguez-Carmona, M., & Barbur, J. L. (2012). Processing of color signals in female carriers of color vision deficiency. *Journal of vision*, 12(2), 1-11.
- Levitt H. (1971). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2), 467-477.
- Loskutova, E., Nolan, J., Howard, A., & Beatty, S. (2013). Macular pigment and its contribution to vision. *Nutrients*, 5(6), 1962–1969.
- MacAdam, D. L. (1937). Projective Transformations of I. C. I. Color Specifications. *J. Opt. Soc. Am.* **27**, 294-299.
- Mancuso, K., Hauswirth, W. W., Li, Q., Connor, T. B., Kuchenbecker, J. A., Mauck, M. C., Neitz, J., & Neitz, M. (2009). Gene therapy for red-green colour blindness in adult primates. *Nature*, 461(7265), 784–787
- Marks, W. B., Dobbelle, W. H., & Macnichol, E. F., Jr (1964). Visual pigments of single primate cones. *Science (New York, N.Y.)*, 143(3611), 1181–1183.
- Martin, P. R., Blessing, E. M., Buzás, P., Szmajda, B. A., & Forte, J. D. (2011). Transmission of colour and acuity signals by parvocellular cells in marmoset monkeys. *The Journal of physiology*, 589(Pt 11), 2795–2812.
- Mollon J. D. (1982). Color vision. *Annual review of psychology*, 33, 41–85.
- Mollon, J. D., Bowmaker, J. K., & Jacobs, G. H. (1984). Variations of colour vision in a New World primate can be explained by polymorphism of retinal photopigments. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 222(1228), 373–399.
- Mollon, J.D., and Jordan, G. (1997). On the nature of unique hues. In John Dalton's Colour Vision Legacy, C. Dickinson, I. Murray and D. Carden, eds. (London: Taylor and Francis), pp. 381–392
- Mollon, J. (2006). Monge: The Verriest Lecture, Lyon, July 2005. *Visual Neuroscience*, 23(3-4), 297-309.
- Moreland J. D. (2004). Moreland match revisited. *Visual neuroscience*, 21(3), 471–476.
- Moskowitz, A., Hansen, R. M., Akula, J. D., Eklund, S. E., & Fulton, A. B. (2009). Rod and rod-driven function in achromatopsia and blue cone monochromatism. *Investigative ophthalmology & visual science*, 50(2), 950–958.
- Nathans, J., Piantanida, T. P., Eddy, R. L., Shows, T. B., & Hogness, D. S. (1986). Molecular genetics of inherited variation in human color vision. *Science (New York, N.Y.)*, 232(4747), 203–210.
- Neitz, J., Neitz, M., & Kainz, P. M. (1996). Visual pigment gene structure and the severity of color vision defects. *Science (New York, N.Y.)*, 274(5288), 801–804.
- Neitz, M., Kraft, T. W., & Neitz, J. (1998). Expression of L cone pigment gene subtypes in females. *Vision research*, 38(21), 3221–3225.
- Neitz, J., Neitz, M., He, J. C., & Shevell, S. K. (1999). Trichromatic color vision with only two spectrally distinct photopigments. *Nature neuroscience*, 2(10), 884–888.
- Neitz, J., Carroll, J., Yamauchi, Y., Neitz, M., & Williams, D. R. (2002). Color perception is mediated by a plastic neural mechanism that is adjustable in adults. *Neuron*, 35(4), 783–792.
- Neitz, M., Carroll, J., Renner, A., Knau, H., Werner, J. S., & Neitz, J. (2004). Variety of genotypes in males diagnosed as dichromatic on a conventional clinical anomaloscope. *Visual neuroscience*, 21(3), 205–216.
- Neitz, J., & Neitz, M. (2011). The genetics of normal and defective color vision. *Vision research*, 51(7), 633–651
- Neitz, M., & Neitz, J. (2014). Curing color blindness-mice and nonhuman primates. *Cold Spring Harbor perspectives in medicine*, 4(11)
- Neitz, J., & Neitz, M. (2017). Evolution of the circuitry for conscious color vision in primates. *Eye (London, England)*, 31(2), 286–300.

- Ng, J. S., Self, E., Vanston, J. E., Nguyen, A. L., & Crognale, M. A. (2015). Evaluation of the Waggoner Computerized Color Vision Test. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry*, 92(4), 480–486
- Nolan, J. M., Stack, J., O'connell, E., & Beatty, S. (2007). The relationships between macular pigment optical density and its constituent carotenoids in diet and serum. *Investigative ophthalmology & visual science*, 48(2), 571–582.
- Nowaczyk, R. H. (1982). Sex-Related Differences in the Color Lexicon. *Language and Speech*, 25(3), 257–265.
- O'Neill-Biba, M., Sivaprasad, S., Rodriguez-Carmona, M., Wolf, J. E., & Barbur, J. L. (2010). Loss of chromatic sensitivity in AMD and diabetes: a comparative study. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 30(5), 705–716.
- Orava, J., “Munsell colors glossy (all) (Spectrofotometer measured),” <https://sites.uef.fi/spectral/munsell-colors-glossyall-spectrofotometer-measured/>.
- Pacheco-Cutillas, M., Edgar, D. F., & Sahraie, A. (1999). Acquired colour vision defects in glaucoma-their detection and clinical significance. *The British journal of ophthalmology*, 83(12), 1396–1402.
- Pacheco-Cutillas M, Barbur JL, Edgar DF. (2002). Comparison of chromatic and achromatic loss of sensitivity in glaucoma. *Ophthalmic Physiol Opt*. 22:574-574
- Paramei G. V. (2012). Color discrimination across four life decades assessed by the Cambridge Colour Test. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 29(2), A290–A297
- Paramei, G. V., & Oakley, B. (2014). Variation of color discrimination across the life span. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 31(4), A375–A384
- Pardo, P.J., Pérez, A.L. and Suero, M.I. (2007), An example of sex-linked color vision differences. *Color Res. Appl.*, 32: 433-439
- Pascual-Camps, I., Barranco-Gonzalez, H., Aviñó-Martínez, J., Silva, E., & Harto-Castaño, M. (2018). Diagnosis and Treatment Options for Achromatopsia: A Review of the Literature. *Journal of pediatric ophthalmology and strabismus*, 55(2), 85–92.
- Patterson, S. S., Neitz, M., & Neitz, J. (2019). Reconciling Color Vision Models With Midget Ganglion Cell Receptive Fields. *Frontiers in neuroscience*, 13 (865), 1-12.
- Pease, P. L. (2006) *Borish's Clinical Refraction*. William J. Benjamin Second ed: 296-352
- Pokorny, J., Smith, V. C., & Lutze, M. (1987). Aging of the human lens. *Applied optics*, 26(8), 1437–1440.
- Regan, B. C., Reffin, J. P., & Mollon, J. D. (1994). Luminance noise and the rapid determination of discrimination ellipses in colour deficiency. *Vision research*, 34(10), 1279–1299.
- Reid, R. C., & Shapley, R. M. (1992). Spatial structure of cone inputs to receptive fields in primate lateral geniculate nucleus. *Nature*, 356(6371), 716–718.
- Rich E. (1977). Sex-related differences in colour vocabulary. *Language and speech*, 20(4), 404–409.
- Rodriguez-Carmona, M., Kvensakul, J., Harlow, J. A., Köpcke, W., Schalch, W., & Barbur, J. L. (2006). The effects of supplementation with lutein and/or zeaxanthin on human macular pigment density and colour vision. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 26(2), 137–147.
- Rodríguez-Carmona, M., Sharpe, L. T., Harlow, J. A., & Barbur, J. L. (2008). Sex-related differences in chromatic sensitivity. *Visual neuroscience*, 25(3), 433–440.
- Sabesan, R., Schmidt, B. P., Tuten, W. S., & Roorda, A. (2016). The elementary representation of spatial and color vision in the human retina. *Science advances*, 2(9), 1-7.
- Sanocki, E., Lindsey, D. T., Winderickx, J., Teller, D. Y., Deeb, S. S., & Motulsky, A. G. (1993). Serine/alanine amino acid polymorphism of the L and M cone pigments: effects on Rayleigh matches among deuteranopes, protanopes and color normal observers. *Vision research*, 33(15), 2139–2152.
- Scheffrin, B. E., Shinomori, K., & Werner, J. S. (1995). Contributions of neural pathways to age-related losses in chromatic discrimination. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 12(6), 1233–1241.

- Schultze, M. Zur Anatomie und Physiologie der Retina. *Archiv f. mikrosk. Anatomie* 2, 175–286 (1866).
- Seshadri, J., Christensen, J., Lakshminarayanan, V., & Bassi, C. J. (2005). Evaluation of the new web-based "Colour Assessment and Diagnosis" test. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry*, 82(10), 882–885.
- Sharpe, L. T., Stockman, A., Jägle, H., Knau, H., Klausen, G., Reitner, A., & Nathans, J. (1998). Red, green, and red-green hybrid pigments in the human retina: correlations between deduced protein sequences and psychophysically measured spectral sensitivities. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 18(23), 10053–10069.
- Sharpe, L.T. (1999). *Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness*.
- Shinomori, K., Scheffrin, B. E., & Werner, J. S. (2001). Age-related changes in wavelength discrimination. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 18(2), 310–318
- Simunovic, M. P., Votruba, M., Regan, B. C., & Mollon, J. D. (1998). Colour discrimination ellipses in patients with dominant optic atrophy. *Vision research*, 38(21), 3413–3419.
- Steward, J. M., & Cole, B. L. (1989). What do color vision defectives say about everyday tasks?. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry*, 66(5), 288–295.
- Smith, D. P., Cole, B. L., & Isaacs, A. (1973). Congenital tritanopia without neuroretinal disease. *Investigative ophthalmology*, 12(8), 608–617.
- Smith, V. C., & Pokorny, J. (1977). Large-field trichromacy in protanopes and deuteranopes. *Journal of the Optical Society of America*, 67(2), 213–220.
- Smith, V. C., Pokorny, J., & Pass, A. S. (1985). Color-axis determination on the Farnsworth-Munsell 100-hue test. *American journal of ophthalmology*, 100(1), 176–182
- Stringham, N. T., & Stringham, J. M. (2015). Temporal Visual Mechanisms May Mediate Compensation for Macular Pigment. *Perception*, 44(12), 1400–1415
- Stockman, A., & Sharpe, L. T. (2000). The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision research*, 40(13), 1711–1737.
- Tait, D. M., & Carroll, J. (2009). Normality of colour vision in a compound heterozygous female carrying protan and deutan defects. *Clinical & experimental optometry*, 92(4), 356–361.
- Thomas, L. L., Curtis, A. T., & Bolton, R. (1978). Sex Differences in Elicited Color Lexicon Size. *Perceptual and Motor Skills*, 47(1), 77–78.
- Tregillus, K. E. M., Isherwood, Z. J., Vanston, J. E., Engel, S. A., MacLeod, D. I. A., Kuriki, I., & Webster, M. A. (2021). Color Compensation in Anomalous Trichromats Assessed with fMRI. *Current biology : CB*, 31(5), 936–942
- Treutwein B. (1995). Adaptive psychophysical procedures. *Vision research*, 35(17), 2503–2522.
- Verriest, G. (1963). Further studies on acquired deficiency of color discrimination. *Journal of the Optical Society of America*, 53, 185–195.
- Vingrys, A. J., & King-Smith, P. E. (1988). A quantitative scoring technique for panel tests of color vision. *Investigative ophthalmology & visual science*, 29(1), 50–63
- Wang, Y. H., Zhong, J., & Li, X. M. (2022). Age-related changes of lens thickness and density in different age phases. *International journal of ophthalmology*, 15(10), 1591–1597.
- Wässle H. (2004). Parallel processing in the mammalian retina. *Nature reviews. Neuroscience*, 5(10), 747–757.
- Weale R. A. (1988). Age and the transmittance of the human crystalline lens. *The Journal of physiology*, 395, 577–587.
- Weitz, C. J., Miyake, Y., Shinzato, K., Montag, E., Zrenner, E., Went, L. N., & Nathans, J. (1992). Human tritanopia associated with two amino acid substitutions in the blue-sensitive opsin. *American journal of human genetics*, 50(3), 498–507.

- Werner, J. S., & Steele, V. G. (1988). Sensitivity of human foveal color mechanisms throughout the life span. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics and image science*, 5(12), 2122–2130
- Werner, J.S. (1996). Visual problems of the retina during ageing: Compensation mechanisms and colour constancy across the life span, *Progress in Retinal and Eye Research*, 15(2), 621-645.
- Werner, J. S., Bieber, M. L., & Scheffrin, B. E. (2000). Senescence of foveal and parafoveal cone sensitivities and their relations to macular pigment density. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 17(11), 1918–1932.
- Werner, J. S., Delahunt, P., Ma, L., Webster, M. A. (2003). Renormalization of color mechanisms across life span, Proceedings of AIC 2003 Bangkok: Color Communication and Management, 406 -412.
- Wiesel, T. N., & Hubel, D. H. (1966). Spatial and chromatic interactions in the lateral geniculate body of the rhesus monkey. *Journal of neurophysiology*, 29(6), 1115–1156.
- Winderickx, J., Lindsey, D. T., Sanocki, E., Teller, D. Y., Motulsky, A. G., & Deeb, S. S. (1992). Polymorphism in red photopigment underlies variation in colour matching. *Nature*, 356(6368), 431–433.
- Wuerger S. (2013). Colour constancy across the life span: evidence for compensatory mechanisms. *PloS one*, 8(5).
- Yaguchi, H., Luo, J., Kato, M., Mizokami, Y. (2018). “Computerized simulation of color appearance for anomalous trichromats using the multispectral image,” *J. Opt. Soc. Am. A* 35, B278–B286
- Zabel, J., Przekoracka-Krawczyk, A., Olszewski, J., & Michalak, K. P. (2021). Variability of Rayleigh and Moreland test results using anomaloscope in young adults without color vision disorders. *PloS one*, 16(5)

AUTORA PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

- P1. Trukša, R., Fomins, S., Jansone-Langina, Z., Dzenis, J. (2023). Modeling D15 test sequences in red-green anomalous trichromacy. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 40(3), A85–A90.
- P2. Trukša, R., Juraševska, K., Livzāne, A., Dzenis, J. (2017). Differences in Chromatic Sensitivity Estimated Using Static and Dynamic Colour Stimuli. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences.*, 71(5) 380-386.
- P3. Trukša, R., Fomins, S., Krūmiņa, G., Dzenis, J. (2014). „Picture segmentation applications in optometry and vision science” *Laboratorine medicina*, 1(61), 38-42.

DALĪBA KONFERENCĒS

- K1. Trukša, R., Jansone-Langina, Z., Fomins, S., Dzenis, J. Computerised colour vision test. Scottish Vision Group 2023, Abertay University, Dundee, United Kingdom, April 21-23, 2023.
- K2. Trukša, R., Fomins, F., Jansone-Langina, Z., Dzenis, J. Software based solution to improve colour rendering accuracy. *Perception* Vol. 52, N 5: Applied Vision Association Christmas Meeting, Nottingham Trent University, Nottingham, UK, December 19, 2022 (2023), 362-363.
- K3. Trukša, R., Jansone-Langina, Z., Fomins, S., Ļetko, K., Krūmiņa, G. Approbation of Color Vision Test for Computerized Vision Screening Protocol. 26th Symposium of the International Colour Vision Society, Crete, Greece, July 1-5, 2022.
- K4. Polupanova, A., Trukša, R., Jansone-Langina, Z., Fomins, F. Computerized colour arrangement test applications in optometrist practice. DOC 2021: 17th International Young Scientist Conference "Developments in Optics and Communications 2021". University of Latvia, Riga, Latvia, April 15-16. ISBN 9789934233562
- K5. Trukša, R., Gabrāne, S., Lazdāne, K., Fomins, S., Krūmiņa, G. Colour categories in short wavelength spectrum among latvian and russian mono and bilingual. The 25th Symposium of the International Colour Vision Society. University of Latvia, Riga, Latvia, July 5-9, 2019, ISSN 978993455.
- K6. Kronberga, K., Trukša, R., Krūmiņa, G. Makulas pigmenta optiskā blīvuma ietekme uz hromatisko jutību. Latvijas Universitātes 77. zinātniskā konference, Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 15. Februāri, 2019.
- K7. Trukša, R. Development of dynamic and static digital colour vision tests for quantitative assessment of colour resolution and analysis of their characteristics. ICVS Summer School on Color, Pembroke College, Oxford, United Kingdom, 30 July – 3 August, 2018.
- K8. Trukša, R., Krūmiņa, G. Viendimensionāla krāsu redzes testa izveide. Latvijas Universitātes 76. zinātniskā konference, Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 16-18 Februāris, 2018.
- K9. Zariņa, E., Trukša, R. . Kvantitatīvo kļūdu skaitīšanas metožu salīdzinājums krāsu sakārtošanas testos. Latvijas Universitātes 75. zinātniskā konference, Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 17-19 Februāris, 2017.
- K10. Trukša, R., Juraševska, K., Zābere, L. Color arrangement test result scoring in normal and deficient color vision. Seeing Colors: An international Symposium on Color Vision, University of Regensburg, Regensburg, Germany, September 19-21, 2016
- K11. Trukša, R., Juraševska, K., Livzāne, A. Chromatic sensitivity evaluation with static and dynamic color vision stimuli. 1st International Symposium on Visual Physiology, Environment, and Perception (VisPEP), University of Latvia, Riga, Latvia, October 6-8, 2016.
- K12. Trukša, R., Juraševska, K., Turko, A., Dzenis, J. Hromatiskās jutības sliekšņu noteikšana, izmantojot datorizētu FM-100 un CUT testu dizainus. Latvijas Universitātes 74. zinātniskā konference, Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 12.-14. februāris, 2016.
- K13. Trukša, R., Juraševska, K., Zābere, L. Color vision resolution assessment for sorting and forced choice methods. Developments in Optics and Communications 2016 : 12th International Young Scientist conference, University of Latvia, Riga, Latvia, March 21-23, 2016.
- K14. Gritāne, A., Trukša, R., Dzenis, J., Krūmiņa, G. Dinamiska datorizēta krāsu redzes testa fona ietekme uz hromatiskās jutības sliekšni. Latvijas Universitātes 73. zinātniskā konference, Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 20. februāris, 2015.
- K15. Trukša, R., Dzenis, J., Krūmiņa, G. Experiment session duration effect on chromatic sensitivity threshold. Developments in Optics and Communications : 11th International Young Scientist Conference, University of Latvia, Riga, Latvia, April 8-10, 2015.
- K16. Trukša, R., Dzenis, J., Krūmiņa, G. Datorizētu krāsu redzes testu stimulu izveide. Latvijas Universitātes 73. zinātniskā konference, Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 20. februāris, 2015.

- K17. Betlere, L., Trukša, R., Dzenis, J. Krāsu redzes rakstura diagnosticēšana izmantojot datorizētu krāsu redzes testu. Latvijas Universitātes 72. zinātniskā konference, Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 14. Februāris, 2014.
- K18. Zariņa, L., Trukša, R., Dzenis, J. Krāsu redzes izvērtēšana ar CCT (Cambrige colour test). Latvijas Universitātes 72. zinātniskā konference, Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 14. Februāris, 2014.

1. Pielikums

Pieņemsim, ka sieviešu populāciju veido 6 ģenētiski atšķirīgas grupas – normālā trihromatija, protan krāsu redzes deficītu nesēji, deitan krāsu redzes deficītu nesēji, protan krāsu redzes deficīti, deitan krāsu redzes deficīti, heterozigotiska krāsu redze. Turpmāk tekstā minētās grupas apzīmējam ar A, B, C, D, E, F. Vīriešu populācijas gadījumā pieņem trīs ģenētiski atšķirīgas grupas – normālā trihromatija, protan krāsu redzes deficīti un deitan krāsu redzes deficīti. Tālāk tekstā minētās grupas apzīmējam ar G, H, I. Turpmākie aprēķini baltās uz sekojošiem pieņēmumiem – vīriešu krāsu redzes deficītu izplatība ir zināma, pieņem, ka abu dzimumu sastopamības biežums ir ekvivalents.

Sakarība, kas apraksta normālās trihromatijas sastopamības biežumu sieviešu vidū

$$A = GA + \frac{1}{2}GB + \frac{1}{2}GC = G * \left(A + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C \right)$$

Sakarība, kas apraksta normālās trihromatijas sastopamības biežumu vīriešu vidū

$$G = GA + \frac{1}{2}GB + \frac{1}{2}GC + HA + \frac{1}{2}HB + \frac{1}{2}HC + IA + \frac{1}{2}IB + \frac{1}{2}IC = (G + H + I) * \left(A + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C \right) = A + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C$$

Izmantojot substitūciju $G = A + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C$, aprēķinām normālās trihromatijas sastopamības biežumu sieviešu populācijā

$$A = G * \left(A + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C \right) = G^2$$

Sakarība, kas apraksta protan krāsu redzes deficītu sastopamības biežumu sieviešu populācijā

$$D = \frac{1}{2}HB + HD + \frac{1}{2}HF = H \left(\frac{1}{2}B + D + \frac{1}{2}F \right)$$

Sakarība, kas apraksta protan krāsu redzes deficītu sastopamības biežumu vīriešu populācijā

$$H = \frac{1}{2}GB + GD + \frac{1}{2}GF + \frac{1}{2}HB + HD + \frac{1}{2}HF + \frac{1}{2}IB + ID + \frac{1}{2}IF = (G + H + I) \left(\frac{1}{2}B + D + \frac{1}{2}F \right) = \frac{1}{2}B + D + \frac{1}{2}F$$

Izmantojot substitūciju $H = \frac{1}{2}B + D + \frac{1}{2}F$, aprēķinām protan krāsu redzes deficītu sastopamības biežumu sieviešu populācijā

$$D = H \left(\frac{1}{2}B + D + \frac{1}{2}F \right) = H^2$$

Sakarība, kas apraksta deitan krāsu redzes deficītu sastopamības biežumu, sieviešu populācijā

$$E = \frac{1}{2}IC + EI + \frac{1}{2}IF = I \left(\frac{1}{2}C + E + \frac{1}{2}F \right)$$

Sakarība, kas apraksta deitan krāsu redzes deficītu sastopamības biežumu, vīriešu populācijā

$$I = \frac{1}{2}GC + GE + \frac{1}{2}GF + \frac{1}{2}HC + HE + \frac{1}{2}HF + \frac{1}{2}IC + IE + \frac{1}{2}IF = \left(\frac{1}{2}C + E + \frac{1}{2}F \right) (G + H + I) = \frac{1}{2}C + E + \frac{1}{2}F$$

Izmantojot substitūciju $I = \frac{1}{2}C + E + \frac{1}{2}F$, aprēķinām deitan krāsu redzes deficītu sastopamības biežumu sieviešu populācijā

$$E = I\left(\frac{1}{2}C + E + \frac{1}{2}F\right) = I^2$$

Sakarība, kas apraksta protan krāsu redzes deficītu nesēju sastopamības biežumu sieviešu populācijā

$$B = \frac{1}{2}GB + GD + \frac{1}{2}GF + AH + \frac{1}{2}HB + \frac{1}{2}HC = G\left(\frac{1}{2}B + D + \frac{1}{2}F\right) + H\left(A + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C\right)$$

Izmantojot substitūcijas $H = \frac{1}{2}B + D + \frac{1}{2}F$ un $G = A + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C$, aprēķinām protan krāsu redzes deficītu sastopamības biežumu sieviešu populācijā

$$B = G\left(\frac{1}{2}B + D + \frac{1}{2}F\right) + I\left(A + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C\right) = GH + HG = 2GH$$

Sakarība, kas apraksta deitan krāsu redzes deficītu nesēju sastopamības biežumu sieviešu populācijā

$$C = AI + \frac{1}{2}BI + \frac{1}{2}CI + GE + \frac{1}{2}GC + \frac{1}{2}GF = I\left(A + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C\right) + G\left(\frac{1}{2}C + E + \frac{1}{2}F\right)$$

Izmantojot substitūcijas $G = A + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C$ un $I = \frac{1}{2}C + E + \frac{1}{2}F$, aprēķinām deitan krāsu redzes deficītu sastopamības biežumu sieviešu populācijā

$$C = I\left(A + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C\right) + G\left(\frac{1}{2}C + E + \frac{1}{2}F\right) = IG + GI = 2GI$$

Aprēķinām heterozigotisku gadījumu sastopamības biežumu sieviešu populācijā

$$\begin{aligned} F &= 1 - A - B - C - D - E = 1 - G^2 - 2GH - 2GI - H^2 - I^2 = 1 - G^2 - H^2 - I^2 - 2G(H + I) = \\ &= 1 - G^2 - H^2 - I^2 - 2G(1 - G) = 1 + G^2 - H^2 - I^2 - 2G \end{aligned}$$

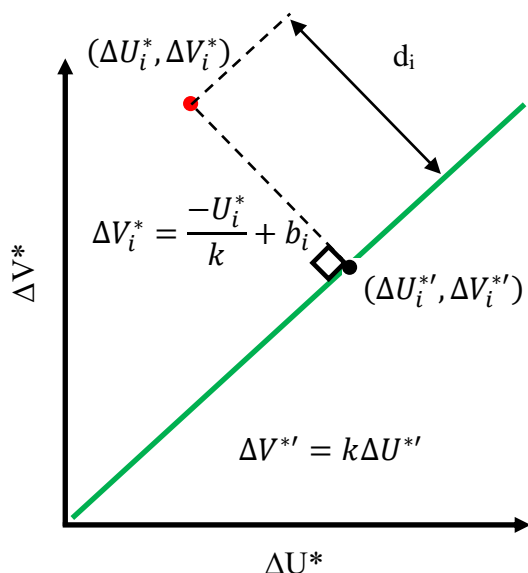
Balstoties uz Sharpe 1999 minētajām krāsu redzes deficītu sastopamības vērtībām vīriešu populācijā, t.i., 2.01% vīriešu ir protan tipa deficīti un 6.28% vīriešu ir deitan tipa deficīti, tad iepriekš minēto sieviešu grupu sastopamības biežums populācijā ir:

No	Grupa	Sastopamības biežums
1	Normālā trihromatija	84,11%
2	Protan krāsu redzes deficītu nesēji	3,69%
3	Deitan krāsu redzes deficītu nesēji	11,52%
4	Protan krāsu redzes deficīti	0,04%
5	Deitan krāsu redzes deficīti	0,39%
6	Protan/deitan krāsu redzes deficītu nesēji	0,25%

2.Pielikums

Leņķisko vērtību, kas norāda uz virzienu krāsu telpā, kurā pētījuma dalībniekiem ir tendence pieļaut lielākas kļūdas krāsu sakārtošanas testos var izskaitļot izmantojot Vingrys&Kingsmith 1988. gada publikācijā piedāvāto inerces momentu metodi, vai, izmantojot ortogonālo, lineāro regresiju pieņemot, ka lineārās regresijas funkcija satur punktu (0,0). Lai vienkāršotu aprēķina algoritmu izklāstu, tiek ierosināti sekojoši mainīgie lielumi:

- $(\Delta U_i^*, \Delta V_i^*)$ - i-tajam relatīvajam krāsu atšķirību vektoram atbilstošās krāsu koordinātes
- $(\Delta U_i^{*'}, \Delta V_i^{*'})$ - krustpunkts starp lineāro funkciju un tai perpendikulāro funkciju, kas satur punktu $(\Delta U_i^*, \Delta V_i^*)$
- k – regresijas modelim atbilstošais slīpuma koeficients
- b_i – lineārās funkcijas, kas perpendikulāra lineārās regresijas funkcijai, krustpunkts ar ΔV^* asi
- d_i – minimālā distance starp punktiem $(\Delta U_i^*, \Delta V_i^*)$ un $(\Delta U_i^{*'}, \Delta V_i^{*'})$.



att. 0.1 *Ilustratīvs piemērs sakarībām starp relatīvajiem krāsu atšķirību vektoriem atbilstošajām koordinātēm un ortogonālas lineārās regresijas modeli*

1. Noskaidro funkcijas, kas perpendikulārā lineārās regresijas funkcijai, krustpunktu ar ΔV^* asi

$$\Delta V_i^* = \frac{-\Delta U_i^*}{k} + b_i \rightarrow b_i = \Delta V_i^* + \frac{\Delta U_i^*}{k} = \frac{k\Delta V_i^* + \Delta U_i^*}{k}$$

2. Noskaidro krustpunkta $(\Delta U_i^{*'}, \Delta V_i^{*'})$ koordinātes starp lineāro funkciju un tai perpendikulāro funkciju, kas satur punktu $(\Delta U_i^*, \Delta V_i^*)$

$$k\Delta U_i^{*'} = \frac{-\Delta U_i^{*'}}{k} + b_i = \frac{-\Delta U_i^{*'}}{k} + \frac{k\Delta V_i^* + \Delta U_i^*}{k}$$

$$\Delta U_i^{*'} \left(k + \frac{1}{k} \right) = \frac{k\Delta V_i^* + \Delta U_i^*}{k} \rightarrow \Delta U_i^{*'} \left(\frac{k^2 + 1}{k} \right) = \frac{ky_i + x_i}{k}$$

$$\Delta U_i^{*'} = \frac{k\Delta V_i^* + \Delta U_i^*}{k} : \left(\frac{k^2 + 1}{k} \right) = \frac{k\Delta V_i^* + \Delta U_i^*}{k^2 + 1}$$

$$\Delta V_i^{*'} = \frac{k^2\Delta V_i^* + \Delta U_i^*}{k^2 + 1}$$

3. Noskaidro minimālo distanci punktam $(\Delta U_i^*, \Delta V_i^*)$ līdz lineārās regresijas modelim atbilstošajai funkcijai.

$$\begin{aligned} d_i^2 &= \left(\frac{k\Delta V_i^* + \Delta U_i^*}{k^2 + 1} - \Delta U_i^* \right)^2 + \left(\frac{k^2\Delta V_i^* + k\Delta U_i^*}{k^2 + 1} - \Delta V_i^* \right)^2 = \\ &= \left(\frac{k\Delta V_i^* + \Delta U_i^* - \Delta U_i^*k^2 - \Delta U_i^*}{k^2 + 1} \right)^2 + \left(\frac{k^2\Delta V_i^* + k\Delta U_i^* - \Delta V_i^*k^2 - \Delta V_i^*}{k^2 + 1} \right)^2 = \\ &= \left(\frac{k\Delta V_i^* - \Delta U_i^*k^2}{k^2 + 1} \right)^2 + \left(\frac{k\Delta U_i^* - \Delta V_i^*}{k^2 + 1} \right)^2 = \\ &= \frac{k^2(\Delta V_i^*)^2 - 2k^3\Delta U_i^*\Delta V_i^* + (\Delta U_i^*)^2k^4 + k^2(\Delta U_i^*)^2 - 2k\Delta U_i^*\Delta V_i^* + (\Delta V_i^*)^2}{(k^2 + 1)^2} = \\ &= \frac{(\Delta V_i^*)^2(k^2 + 1) - 2k\Delta U_i^*\Delta V_i^*(k^2 + 1) + (\Delta U_i^*)^2k^2(k^2 + 1)}{(k^2 + 1)^2} = \\ &= \frac{(\Delta V_i^*)^2 - 2k\Delta U_i^*\Delta V_i^* + (\Delta U_i^*)^2k^2}{k^2 + 1} \end{aligned}$$

4. Noskaidro distanču summu starp relatīvo krāsu atšķirību vektoriem atbilstošajām koordinātēm un lineārās regresijas funkciju

$$D = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta V_i^*)^2 - 2k\Delta U_i^*\Delta V_i^* + (\Delta U_i^*)^2k^2}{k^2 + 1}$$

5. Noskaidro ortogonālās lineārās regresijas modeļa slīpuma koeficientu

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial k} \left(\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta V_i^*)^2 - 2k\Delta U_i^*\Delta V_i^* + (\Delta U_i^*)^2k^2}{k^2 + 1} \right) &= 0 \\ &= \left(\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta V_i^*)^2}{k^2 + 1} \right)'_k + \left(\sum_{i=1}^n \frac{-2k\Delta U_i^*\Delta V_i^*}{k^2 + 1} \right)'_k + \left(\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta U_i^*)^2k^2}{k^2 + 1} \right)'_k = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^n \frac{-2k(\Delta V_i^*)^2}{(k^2+1)^2} + \sum_{i=1}^n \frac{2\Delta U_i^* \Delta V_i^* (k^2-1)}{(k^2+1)^2} + \sum_{i=1}^n \frac{2k(\Delta U_i^*)^2}{(k^2+1)^2} = \\
&= 2 \sum_{i=1}^n \frac{k((\Delta U_i^*)^2 - (\Delta V_i^*)^2) + 2\Delta U_i^* \Delta V_i^* (k^2-1)}{(k^2+1)^2} = \\
&= \frac{2}{(k^2+1)^2} \sum_{i=1}^n k((\Delta U_i^*)^2 - (\Delta V_i^*)^2) + \Delta U_i^* \Delta V_i^* (k^2-1) = 0
\end{aligned}$$

6. Atrisinā vienādojumu $\frac{2}{(k^2+1)^2} \sum_{i=1}^n k((\Delta U_i^*)^2 - (\Delta V_i^*)^2) + \Delta U_i^* \Delta V_i^* (k^2-1) = 0$

Ievēro, ka $\frac{2}{(k^2+1)^2} > 0$ no kā seko, ka $\sum_{i=1}^n k((\Delta U_i^*)^2 - (\Delta V_i^*)^2) + \Delta U_i^* \Delta V_i^* (k^2-1) = 0$

7. Sadala izteiksmi

$$\sum_{i=1}^n k((\Delta U_i^*)^2 - (\Delta V_i^*)^2) + \Delta U_i^* \Delta V_i^* (k^2-1) = k \sum_{i=1}^n ((\Delta U_i^*)^2 - (\Delta V_i^*)^2) + k^2 \sum_{i=1}^n \Delta U_i^* \Delta V_i^* - \sum_{i=1}^n \Delta U_i^* \Delta V_i^*$$

8. Ieviešam substitūcijas

$$Q = \sum_{i=1}^n ((\Delta U_i^*)^2 - (\Delta V_i^*)^2)$$

$$W = \sum_{i=1}^n \Delta U_i^* \Delta V_i^*$$

9. Atrisinām vienādojumu $k^2W + kQ - Q = 0$

$$\begin{aligned}
k_{1,2} &= \frac{-Q \pm \sqrt{Q^2 - 4 * W * (-W)}}{2W} = \frac{-Q \pm \sqrt{Q^2 + 4W^2}}{2W} = \\
&= \frac{\sum_{i=1}^n ((\Delta U_i^*)^2 - (\Delta V_i^*)^2) \pm \sqrt{(\sum_{i=1}^n ((\Delta U_i^*)^2 - (\Delta V_i^*)^2))^2 - 4 * (\sum_{i=1}^n \Delta U_i^* \Delta V_i^*)^2}}{2 \sum_{i=1}^n \Delta U_i^* \Delta V_i^*}
\end{aligned}$$

PATEICĪBAS

Vēlos izteikt pateicību darba vadītājam Dr. phys Jānim Dzenim par atbalstu un padomiem disertācijas izstrādes procesā, kā arī par padomiem saistībā ar maniem centieniem attīstīt produktus un pakalpojumus. Lielu paldies vēlos teikt neformālās krāsu grupas biedriem – Kaivai Juraševskai, Anetei Petrovai, Zanei Jansonei-Langinai, Sergejam Fominam un Mārim Ozoliņam par padomiem, palīdzību un sniegtajām iespējām disertācijas tapšanas procesā. Paldies visiem Optometrijas un redzes zinātnes nodaļas kolēģiem par pacietību, atbalstu, uzmuntrinājumiem un sniegtajām iespējām. Paldies studentiem par kopīgo darbu eksperimentu un pētījumu izstrādē. Vēlos teikt paldies par iespēju vairāk laika veltīt disertācijas izstrādei grantam projekta ietvaros “LU doktorantūras kapacitātes stiprināšana jaunā doktorantūras modeļa ietvarā”, projekta nr. 8.2.2.0/20/I/006, kas deva ierosmi pabeigt doktorantūras studijas. Liels paldies vecākiem par atbalstu, sapratni un pacietību.



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**