



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

**Promocijas darba
kopsavilkums**

Renārs Trukša

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

Rīga 2024



LATVIJAS UNIVERSITĀTE

FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE

Renārs Trukša

METODE UN MODELIS SARKANI-ZAĻĀS ANOMĀLĀS TRIHROMĀTIJAS IZVĒRTĒŠANAI

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

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.



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

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

Darba kopsavilkums sastāv no ievada, 4 nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta.

Darba forma: disertācija fizikas nozarē, medicīniskās fizikas apakšnozarē.

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

Darba recenzenti:

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

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2024. gada 2. februārī Rīgā, 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

© Latvijas Universitāte, 2024

© Renārs Trukša, 2024

ISBN 978-9934-36-157-9

ISBN 978-9934-36-158-6 (PDF)

ANOTĀCIJA

Šis darbs ir veltīts krāsu redzes deficītu diagnosticēšanas un modelēšanas problemātikai. Šī pētījuma ietvaros ir izstrādāts matemātisks modelis, kas nodrošina iespēju paredzēt D15 testa krāsu kauliņu sakārtošanas secības sarkani-zaļās anomālās trihromātijas gadījumos. Matemātiskā modeļa rezultātu analīze apstiprina, ka krāsu redzes deficītu izteiktību sarkani-zaļās anomālās trihromātijas gadījumos var skaidrot ar L un M vāļišu fotoreceptoru spektrālajām atšķirībām. Modelēšanas eksperimentu rezultāti norāda, ka normālās un anomālās trihromātijas gadījumos krāsu oponento mehānismu darbības principi neatšķiras.

Pētījuma ietvaros ir izstrādāts datorizēts krāsu redzes tests (CCVT), kas ietver divu tipu stimulus – dinamisku un statisku. Darbā ir aprakstīti datorizētā testa uzbūves principi, kā arī algoritmi, kas nodrošina iespēju noskaidrot hromatisko izšķirtspēju un aprēķināt sarkani-zaļā un dzelteni-zilā krāsu oponentā kanāla izšķirtspēju. Salīdzinot pētījuma dalībnieku sniegumu kā ar datorizēto CCVT testu tā ar krāsu redzes testiem HRR, FM100, CAD un anomaloskopa testu, apstiprināts, ka CCVT tests ar augstu jutību un specifitāti nodrošina iespēju konstatēt kā normai atbilstošu krāsu redzi tā arī sarkani-zaļās krāsu redzes deficītu gadījumos. CCVT testa priekšrocība salīdzinājumā ar citiem datorizētajiem krāsu redzes testiem ir tā relatīvi vienkāršais un pieejamais tehniskais nodrošinājums, kas var nodrošina iespēju sniegt krāsu redzes izmeklējumu skolas vecuma bērniem, lai agrīni konstatētu krāsu redzes deficītus un sekmētu to karjeras izvēli, transporta industrijai un tiesībsargājošām iestādēm, lai veiktu potenciālo darbinieku krāsu redzes izmeklējumus.

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

SATURS

Termini un saīsinājumi	6
1. IEVADS.....	9
1.1. Ievads un tēmas aktualitāte.....	9
1.2. Darba mērķi un uzdevumi	10
1.3. Aizstāvamās tēzes.....	11
1.4. Darba novitāte	11
1.5. Autora ieguldījums	12
1.6. Rezultāti	12
2. LITERATŪRAS PĀRSKATS.....	15
2.1. Krāsu redzes deficīti.....	15
2.2. Krāsu redzes izmaiņas dzīves laikā	15
2.3. Krāsu redzes testi.....	16
2.4. Datoru monitoru kalibrēšana	17
2.5. Psihofizikālās metodes	18
3. D15 TESTA REZULTĀTU MODELĒŠANA PROTANOMĀLIJAS UN DEITERANOMĀLIJAS GADĪJUMOS.....	20
3.1. Modelis.....	20
3.2. Rezultāti	23
4. DATORIZĒTAIS KRĀSU REDZES TESTS	27
4.1. Metode.....	27
4.2. Rezultāti	29
4.2.1. Mērījumu atkārtojamība.....	29
4.2.2. Krāsu izšķirtspēja pirms un pēc 40 gadu vecuma	30
4.2.3. Vecums un hromatiskā jutība.....	31
4.3. Secinājumi.....	34
5. DATORIZĒTAIS KRĀSU REDZES TESTS – CCVT	35
5.1. Pētījuma dalībnieki un eksperiments.....	35
5.2. CCVT tests	35

5.3. Hromatiskā izšķirtspēja cilvēkiem bez krāsu redzes.....	38
5.4. Datorizētā krāsu redzes testa CCTV rezultāti cilvēkiem ar krāsu redzes deficītiem.....	42
5.5. Secinājumi	45
SECINĀJUMI UN IESPĒJAMIE PIELIETOJUMI	46
LITERATŪRA.....	48
PATEICĪBAS.....	52

Termini un saīsinājumi

a, b	hromatiskās krāsu koordinātes CIELab krāsu telpā
$by(\lambda)$	dzelteni-zilā krāsu oponentā kanāla spektrālā funkcija
BY	dzelteni-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”
CIELab	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.
CIELUV	organizācijas “International Commission on Illumination” ierosinātā krāsu telpa. Homogēna krāsu telpa, kas tiek izmantota, lai raksturotu gaismu atstarojošus stimulus.
CIExy	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 nekā D15 testa stimuliem, savukārt piesātinājums mazāks nekā D15 testa stimuliem.
ΔE	krāsu atšķirību mērs CIELab krāsu telpā.
FM100	krāsu sakārtošanas tests “Farnsworth–Munsell 100 hue test”
HRR	pseudoizohromatisko 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.
$I_{\max 0}$	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.
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.
$L_{\text{ēca}}OD(\lambda)$	acs lēcas gaismas caurlaidības spektrs
$lum(\lambda)$	ahromātiskā kanāla spektrālā funkcija
$\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$	normalizētas L, M, S vāļišu spektrālās jutības funkcijas
$MPOD(\lambda)$	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 patients, 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
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.
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 trihromātijas 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 fotopigmenti 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 stimuliem, kas atbilst vienai konfūzijas līnijai (Davidoff et al., 2016). Šobrīd par nozares standartu sarkani-zaļās krāsu redzes izmeklējumam tiek uzskatīts anomaloskopa tests, kas nodrošina iespēju savstarpēji izšķirt kā protan un deitan tā arī dihromātijas un anomālās trihromātijas 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 dzeltenī-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 & Rodríguez-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 neattiecinot 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 trihromātijas 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 dzeltenī-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 trihromātijas gadījumos.

1.3. Aizstājamās 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 trihromātijas 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 raksturo īgas protanomālijas un deiteranomālijas gadījumiem. (P1)

1.4. Darba novitāte

1. Izstrādāts datorizēts krāsu redzes tests, kas nodrošina iespēju ar augstu jutību un specifitāti savstarpēji izšķirt normālās trihromātijas 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 stimuls 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) izstrādāto modeli, kas nodrošina iespēju modelēt krāsu uztveres īpatnības sarkani-zaļo krāsu redzes deficītu gadījumos, un Vingrys & KingSmith (1988) ierosināto inerces momentu metodi, kas sniedz iespēju izvērtēt sniegumu krāsu sakārtošanas testos, apstiprināts, ka sniegumu D15 krāsu redzes testā sarkani-zaļās anomālas trihromātijas gadījumos var izskaidrot ar spektrālajām atšķirībām starp L un M vāļišu fotoreceptoru pigmentiem.

1.5. 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 sliekšņus, izveidojis algoritmu, lai noskaidrotu minimālās izšķiršanas elipses parametrus un aprēķinātu sarkani-zaļā un dzelteni-zilā krāsu oponentā krāsu kanāla hromatiskās izšķirtspējas sliekšņus. 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 vāļišu spektrālo īpašību ietekmi uz sniegumu D15 krāsu sakārtošanas testā.

1.6. Rezultāti

Publikācijas

- 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.

Konferenču tēzes

- 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. februārī, 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. 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 (Cambridge colour test). Latvijas Universitātes 72. zinātniskā konference, Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 14. februāris, 2014.

2. LITERATŪRAS PĀRSKATS

2.1. Krāsu redzes deficīti

Cilvēkiem bez krāsu redzes traucējumiem tiklīdz var konstatēt trīs fotoreceptoru tipus – L, M un S vāļītes, kas nodrošina gaismas uztveri redzamās gaismas garo, vidējo un īso viļņu daļā. Cilvēkiem ar krāsu redzes deficītiem konstatē spektrālās jutības izmaiņas vienam no trīs vāļīšu fotoreceptoru tipiem, vai atsevišķu fotopigmentu vai fotoreceptoru pilnīgu iztrūkumu. Anomālās trihromātijas gadījumus ir pieņemts iedalīt protanomālījā un deitranomālījā, kur pirmajā gadījumā konstatē L vāļīšu fotopigmentu gaismas absorbcijas spektru nobīdi redzamās gaismas īso viļņu virzienā un otrajā gadījumā konstatē M vāļīšu fotopigmentu gaismas absorbcijas spektru nobīdi redzamās gaismas garo viļņu virzienā. Krāsu redzes deficīta izteiktība anomālās trihromātijas gadījumos atkarīga no spektrālās diferences starp L un M vāļīšu fotopigmentu absorbcijas maksimumiem, t.i., samazinoties spektrālajai diferencei starp L un M vāļīšu maksimumiem krāsu redzes deficīta izteiktība palielinās (Neitz et al., 1996). Anomālās trihromātijas veida trianomālīja eksistence ir diskutabla, jo cilvēku populācijā nav konstatētas ievērojamas S vāļīšu fotopigmentu nobīdes redzamās gaismas garo viļņu virzienā. Vāji un vidēji izteiktus tritan tipa deficītus šobrīd skaidro, ar progresīvu S vāļīšu funkcijas deģenerāciju (Baraas et al., 2007). Sarkani-zaļās dihromātijas jeb protanopijas un deiteranopijas gadījumos konstatē pilnīgu L un M fotopigmentu iztrūkumu, savukārt dzeltenī-zilās dihromātijas gadījumā jeb tritanopijas gadījumos konstatē pilnīgu S vāļīšu fotoreceptoru iztrūkumu. S vāļīšu monohromāzijas gadījumos konstatē pilnīgu L un M vāļīšu iztrūkumu, savukārt nūjiņu monohromāzijas gadījumā pilnībā iztrūkst visi trīs vāļīšu fotoreceptoru tipi. Būtiski minēt, ka cilvēkiem ar monohromātisku krāsu redzes raksturu līdztekus krāsu redzes problēmām konstatē zemu redzes asumu, fotofobiju un nistagmu (Pascual-Camps et al., 2018; Moskowitz et al., 2009).

2.2. Krāsu redzes izmaiņas dzīves laikā

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 diemžēl ir tikai daļēji paties apgalvojums. Wuerger 2013 pētījumā ir apstiprināts, ka spēja izšķirt virsliedzīgu stimulus vairumā gadījumu saglabājas nemainīgi augsta vecuma grupā no 18 līdz 75 gadiem, tiesa, pieaugot vecumam novēro krāsu izšķirtspējas sliekšņu vērtību pieaugumu. Tiek ierosināts, ka virsliedzīgu krāsaino stimulu uztvere ir relatīvi nemainīga, jo pieaugot vecumam konstatē vienmērīgu un līdzīgu visu vāļīšu fotoreceptoru funkciju degradāciju, kas skaidro stabilu krāsu oponento kanālu darbību visā dzīves garumā, jo krāsu oponento kanālu signāli tiek aprēķināti, kā difference starp dažādo vāļīšu tipu signāliem (Wuerger, 2013; Werner, 1996).

Tiesa, ir konstatēts, ka pieaugot vecumam būtiski samazinās acs lēcas gaismas caurlaidība (Weale 1988; Pokorny et al., 1987; Xu et al., 1997), zīlītes diametrs sašaurinās (Guillon et al., 2016), vāļišu fotoreceptru gaismas absorbcijas efektivitāte (Kilbride et al., 1986; Werner & Steele, 1988) un tīklenes ganglionāro šūnu skaits (Curcio & Drucker, 1993) samazinās. Pētījumu rezultāti norāda, ka cilvēku sniegumu ar krāsu redzi saistītos eksperimentos ietekmē ne tikai fizioloģiskas un anatomiskas izmaiņas acs audos un struktūrās, bet arī izmaiņas augstākos vizuālās analīzes posmos galvas smadzenēs (Elliott et al., 1990; Hardy et al., 2005; Scheffrin et al., 1995; Shinomori et al., 2001).

Veicot krāsu redzes izmeklējumus ar tādiem krāsu redzes testiem kā FM-100 (Verriest, 1963, Knoblauch et al., 1987, Kinnear & Sahaie, 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 2015. 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 ar krāsu redzes testu izpildes nosacījumu izpratnes padziļināšanos.

2.3. Krāsu redzes testi

Šobrīd rutīnas krāsu redzes izmeklējumam tiek izmantoti pseidoizohromatisko plašu krāsu redzes testi kā HRR un Ishihara, kas balstīti uz *Chibret* un *Stilling* principiem (Mollon, 1989). Pseidoizohromatisko plašu testu jutība uz specifitāti ir robežās no 87–98% atkarībā no izvēlēta kritērija vērtības (Birch, 2010; Birch, 1997), kas ir pietiekami priekš rutīnas krāsu redzes izmeklējumam. Lai identificētu cilvēkus ar izteiktiem krāsu redzes deficiētiem, ir izveidoti tādi krāsu redzes testi kā D15 un DS15, kas ir atvasināti no krāsu sakārtošanas testa *Farnsworth-Munsell* 100, turpmāk tekstā FM100. Krāsu sakārtošanas testus D15 un DS15 neiesaka krāsu redzes skrīningam, jo šo testu jutība sasniedz tikai 45–53% un 58–63% (Atchison et al., 1991; Dain & Adams, 1990). FM100 krāsu redzes tests praksē tiek izmantots reti, jo testa rezultātu apstrāde ir relatīvi sarežģīta un laikietilpīga, tiesa, minētās problēmas ir atrisinātas, pilnīgi vai daļēji automatizējot testa rezultātu apstrādi (Vingrys & King-Smith, 1988). Anomāloskopa tests tiek uzskatīts par references testu sarkani-zaļo krāsu redzes

deficītu diagnostikai (Dain, 2004), jo šī metode tiešā veidā nodrošina iespēju noskaidrot, cik daudz dažādu fotopigmentu tipu ir cilvēka tīklenē, kā arī konstatēt gaismas absorbcijas īpašību atšķirības starp dažādajiem fotopigmentu tipiem. Pielietojot anomaloskopa testu klīniskos pētījumos un ikdienas krāsu redzes izmeklējumos, var identificēt un savstarpēji atšķirt tādas krāsu redzes deficītu veidus kā deiteranomālija un protanomālija, deiteranopija un protanopija. Līdztekus iepriekš minētajiem krāsu redzes testiem ir pieejami tādi datorizētie krāsu redzes testi kā CCT (Cambridge Color Test) un CAD (Colour Assessment and Diagnosis test). Datorizētie krāsu testi nodrošina iespēju veikt detalizētāku krāsu redzes izmeklējumu salīdzinājumā ar krāsu sakārtošanas un pseidoizohromatisko plašu testiem, tomēr datorizētie krāsu redzes testi nenodrošina iespēju savstarpēji izšķirt protanomālijas un protanopijas, deiteranomālijas un deiteranopijas gadījumus.

2.4. Datoru monitoru kalibrēšana

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 sekojošiem pieņēmumiem – krāsainā stimula spektru un tā CIE_{xy} sistēmas atbilstošos parametrus var aprēķināt summējot individuālo krāsu kanālu atbilstošos CIE_{xy} sistēmas parametrus balstoties uz aditīvo krāsu saskaitīšanas principu, starp individuālo krāsu kanālu spožuma vērtībām Y un integrālsummām X un Z pastāv cieša lineāra sakarība. Balstoties uz augstāk minētajiem pieņēmumiem, tika aprēķināts vēlamajām x, y, Y koordinātēm atbilstošākais visu trīs krāsu kanālu spožuma vērtību komplekts, t.i., Y_R, Y_G, Y_B (skatīt vienādojumus 2.1 un 2.2). Vienādojumos 2.1 un 2.2 ar X_R, X_G, X_B, Y_R, Y_G, Y_B, Z_R, Z_G, Z_B tiek apzīmētas integrālās summas stimuliem ar CIE_{xy} krāsu telpas koordinātēm x, y un Y, savukārt ar x_r, x_g, x_b, y_r, y_g, y_b, z_r, z_g, z_b ir apzīmētas datora monitora sarkanā, zaļā un zilā krāsu kanāla krāsu koordinātes.

$$\begin{aligned} X &= X_R + X_G + X_B = \frac{x_R}{y_R} Y_R + \frac{x_G}{y_G} Y_G + \frac{x_B}{y_B} Y_B \\ Y &= Y_R + Y_G + Y_B \\ Z &= Z_R + Z_G + Z_B = \frac{z_R}{y_R} Y_R + \frac{z_G}{y_G} Y_G + \frac{z_B}{y_B} Y_B \end{aligned} \rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{z_R}{y_R} & \frac{z_G}{y_G} & \frac{z_B}{y_B} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Y_R \\ Y_G \\ Y_B \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{z_R}{y_R} & \frac{z_G}{y_G} & \frac{z_B}{y_B} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_R \\ Y_G \\ Y_B \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Balstoties uz radiospektrometrijas mērijumiem ar ierīci PR-655 tika noskaidrotas funkcionālās sakarības starp katram krāsu kanālam atbilstošajām R, G, B sistēmas vērtībām un spožumu. Šī pētījuma ietvaros sakarības starp R, G, B sistēmas vērtībām un katra krāsu kanāla individuālo spožumu tika aprakstītas ar otrās kārtas polinomu, kas vienlaikus korekti apraksta sakarības starp RGB un CIE_{xy} sistēmām, kā arī sniedz iespēju veikt vienkāršus pārrēķinus no CIE_{xy} uz RGB sistēmām (skatīt vienādojumu 2.3). Vienādojumā 2.3 ar $a_r, b_r, c_r, a_g, b_g, c_g, a_b, b_b, c_b$ tiek apzīmēti koeficienti otrās pakāpes polinomiem, kas tiek izmantoti, lai aprakstītu sakarības starp RGB vērtībām un gaismas intensitātēm – Y_R, Y_G, Y_B , kas atbilst datora monitora sarkanajam, zaļajam un zilajam krāsu kanālam.

$$\begin{aligned}
 Y_R &= a_R R^2 + b_R R + c_R \rightarrow R = \frac{-b_R + \sqrt{b_R^2 - 4a_R(c_R - Y_R)}}{2a_R} \\
 Y_G &= a_G G^2 + b_G G + c_G \rightarrow G = \frac{-b_G + \sqrt{b_G^2 - 4a_G(c_G - Y_G)}}{2a_G} \\
 Y_B &= a_B B^2 + b_B B + c_B \rightarrow B = \frac{-b_B + \sqrt{b_B^2 - 4a_B(c_B - Y_B)}}{2a_B}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

2.5. Psihofizikālās metodes

Redzes psihofizikā pieņem, ka absolūta sliekšņa vērtība ir minimālā stimula intensitāte, kuru persona spēj korekti identificēt 50% gadījumos. Krāsu pētījumos par sliekšņa vērtību pieņem minimālo krāsainā stimula piesātinājumu, kas nepieciešams, lai 50% gadījumos detektētu krāsaino stimulu. Šī pētījuma ietvaros tika izmantotas divas psihofizikālās metodes, lai noskaidrotu hromatiskās jutības sliekšņu vērtības – konstanto stimulu un adaptīvā neparametriskā trepju metode.

Konstanto stimulu metodes gadījumā pētījuma dalībniekam vienas mērijumu sesijas laikā jautātā secībā tiek demonstrēti vismaz 5 dažādu intensitāšu stimuli katrs vismaz 20 reizes. Lai ņemtu vērā eksperimenta dizaina ietekmi uz eksperimentālajiem datiem, t.i., iespēju, ka pētījuma dalībnieks var nejauši sniegt korektu atbildi, tika veikta eksperimentālo datu korekcija, izmantojot *Abbott* ierosināto sakarību (Treutwein, 1995). Balstoties uz eksperimenta laikā iegūtajiem datiem tika noskaidrota psihometriskā funkcija, t.i., funkcionāla sakarība, kas raksturo stimula detektēšanas varbūtību atkarībā no stimula piesātinājuma. Pētījuma dalībnieku sniegtam atbilstošā sliekšņu vērtība tika aprēķināta, izmantojot psihometriskās funkcijas inverso funkciju, kas nodrošina iespēju aprēķināt stimula detektēšanas varbūtībai atbilstoši testa stimula intensitāti.

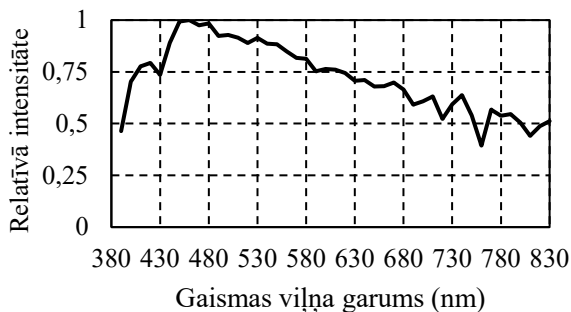
Līdztekus konstanto stimulu metodei tika izmantotas *1 up / n down* adaptīvās neparametriskās metodes, t.i., testa stimula intensitāte tiek samazināta, ja tiek reģistrētas n secīgas pareizas atbildes vienai testa stimula intensitātei un

vienam testa stimula tipam, savukārt testa stimula intensitāti palielina, kamēr tiek konstatēta nepareiza atbilde. Gadījumos, kad konstatē pētījuma dalībnieka snieguma izmaiņas, t.i., ja iepriekšējais testa stimulants tika identificēts korekti un sekojošais kļūdaini vai otrādi, tad pēdējā demonstrētā testa stimula intensitāte tiek reģistrēta kā sliekšņu vērtība. Eksperimentālā sesija turpinās tik ilgi, kamēr tiek reģistrēts iepriekš definēts sliekšņu vērtību skaits. Mērījumu sesijas noslēgumā sliekšņu vērtība tiek aprēķināta kā vidējais aritmētiskais no mērījumu sesijas laikā reģistrētajām sliekšņu vērtībām. Šī darba ietvaros tika izmantota *multiple random staircase* metode, kas sevī ietver vairākas paralēlas mērījumu sesijas ar *1 up / n down* adaptīvajām neparimetriskajām metodēm.

3. D15 TESTA REZULTĀTU MODEĻĒŠANA PROTANOMĀLIJAS UN DEITERANOMĀLIJAS GADĪJUMOS

3.1. 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 trihromātijas 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 vāļišu 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 3.1 attēlu).



3.1. 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 vāļišu fotopigmentiem. Zinātniskajā literatūrā ir apstiprināts, ka *Lamb* piedāvātais modelis nevar tikt izmantots, lai modelētu S vāļišu fotoreceptoru gaismas absorbcijas funkcijas,

tāpēc S vāļišu fotoreceptoru gaismas absorbcijas funkcijas tika modelētas izmantojot *Stockman & Sharpe* 2000. gada pētījumā ierosināto S vāļišu 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 3.1–3.3, kur ar k_L , k_M , k_S apzīmēti normalizācijas koeficienti, ar $LensOD(\lambda)$ un $MPOD(\lambda)$ 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.

$$\bar{l}(\lambda) = k_L * 10^{-L_{\text{ēcaOD}}(\lambda)} * 10^{-MPOD(\lambda)} * (1 - 10^{-L_{OD} * S_L(\lambda)}) \quad (3.1)$$

$$\bar{m}(\lambda) = k_M * 10^{-L_{\text{ēcaOD}}(\lambda)} * 10^{-MPOD(\lambda)} * (1 - 10^{-M_{OD} * S_M(\lambda)}) \quad (3.2)$$

$$\bar{s}(\lambda) = k_S * 10^{-L_{\text{ēcaOD}}(\lambda)} * 10^{-MPOD(\lambda)} * (1 - 10^{-S_{OD} * S_S(\lambda)}) \quad (3.3)$$

Spožuma jeb V lamda funkcija (skatīt *lum*(λ) 3.4 vienādojumā) tika modelēta kā svērtā L un M vāļišu fotoreceptoru signālu summa, savukārt sarkani-zaļā krāsu oponentā funkcija (skatīt *rg*(λ) 3.4 vienādojumā) tika modelēta kā starpība starp L un M vāļišu signāliem, savukārt dzeltenī-zilā krāsu oponentā funkcija (skatīt *by*(λ) 3.4 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 3.4 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 dzeltenī-zilā oponento kanālu signālu vērtības tika normalizētas attiecībā pret V lamda funkcijas vērtību ahromātiska stimula gadījumā (skatīt 3.4 vienādojumu).

$$\begin{bmatrix} lum(\lambda) \\ rg(\lambda) \\ by(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,6899 & 0,3483 & 0 \\ \frac{M_w}{V_w} & \frac{-L_w}{V_w} & 0 \\ \frac{0,6899 * S_w}{V_w} & \frac{0,3483 * S_w}{V_w} & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_w(\lambda)}{L'_w} l(\lambda) \\ \frac{M_w(\lambda)}{M'_w} m(\lambda) \\ s(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Lai aprēķinātu D15 testa stimuliem atbilstošās krāsu koordinātes CIE_xy 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 3.5 vienādojumu).

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,9447 & -1,4145 & 0,3648 \\ 0,6899 & 0,3483 & 0 \\ 0 & 0 & 1,9349 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,6899 & 0,3483 & 0 \\ 0,8991 & -0,9955 & 0 \\ 0,4260 & 0,2151 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} lum(\lambda) \\ rg(\lambda) \\ by(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

D15 testa kauliņiem atbilstošās integrālsomas X, Y, Z krāsu redzes deficītu gadījumos tika aprēķinātas ar vienādojumiem 3.6–3.8. 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.

$$\begin{aligned} X_i &= \int_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) (0,8896 lum(\lambda) + 1,6532 rg(\lambda) - 0,3648 by(\lambda)) d\lambda \approx \\ &\approx 0,8896 \sum_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) lum(\lambda) + 1,6532 \sum_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) rg(\lambda) - \\ &- 0,3648 \sum_{390}^{830} by(\lambda) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$Y_i = \int_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) lum(\lambda) \approx \sum_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) lum(\lambda) \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} Z_i &= \int_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) (1,1948 lum(\lambda) - 1,9348 by(\lambda)) d\lambda \approx \\ &\approx 1,1948 \sum_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) lum(\lambda) - 1,9348 \sum_{390}^{830} I_{D65}(\lambda) R_i(\lambda) by(\lambda) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Katram D15 testa kauliņam atbilstošās integrālsomas X_i , Y_i , Z_i tika transformētas uz CIELab krāsu telpas L_i , a_i , b_i parametriem. Vienādojumos 3.9–3.11 ar X_N , Y_N un Z_N apzīmētas gaismas avotam D6500 atbilstošās integrālsomas. Stimulu krāsu koordināšu transformācija no CIExy uz CIELab krāsu telpu tika veikta, lai noskaidrotu krāsu atšķirību vērtības ΔE starp D15 testa stimuliem krāsu redzes deficītu gadījumos (skatīt vienādojumus no 3.9 līdz 3.11).

$$L_i = 116 \sqrt[3]{\frac{Y_i}{Y_N}} - 16 \quad (3.9)$$

$$a_i = 500 * \left(\sqrt[3]{\frac{X_i}{X_N}} - \sqrt[3]{\frac{Y_i}{Y_N}} \right) \quad (3.10)$$

$$b_i = 200 * \left(\sqrt[3]{\frac{Y_i}{Y_N}} - \sqrt[3]{\frac{Z_i}{Z_N}} \right) \quad (3.11)$$

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 vienādojumu 3.12).

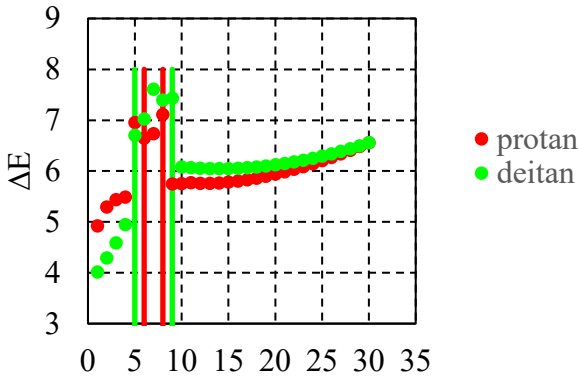
$$\Delta E = \sqrt{(L_{pēdējais} - L_j)^2 + (a_{pēdējais} - a_j)^2 + (b_{pēdējais} - b_j)^2} \quad (3.12)$$

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.

3.2. Rezultāti

Pieņem, ka sarkani-zaļā krāsu redzes deficīta izteiktība ir atkarīga no spektrālās diferences starp L un M vāļišu fotoreceptoru absorbcijas maksimumiem, t.i., samazinoties spektrālajai diferencei starp L un M vāļišu fotopigmentiem palielinās krāsu redzes deficīta izteiktība. Teorētiskie aprēķini apstiprina, ka samazinot spektrālo diferenci starp L un M vāļišu fotopigmentu absorbcijas maksimumiem no 30 līdz 12 nm protanomālījas un no 30 līdz 10 nm deiteranomālījas gadījumos nenovēro kļūdas D15 testa kauliņu sakārtošanas secībām. Iepriekš minētajos gadījumos, samazinoties spektrālajai diferencei starp L un M vāļišu 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 vāļišu fotopigmentiem no 8 līdz 5 nm protanomālījas gadījumos un no 9 līdz 5 nm deiteranomālījas gadījumā tālāku vidējo krāsu atšķirību vērtību samazināšanos nekonstatē (skatīt att. 3.2). Izvērtējot aprēķinātas krāsu kauliņu sakārtošanas secības protanomālījas gadījumos konstatētas tādas kļūdas kā P-15, 1-14, 10-6

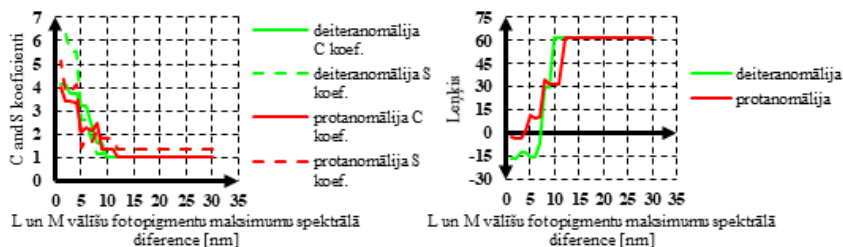
un deiteranomālijas gadījumos konstatētas tādas kļūdas kā 2-15, 13-4, 6-11, 12-10, 7-3, kas saskaņā ar Evans et al. (2020) ir raksturīgas atbilstošajiem krāsu redzes deficītu gadījumiem. Vāji izteiktu krāsu redzes deficītu gadījumos izveidotais modelis paredz vienu vai divas kļūdas, kas raksturīgas noteiktam 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.



Spektrālā diference starp L un M vāļišu fotopigmentu absorbcijas maksimumiem [nm]

3.2. 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 vāļišu 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 modeļi paredzētās krāsu kauliņu sakārtošanas secības, ir apstiprināts, ka, samazinoties spektrālajai diferencei 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 spektrālajai diferencei starp L un M vāļišu fotopigmentiem krāsu redzes deficīta izteiktība palielinās (skatīt att. 3.3).



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

Pētījumos ir apstiprināts, ka protanomālījas un deiteranomālījas 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 diferences ietekmi starp L un M fotopigmentiem deiteranomālījas un protanomālījas 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 diference 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 diferencei 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 iespējamās vairākas savstarpēji atšķirīgas modifikācijas. Fotopigmentu gaismas absorbcijas spektri ir savstarpēji atšķirīgi, kas daļēji skaidro ievērojamās krāsu uztveres īpatnības cilvēkiem ar anomālo trihromātiju. 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 tiklenē. 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 krāsas L un M vālišu daudzumu attiecības, konstatē paaugstinātu neirālā trokšņa līmeni sarkani-zaļajā krāsu oponentajā kanālā, kā rezultātā novēro samazinātu hromatisko izšķirtspēju (Barbur et al., 2008).

3.3. 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 diferencei starp L un M vālišu 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 trihromātijas gadījumiem, var noskaidrot pieņemot, ka krāsu oponentie kanāli funkcionē ekvivalenti normālās un anomālās trihromātijas gadījumos.

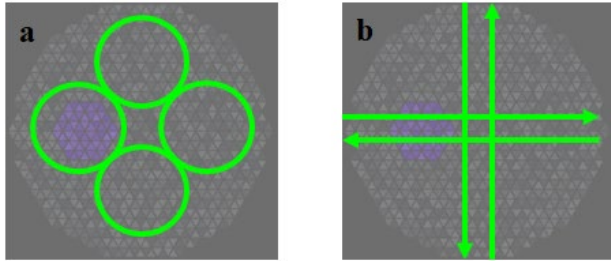
4. DATORIZĒTAIS KRĀSU REDZES TESTS

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.

4.1. Metode

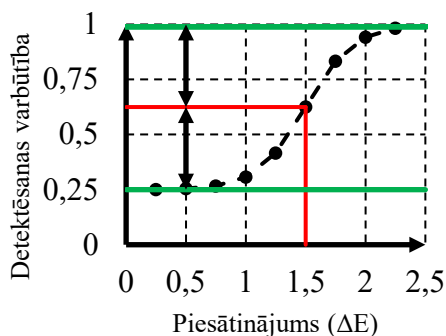
Katra pētījuma dalībnieka krāsu redze tika izvērtēta ar datorizētā krāsu redzes testa dinamisko un statisko stimulu divās atsevišķās mērījumu sesijās (skatīt att. 4.1). Datorizētā testa stimula fons 1 metra attālumā ir $9,1 \times 8,9$ grādi, savukārt krāsainais stimuluss ir 2° grādi redzes lauka. Saskaņā 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 stimuluss tika demonstrēts 1.3 grādus no testa stimula fona centra, savukārt izmeklējot krāsu redzi ar dinamisko testa stimulu versiju krāsainais stimuluss 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 stimuluss 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.

Pētījuma dalībnieku hromatiskā jutība katrā no virzieniem krāsu telpā tika noskaidrota divos posmos, t.i., izmantojot neparimetrisko 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 stimuluss 20



4.1. 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.

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. 4.2.)



4.2. 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.

4.2. Rezultāti

4.2.1. Mērījumu atkārtojamība

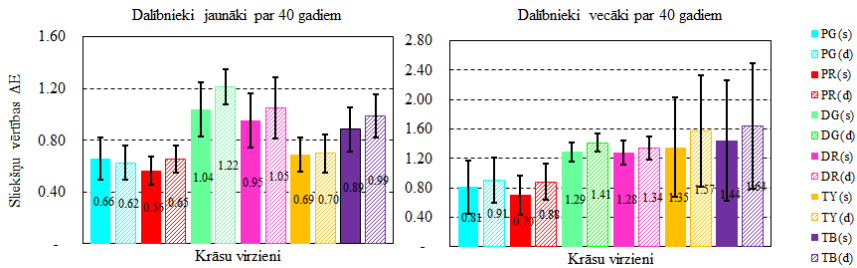
Katrs pētījuma dalībnieks piedalījās divās mērījumu sesijās, kuru ietvaros krāsu redze tika izvērtēta ar datorizētā krāsu redzes testa dinamisko un statisko testa stimulu. Izvērtējot hromatiskās jutības sliekšņu vērtības, kas noskaidrotas ar statisko testa stimulu tika konstatētas statistiski būtiskas 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 tabulu 4.1).

4.1. tabula. Hromatiskās jutības mērījumu atkārtojamības analīze ar statisko un dinamisko testa stimulu.

Krāsu virziens	Statiskais testa stimuls	Dinamiskais testa stimuls
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	$t = -0,78 < t_{0,05; 19} = 2,09$	$t = 0,13 > t_{0,05; 19} = 2,09$

4.2.2. 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. 4.3).



4.3. 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 tabulu 4.2).

4.2. 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 tabulu 4.3).

4.3. tabula. Hromatiskās jutības sliekšņu vērtību statistiskā analīze starp dalībniekiem vecumā līdz un pēc 40 gadiem.

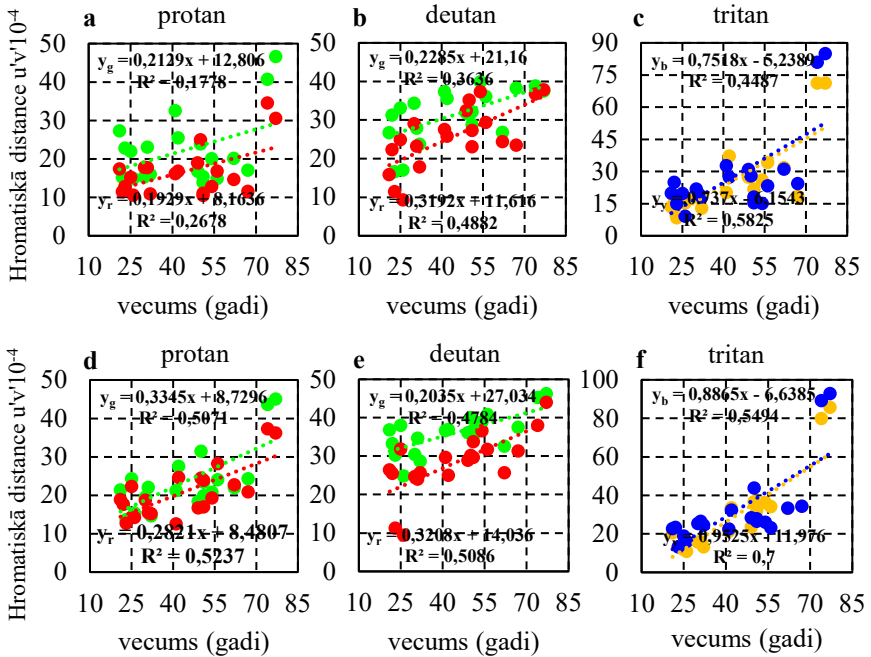
Krāsu virziens	Statiskais testa stimulss	Dinamiskais testa stimulss
PG	$t = 1,22 < t_{0,05; 16} = 2,12$	$t = 3,22 > t_{0,05; 18} = 2,10$
PR	$t = 1,10 < t_{0,05; 16} = 2,12$	$t = 3,34 > t_{0,05; 18} = 2,10$
DG	$t = 3,34 > t_{0,05; 18} = 2,10$	$t = 2,88 > t_{0,05; 17} = 2,11$
DR	$t = 4,05 > t_{0,05; 18}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

4.2.3. 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 dzeltenu 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.



4.4. 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 tabulu 4.4).

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

Krāsu virziens	Statiskais testa stimul	Dinamiskais testa stimul
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 tabulu 4.5).

4.5. 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 tabulu 4.6).

4.6. tabula. Regresijas modeļu slīpuma koeficientu, kas apraksta sakarības starp vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kuras noskaidrotas protan, deitan un tritan virzienos krāsu telpā, statistiskā analīze.

Tritan krāsu virzieni	Protan un deitan krāsu virzieni	Statistiskais 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	$t = 2,05 > t_{0,05; 36} = 2,03$	$t = 2,78 > t_{0,05; 36} = 2,03$

4.3. 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 sniegunā 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 stimul 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.

5. DATORIZĒTAIS KRĀSU REDZES TESTS – CCVT

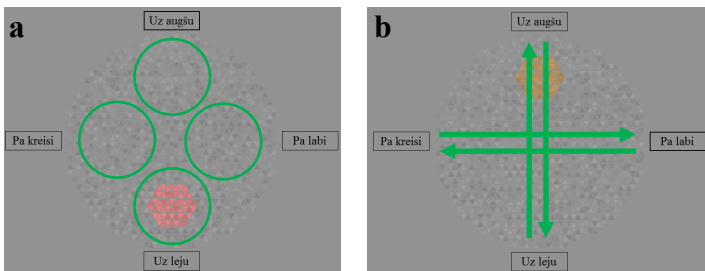
5.1. Pētījuma dalībnieki un eksperiments

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.

5.2. CCVT tests

CCVT testa stimula fons un krāsainais stimulants 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/m². Testa stimulants tika attēlots uz ahromātiska fona ($x = 0,2997$, $y = 0,3130$) ar spožumu 34 cd/m². Testa stimula vidējais spožums ir ekvivalents fona apgaismojumam, t.i., katrā 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 “dzēs”, 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 pults 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 pults testa stimula demonstrācijas laikā un/vai 3 sekunžu laikā pēc testa stimula demonstrācijas beigām (skatīt att. 5.1).

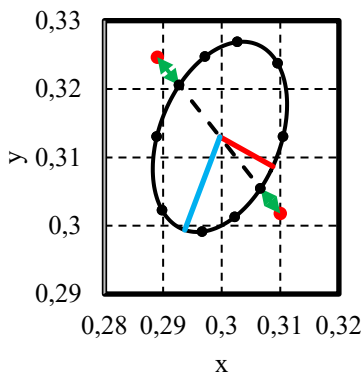


5.1. att. CCVT testa statiskā (a) un dinamiskā (b) stimula dizains. Veicot krāsu redzes izmeklējumu ar statisko testa stimulu, pētījuma dalībnieki tika lūgti norādīt krāsainā stimula pozīciju, savukārt veicot izmeklējumus ar dinamisko testa stimulu, pētījuma dalībnieki tika lūgti norādīt krāsainā stimula 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. 5.2).

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.



5.2. att. 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 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 5.1 un 5.2) tika noskaidroti balstoties uz transformācijas matricu (skatīt vienādojumu 5.3), kas apraksta sakarību starp vāļīšu receptoru LMS ierosinājuma līmeņiem un krāsaino stimulu XYZ vērtībām un augstāk minētajiem pieņēmumiem par krāsu oponento kanālu darbības mehānismiem.

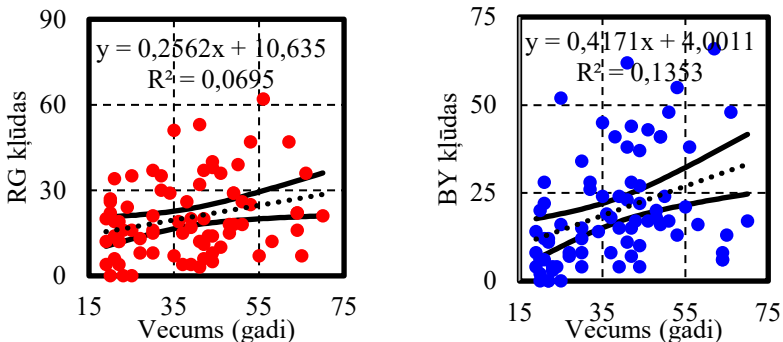
$$y = -0,4787 + 0,4787 \quad (5.1)$$

$$y = 2,2735x - 0,3819 \quad (5.2)$$

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4002 & 0,7076 & -0,0808 \\ -0,2263 & 1,1653 & 0,0457 \\ 0 & 0 & 0,9182 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

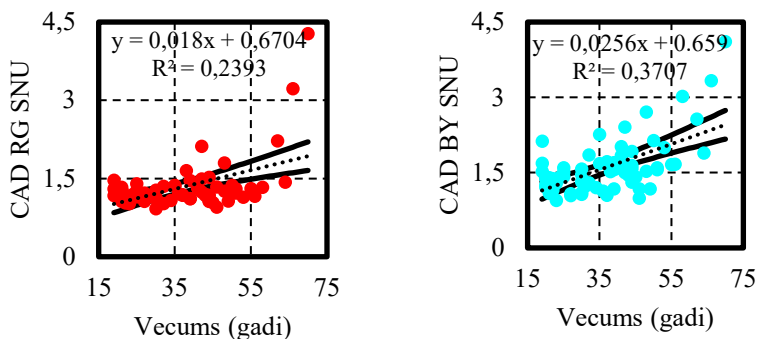
5.3. Hromatiskā izšķirtspēja cilvēkiem bez krāsu redzes

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 trihromātijas 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. 5.3).



5.3. 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. 5.4). 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).

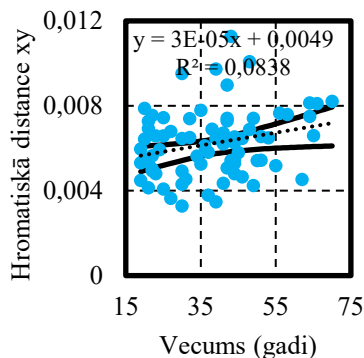
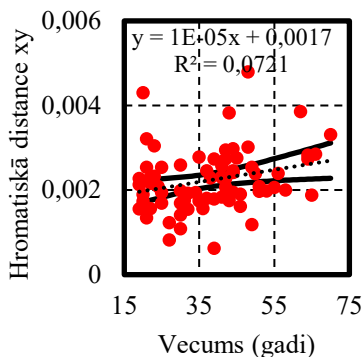


5.4. att. Lineārās regresijas modelis starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar CAD datorizēto krāsu redzes testu.

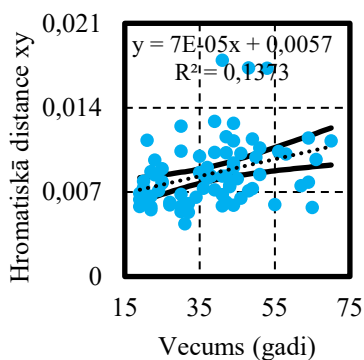
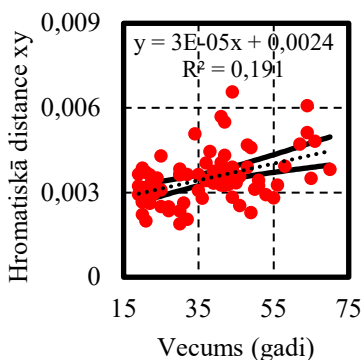
Pētījuma dalībnieku krāsu redze tika izmeklēta ar CCVT testu, izmantojot kā statisko tā dinamisko testa stimula versiju, 10 virzienos krāsu telpā. Balstoties uz hromatiskās jutības vērtībām atbilstošajām krāsu koordinātēm, tika noskaidroti elipses vienādojuma parametri un hromatiskās jutības vērtības 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 tabulu 5.1 un att. 5.5, 5.6).

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

Virziens krāsu telpā	Statistiskais 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	$t = 2,28 > t_{0,05;74} = 1,99$	$t = 3,20 > t_{0,05;74} = 1,99$



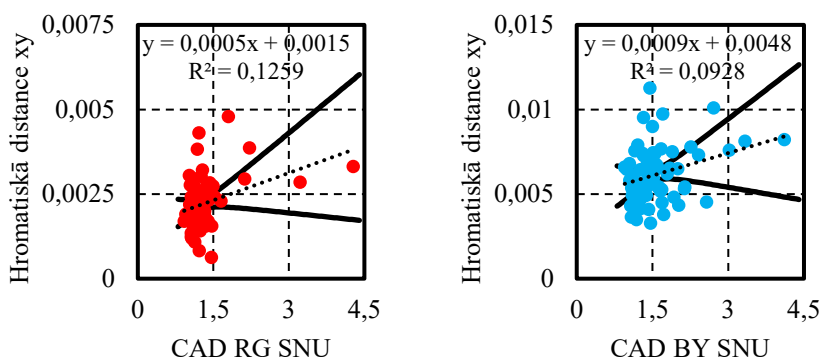
5.5. att. Lineārās regresijas modeļi, kas apraksta sakarības starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatisko izšķirtspēju. Pa kreisi un labi attēlotas sakarības starp vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar statisko testa stimulu.



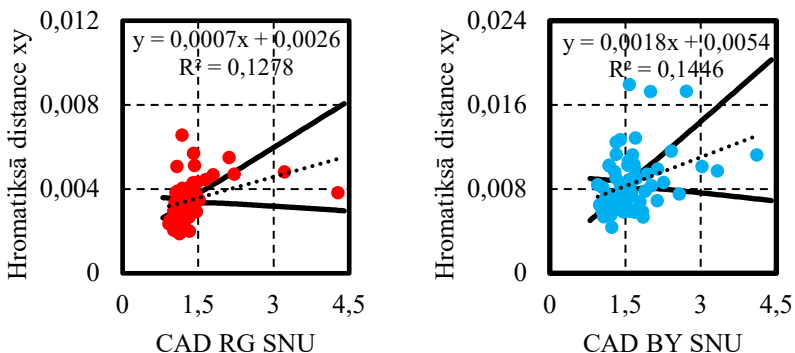
5.6. att. Lineārās regresijas modeļi, kas apraksta sakarības starp pētījuma dalībnieku vecumu un hromatisko izšķirtspēju. Grafikos pa kreisi un labi attēlotas sakarības starp vecumu un hromatiskās jutības sliekšņu vērtībām, kas noskaidrotas ar dinamisko testa stimulu.

Salīdzinot regresijas modeļu slīpuma koeficientus, kas apraksta sakarību starp vecumu un RG sliedžu 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 sliedžu 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 sliedžu 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 sliedžu vērtībām RG un BY, kas noskaidrotas ar dinamisko testa stimulu, arī netika konstatētas ($t = 1,76 < t_{0,05;148} = 1,98$).

Izvērtējot sakarības starp RG un BY sliedžu 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 ($t = 2,68 > t_{0,05;70} = 1,99$) sliedžu 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 sliedžu vērtībām, kas noskaidrotas ar CAD un CCVT testa dinamiskā stimula versiju (skatīt att. 5.7, 5.8). 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.



5.7. att. Grafikos pa kreisi un labi attēlotas sakarības starp RG un BY sliedžu vērtībām, kas noskaidrotas ar CAD un CCVT testa statiskā stimula versiju.



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

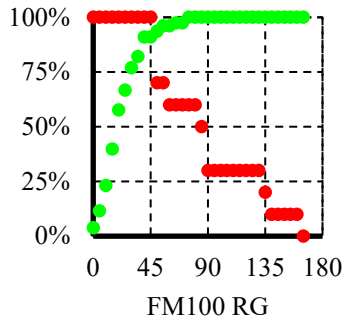
Kā otrs snieguma atšķirību ietekmējošs faktors ir krāsu redzes izmeklējumā norise. Lai ierobežotu mērījumu sesijas laiku ar CCVT testu, pētījuma dalībnieki tika rosināti iesniegt atbildi 3 sekunžu laikā pēc stimula parādīšanās brīža testa statistiskās modifikācijas gadījumā un 3 sekunžu laikā pēc stimula demonstrācijas beigām testa dinamiskās modifikācijas gadījumā, turpretī CAD testā atbildes iesniegšanas laiks nav ierobežots. Minētie ierosinājumi CCVT testa gadījumā var potenciāli palielināt nejauso kļūdu skaitu.

5.4. 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 deiteranomālīja un 3 protanomālīja. 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

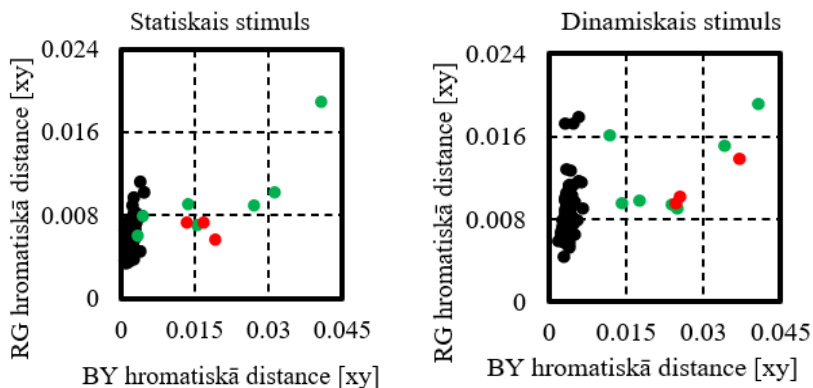
redzes deficītus, izvēloties $RG \geq 45$, FM100 testa jutība un specifitāte sasniedz 100% un 96% (skatīt att. 5.9).



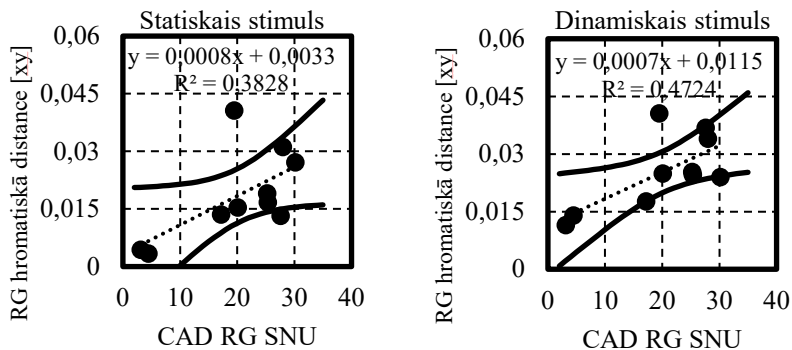
5.9. att. FM100 testa jutība (skatīt sarkanos punktus) un specifitāte (skatīt zaļos punktus) atkarībā no kritērija vērtības, t.i., FM100 testa RG kļūdu vērtības.

Izvērtējot pētījuma dalībnieku sniegumu, kas uzrādīts ar CCVT testu noskaidrots, ka CCVT testa statiskās 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 sliekšņu vērtībai atbilstošā hromatiskā distancē 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 (skatīt att. 5.10).

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. 5.11).



5.10. 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 trihromātijas gadījumi attēloti ar melniem punktiem. CCVT testa statiskajai versijai konstatēta jutība un specifitāte 100% un 82%, savukārt dinamiskajai versijai jutība un specifitāte sasniedz 100%.



5.11. 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.

5.5. 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 trihromātijas gadījumus salīdzinājumā ar CCVT testa statiskā stimula versiju.
3. CCVT datorizētais krāsu redzes tests nodrošina iespēju identificēt iedzimtus sarkani-zaļos 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.

SECINĀJUMI UN IESPĒJAMIE PIELIETOJUMI

Pētījuma rezultāti ierosina, ka sniegumu D15 krāsu sakārtošanas testā cilvēkiem ar krāsu redzes raksturu, kas atbilst sarkani-zaļās anomālās trihromātijas 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 fotoreceptoru fotopigmentiem. 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 iespējamas krasas 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 sliekšņu 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. Mīnētais 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, t.i., 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 izmantojot 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

LITERATŪRA

- 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.
- 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.
- 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.
- Birch, J. (1997). Efficiency of the Ishihara test for identifying red-green colour deficiency. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 17(5), 403–408.
- Birch, J. (2010). Identification of red-green colour deficiency: sensitivity of the Ishihara and American Optical Company (Hard, Rand and Rittler) pseudo-isochromatic plates to identify slight anomalous trichromatism. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 30(5), 667–671.
- Boehm, A. E., Bosten, J., MacLeod, D. I. A. (2021) “Color discrimination in anomalous trichromacy: experiment and theory,” *Vis. Res.* 188, 85–95.
- 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.
- 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.
- Curcio, C. A., & Drucker, D. N. (1993). Retinal ganglion cells in Alzheimer's disease and aging. *Annals of neurology*, 33(3), 248–257.

- 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.
- 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).
- Deeb, S. S. (2005). The molecular basis of variation in human color vision. *Clinical genetics*, 67(5), 369–377.
- 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.
- 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.
- 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.
- Hiltunen, J. “Munsell colors matt (Spectrofotometer measured),” <https://sites.uef.fi/spectral/munsell-colors-matt-spectrofotometermeasured>.
- 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
- 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.

- Kilbride, P. E., Hutman, L. P., Fishman, M., & Read, J. S. (1986). Foveal cone pigment density difference in the aging human eye. *Vision research*, 26(2), 321–325.
- 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., 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.
- Lee, D., Honson, M. (2003). Chromatic variation of Ishihara diagnostic plates. *Color Research & Application*, 28, 267 – 276
- 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
- Mollon, J. D. (1989). A computer-controlled colour vision test that combines the principles of Chibret and of Stilling.
- 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.
- 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., & Neitz, J. (2014). Curing color blindness—mice and nonhuman primates. *Cold Spring Harbor perspectives in medicine*, 4(11)
- 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/>.
- 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.
- 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
- 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.
- 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.
- 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.
- 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,” *Vis. Res.* 40, 1711–1737.
- 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
- Weale R. A. (1988). Age and the transmittance of the human crystalline lens. *The Journal of physiology*, 395, 577–587.
- 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.
- Wuerger S. (2013). Colour constancy across the life span: evidence for compensatory mechanisms. *PloS one*, 8(5).
- Xu, J., Pokorny, J., & Smith, V. C. (1997). Optical density of the human lens. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 14(5), 953–960.
- 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

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, uzmundrinājumiem 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. 8.2.2.0/20/1/006, kas deva ierosmi pabeigt doktorantūras studijas. Liels paldies vecākiem par atbalstu, sapratni un pacietību.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē