

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Andrius
PETRULIS

Daugiaspalvio kietakūnio apšvietimo spalvų atgavos inžinerija ir psichofizikinis vertinimas

DAKTARO DISERTACIJA

Technologijos mokslai,
medžiagų inžinerija 08T

VILNIUS 2018

Disertacija rengta 2013– 2018 metais Vilniaus universitete.

Mokslinius tyrimus iš dalies rėmė Lietuvos Mokslo Taryba.

Mokslinis vadovas:

prof. habil. dr. Artūras Žukauskas [Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija [08T].

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Andrius
PETRULIS

Colour rendition engineering and psychophysical assessment of multicolour solid-state lighting

DOCTORAL DISSERTATION

Technological sciences,
Materials engineering [08T]

VILNIUS 2018

This dissertation was written between 2013 and 2018 at Vilnius university.

The research was partially supported by Research Council of Lithuania.

Academic supervisor:

Prof. habil. dr. Artūras, Žukauskas (Vilnius university, technological sciences, materials engineering – 08T).

TURINYS

ĮVADAS.....	7
1. Daugiaspalvio kietakūnio apšvietimo psichofizikinis vertinimas	11
1. 1. Literatūros apžvalga	11
1. 1. 1. Spalvinės temperatūros vertinimo psichofizikiniai tyrimai	11
1. 1. 2. Apšvietimo spalvų atgavos metrikos	14
1. 1. 3. Apšvietimo spalvinės kokybės įvertinimo testai	17
1. 2. Psichofizikiniai eksperimentai ir naudota įranga	19
1. 3. Apšvietimo susietosios spalvinės temperatūros derinimo ir Farnsworth-Munsell 100 hue testo rezultatai.....	29
1. 4. Pirmojo skyriaus išvados.....	38
2. Metamerinių šviesos šaltinių tyrimas	39
2. 1. Literatūros apžvalga	39
2. 2. Metamerinių šviesos šaltinių spalvio sulyginimo eksperimentas ir naudota įranga.....	40
2. 3. Spalvių sulyginimo eksperimento rezultatai	44
2. 4. Antrojo skyriaus išvados	48
3. Daugiaspalvio šviesos šaltinio spalvų atgavos inžinerija į žmogų orientuotam apšvietimui.....	49
3. 1. Literatūros apžvalga	49
3. 2. Praktinio daugiaspalvio šviestukų telkinio optimizavimas	52
3. 3. Trečiojo skyriaus išvados	66
4. Šviestuvai su 10 spalvinių kanalų senstančių pigmentų neinvaziniam spalvų atstatymui.....	67
4. 1. Literatūros apžvalga	67
4. 2. Pigmentai ir jų sendinimas	68
4. 3. Pigmentų spalvinio atstatymo modeliavimas	71
4. 4. Universalus daugiaspalvis kietakūnis šaltinis	76
4. 5. Ketvirtojo skyriaus išvados	84
IŠVADOS.....	85
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	86
PADĖKA.....	93
PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS	94

Tekste naudojamų sutrumpinimų sąrašas

B, C, D, G, N, pcA, pcL, O, R, W, W _H ir W _L	šviestukų spinduliuotės spalvos atitinkamai mėlyna, žydra, tamsiai raudona, žalia, tamsiai mėlyna, konversijos fosfore gintarinė (angl. <i>Phosphor converted amber</i>), konversijos fosfore gelsvai žalsva (angl. <i>Phosphor converted lime</i>), oranžinė, raudona, balta, aukštos spalvinės temperatūros ir žemos spalvinės temperatūros balta.
CCT	Susietoji spalvinė temperatūra (angl. <i>Correlated colour temperature</i>)
CDI	Spalvų blukinimo rodiklis (angl. <i>Colour dulling index</i>)
CFI	Spalvų tikslumo rodiklis (angl. <i>Colour fidelity index</i>)
CIE	Tarptautinė Apšvietimo Komisija (pranc. <i>Commission Internationale de l'Eclairage</i>)
CMF	spalvų atitikties funkcijos (angl. <i>Colour matching functions</i>)
CQS	Spalvų kokybės skalė (angl. <i>Colour quality scale</i>)
CRI	Spalvų atgavos rodiklis (angl. <i>Colour rendition index</i>)
CSI	Spalvų sodrinimo rodiklis (angl. <i>Colour saturation index</i>)
FM100	Farnsvorto-Munselio 100 spalvių testas (angl. <i>Farnsworth-Munsell 100 Hue test</i>)
GAI	Gamos ploto rodiklis (angl. <i>Gamut area index</i>)
HDI	Spalvų iškraipymo rodiklis (angl. <i>Hue distortion index</i>)
IR	Infraraudonoji elektromagnetinių bangų spektro dalis
LDI	Šviesio iškraipymo rodiklis (angl. <i>Lightness distortion index</i>)
LED	Šviestukas – šviesos diodas (angl. <i>Light-emitting diode</i>)
LER	Šviesos veiksmingumas (angl. <i>Luminous efficacy of radiation</i>)
MCPCB	Metalinės šerdies spausdintinė montažo plokštė (angl. <i>Metal-core printed circuit board</i>)
PWM	Impulso pločio moduliacija (angl. <i>Pulse width modulation</i>)
R _f	Spalvų tikslumo balas (angl. <i>Colour fidelity score</i>)
R _g	Spalvų gamos balas (angl. <i>Colour gamut score</i>)
RpcAGB	Raudonas, konversijos fosfore gintarinis, žalias ir mėlynas
rmse	Vidutinio kvadratinio nuokrypio paklaida (angl. <i>Root-mean-square error</i>)
SKSK	Spalvinės kokybės svertinis koeficientas
SPD	Spektrinės galios skirstinys (angl. <i>Spectral power distribution</i>)
SSL	Kietakūnis apšvietimas (angl. <i>Solid-state lighting</i>)
TES	Farnsworth-Munsell 100 spalvių testo rezultatas (angl. <i>Total error score</i>)
UV	Ultravioletinė elektromagnetinių bangų spektro dalis

ĮVADAS

1994 metais Shuji Nakamurai pademonstravus aukšto ryškumo mėlyną šviesos diodą, prasidėjo apšvietimo technologijos perversmas. Šis išradimas neliko nepastabėtas ir 2014 metais Nobelio premija fizikos srityje skirta trimis išradėjams (Isamu Akasaki, Hiroshi Amano ir Shuji Nakamura), kurių darbas leido sukurti baltos šviesos kietakūnį šaltinį. Inovatyvus kietakūnis apšvietimas išnaudojo technologinį šviesos diodų – šviestukų lankstumą ir įgalino energiškausiai taupių ir optimalių sistemų kūrimą.

Pasinaudojus pagrindinėmis šviestukų keturnarėmis AlGaInAs, AlGaInP ir AlInGaN medžiagomis bei šviesos keitikliais – fosforais, buvo pademonstruota eilė spektrinės galios skirstinių, kuriuos maišant galima pasiekti norimus apšvietimo efektus su taip vadinamais metameriniais šaltiniais, kurių spalva tyrimo dalyviams idealiu atveju yra vienoda. Mėlynos ir konversijos fosfore geltonos komponenčių spektrinis galios skirstinys buvo panaudotas pirminiame kietakūniame baltos šviesos šaltinyje, kuris dalinai išstūmė tradicinius apšvietimo sprendimus, paremtus kaitinamosiomis ar fluorescencinėmis lempomis. Raudonos, žalios ir mėlynos spalvinių komponenčių apšvietimas padėjo pamatus pažangiam apšvietimo spalvinės kokybės vertinimui [1], kuomet spalvų atgavos rodiklis (CRI) pakeistas keliais spalvų atkūrimui apibūdinti sukurtais rodikliais [2, 3]. Detalus apšvietimo spalvinės kokybės įvertinimas leido daugiaspalvius šaltinius pritaikyti meno kūrinių apšvietimui su aukštais techniniais ir spalvinės kokybės reikalavimais, o XXI a. pradžioje susiejus žmogaus biologinį laikrodį – cirkadinę sistemą su akyje esančiu nevizualiniu receptoriu [4], imta kalbėti apie į žmogų orientuotą apšvietimą (angl. *Human Centric Lighting*).

Šviesos šaltinius aprašantis šviesinis intensyvumas ($\text{lm/sr} - \text{cd}$) yra vienintelis SI sistemos pagrindinis fizikinis dydis, kuris tiesiogiai siejamas su žmogaus akies jautrio funkcija. Todėl pats apšvietimo vertinimas negali būti objektyvus visais atvejais dėl skirtingų žmonių biologinių, fizinių ir psichinių savybių. Čia kyla poreikis apšvietimą vertinti pagal subjektyvius pasirinkimus konkrečiu atveju. Taip gimė ir Kruithofo hipotezė [5], kad šviesos susietosios spalvinės temperatūros vertinimas ir patrauklumas priklauso nuo apšvietos, o pažangus spalvų perteikimo modelis CIECAM02 [6] leido tiksliau aprašyti perteikiamas spalvas.

Nepaisant šviestukų įvairovės, nišinių kietakūnio apšvietimo taikymo sričių bei žmonių subjektyvaus vertinimo, dinaminės kietakūnio apšvietimo sistemos nėra visapusiškai iširtos žemos apšvietos sąlygomis bei atsižvelgiant į spalvinės kokybės valdymą.

Šiame darbe detaliau nagrinėjamas psichofizikinis kietakūnio apšvietimo vertinimas ir praktinės bei dinaminės LED sistemos. Suformuluotas darbo **tikslas** – įvertinti dinaminių kietakūnio apšvietimo sistemų spalvinės kokybės parametrus bei pagrįsti juos psichofizikiniais eksperimentais. Šiam tikslui pasiekti buvo suformuluoti šie **darbo uždaviniai**:

- 1) Pademonstruoti lauko apšvietimui skirtą kietakūnio apšvietimo sistemą su valdoma susietąją spalvine temperatūra ir cirkadiniu poveikiu bei atlikti subjektyviai pasirenkamo maloniausio apšvietimo vertinimo tyrimus.
- 2) Įvertinti apšvietimo spalvinės kokybės valdymo sukeltus pokyčius atliekant spalvų rikiavimo testą žemos apšvietos sąlygomis.
- 3) Pademonstruoti metamerinių šviesos šaltinių spalvų suluginimo metodą.
- 4) Sumodeliuoti į žmogų orientuotą praktinę apšvietimo sistemą su minimaliu spalvinių komponentų skaičiumi.
- 5) Atlikti meno kūrinių restauracijai naudojamų pigmentų fotocheminio sendinimo eksperimentą bei pademonstruoti spalvų atstatymo galimybes teoriškai ir su praktine sistema.

Darbo naujumas

- Atliktas Kruithof'o hipotezės tyrimas skirtingose lauko aplinkose su keturspalve dinamine apšvietimo sistema žemos apšvietos sąlygomis ir įvertintas maloniausio apšvietimo intervalas.
- Pademonstruotas valdomos apšvietimo spalvinės kokybės lemiamas spalvų rikiavimo tikslumas žemos apšvietos sąlygomis.
- Pasiūlytas metodas daliniam metamerinių spektrinės galios skirstinių, sudarytų iš raudonos, gintarinės, žalios ir mėlynos spektrinių komponentų, spalvų lyginimui.
- Pademonstruotas praktinės dinaminės penkiaspalvės kietakūnio apšvietimo sistemos taikymas į žmogų orientuotam apšvietimui su valdoma spalvine kokybe, cirkadiniu poveikiu, susietąja spalvine temperatūra ir pirmenybine spalvų perteikimo kokybe.

- Atliktas meno kūrinių restauracijai naudojamų realių pigmentų sendinimo eksperimentas, jų spalvio atstatymo modeliavimas bei pademonstruotas 10 spalvinių kanalų dinaminis šviestuvus.

Ginamieji teiginiai

- 1) Lauko sąlygomis esant 5 ir 50 lx apšvietomis su 1900 K adaptacine spalvine temperatūra subjektyviai maloniausia natūralaus apšvietimo spalvinė temperatūra pasirenkama atitinkamai 3000 ± 200 K ir 3500 ± 250 K.
- 2) Dalinė 3000 K metamerinių šviesos šaltinių grindžiamų RpcAGN telkiniu spalvinė korekcija galima atliekant jų spalvio derinimą izotemperatūrine tiese.
- 3) Penkiaspalvė prekinių šviestukų RGB+W_L+W_H sistema yra tinkama į žmogų orientuotam apšvietimui su galimybe keisti susietą spalvinę temperatūrą, spalvinę kokybę, cirkadinių poveikį bei atkurti pirmenybinės spalvinės kokybės apšvietimą.
- 4) Spalviškai degradavusių prekinių pigmentų aibės spalvų atstatymui kietakūnio apšvietimo technologija gali būti taikoma esant erdviniam spektrinės galios skirstinių valdymui.

Disertacijos planas

Disertacija yra sudaryta iš keturių skyrių, suskirstytų į smulkesnius poskyrius. Kiekvieno skyriaus išvados pateikiamos atitinkamo skyriaus gale. Apibendrintos disertacijos išvados yra disertacijos pabaigoje prieš cituojamos literatūros sąrašą. Visas naudotos literatūros sąrašas pateikiamas prieš publikacijų, susijusių su disertacija, sąrašą. Su disertacija susijusios cituojamos autoriaus publikacijos pažymėtos su priešdėliu „P“, o konferencijų pranešimai su priešdėliu „C“.

Pirmame skyriuje plačiau aprašyti psichofizikiniai eksperimentai kietakūnio apšvietimo vertinimui ir palyginimui esant žemai apšvietai (3,3 lx – 300 lx). Atlikti trys eksperimentai: pirmojo metu ieškoma maloniausia susietoji spalvinė temperatūra su aukštos atgavos kietakūnio apšvietimu lauko sąlygomis ir tikrinama Kruithofo hipotezė. Antrasis eksperimentas papildoma pirmąjį tiriant pradinės adaptacinės spalvinės temperatūros daromą įtaką pasirenkamai maloniausiai spalvinei temperatūrai. Trečiasis eksperimentas susietas su spalvų rikiavimo ir skyrimo įvertinimu žemos apšvietos sąlygomis

atliekant Farnsworth-Munsell 100 spalvių testą keičiant apšvietimo spalvinę kokybę ir apšvietos lygį.

Antrame skyriuje aprašoma metamerinių šviesos šaltinių spalvos nesutapimo problematika ir atliekami du eksperimentai, kurių metu vertinami keturspalvės RpcGN sistemos metamerų spalvos skirtumai 10 laipsnių stebėjimo laukui. Pirmuoju eksperimentu atliktas spalvos koregavimas išilgai izotemperatūrinės tiesės, kertančios Planko lanką. Antruoju eksperimentu pademonstruotas tyrimo dalyvių suderintų dviejų šaltinių su CCT ir nuokrypio nuo baltos šviesos valdymu spalvio koordinacių skirtumas.

Trečiame skyriuje aprašomas daugiaspalvio šviestukų telkinio modeliavimas į žmogų orientuotam apšvietimui. Įvertinta apšvietimo spalvinė kokybė, cirkadinis poveikis, pirmenybinio apšvietimo ribos, kuomet baltas šviestukas atitinka spalvų perteikimą su sumažintu sodriu, o raudonos, žalios ir mėlynos spalvos šviestukų telkinys atitinka spalvų perteikimą su padidintu sodriu. Pademonstruota penkiaspalvė apšvietimo sistema, sudaryta iš raudono, žalio, mėlyno ir dviejų skirtingų CCT baltų šviestukų.

Ketvirtame skyriuje pateikiami fotochemiškai su UV apšvietimu sendintų pigmentų spalvio kitimo rezultatai ir jų atstatymas naudojant matematinį modelį su praktiniais bei teoriniais LED spektrais. Aptariamos kietakūnio apšvietimo ribotos galimybės atstatyti konkrečią spalvinių bandinių aibę. Praktiniam meno kūrinių apšvietimui ir neinvaziniam spalvų atstatymui pademonstruotas prototipinis 10 spalvinių kanalų šviestuvai, kuris leidžia pademonstruoti doktoranto su grupe sukurtas apšvietimo technologijas.

Autoriaus indėlis

Visi disertacijoje aprašyti šviestuvai yra pagaminti bei jų valdymo programinė įranga „Windows“ platformoje sukurta autoriaus. Doktorantas atliko psichofizikinius eksperimentus, jų duomenų rinkimą bei analizę, į žmogų orientuoto apšvietimo modeliavimą, pigmentų sendinimo eksperimentą ir duomenų rinkimą. Autorius surinko ir pateikė psichofizikinių tyrimų duomenis bei parengė šviestuvo valdymo programą magistrantūros studijų metu P1 publikacijai. Autoriaus atlikti šviesos taršos ir akies senėjimo skaičiavimai kartu su psichofizikinių tyrimų rezultatais pateikti P2 publikacijoje. P3-P5 publikacijos rengtos bendraautorių, tačiau autorius prisidėjo eksperimentinių duomenų rinkimu ir atvaizdavimu. P6-P8 publikacijų rankraščius parengė ir aprašytus tyrimus atliko disertacijos autorius.

1. Daugiaspalvio kietakūnio apšvietimo psichofizikinis vertinimas

Susietosios spalvinės temperatūros parinkimas žemos apšvietos sąlygomis yra aktualus tiek lauko, tiek vidaus apšvietimui. Remiantis Kruithofo hipoteze [5], subjektyviai maloniausios susietosios spalvinės temperatūros vertės priklauso nuo apšvietos, todėl kiekvienu apšvietos atveju galima rasti spalvinės temperatūros intervalus. Žemos apšvietos sąlygomis prastėja regos spalvų skyrimo geba, todėl galimas žemesnės spalvinės kokybės apšvietimo naudojimas, kuris nėra detaliam ištyrimui. Šiame skyriuje aptariamas psichofizikinis šviesos šaltinių vertinimas renkantis maloniausią susietąją spalvinę temperatūrą žemos apšvietos lauko sąlygomis, adaptacinės susietosios spalvinės temperatūros daroma įtaka pasirenkamai maloniausiai spalvinei temperatūrai bei spalvų diskriminacija atliekant Farnsworth-Munsell 100 spalvių testą. Visi eksperimentai atlikti su keturspalve kietakūnio apšvietimo sistema, sudaryta iš raudonos, konversijos fosfore gintarinės, žalios ir tamsios mėlynos spalvos šviestukų, kuri leidžia derinti tiek susietąją spalvinę temperatūrą, tiek apšvietimo spalvinę kokybę. Rezultatai pateikti šiose publikacijose: P2, P7, P8, C1, C3, C4, C7, C8, C9, C10.

1. 1. Literatūros apžvalga

1. 1. 1. Spalvinės temperatūros vertinimo psichofizikiniai tyrimai

Šviesos šaltinio spalvinė temperatūra yra tokia juodojo kūno spinduliuotės temperatūra, kai juodojo kūno spinduliuojama spalva panaši į šviesos šaltinio spalvą. Dauguma šviesos šaltinių šviesą generuoja ne terminiu būdu, todėl jų spektras neatitinka juodojo kūno spinduliuotės spektro. Tokių šaltinių, kaip LED ar liuminescencinės lempos, spalvinės temperatūros atitikmuo juodojo kūno spinduliuotei vadinamas susietąja spalvine temperatūra (CCT). Žmogaus stebima CCT suvokiama kaip balta šviesa priklausomai nuo adaptacijos. Žemos spalvinės temperatūros šaltiniai ($CCT < 3000\text{ K}$) yra suvokiami kaip gelsvi, o aukštos ($CCT > 6000\text{ K}$) – kaip melsvi. Todėl svarbu įvertinti suvokiamą baltą šviesą ir idealiu atveju parinkti optimalius parametrus konkrečiai scenai ar objektui apšviesti.

Psichofizika yra tarpdisciplininis mokslas, tiriantis sąveiką tarp objektyviai išmatuojamų fizikinių stimulų savybių bei subjektyvių pojūčių ir suvokimo. Psichofizika sieja kognityvinę ir eksperimentinę psichologiją. Šiame darbe

stimulus apibrėžiamas kaip elektromagnetinė spinduliuotė regimojoje srityje, o subjektyvus pojūtis – regimos šviesos vertinimas.

Šviesos šaltiniai gali būti kokybiškai vertinami pagal 4 metodikas [7]: lyginimo, diskriminavimo, derinimo ir reitingavimo (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Pagrindinės šviesos šaltinių kokybiško vertinimo metodikos [7].

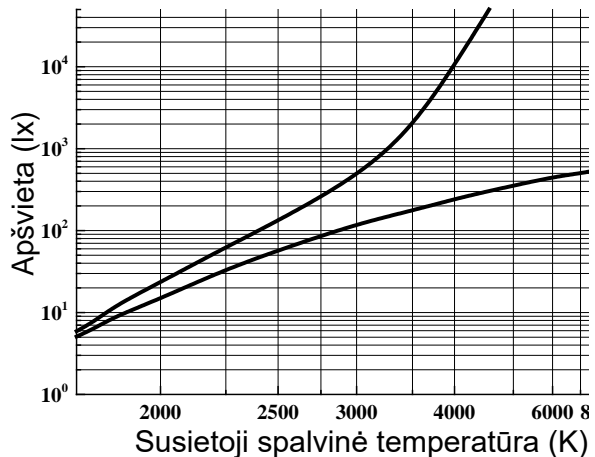
	Absolūtus matavimas be išorinio etaloninio apšvietimo	Santykinis matavimas su išoriniu etaloniniu apšvietimu
Pasyvus: be sąveikos su vaizdu	Reitingavimas	Diskriminavimas
Aktyvus: sąveika su vaizdu	Derinimas	Lyginimas

Apšvietimo derinimas susideda iš vienkartinių tarpinių užduočių, kuomet reikia keisti apšvietimą parametrus konkrečiu atveju. Būtent tokia eksperimentų procedūra ir buvo naudojama šiame skyriuje aprašytuose 2 iš 3 eksperimentuose išnaudojant išmanaus apšvietimo lankstumą ir dinamiškumą. Apšvietimo lyginimo procedūra susideda iš dviejų apšviestų scenų, kurios yra lyginamos tarpusavyje su galimybe keisti testuojamos scenos apšvietimą kitos atžvilgiu. Ši procedūra naudota antrojo skyriaus eksperimente, kuomet lyginti pcAGN ir RGN šaltiniai.

Diskriminavimas susideda iš dviejų scenų, kurios turi fiksuotą apšvietimą ir yra lyginamos tarpusavyje. Ši procedūra naudojama palyginti arba pademonstruoti du skirtingus apšvietimus. Reitingavimas naudojamas įvertinti konkretų apšvietimą demonstruojant tik vieną sceną be jokio etaloninio apšvietimo. Tuomet apšvietimo vertinimas yra reitinguojamas pagal užsibrėžtą skalę. Populiariausias reitingavimo metodas – Likerto skalė (angl. Likert scale) [8]. Šio skyriaus trečias eksperimentas yra artimas reitingavimo procedūrai pagal apšvietimo režimų pristatymus, tačiau esant fiksuotam apšvietimui buvo atliekamas FM100 testas, o ne reitingavimas.

1941 metais olandų profesorius Arie Andries Kruithofas iškėlė idėją, kad žmogaus suvokiama labiausiai patinkanti balta šviesa kinta priklausomai nuo apšvietos lygio (1.1 pav.) [5]. Jis teigė, kad kiekvienai CCT egzistuoja apšvietos ribos, iš kurių išėjus šviesa atrodoys blanki arba per melsva, kas lems ir nenatūralią spalvų atgavą. Remiantis tik kelių tyrimo dalyvių rezultatais, buvo konstatuota, kad didelei apšvietai reikia aukštos spalvinės temperatūros, o žemai – žemos. Tolesni tyrimai vidaus patalpose su didesne nei 100 lx apšvieta parodė, kad maloniausią apšvietimą atitinkančių spalvinės

temperatūros verčių intervalas išplinta didėjant apšvietimui, o tai kokybiškai patvirtino Kruithofo hipotezę [9]. Atlikus tyrimus su fluorescencinėmis lempomis paaiškėjo, kad ofiso apšvietime subjektyviai prioritetas išskiriamas 3500 K ir 4300 K šaltiniams [10]. Vėliau Boyce parodė, kad aukštesnės apšvietos lygiai yra labiau malonūs plačiam CCT intervalui naudojant aukštos spalvinės kokybės apšvietimą [11]. Kitas tyrimas ofisuose papildė Boyce grupės rezultatus tuo, kad didėjant apšvietos lygiui, didėja ir maloniausios CCT intervalas [12]. Vėlesnis eksperimentas apšviečiant kambarius su aukštos spalvinės atgavos (CRI = 82 – 85) fluorescencinėmis lempomis taip pat patvirtino, kad aukštesiose apšvietose egzistuoja platus (2700 K – 6500 K) maloniausios CCT intervalas [13]. Taip pat nustatyta, kad didėjant apšvietimui bendrai didėja subjektyvus pasitenkinimas apšvietimu nepriklausomai nuo CCT [14]. 2004 metais panaudota derinimo procedūra tarp 50 – 2000 lx su temdoma ir valdoma 3000 – 4400 K kaitinamąja lempa parodė, kad maloniausia CCT yra 3700 K [15]. Tos pačios mokslininkų grupės buvo parodyta, kad iš 11 naudotų kaitinamųjų šaltinių, labiausiai pageidaujama buvo 3600 K CCT esant 200 lx apšvietimui [16]. Vertinant meno kūrinių apšvietimą su LED šviesos šaltiniais, nustatyta, kad esant 300 lx maloniausia CCT varijuoja nuo 3000 K iki 6000 K priklausomai nuo apšviečiamos scenos ir tyrimo dalyvių kultūrinės kilmės [17]. Amerikiečių atveju skirstiniai buvo plačiausi, kinų – siauriausi, o europiečių (lietuvių) – tarpiniai. Darbo vietų apšvietime vyrauja subjektyvus CCT vertinimas, kuris priklauso nuo paros laiko ir individo, bet bendrai patenkantis į Kruithofo apibrėžtą plotą [18]. Apžvelgiant lauko apšvietimo CCT vertinimą žemos apšvietos sąlygomis, nėra pakankamai duomenų Kruithofo hipotezei patvirtinti [19]. 2 – 50 lx apšvietimui, kurią rekomenduoja tarptautiniai kelių apšvietimo standartai, Kruithofo CCT vertės

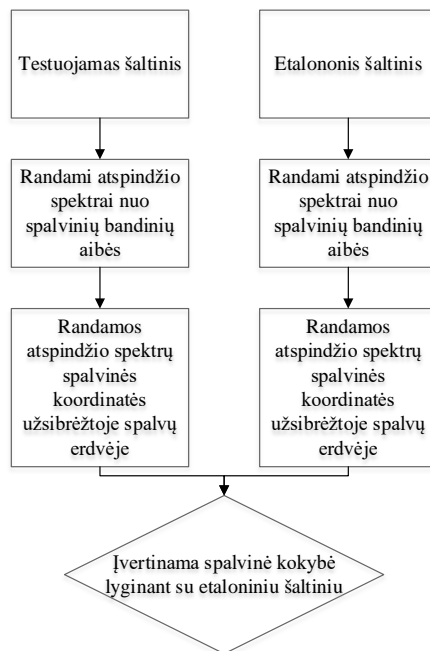


1.1 pav. Originali Kruithofo kreivė. Kreivių ribojamas plotas atitinka maloniausią apšvietimą [adaptuota pagal [5].

siekia 2500 K ir mažiau, todėl aukšto slėgio natrio lempa (~1850 K) tampa racionali pasirinkimu. Tačiau buvo pademonstruota, kad didėjanti apšvieta yra pagrindinis komforto veiksnys parkingų apšvietime [20], o metalų halogenidų lempa su 2800 K CCT yra suvokiama kaip ryškesnė ir didinanti saugumą lyginat su natrio lempa [21]. Pastarasis tyrimas patvirtintas kitos grupės, kuri teigia, kad aukštesnė CCT suvokiama kaip saugesnė ir ryškesnė lauko apšvietimui [22]. 0,5 cd/m² skaisčio sąlygomis atliktas tyrimas su LED (3664 K) ir gyvsidabrio garų lempoms (3260 K) parodė, kad LED reitinguojamas geriau, bet aukštesniems skaisčiams LED su 4000 K ir 4400 K buvo mažiau malonus [23]. Visi ankstesni Kruithofo hipotezės tyrimai negali patvirtinti ar paneigti nubrėžtos kreivės. Kadangi tyrimo dalyvių imtys buvo nekontroliuojamos ir rezultatai pasižymėjo didele sklaida dėl individualizmo. Taip pat šviesos šaltiniai buvo skirtingi ir pasižymėjo skirtinga spalvų atgava bei buvo pritaikyti skirtingoms lauko ar vidaus scenoms. Tobulėjant apšvietimo spalvų atgavos ir CCT valdymui [P1, [24]], galime pritaikyti dinaminį apšvietimą individualiam taikymui [25].

1. 1. 2. Apšvietimo spalvų atgavos metrikos

Šviesos šaltiniai turi būti įvertinti pagal gebėjimą atkurti spalvas. Istoriskais šviesos šaltinio spalvų atgava ar kitaip spalvinė kokybė lyginama su juodojo kūno spinduliuotės (iki 5000 K) arba dienos šviesos kuriamos spinduliuotės (nuo 5000 K) spalvų atgava. Pastarieji šaltiniai laikomi natūraliais ir jų perteikiamos spalvos yra nepakitusios. Visi kiti šviesos šaltiniai yra lyginami su minėtais etalonais. Spalvų atgavos vertinimas susideda iš kelių pagrindinių etapų nepriklausomai nuo sukurto spalvų atgavos rodiklio (1.2 pav.). Pati spalva iš fizikinės pusės gali būti apibūdinama kaip šviesos šaltinio



1.2 pav. Spalvų atgavos įvertinimo etapai.

SPD arba atspindėtas SPD (šviesos šaltinio SPD ir atspindžio spektro sandauga). Remiantis Munsell spalvų sistema [26], spalva apibrėžiama trimis parametrais: šviesiu, sodriu ir tonu. Terminu spalvis apibūdinamas sodris ir tonu. Šviesis atitinka spalvos šviesumą: tamsi spalva tampa juoda, o labai šviesi – balta. Sodris atitinka nuotolį nuo baltos šviesos iki monochrominių atspalvių, todėl sodriausia spalva yra siauro spektrinės galios skirstinio, kaip monochrominio lazerio spinduliuotė. Spalvinis tonas arba spalvis atitinka žmogaus suvokiamą spalvos apibūdinimą (mėlyna, žalia, geltona ir t.t.) pagal monochrominį tos spalvos atitikmenį. Turint šiuos tris spalvos parametrus, galime įvertinti jų pokyčius apšvietus testuojamu šviesos šaltiniu. Pirmasis spalvų atgavos rodiklis (bendrasis spalvų atgavos rodiklis - CRI arba R_a) aprašytas 1974 bei patobulintas 1995 metais [27] yra plačiai naudojamas iki šių dienų, ypač apšvietimo prekių žymėjime. Jis naudoja tik 8 pagrindinius spalvinius bandinius, pagal kurių spalvio pokytį ir vertinama spalvinė kokybė. Didžiausia reikšmė (100) reiškia visiškai tikslų spalvų atkūrimą. Žemesnės vertės nurodo, kad spalvos neatkuriamos tiksliai. Toks vertinimas išsamiai neaprašo šviesos šaltinių ir 2007 metais buvo parodyta, kad šis rodiklis netinka įvertinti LED SPD, nes LED apšvietimas su žemesne CRI verte žmonių gali būti įvertintas geriau nei aukštesnio CRI [1], todėl jo reiktų atsisakyti [28].

Spalvų vertinime naudojama pirmoji 1931 metais aprašyta CIEXYZ spalvų erdvė [29], kurioje visos spalvos apibūdinamos x ir y spalvinėmis koordinatėmis. Ši erdvė nėra tiesinė bei jos spalvinės koordinatės neturi jokio atskaitos taško, todėl 1976 metais įvesta CIELUV erdvė, kurios 6500 K CCT MacAdamo elipsė [30] atitinka apskritimą, o izotemperatūrinės tiesės yra statmenos Planko lankui. MacAdamo elipsė CIEXYZ erdvėje aprašo aibę spalvių, kurie atrodo identiškai. Planko lankas aprašo natūralaus apšvietimo su kintančia CCT kreivę spalvų erdvėje. Izotemperatūrinė tiesė yra tiesė taškų, kertančių Planko lanką, kurie priskiriami tai pačiai CCT, kurią atitinka Planko lanko kertamas taškas. CRI įvertinime yra naudojama CIE 1960 spalvų erdvė (CIEUWV), kuri yra tarpinė tarp CIEXYZ ir CIELUV. Vėliau CIELUV erdvę pakeitė nuolatos tobulinta CIELAB erdvė, kurios centrinis taškas atitinka baltą šviesą. Ji tiksliau atitinka žmogaus regą ir MacAdamo elipsės išlaikomos apskritimais arti erdvės centro. Čia spalvinės koordinatės priklauso ir nuo bendro šviesos kiekio, o pats spalvų modelis panašus į Munsell spalvų sistemą. Naujausia ir tiesiškiausia spalvų erdvė nuo 2002 metų yra CIECAM02 [6], kuri paremta ankstesnėmis CIECAM97 bei CIELAB spalvų erdvėmis. CIECAM02 modelyje galima įtraukti neuronų veiklą smegenų žievės pakaušio srityje vertinant spalvas [31] bei šis modelis yra pats

tiksliausias ir tiesiščiausias sukurtas iki 2018 metų. Tolimesniam darbui bus remtasi CIEXYZ (kaip pirminė erdvė), CIELAB ir CIECAM02 spalvų erdvėmis.

CRI turi 6 papildomus rodiklius, kurie vertinami atskirai. Iš jų R9 atitinka ryškiai raudonos spalvos perteikimą. Pastarasis rodiklis yra esminis vertinant apšvietimo patrauklumą ir sodrinimo galimybes. Tobulinant CRI, pademonstruotas CRI2012 su pritaikyta CIECAM02 erdve, pakeistais spalvinių bandinių spektrais ir įtraukta tikslesne spalvine adaptacija [32]. Taip pat patobulinti ir papildomi rodikliai, kaip R9 2012. CRI pakeitė spalvų kokybės skalė CQS [33], kuri naudoja CIELAB erdvę, tobulesnį chromatinės adaptacijos modelį (CMCCAT2000) bei spalvų sodrio vertinimą. CQS naudoja šiuos rodiklius: CQS Q_f – tikslumo rodiklis, CQS Q_a ir Q_p – pirmenybinio apšvietimo rodikliai, CQS Q_g – gamos ploto rodiklis. Gamos plotui įvertinti palyginimui su CRI, pristatytas gamos ploto rodiklis (GAI) [34]. Tuomet iškelta idėja, kad šviesos šaltinio spalvų atgavai įvertinti neužtenka vieno rodiklio. Šviesos šaltiniai su skirtinga spalvų atgava gali turėti tą pačią CRI vertę [P1], todėl reikia naujų rodiklių. IES TM-30-15 spalvinės kokybės įvertinimo metodas [35] yra pažangiausias disertacijos rengimo metu, kuris aprašo tik du rodiklius: R_f – spalvų tikslumo balas; R_g – spalvų gamos balas. Kuriant šiuos rodiklius [2] atsižvelgta į spalvinių bandinių atspindžio spektrus [36]. Kita doktoranto mokslinio vadovo su kolegomis sukurta spalvų atgavos metodika naudoja Munsell spalvų sistemą CIELAB erdvėje ir statistinį modelį, kuomet spalvių pokyčiai yra lyginami pagal krypties vektorius, kuris peržengia 3 žingsnių MacAdamo elipsę arba $\pm 2\%$ šviesį [3]. Šis metodas leidžia tiksliau įvertinti šviesos šaltinių spalvinę kokybę dėl daugelio rodiklių: CFI – spalvų tikslumo rodiklis, CDI – spalvų su sumažintu sodriu (blukinimo) rodiklis; CSI – spalvų sodrinimo rodiklis; HDI – spalvinio tono iškraipymo rodiklis; LDI – šviesio iškraipymo rodiklis. Spalvų blukinimas čia apibrėžiamas kaip apšviečiamų paviršių spalvų sodrio sumažėjimas, o ne fotocheminis ar biocheminis poveikis. Metrikos dėka pavyko aptikti žmogui patrauklesnio (pirmenybinio) apšvietimo ribas (plačiau 3.1 poskyryje) [P5] ir sukurti elementarų spalvinės kokybės derinimo algoritmą [P1]. Spalvinei kokybei pagal spalvinius tonus įvertinti naudojamos spalvų piktogramos [37], kurios gali būti naudojamos CIELAB arba CIECAM02 spalvų erdvėse. Šios spalvų piktogramos naudojamos darbe įvertinti tiriamų bei kuriamų šviesos šaltinių spalvinę kokybę. Greta spalvinės kokybės rodiklių dažnai pateikiamas ir šviesos veiksmingumas LER:

$$K = 683 \text{lm/W} \times \frac{\int_{380}^{780} V(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda} \quad (1.1)$$

kur $V(\lambda)$ - standartinė santykinė spektrinės šviesos veiksmingumo funkcija dviejų laipsnių fotometriniam stebėtojų, $S(\lambda)$ - šviesos šaltinio SPD. Šviesos veiksmingumas matuojamas liumenais vatui (lm/W) ir priklauso tik nuo spinduliuotės spektro. Jis aktualus vertinant galimas energijos sąnaudas norint pasiekti reikiamą apšvietą.

Visi spalvų atgavos rodikliai kurti esant fotopinei regai ($>10 \text{ cd/m}^2$), bet yra žinoma, kad spalvinė rega priklauso ne tik nuo spalvinės temperatūros, bet ir nuo apšvietos. Pereinant į mezopinę sritį ($0,01 - 10 \text{ cd/m}^2$ [skirtingi šaltiniai nurodo skirtingai]) kartu veikia spalvinės regos kūgeliai ir nespalvinės regos stiebeliai akyje, todėl spalvų skyrimas yra komplikotas. Tokiu atveju galime adaptuoti CRI pagal sumažėjusį spalvų skyrimą mezopinėje srityje [38].

$$CRI_{mes} = 100 - \gamma(L_{mes})(100 - CRI). \quad (1.2)$$

Čia spalvų perskaičiavimo daugiklis $\gamma(L_{mes})$ yra MacAdamo elipsių vidutinio dydžio pokyčio vertė konkretaus skaisčio atveju.

Šiuo metu nėra priimtose visuotinės ir universalios spalvų atgavos metrikos, todėl skirtingų rodiklių naudojimas yra pasirenkamas pagal norimas tyrimų ir taikymų sritis.

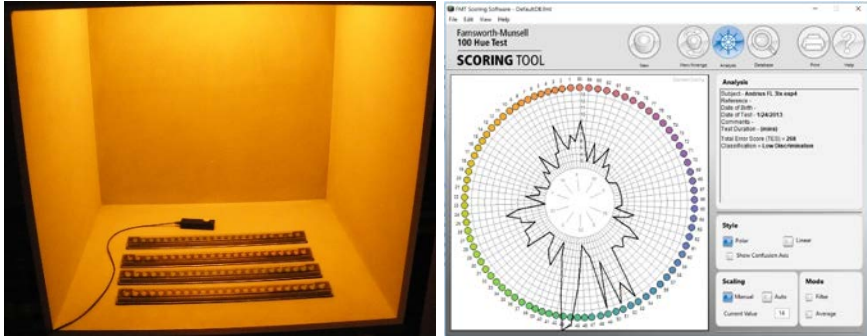
Daugiaspalvio kietakūnio apšvietimui naudojamas spalvinės kokybės valdymo modelis [P1], kuriame tiesiškai derinami dviejų priešingų spalvinių kokybių apšvietimai: spalvas blukinantis ir spalvas sodrinantis. Formulė, kuri aprašo bendrą SPD keičiant SKSK (σ) lygi:

$$S_{TOTAL}(\lambda) = \sigma S_{SAT}(\lambda) + (1 - \sigma) S_{DUL}(\lambda) \quad (1.3)$$

Čia $S_{SAT}(\lambda)$ atitinka SPD su spalvų sodrinimo galimybe, o $S_{DUL}(\lambda)$ - SPD su spalvų blukinimo galimybėmis. SPD sunormuoti pagal šviesinį srautą.

1. 1. 3. Apšvietimo spalvinės kokybės įvertinimo testai

Priešingai nei skaitmeninės-teorinės spalvų atgavos įvertinimo metrikos, empiriškai spalvinė kokybė gali būti įvertinta pasinaudojant spalvų rikiavimo testais. Plačiausiai paplitęs testas – Farnsworth-Munsell 100 spalvių testas (FM100).



1.3 pav. FM100 testas eksperimentinėje apšvietimo vitrinoje (kairėje) ir jo rezultatai (dešinėje).

Šio testo metu naudojamos 4 paletės su 85 spalviniais bandiniais, kuriuos reikia surikiuoti pagal kintantį spalvinį toną. Patalpinus ir surikiavus po vieną visas 4 paletes testuojamo apšvietimo aplinkoje ir į programos vartotojo langą suvedus gautą spalvinių bandinių seką, randamas bendras testo rezultatas - TES (1.3 pav.). FM100 testas kurtas fotopinei regai ir esant etaloninio C šviesmens apšvietimui (6774 K), bet naudojamas ir kitų CCT šviesos šaltinių vertinimui. Remiantis FM100 testo rezultatais yra pasiūlytas spalvų atgavos rodiklis R_d [39]. Šis testas plačiai naudojamas žmonių su spalvinės regos nepakankamumu oftalmologinių ligonių tyrimams.

Kiti spalvų rikiavimo testai, kaip Farnsworth D15 ir, yra paremti FM100 testu. Lanthony sumažinto sodrio D15 testas nuo Farnsworth D15 testo skiriasi tik mažesniu spalvų sodriu, o tai apsunkina testo atlikimą. Lanthony ir Farnsworth D15 testai sudaryti iš etaloninio bandinėlį ir 15 spalvinių bandinėlių, kuriuos reikia sudėlioti spalvinio tono kitimo kryptimi. Šie supaprastinti testai naudojami greitam regos įvertinimui ir FM100 testo rezultatų prognozavimui. Jais taip pat nustatomas spalvinės regos nepakankamumo tipas. Spalvinė rega yra įvertinama ir su Stillingo pseudo-izochromatinėmis arba Ishihara [40] lentelėmis. 1917 metais Tokijo profesorius Shinobu Ishihara karo reikmėms sukūrė spalvų aklumo testą, kuris yra patobulinta vokiečių oftalmologo Jakobo Stillingo testo versija. Šis testas sudarytas iš spalvotų apskritimų su vienodo šviesio skirtingų spalvų taškais jų viduje, kur dalis šių taškų sudaro skaitmenų atvaizdus. Tyrimo dalyvis turi pasakyti koks skaitmuo nupieštas apskritime, tad per trumpą laiko tarpą galima atlikti vairuotojų ar pilotų vairuotojų ar lakūnų spalvinės regos patikrą.

FM100 testo rezultatai parodė, kad RGN (452, 527 ir 644 nm) LED apšvietimas įvertinamas dvigubai prasčiau (TES = ~74) nei halogeninis

apšvietimas (~35) esant 370 lx apšvietai [41]. Galima teigti, kad spalvas sodrinantis ir didesne spalvų gama pasižymintis RGN apšvietimas lemia prastesnes spalvų skyrimo galimybes nei natūralus apšvietimas [39], bet subjektyviai jis yra gerai vertinamas [42]. Kita vertus, spalvinė rega kinta su amžiumi ir parenkant jaunas žmones su vidutiniu 20 metų amžiumi, galime pasiekti geriausias spalvų diskriminacijos rezultatus [43] su aukštos spalvinės kokybės apšvietimu [44]. Tolesniuose eksperimentuose tyrimo dalyviai parinkti pagal savo amžių tikintis geriausių rezultatų ne tik su natūraliu apšvietimu.

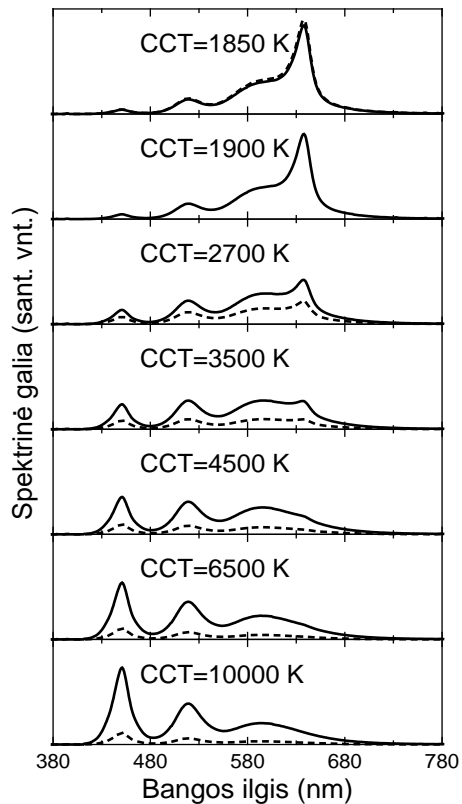
1. 2. Psichofizikiniai eksperimentai ir naudota įranga

Kietakūnio apšvietimo įvertinimui buvo atlikti trys psichofizikiniai eksperimentai. Toliau kiekvienas jų bus aprašytas pagal dalyvius, eksperimentą ir jo eigą bei duomenų apdorojimą.

Pirmasis psichofizikinis eksperimentas atliktas siekiant patikrinti Kruithofo hipotezę žemos apšviestos lauko sąlygomis. Didžioji tyrimo dalyvių dalis buvo atrinkta tarp Vilniaus universiteto darbuotojų ir studentų patogiosios netikimybinės atrankos būdu. Visi tyrimo dalyviai šiame ir kituose eksperimentuose dalyvavo laisva valia. Pirmasis eksperimentas buvo atliekamas trijose vietose. Pagrindiniame Bursų kiemo eksperimente dalyvavo 21 vyras ir 19 moterų, kurių visų amžiaus vidurkis buvo 24 metai (nuo 19 iki 57). Papildomuose eksperimentuose Kairėnų botanikos sode dalyvavo 22 tyrimo dalyviai (13 vyrų ir 9 moterys, kurių bendras amžiaus vidurkis buvo 27 metai) bei šalia Nacionalinės dailės galerijos 24 tyrimo dalyviai (14 vyrų ir 10 moterų, kurių bendras amžiaus vidurkis buvo 28 metai). Pagrindinio eksperimento dalyvių skaičius didesnės dėl prijungtos studentų grupės, kurie atlieka spalvų vertinimo laboratorinius darbus. Toks dalyvių skaičius pasirinktas remiantis kitų mokslininkų grupių imtimis atliekant panašius tyrimus. Visi tyrimo dalyviai buvo patikrinti su Ishihara spalvų testu, siekiant nustatyti spalvų skyrimo anomalijas, tačiau jų nepastebėta.

Šiam eksperimentui buvo pagaminti keturspalviniai RgcAGN šviestuvai, kurių valdymas vyko per mikrovaldiklio reguliuojamus 4 spalvinių kanalų srovės valdiklius. Du identiški gatvės apšvietimo šviestuvai perdaryti taip, kad sutalpintų 66 RgcAGN šviestukų telkinius ir valdymo bei maitinimo elektroniką. Šviestukai parinkti pagal Philips Lumileds Rebel serijos

modelius: raudonas su 638 nm SPD smaile (LXM2-PD01), konversijos fosfore gintarinis (LXM2-PL01) su 598 nm SPD smaile, žalias (LXM2-PM01) su 518 nm SPD smaile ir gilus mėlynas (LXM2-PR01) su 451 nm SPD smaile. Mobilusis telefonas su Bluetooth® ryšiu ir Android programa atliko šviestuvo valdymo funkciją nuotoliniu būdu. Programą parengė tuometinis Matematikos ir Informatikos fakulteto (VU) studentas Tadas Leiga, vadovaujamas prof. Rimanto Vaicekausko. Šviestuvų CCT valdymas apribotas nuo 1850 K iki 10000 K su 10 K valdymo žingsniu tiesinėje kelvinų skalėje. 1850 K atitinka ypač žemos spalvinės temperatūros šviesos šaltinį tinkantį gatvių apšvietimui [P2]. Kuomet vykdavo CCT keitimas, Android programa automatiškai perskaičiuodavo RGN ir pcAGN telkinių svertinę sumą taip, kad būtų pasiekta didžiausias spalvų atkūrimo tikslumas. Tuo buvo pasiekta pastovi aukšta apšvietimo spalvinė kokybė keičiant CCT. Programa turėjo du valdymo režimus: pastovios apšvietos ir pastovaus cirkadinio poveikio [P7]. Cirkadinis poveikis yra nevizualinis šviesos poveikis tyrimo dalyvių cirkadinei sistemai, kuris detaliam aprašytas 3.1 poskyryje. SPD pavaizduoti 1.4 pav. šviestuvams veikiant abiem režimais.



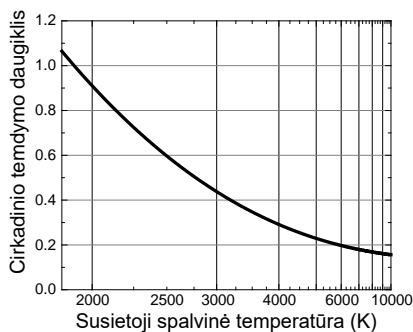
1.4 pav. Šviestuvų spektrinės galios skirstiniai pastovios apšvietos (vientisos linijos) ir pastovaus cirkadinio poveikio, normuoto į 1900 K spalvinės temperatūros poveikį (brūkšninės linijos), sąlygomis.

Pirmasis valdymo režimas naudotas testuojant Kruithofo hipotezę [5], kuomet didesnės CCT šviesos šaltiniai yra priimtinesni aukštesnės apšvietos sąlygomis nei mažesnės CCT šviesos šaltiniai. Šiuo atveju nebuvo atsižvelgiama į mezopinės regos sukeltus suvokiamo skaisčio skirtumus

esant didesnėms CCT. Antrasis režimas buvo skirtas nustatyti ar tyrimo dalyviai yra pasiryžę keisti apšvietimo vizualinį patrauklumą, kurį riboja sumažėjusios šviesos kiekis aukštesiose CCT. Šiuo atveju, programa palaikė pastovų cirkadinį šviesos srautą pagal formulę:

$$\Phi_c = k_{\text{CCT}} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} C(\lambda) S_{\text{CCT}}(\lambda) d\lambda, \quad (1.4)$$

Čia k_{CCT} yra cirkadinis temdymo daugiklis (1.5 pav.), $C(\lambda)$ – cirkadinio poveikio funkcija ir $S_{\text{CCT}}(\lambda)$ yra šviestuvo spektrinės galios skirstinys. Šiame darbe remtasi Gall cirkadine funkcija [45], kuri yra paremta melatonino (miegą reguliuojantis hormonas) slopinimo tyrimais [4, 46]. Yra sutarta, kad mėlyna šviesa (aukštos CCT) sukelia didesnę poveikį cirkadinei sistemai nei žemos CCT šviesos šaltiniai [47].

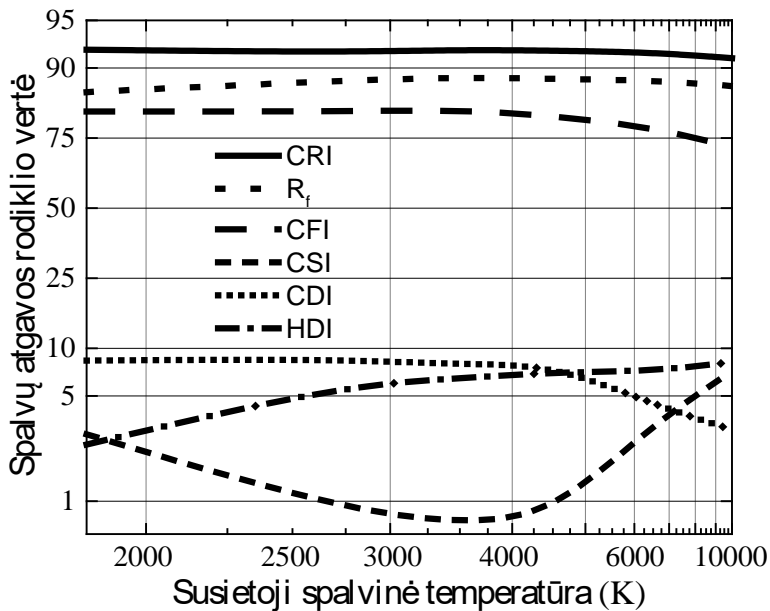


1.5 pav. Cirkadinio temdymo daugiklio k_{CCT} kitimas nuo susietosios spalvinės temperatūros esant pastovaus cirkadinio poveikio šviestuvo režimui [P7].

Šviestuvai sukalibruoti palaikyti didelę ir tolygią aukštą spalvinę kokybę CCT derinimo metu (1.6 pav.). CRI bei R_f visoje CCT srityje išlaiko ne mažiau 91 bei 86, atitinkamai. CFI naudoja 1269 Munsell sistemos bandinius spalvų atgavos vertinime [3], tačiau verčių sumažėjimas aukštesnėje CCT srityje vis dar leidžia apibūdinti šviestuvą kaip aukštos spalvinės kokybės, nes atskirai CSI, CDI ir HDI neviršija 10 (1.6 pav.). Šviestuvų spektrų kalibravimui naudota Labsphere Illumia Pro sistema su SMS 500 spektrometru. Atskirų spalvinių kanalų kalibraciniai duomenys yra surašyti šviestuvo mikrovaldiklio programoje, o spalvinis taškas skaičiuojamas ir valdomas išmaniajame įrenginyje. Kintančios temperatūros poveikis LED srautas kompensuojamas matuojant šviestuvo korpuso temperatūrą ir derinant kiekvieno spalvinio kanalo vidutinę srovę nepriklausomai nuo Android programos nustatymų mikrovaldiklio lygyje.

Apšvietimo instaliaciją sudarė du lygiagrečiai sumontuoti šviestuvai 4,2 metro aukštyje su 6 metrų tarpu. Eksperimento metu tyrimo dalyviai stovėjo

viduryje tarp šviestuvų taip, kad už nugaros likę šviestuvai jiems apšviestų regimąjį lauką į priekį ir sumažintų akinimą judant į ar iš eksperimento erdvės. Tyrimo dalyvių buvo paprašyta stebėti apšvietos matavimo tašką, nutolusį 6 metrų atstumu nuo jų. Apšvieta matuota Konica Minolta T-10 liuksmetru. Tokia eksperimento konfigūracija buvo grindžiama prielaida, kad subjektyvus lauko apšvietimo vertinimas visų pirma priklauso nuo apšvietos labai arti tyrimo dalyvio [P13]. Tyrimo dalyvių regėjimo laukas nebuvo ribojamas bei vertikali apšvieta į akį nematuota. Foninė šviesa su nekontroliuojamu SPD neviršijo 1 lx.

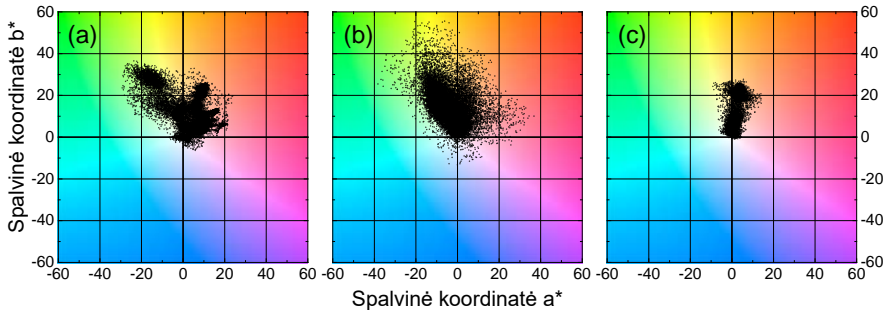


1.6 pav. Spalvinės kokybės rodiklių priklausomybė nuo susietosios spalvinės temperatūros keturspalviame šviestuve: bendrasis spalvų atgavos rodiklis CRI (vientisa linija), spalvų tikslumo balas R_f (taškuota linija) ir spalvų tikslumo rodiklis CFI (brūkšninė linija), spalvų sodrinimo rodiklis CSI (trumpų brūkšnių linija), spalvų blukinimo rodiklis CDI (mažų taškų linija) ir spalvų iškraipymo rodiklis HDI (brūkšninė taškinė linija).

Pirmasis eksperimentas vykdytas Vilniuje trijose skirtingose aplinkose tamsiu paros metu (Gegužės mėnesį tarp 23 ir 2 valandos bei rugsėjo mėnesį tarp 21 ir 24 valandos). Tuo metu apšviečiami paviršiai buvo sausi, o aplinkos temperatūra svyravo tarp 8 ir 14 laipsnių šilumos. Yra žinoma, kad aplinkos temperatūra veikia spalvų suvokimą [48], todėl buvo siekiama eksperimentus atlikti panašios temperatūros sąlygomis.



1.7 pav. Tyrimų vietos nuotraukos dienos metu: (a) Bursų kiemas, (b) Kairėnų botanikos sodas ir (c) Nacionalinė dailės galerija [P7].



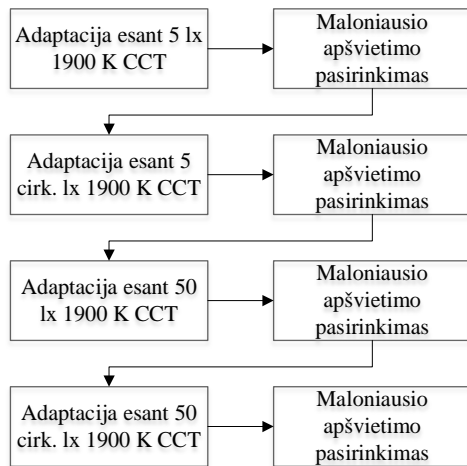
1.8 pav. Tyrimų vietų spalvų gamos CIELAB spalvų erdvėje: (a) Bursų kiemas, (b) Kairėnų botanikos sodas ir (c) Nacionalinė dailės galerija [P7].

Pagrindinis Kruithofo hipotezės tyrimas atliktas Vilniaus universiteto centrinių rūmų Bursų kieme (senamiesčio atitikmuo), o papildomi tyrimai – Vilniaus universiteto Kairėnų botanikos sode (parko atitikmuo) ir šalia Nacionalinės Dailės Galerijos (modernaus miesto atitikmuo). Tyrimo vietos nuotraukos dienos metu bei jų spalvų gamos CIELAB spalvų sistemoje pateiktos atitinkamai 1.7 ir 1.8 pav. Spalvų gama tirta su vaizdinančiu fotometru kolorimetru Lumicam 1300 Color.

Visi tyrimo dalyviai, kurių spalvinės regos savybės nebuvo žinomos tyrimo organizatoriams, prieš eksperimentą buvo patikrinti su Stillingo spalvų skyrimo testu. Kiekvienas dalyvis, prieš eksperimentą žodiškai supažindintas su jo eiga, pabandė valdyti apšvietimą dar prieš adaptaciją tam, kad vėliau kuo mažiau stebėtų telefono ekraną, kuriame atliekamas apšvietimo valdymas. Tyrimo dalyviai instrukuoti trumpai ir aiškiai, kad pagrindinis jų tikslas – pasirinkti maloniausią apšvietimą. Iškilę klausimai aptariami vietoje, nes viso eksperimento metu eksperimento organizatorius stovėjo šalia taip, kad netrukdytų, bet galėtų nedelsiant padėti. Pastovaus cirkadinio poveikio režimas apibūdintas paminint, kad šio režimo metu šviestuvai temdysis didėjant CCT. Žalingas mėlynos šviesos poveikis tamsiu paros metu neminėtas, siekiant neiškreipti tyrimo rezultatų.

Pirmasis eksperimentas vykdytas esant 5 lx ir 50 lx pastovios apšvietos sąlygoms keičiant CCT. Kita šio eksperimento dalis atlikta su pastovaus cirkadinio poveikio apšvietimu, kai pradinio taško apšvieta 1900 K CCT lygi 5 lx ir 50 lx. Šiuo atveju, didėjant CCT, apšvieta mažėjo pagal 1.5 pav. funkciją. Eksperimento eiga pavaizduota 1.9 pav. Adaptacija esant 5 lx ir 5 cirk. lx su 1900 K CCT truko atitinkamai 10 ir 5 minutes. Adaptacija esant 50 lx ir 50 cirk. lx su 1900 K CCT truko atitinkamai 5 ir 3 minutes. Yra žinoma,

kad pastovios fotopinės apšvietos sąlygomis 90 proc. spalvinės adaptacijos pasiekama per 60 sekundžių [49]. Mūsų atveju apšvieta yra žemesnė, todėl adaptacijos laikas yra padidintas remiantis spalvų suvokimo mažėjimu. Kiekvienas tyrimo dalyvis keturis kartus pasirinko maloniausią apšvietimą, kuris atitinka originalų Kruithofo tyrimo (angl. most pleasing) apšvietimo apibūdinimą. Viso buvo atlikti 86 (40+22+24)



1.9 pav. Kruithofo hipotezės tyrimo eksperimento eiga.

pasirinkimai kiekvienam apšvietimo režimui trijose eksperimento vietose. Pasirenkama buvo pirštu liečiamame ekrane valdant pirmyn ir atgal slankiklį, kuris keitė CCT. Eksperimento organizatorius užsifikuodavo CCT reikšmę, Android programos fonas buvo parinktas juodas ir ekrano pašvietimas nustatytas į žemiausią lygį. Pasirinkimo laikas nebuvo ribojamas, o visi pasirinkimai pradėti nuo 1900 K CCT. Šis atskaitos taškas, kuris atitinka aukšto slėgio natrio lempos CCT, galėjo lemti rezultatus [50, 51], todėl antrasis šio skyriaus eksperimentas buvo atliktas taip vadinamam inkaro efektui iširti. Inkaro efektas yra toks adaptacinės spalvinės temperatūros poveikis apšvietimo tyrimams, kuomet tyrimo rezultatai priklauso nuo pradinių apšvietimo sąlygų.

Surinktos CCT vertės perskaičiuotos į atvirkštinius megakelvinus ($10^6/K$ - miredas), kurie atitinka beveik tiesinį CCT suvokimą [52]. Atliekant statistinę duomenų analizę, surasti atvirkštinių megakelvinų vidurkiai, standartiniai nuokrypiai ir 95 % pasikliovimo intervalai kiekvienam apšvietimo režimui bei aplinkai. Vėliau atliktas parametrinis dviejų priklausomų imčių t-testas

atvirkštinių megakelvinų vidurkių skirtumo statistinio patikimumo įvertinimui. Duomenų pasiskirstymas pagal normalųjį skirstinį patikrintas su Lilliefors goodness-of-test ir Mann-Whitney U testais. Galiausiai visi rezultatai perskaičiuoti atgal į paprastą CCT skalę kelvinais.

Antrame eksperimente dalyvavo 20 tyrimo dalyvių, kurių amžiaus vidurkis buvo 20 metų (13 vyrų ir 7 moterys). Šio eksperimento dalyviai atrinkti analogiškai pirmojo eksperimento atvejui. Visi tyrimo dalyviai buvo patikrinti su Ishihara spalvų testu, siekiant nustatyti spalvų skyrimo anomalijas, tačiau jų nepastebėta.

Šio eksperimento metu naudotas keturspalvis kietakūnis RpcAGN šviestuvai, aprašytas [P1] publikacijoje. Jis paremtas ta pačia technine baze, kaip ir pirmojo eksperimento šviestuvai. Šviestuvo elektrinė galia yra mažiau nei 45 W, todėl ir šviesinis srautas yra mažesnis lyginant su pirmojo eksperimento šviestvu. Siekiant išvengti išmanaus įrenginio ar kito šviečiančio ekrano apšvietimo daromos įtakos valdymui tyrimo metu, buvo parašyta speciali programinė įranga vb.net programavimo kalbos pagrindu Windows® platformoje su valdymo galimybe per USB žaidimų pultą. Esminis šios eksperimento skirtumas nuo pirmojo – valdymo pultas neturėjo fiksuotų kraštinių šviestuvo CCT verčių, t.y. pasiekus žemiausią ar didžiausią CCT, ji ima atitinkamai didėti ar mažėti, tad pokytį galima pamatyti vizualiai. Taip sumažinamas programiškai fiksuotų kraštinių padėčių poveikis pasirinkimams. Antras esminis patobulinimas eksperimento metodikoje – naudota $1/CCT$ skalė valdyme, kuri atitinka panašų į tiesinį žmogaus spalvinės temperatūros suvokimą.

Šviestuvai buvo sumontuoti virš eksperimentinės apšvietimo vitrinos (80 cm aukščio, 70 cm pločio ir gylio), kurios sienos nudažytos neutraliai pilkais dažais, o vitrinos viršuje buvo įdėtas organinis stiklas difuzoriaus funkcijai atlikti. Pradinės CCT vertės parinktos pagal dažnai pasitaikančias praktinių baltų šviestukų CCT: 2100 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K, 10000 K. Nustatyti du apšvietimo lygiai: 50 lx ir 250 lx. 50 lx atitinka žemiausią meno kūrinių apšvietimo ir aukštą gatvių apšvietimo lygį. 250 lx apšvieta atitinka V kategorijos (≥ 200 lx) regos darbų [53] keliamus reikalavimus. Tai yra darbai, kurie atliekami esant bendrajam apšvietimui be papildomų spalvų skyrimo ar mažų objektų atrinkimo užduočių.

Tyrimo dalyviai turėjo pasirinkti maloniausią CCT esant skirtingoms adaptacinėms pradinėms CCT. Šio eksperimento eiga buvo panaši į pirmojo eksperimento eiga. Tyrimo dalyvis sėdi prieš apšvietimo vitriną ir atlieka bandomąjį šviestuvo valdymą; atsitiktine tvarka nustatoma viena iš 6 CCT su

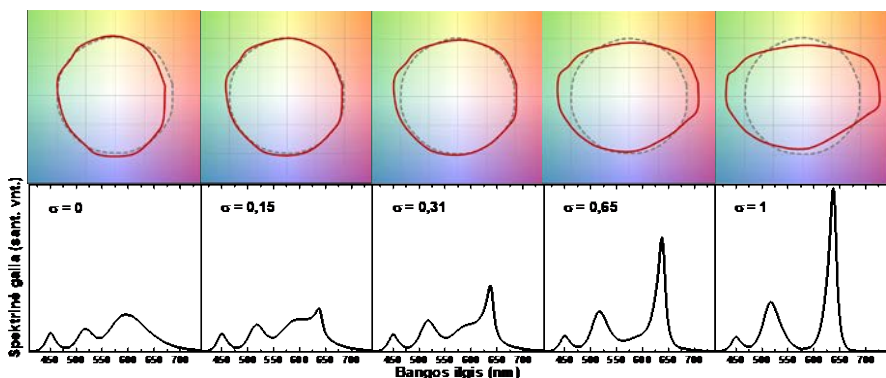
50 lx apšvieta bei paliekama 3 minutės adaptacijai; atliekamas maloniausias CCT pasirinkimas judinant valdymo pulto svirtelę; pakeičiama CCT ir paliekama 1 minutė spalvinei adaptacijai; pasirenkama CCT ir eiga pakartojama likusioms 4 CCT vertėms; parenkama atsitiktinė CCT su 250 lx apšvieta ir tyrimo dalyvis adaptuojasi 1 minutę; ankstesnio eksperimento seka pakartojama visoms 6 CCT vertėms. Tyrimo metu eksperimentatorius keičia šviestuvo apšviestos lygį, CCT, fiksuoja adaptacijos laiką ir renka pasirinktas CCT vertes. Adaptacijos laikas paremtas pagal anksčiau aprašytą 90 proc. spalvinės adaptacijos trukmę pastovios fotopinės apšvietos sąlygomis [49]. Viena sesija tyrimo dalyviui truko ne ilgiau 20 minučių, todėl nuovargio eksperimento eigoje nepastebėta.

Pasirinktos CCT vertės perskaičiuotos į atvirkštinius CCT vienetus, rastas standartinis nuokrypis, 95 proc. pasiklovimo intervalas ir atverstos atgal į CCT. Visi 20 tyrimo dalyvių rezultatai suvidurkinti ir atvaizduoti grafiškai.

Trečiasis psichofizikinis eksperimentas sujungia spalvinių temperatūrų pasirinkimų rezultatus, žemą apšvietos lygį ir spalvų diskriminaciją. Šio eksperimento metu 5 gerai apmokyti ankstesnių psichofizikinių tyrimų metu tyrimo dalyviai, kurių amžiaus vidurkis 23 metai (3 vyrai ir 2 moterys) atliko FM100 testą, kuomet išrikiuojamos 4 paletes su spalviniais bandiniais pagal spalvinį toną. Visi tyrimo dalyviai buvo patikrinti Stillingo (angl. Stilling's) pseudoizochromatinių lentelių testu, norint įsitikinti, ar nėra jų spalvinės regos nuokrypių esant 200 lx apšvietai ir aukštos spalvinės kokybės apšvietimui. Dalyviai buvo žodiškai instrukuoti, jog atliks spalvų rikiavimo testą esant skirtingoms apšvietoms ir spalvinės kokybės apšvietimui.

Tyrimas atliktas su antrajame eksperimente aprašytu keturspalviu kietakūniu šviestuvu [P1]. Šviestuvus naudotas kitu režimu, kuomet yra fiksuojama CCT ir šviesinis srautas, bet keičiama apšvietimo spalvinė kokybė, kurią lemia SPD. Šio tyrimo metu parinkta 3000 K CCT, kuri yra tinkama žemos apšviestos sąlygomis ir tai pagrindžia pirmo bei antrojo eksperimento rezultatai aptarti kitame poskyryje. Nustatyti 3 apšvietos lygiai: 3,3 lx, 67 lx ir 300 lx, kurie atitinkamai susieti su išmatuotu skaisčiu: 0,5 cd/m², 10 cd/m² ir 45 cd/m². Skaistis vertinimui įtrauktas todėl, kad žmonės suvokia ne apšvietą, o skaistį, kuris yra paviršiaus elemento spinduliuotės intensyvumas tam tikra kryptimi, padalytas iš šio elemento ploto projekcijos ta kryptimi. Tuo tarpu apšvieta parodo tik šviesos srautą ploto vienetai, kuris krenta ant apšviečiamo paviršiaus. Taip pat apšvieta matuojama ant apšviečiamų paviršių, o skaistis vertinamas iš tyrimo dalyvio pozicijos. Žemiausia apšvieta atitinka urvų apšvietimui naudojamas vertes [54], vidutinė — pereinamą ribą

tarp mezopinės ir fotopinės regos, o aukščiausia – atitinka IV kategorijos (≥ 300 lx) regos darbus [53].



1.10 pav. Spalvių pokytis CAM02-UCS spalvų erdvėje (viršuje) ir spektrinės galios skirstiniai (apačioje) priklausomai nuo spalvinės kokybės svertinio koeficiento σ . Punktyrinė linija (viršuje) rodo idealiai natūralų apšvietimą, raudona – testuojamą.

Šviestuvai turėjo 5 fiksuotus spalvinės kokybės svertinio koeficiento (SKSK) režimus: $\sigma = 0$ atitinka žemiausios spalvinės kokybės apšvietimą su spalvų blukinimu; $\sigma = 0,15$ atitinka didžiausią galimą natūralų apšvietimą iš šio šviestukų telkinio; $\sigma = 0,31$ atitinka pirmenybinį apšvietimą [P1, P5]; $\sigma = 0,65$ atitinka tarpinę padėtį tarp pirmenybinio ir didžiausio sodrinimo; $\sigma = 1$ atitinka didžiausią spalvų sodrinimą iš RpcAGN telkinio. Šių režimų SPD ir spalvinė kokybė CIECAM02 [55] spalvų erdvėje naudojant IES TM-30-15 metodą [2, 35] pavaizduota 1.10 pav.

Šviestuvo spalvinė kokybė priklausomai nuo SKSK (1.2 lentelė) buvo įvertinta pagal šiuos rodiklius: spalvų tikslumo - CRI, CRI_{mes} esant $0,5 \text{ cd/m}^2$, CRI 2012, CQS Q_a , CFI, R_f ; spalvų gamos ploto – CQS Q_g , GAI ir R_g ; papildomi statistinio metodo – CSI, CDI, CFI ir HDI; kiti – R_9 , R_9 2012 ir LER. CRI_{mes} normavimo konstanta esant $0,5 \text{ cd/m}^2$ yra 0,3 [56].

Duomenų rinkimas vyko etapais, nes sudėlioti vieną kartą FM100 testo paletes užtrunka ~15 minučių. Eksperimento eiga kiekvienam tyrimo dalyviui buvo tokia pati. 10 minučių adaptacija esant $0,5 \text{ cd/m}^2$ atsitiktine tvarka parinktam SKSK apšvietimu; FM100 testo atlikimas surenkant atsitiktine tvarka pateiktas 4 spalvinių bandinių paletes; 1 minutės spalvinė adaptacija kitai apšvietimo SKSK (nesikeičia apšvieta) ir FM 100 kartojimas likusiems SKSK apšvietimams su 1 minutės spalvine adaptacija; 5 minučių adaptacija esant 10 cd/m^2 (didėja apšvieta) ir vėl atliekami 5 testai; 1 minutės adaptacija

esant 45 cd/m² apšvietimui (didėja apšvieta) ir vėl kartojami FM100 testai. Siekiant padidinti rezultatų patikimumą, visi testai buvo kartojami po 5 kartus, t.y. vienas tyrimo dalyvis viso atliko po 75 FM100 testus (3 skaisčiai, 5 spalvinės kokybės apšvietimai po 5 kartus). Vienas tyrimo dalyvis per dieną atliko ne daugiau 10 FM100 testų su pertraukomis, siekiant išvengti nuovargio.

1.2 lentelė. RpcAGN telkinio spalvinės kokybės rodikliai.

SKSK σ	Spalvų tikslumo rodikliai						Spalvų gamos ploto rodikliai		
	CRI	CRI _{mes} @0,5 cd/m ²	CRI 2012	CQS Q _a	CFI	R _f	CQS Q _g	GA I	R _g
0	80,9	94,3	83,3	82,1	50,2	83,3	90,4	54,9	96,3
0,15	92,7	97,8	93,0	91,0	77,5	90,2	99,2	60,1	102,6
0,31	84,9	95,5	87,0	85,1	43,1	85,5	105,2	63,7	106,5
0,65	50,0	85,0	60,0	63,7	12,9	63,5	116,1	69,7	112,4
1	14,3	74,3	34,0	41,3	6,1	41,9	122,4	72,2	114,0
SKSK σ	Papildomi rodikliai								
	CSI	CDI	HDI	R9	R9 2012	LER (lm/W)			
0	0,4	37,0	9,2	-15,7	47,3	337,7			
0,15	6,3	4,6	6,4	67,0	85,5	321,4			
0,31	41,2	1,0	19,4	70,8	85,5	309,1			
0,65	72,6	0,2	48,5	-61,9	31,4	282,9			
1	79,2	0,7	64,0	-179,1	-13,6	260,1			

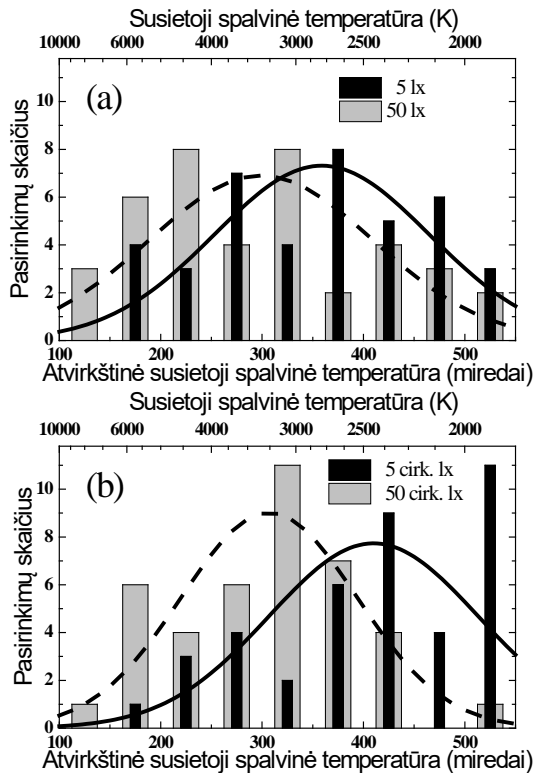
Visų tyrimo dalyvių FM100 testo rezultatai sugrupuoti pagal apšvietimo SKSK ir skaisčių bei suvidurkinti įtraukiant 95 % pasiklovimo intervalą. Išskirti visų 4 palečių rezultatai pagal spalvinių bandinėlių numerius: 1 spalvių sektorius – 0(85)–21 bandinėliai (raudona – oranžinė); 2 sektorius – 22–42 bandinėliai (geltona – žalia); 3 sektorius – 43–63 bandinėliai (žydra – mėlyna) ir 4 sektorius – 64–84 bandinėliai (mėlyna – raudona). Eksperimento rezultatai apdoroti pasitelkiant regresinę bei vektorinę dispersinę analizes (ANOVA).

1. 3. Apšvietimo susietosios spalvinės temperatūros derinimo ir Farnsworth-Munsell 100 hue testo rezultatai

Pirmojo psichofizikinio eksperimento maloniausios CCT pasirinkimo rezultatai Bursų kiemelyje pateikti 1.9 pav. histogramų pavidalu atvirkštinių megakelvinų skalėje miredais. Pasirinkimai sugrupuoti kas 50 miredų, o normaliojo skirstinio funkcijos yra skirtos nustatyti vidurkius.

Nepaisant plataus pasiskirstymo, pastebimas CCT vidurkio pokytis nuo 2800 K iki 3300 K padidinus apšvietą nuo 5 lx iki 50 lx (1.9 pav (a)). Šios vertės yra didesnės, nei pagal Kruithofo pateiktą prognozę [5]. Tai galėjo lemti naudotų aukšto slėgio natrio bei metalų halogenidų lempų CCT skirtumas [20] ir dėl to neužfiksuotos optimalios CCT. Kita vertus, gautus duomenis pagrindžia ankstesni tyrimai [22, 21, 23], kur lauko apšvietimo sąlygomis pirmenybė teikiama šiltai baltos šviesos šaltiniams. Pastovaus cirkadinio apšvietimo režime taip pat pastebima padidėjusi vidutinė CCT (1.11 pav.

(b)): nuo 2400 K esant 5 cirk. lx iki 3300 K esant 50 cirk. lx. Čia 5 cirk. lx esant 2400 K atitinka 3,2 lx, todėl tyrimo dalyviai pirmenybę teikė didesnei apšvietai nei didesnei 2800 K CCT esant pastovios apšvietos sąlygomis. 5 cirk. lx esant 2800 K atitiktų 2,4 lx, t.y. 33 % mažesnė apšvieta nei 5 cirk. lx esant 2400 K. Aukštesnėje apšvietoje tyrimo dalyviai pasirinko



1.11 pav. Pasirinktų susietųjų spalvinių temperatūrų pasiskirstymo histogramos pastovios apšvietos (a) ir pastovaus cirkadinio poveikio (b) režimuose. Juoda linija žymi normalųjį skirstinį 5 lx ir 5 cirk. lx, o punktyrinė – 50 lx ir 50 cirk. lx [P7].

panašiais CCT abiem režimams, todėl iki 19 lx kritusi apšvieta esant 50 cirk. lx su 3300 K nebuvo prioritetas CCT pasirinkime.

1.3 lentelė. Kruithofo CCT intervalai ir dviejų apšvietų ir dviejų režimų tyrimo rezultatai [P7].

Apšvietimo režimas	Kruithofo CCT intervalas (K)	Aplinka	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	95 % pasiklovimo intervalas	Lilliefors testo p -vertė
5 lx	1720–1770	Senamiestis	2790	(2150; 3960)	(2550; 3080)	0,408
		Sodas	3140	(2380; 4600)	(2750; 3660)	0,052
		Miestas	3220	(2550; 4370)	(2900; 3620)	0,648
		Bendras	2990	(2300; 4260)	(2800; 3190)*	0,010
50 lx	2200–2450	Senamiestis	3340	(2440; 5320)	(2990; 3790)	0,257
		Sodas	3760	(2990; 5080)	(3380; 4250)	0,197
		Miestas	3400	(2710; 4570)	(3070; 3810)*	0,009
		Bendras	3460	(2620; 5090)	(3230; 3710)	0,171
5 cirk. lx.	-	Senamiestis	2440	(1950; 3260)	(2260; 2660)	0,192
		Sodas	2360	(1910; 3090)	(2140; 2640)	0,107
		Miestas	2650	(2130; 3490)	(2400; 2950)	0,271
		Bendras	2470	(1990; 3280)	(2350; 2610)	0,071
50 cirk. lx.	-	Senamiestis	3260	(2540; 4540)	(2990; 3580)	0,331
		Sodas	2970	(2270; 4300)	(2620; 3450)	0,988
		Miestas	3320	(2600; 4580)	(2970; 3760)	0,561
		Bendras	3200	(2480; 4500)	(3010; 3410)	0,711

1.3 lentelėje pateikti CCT vidurkiai, 95 % pasiklovimo intervalai, standartiniai nuokrypiai ir Lilliefors tinkamumo testo rezultatai priklausomai nuo tyrimo aplinkų ir jų duomenų bendro vidurkio. Lilliefors tinkamumo testas parodo ar duomenys yra pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį ($p > 0,05$), todėl bendri duomenys esant 5 lx ($p = 0,01$) ir miesto aplinkos esant 50 lx ($p = 0,009$) netenkina šios sąlygos ir jų pasiklovimo intervalai pažymėti žvaigždute.

1.4 lentelėje pateiktos dviejų priklausomų imčių t ir Mann-Whitney U testų p vertės priklausomai nuo apšvietimo režimo pokyčio. Mann-Whitney U testas yra neparametrinis testas, kuris tikrina ar viena atsitiktinai parinkta vertė iš vienos imties yra didesnė ar mažesnė už kitos imties atsitiktinę vertę. Šio testo imtims nebūtinai pasiskirstymas pagal normalųjį skirstinį. Senamiesčio ir bendro aplinkų rezultatų CCT vidurkių rezultatų pokytis nuo 5 lx iki 50 lx yra statistiškai patikimas, o tai sutampa su Kruithofo teorija, kuri sako, kad

didėjant apšvietai, didėja ir maloniausios CCT vertė. Tokie pat patikimi vidurkių pokyčių rezultatai yra ir visoms aplinkoms nuo 5 cirk. lx iki 50 cirk. lx. bei nuo 5 lx iki 5 cirk. lx. Šie pasirinkimai cirkadinio apšvietimo režime gali būti pagrįsti tyrimo dalyvių noru stebėti didesnę apšvietą nei CCT jau ir taip žemos apšvietos atveju. Tuo tarpu pereinant nuo 50 lx į 50 cirk. lx statistiškai patikimi rezultatai gauti tik sodo aplinkoje ir bendruose rezultatuose. Apšvietimo senamiestyje ir mieste režimo pokyčio statistinio patikimumo vertės reiškia, kad tyrimo dalyviai dėl norimos CCT pasitenkino žemesne apšvieta.

1.4 lentelė. Dviejų priklausomų imčių t ir Mann-Whitney U testų rezultatai priklausomai nuo apšvietimo režimo pokyčio [P7].

Apšvietimo režimo pokytis	Aplinka	CCT vidurkio pokytis	t-testo p-vertė	MW U p-vertė
5 lx→ 50 lx	Senamiestis	2790→3340	0,0003	<0,001
	Sodas	3140→3760	0,010	0,023
	Miestas	3220→3400	0,390*	0,820
	Bendras	2990→3460	<0,001*	<0,001
5 cirk. lx.→ 50 cirk. lx.	Senamiestis	2440→3260	<0,001	<0,001
	Sodas	2360→2970	<0,001	<0,001
	Miestas	2650→3320	<0,001	<0,001
	Bendras	2470→3200	<0,001	<0,001
5 lx→ 5 cirk. lx.	Senamiestis	2790→2440	0,0045	0,003
	Sodas	3140→2360	<0,001	<0,001
	Miestas	3220→2650	<0,001	<0,001
	Bendras	2990→2470	<0,001*	<0,001
50 lx→ 50 cirk. lx.	Senamiestis	3340→3260	0,643	0,439
	Sodas	3760→2970	0,003	0,003
	Miestas	3400→3320	0,703*	0,790
	Bendras	3460→3200	0,03	0,022

* rezultatai netenkina normaliojo skirstinio reikalavimų

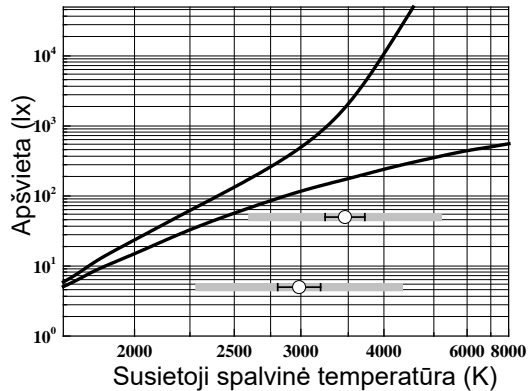
Visi rezultatai kokybiškai sutampa su Kruithofo hipoteze, kad esant didesnei apšvietai, tyrimo dalyviai pageidauja didesnės spalvinės temperatūros. Taip pat egzistuoja priimtinių CCT intervalai kiekvienam apšvietos lygiui didžiąjai daliai tyrimo dalyvių konkrečioje aplinkoje. Šie intervalai yra panašūs skirtingos aplinkos scenose su skirtinga spalvų gama ir sudėtimi. Kita vertus, maloniausios CCT intervalai gali būti ribojami standartinio nuokrypio (1.12 pav.), nors jie yra žymiai platesni nei Kruithofo hipotezėje. Tariant, kad subjektyviai pasirinktų CCT intervalai atvirkštinėje

CCT skalėje yra panašių plokčių skirtingose apšvietoje, galima tikėtis, kad bus sunku apibrėžti maloniausios CCT intervalus aukštesnėje CCT. Tokiu atveju apšvietimą geriau individualizuoti nei vidurkinti, kaip kad buvo padaryta ofisuose [25, 57]. Be to, maloniausios apšvietos intervalai pastovioje CCT nebūtinai egzistuos visoms apšvietos sąlygoms [11, 12, 13, 20].

Reikia pažymėti, kad nustatyti CCT intervalai gali būti paveikti

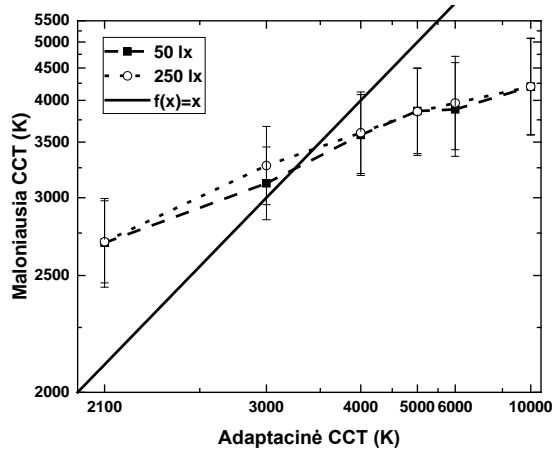
valdomos CCT intervalo, eksperimento eigos ir taip vadinamo inkaro efekto [51]. Manoma, kad CCT intervalas nelemia rezultatų dėl plačios valdomos CCT srities, o didžioji dalis gautų duomenų atitinka normalųjį skirstinį. Vertinant inkaro efekto daromą įtaką, CCT vidurkiai galėjo pasislinkti iki 200 K į didesnių CCT pusę [51], nors šios vertės pakliūna į standartinio nuokrypio intervalą. Inkaro efekto daroma įtaka plačiai ištirta kitame eksperimente. Pastovaus cirkadinio poveikio apšvietimo atveju, tyrimo dalyviai priėmė skirtingus sprendimus esant skirtingoms apšvietoms. Žemesnėje apšvietoje (5 cirk. lx) jie buvo pasiryžę mažinti CCT dėl didesnės apšvietos lyginant su 5 lx, o kitu atveju (50 cirk. lx) CCT vertės buvo panašios lyginant su 50 lx režimu.

Inkaro efekto tyrimas (antrasis eksperimentas) uždaroje aplinkoje parodė, kad plačiame CCT intervale, adaptacinė CCT turi stiprų poveikį maloniausios CCT pasirinkimui (1.13 pav.). Pasirinkta CCT vertė kinta nuo 2700 K iki 4200 K adaptacinei CCT didėjant nuo 2100 K iki 10000 K. Universali CCT, kurią kerta tiesės lygtis yra 3350 K, tad galima teigti, kad parinkus tokią pradinę CCT, bus pasiekiamas maloniausias apšvietimas, nepriklausomai nuo adaptacinės temperatūros. Žinant, kad žmogaus rega netiesiškai suvokia CCT, tai pokytis nuo 2700 K iki 3350 K (72 miredų pokytis) yra panašus pokyčiui



1.12 pav. Kruithofo hipotezės ribojamas dviejų juodų kreivių maloniausias apšvietimas (adaptuota pagal [5]). Balti taškai su juodomis ir pilkomis juostomis žymi bendrą visų aplinkų vidutinę susietąją spalvinę temperatūrą, jos pasiklojimo intervalus ir standartinius nuokrypius, atitinkamai. Pateikti 5 lx ir 50 lx pastovios apšvietos rezultatai [P7].

nuo 3350 K iki 4200 K (60 miredų pokytis). Įvertinus pasirinkimų bendrą vidurkį su 3470 K esant 50 lx ir 3520 K esant 250 lx, galima konstatuoti, kad duotame CCT intervale nepriklausomai nuo apšvietos vidutinė CCT yra 3500 K. Šie rezultatai -200 K



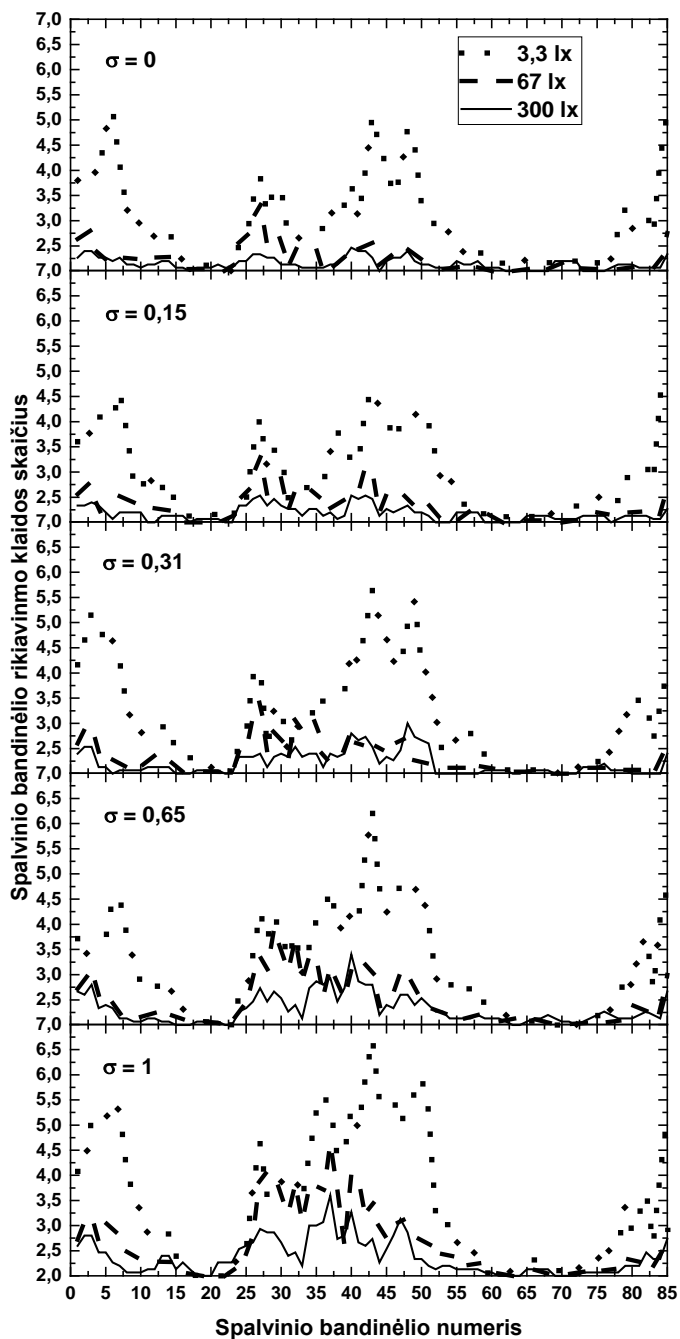
1.13 pav. Pasirinktos maloniausios CCT priklausomybė nuo pradinės adaptacinės CCT dviem apšvietos lygiams (punktyrinė linija – 50 lx ir taškinė linija – 250 lx). Juoda tiesė žymi tiesinę funkciją.

skyrėsi nuo kitos grupės pateiktų rezultatų [15], nes jų pradinių CCT intervalas buvo nuo 3000 K iki 4400 K. Remiantis ankstesniu valdomos CCT (3000 K – 8000 K) šaltinio tyrimu, nustatyta, kad pradinė CCT, CCT intervalas ir adaptacijos trukmė lemia pasirinktiną CCT [50]. Disertacijos autoriaus atliktame tyrime naudotas plačiausias CCT valdymo intervalas be fiksuotų kraštinių padėčių ir 6 universalios pradinės CCT, kas leido pasiekti tikslesnius rezultatus.

1.5 lentelė. Dviejų nepriklausomų porų t testo p vertės 50 lx (viršuje dešinėje) ir 250 lx (apačioje kairėje) priklausomai nuo pradinės susietosios spalvinės temperatūros.

		50 lx					
		2100 K	3000 K	4000 K	5000 K	6000 K	10000 K
250 lx	2100 K		0.0372	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	3000 K	0.008		0.0576	0.0106	0.0136	< 0.001
	4000 K	< 0.001	0.2338		0.399	0.3942	0.118
	5000 K	< 0.001	0.063	0.4662		0.9598	0.4348
	6000 K	< 0.001	0.039	0.3236	0.7736		0.4832
	10000 K	< 0.001	0.0116	0.1354	0.4128	0.6122	

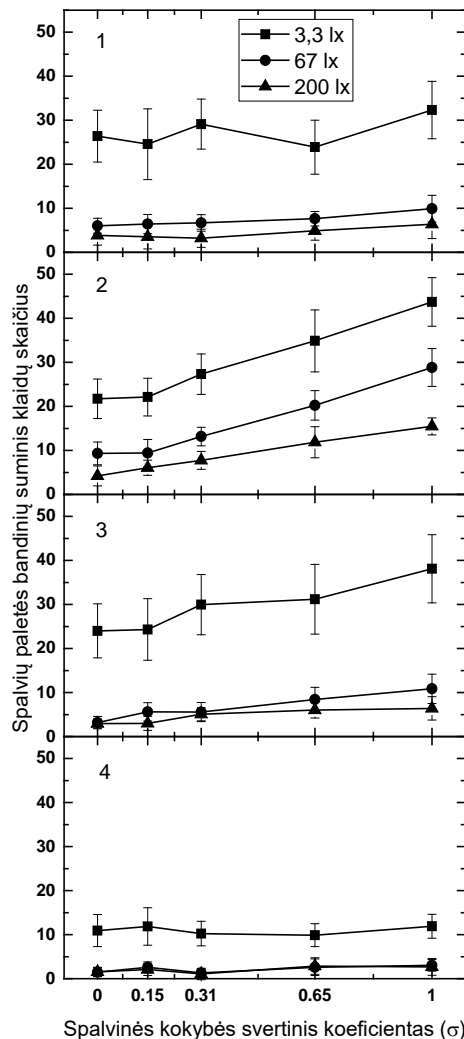
1.5 lentelėje pateikti pilotinių duomenų statistinio patikimumo vertinimo duomenys rodo, kad pradinės 2100 K pasirinktų CCT vidurkiai patikimai atskiriami nuo kitų pradinių CCT vidurkių. Vertės tarp 4000 K ir 10000 K statistiškai patikimai neatskiriamos abiem apšvietos lygiams.



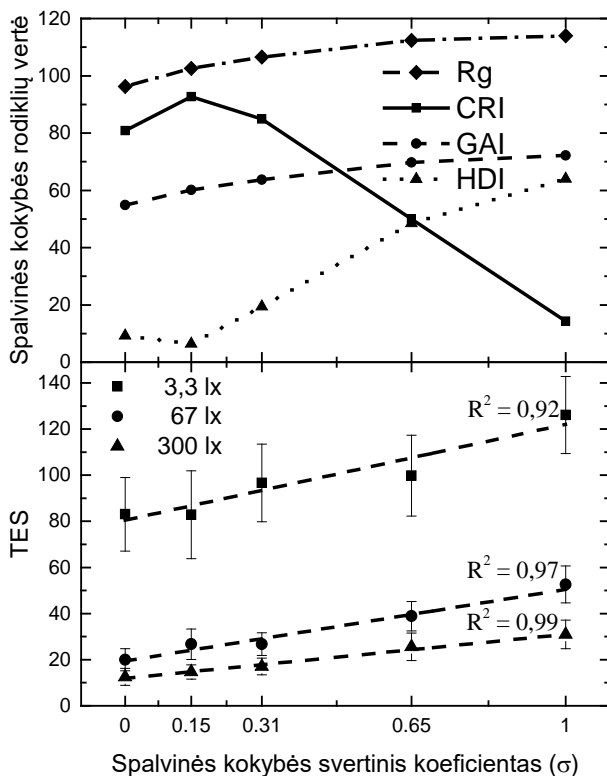
1.14 pav. Paskirų spalvinių bandinių rikiavimo klaidos skaičius esant 3,3 lx (taškuota linija), 67 lx (brūkšninė linija) ir 300 lx (ištisa linija) kintant apšvietimo spalvinei kokybei (iš viršaus į apačią) [P8].

Trečiojo psichofizinio eksperimento FM100 testo rezultatai pateikti 1.14 pav. Paskirų bandinėlių klaidos skaičių sudaro pozicijos skirtumas tarp gretimų bandinėlių numerių, t.y., jei bandinėlis surikiuotas teisingai, tai jo klaidos skaičius bus 2. Tokiu atveju matome, kad didėjant apšvietimui, klaidų skaičiai mažėja ir rikiavimas tiksliau atitinka originalią spalvių seką. Spalvinės kokybės pokytis didėjant SKSK lemia prastesnę spalvų skyrimą ir rikiavimą. 4 spalvinių palečių bandinių suminis klaidų skaičius (1.15 pav.) rodo, kad žemiausios apšvietos sąlygomis didžiausias klaidų skaičius 32, 43 ir 38 pasiektas atitinkamai 13 paletėse.

Mažiausias klaidų skaičius pasiektas 4 paletėje (mėlyna – raudona spalvių sritis) visiems apšvietimams. 2 ir 3 palečių klaidų skaičius didėja didėjant apšvietimo spalvų sodrinimo rodikliams (1.2 lentelė). 1 ir 4 palečių rezultatai yra pastovūs nepriklausomai nuo spalvinės kokybės. Esant 67 lx apšvietimui klaidos yra kartojamos 2 paletėje tarp 25 ir 35 spalvinių bandinėlių nepriklausomai nuo apšvietimo spalvinės kokybės. TES rodo (1.16 pav.), kad didėjant apšvietimui nuo 3,3 lx iki 300 lx, klaidų skaičius sumažėja 7 kartus bei 4 kartus, esant SKSK vertėms 1 ir 0, atitinkamai. Tai reiškia, kad spalvų sodrinimas lemia didesnius spalvinius pokyčius žemos apšvietos sąlygomis. Bendrai TES padidėja 3 kartus apšvietimui



1.15 pav. FM100 testo rezultatai 4 bandinių paletėms kintant apšvietimo spalvinei kokybei (iš viršaus į apačią) esant skirtingiems apšvietos lygiams [P8].



1.16 pav. Spalvinės kokybės rodiklių verčių (viršuje) bei FM100 testo rezultatų (apačioje) priklausomybė nuo spalvinės kokybės svertinės sumos. Punktyrinė linija yra FM100 testo rezultatų tiesinės funkcijos parinkimas.

pakitęs nuo 67 lx iki 3,3 lx, o tai ir siejasi su MacAdamo elipsės dydžio pokyčiu mezopinėje srityje. TES sumažėja iki dviejų kartų apšvietą padidinus nuo 67 lx iki 300 lx nepriklausomai nuo spalvinės kokybės. TES didėja tiesiškai didėjant SKSK. Kartu stebimas nuoseklus spalvų gamos rodiklių augimas didėjant SKSK. Šios priklausomybės leidžia susieti TES ir spalvų gamos rodiklius, todėl galima teigti, kad pagrindinis spalvų rikiavimo klaidų netiesioginis kriterijus vertinime turi būti spalvų gamos plotas. HDI parodo, kokia procentinė dalis Munsell paletės bandinių yra su iškraipytu spalviniu tonu, kurie peržengia 3 žingsnių MacAdamo elipsę ir yra pastebimi tyrimo dalyvio kaip kito spalvinio tono. Žvelgiant iš šios pusės, TES rezultatai tarp SKSK = 0 ir SKSK = 0,15 yra tapatūs. Tai rodo ir aposteriorinio Bonferonio kriterijaus porinio palyginimo p vertės (1.6 lentelė). Čia statistiškai patikimai neišsiskiria TES tarp SKSK = 0,15 ir SKSK = 0,31 poros bei SKSK = 0,31 ir

SKSK = 0,65 poros. TES esant SKSK = 1 statistiškai patikimai skiriasi nuo kitų verčių.

1.6 lentelė. Spalvinės kokybės rodiklių aposteriorinio Bonferonio kriterijaus porinio palyginimo p vertės [P8].

SKSK (σ)	0	0,15	0,31	0,65	1
0	-	0.201	0.037	0.010	0.001
0,15	0.201	-	0.113	0.011	0.001
0,31	0.037	0.113	-	0.072	0.001
0,65	0.010	0.011	0.072	-	0.001
1	0.001	0.001	0.001	0.001	-

TES palyginimas esant skirtingiems apšvietos lygiams tokiu pat būdu (1.7 lentelė) rodo, kad 67 lx ir 300 lx rezultatų negalima statistiškai patikimai atskirti vertinant visų SKSK vertes.

1.7 lentelė. Apšvietos lygių aposteriorinio Bonferonio kriterijaus porinio palyginimo p vertės [P8].

Apšvieta (lx)	3,3	67	300
3,3	-	0.008	0.011
67	0.008	-	0.072
300	0.011	0.072	-

Vertinant paskirų bandinėlių rikiavimo klaidas matome, kad raudonos komponentės trūkumas SPD nekeičia raudonų spalvių rikiavimo klaidų skaičiaus kintant SKSK pirmoje paletėje esant žemai apšvietai ir tai lemia žmogaus spektrinio jautrio poslinkis į mėlyną pusę (Punkinje efektas). Klaidų skaičius 1 paletėje nežymiai didėja didėjant SKSK esant didesnėms apšvietoms ir tai gali būti paaiškinta pcA LED plačia raudona komponente, kurios pakanka apšviesti ir atskirti raudonus tonus, nors jų šviesis ir yra sumažėjęs. 2 spalvinės paletės rezultatai stipriai priklauso nuo SKSK, nes šiuo atveju gelsvų ir žalsvų tonų spalvinis atkūrimas kenčia nuo geltonos komponentės trūkumo RGN šaltinyje. Trečiosios paletės spalvos prasčiau atkuriamos dėl žydros spektrinės komponentės trūkumo bei mažėjančios žalios komponentės didėjant SKSK. Paskutinės 4 paletės spalviai nepriklauso nuo spalvinės kokybės, nes naudojama ta pati mėlyna komponentė tiek RGN, tiek pcAGN telkiniui, o rausvi tonai apšviečiami konversijos fosfore

gintariniu bei raudonu LED ir to pakanka atskirti jų spalvius. Purpuriniai atspalviai yra tiksliausiai rikiuojami ir išskiriasi visiems apšvietos lygiams ir spalvinėms kokybėms. Taigi, pagrindinis bandinėlių rikiavimo klaidų didėjimas pagrįstas prastėjančiu gebėjimu skirti spalvas žemose apšvietoje bei spektrinių komponentių trūkumu SPD.

Atlikus kartotinių matavimų ANOVA analizę su Greenhouse-Geisser korekcija, matome, kad TES yra statistiškai patikimai besiskiriantis skirtingoms SKSK vertėms ($F(2,024, 8.096) = 37.907, p < 0.001$) bei apšvietos lygiams ($F(1,051, 4.206) = 20.264, p = 0.009$). Tokiu atveju galima išvesti funkcinę priklausomybę pritaikius regresinę analizę, kuri apibrėžtų tarpines TES vertes. Gauta netiesinė regresija su $r^2 = 0,376$ ($F(2, 322) = 97.207, p < 0.001$). TES lygtis :

$$TES = 11,72 + 36,16/L + 32,71 * \sigma \quad (1.4)$$

Čia L – skaisčio vertė cd/m^2 , o σ – SKSK. Abu kintamieji statistiškai reikšmingai prisidėjo prie prognozės su $p < 0,05$. Ši funkcija leidžia įvertinti galimas TES vertes kitoms SKSK ir skirtingiems apšvietos lygiams.

1. 4. Pirmojo skyriaus išvados

Aukštos spalvinės kokybės lauko apšvietimo CCT derinimo eksperimentas parodė, kad didėjant apšvietos lygiui, pasirenkama aukštesnė maloniausia CCT. Šios vertės kokybiškai sutampa su Kruithofo hipoteze, tačiau yra didesnės: $3000 \pm 200 \text{ K}$ ir $3500 \pm 250 \text{ K}$ atitinkamai esant 5 lx ir 50 lx apšvietomis. Vertės iš esmės nepriklausė nuo apšviečiamos aplinkos. Pastovaus cirkadinio poveikio režime su 50 cirk. lx maloniausia CCT išlaikoma tokia pati kaip ir 50 lx , tačiau žemesnėje apšvietoje prioritetu tampa didesnė apšvieta su žemesne CCT.

Inkaro efekto tyrimas laboratorinėmis sąlygomis parodė, kad tarp 2100 K ir 10000 K CCT verčių, pasirenkamos maloniausios CCT vidurkio intervalas siekia nuo 2700 K iki 4200 K ir į tai reikia atsižvelgti planuojant CCT derinimo eksperimentus.

FM100 testo TES rodo, kad didėjantys apšvietimo spalvų gamos rodikliai atitinka didėjančias spalvių rikiavimo klaidas. Klaidų skaičius pagal spalvinius bandinėlius priklauso nuo SPD komponentių stygiaus, o TES esant natūraliam apšvietimui, mažėjant apšvietai, atitinka spalvų skyrimo prastėjimą mezopinėje srityje. Taip pat žemos apšvietos sąlygomis ($3,3 \text{ lx} - 0,5 \text{ c/m}^2$) mezopinėje srityje spalvas blukinant, tikslus ir pirmenybinis apšvietimų lemiamas TES statistiškai patikimai nesiskiria, todėl aukštos spalvinės kokybės apšvietimo naudojimas neturi prasmės.

2. Metamerinių šviesos šaltinių tyrimas

Šviesos šaltiniai su skirtingais spektrinės galios skirstiniais priskiriami metameriniais šaltiniams, kai jų spalvos yra identiškos. Tyrimų ir literatūros analizės metu pastebėta, kad tyrimo dalyviams skiriasi metamerinių šaltinių spalvis ir nėra aptartas jo suliginimo metodas. Šiame skyriuje aprašomas 10 laipsnių regėjimo laukui daugiaspalvių kietakūnių metamerinių šviesos šaltinių spalvio suliginimas derinant vieną iš gretimų šviestuvų. Šis eksperimentas atliktas remiantis tyrimo dalyvių atsiliepimais iš 1 skyriaus trečiojo eksperimento, kuomet teoriškai vienodo spalvio šaltiniai nebuvo suvokiami kaip vienspalviai. Tyrimų rezultatai publikuoti P6, C11, C14.

2. 1. Literatūros apžvalga

Pažangūs šviesos šaltiniai leidžia tolygiai keisti spektrinės galios skirstinius ir išnaudoti metamerinių šviesos šaltinių dinaminę spalvinę kokybę [P1]. Tačiau susiduriama su problema, kuomet teoriškai metameriniai šviesos šaltiniai turi nevienodą suvokiamą spalvą [58, 59, 41]. Metameriniais šviesos šaltiniams aprašyti ir įvertinti naudojamos 2 laipsnių standartinio fotometrinio stebėtojo modelis, pristatytas 1931 metais tarptautinės apšvietimo komisijos [60]. Vėliau modelis papildytas 10 laipsnių standartiniu fotometriniu stebėtoju [61] bei pristatytos platesnio kampo regos funkcijos [62]. Yra teigiama, kad 95 % žmonių spalvinė rega aprašoma tiksliai su 2 laipsnių ir 10 laipsnių funkcijomis [63], tačiau egzistuoja eilė vizualinių ir spalvinių parametru, neįtrauktų į šį standartinio fotometrinio stebėtojo modelį. Lytis, nėštumas, amžius, nuovargis, aplinkos temperatūra, spalvinės regos defektai, oftalmologinės ir kitos ligos, stebimo objekto fono spalva, skaistis ir daugelis kitų parametru lemia spalvinę regą ir jos nuokrypius nuo standartinio fotometrinio stebėtojo regos modelio. Pavyzdžiui, kur yra nukreiptas žvilgsnis lemia, kokia spalva suvokiamas apšviečiamas taškinis objektas, jei žvelgiama į jį ar šalia jo [64]. Taip pat buvo rasta, kad egzistuoja grupės žmonių, su skirtingomis spalvų atitikties funkcijomis (CMF), kurios svarbios tiek spalvų suvokimui, tiek pramoniniams taikymams [65]. Tokie žmonės vadinami metamerikais. Be metamerinių šviesos šaltinių ir metamerikų, galimas ir apšviečiamų objektų metamerizmas, kuris gamtoje labai retai pasitaiko [66]. Priešingai nei metameriniai šviesos šaltiniai, kurie yra vienodos spalvos, metamerinių objektų ir metamerikų apibūdinimas skiriasi tuo, kad objektai

atrodo kitaip esant skirtingiems apšvietimams, o metamerikai mato skirtingas to pačio objekto spalvas.

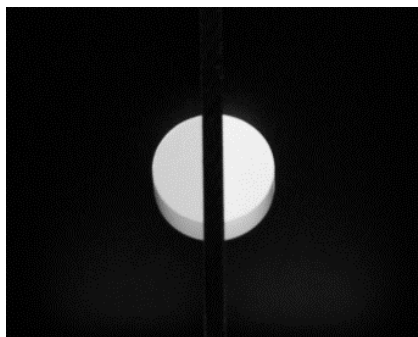
Thorntonas parodė, kad nei 2, nei 10 laipsnių CMF netiksliai įvertina metamerinius šaltinius [67]. Pagrindinis CMF trūkumas – jos sukurtos remiantis palyginamuoju monochrominių šaltinių matavimu ir naudojamas Abnėjaus dėsnis, kuris nusako spalvinių komponentų sudėtiniam spektre sudėjimą tiesiškai. Dėl netiesinės regos savybių atsiranda galimybė sukurti kitus dėsnius, kaip Kruithofo hipotezė iš ankstesnio skyriaus. Nepaisant 2 laipsnių CMF neatitikimo realiai situacijai, didžioji dalis apšvietimo profesionalų bei mokslininkų taiko pastarąsias CMF. Nors 2 ir 10 laipsnių CMF buvo atnaujintos 2006 metais [60], vis dar plačiai naudojamos senosios. Be to, spalvių skirtumai aprašomi plotu užsibrėžtoje spalvių erdvėje – elipsėmis, kurioje esančių spalvių didžioji dalis populiacijos neskiria [68, 69, 30]. Dažniausiai naudojamos MacAdam'o elipsės [30], kurios gali būti aprašomos bet kuriam spalvių erdvės taškui geodeziniu būdu [70]. Tuo tarpu įvertinus galimą metamerikų CMF Monte Carlo būdu, nustatyta, kad jų suvokiamos spalvių pokytis (Δa^* , Δb^*) CIELAB erdvėje gali siekti iki 10 Δa^* [71], kuris yra didesnis nei 10 žingsnių MacAdamo elipsė. Todėl galime spręsti, kad subjektyvaus spalvių sulyginimo eksperimento metu, turėsime platų duomenų skirstinį.

2. 2. Metamerinių šviesos šaltinių spalvio sulyginimo eksperimentas ir naudota įranga

Metamerinių šaltinių spalvių sulyginimui atlikti du eksperimentai. Pirmojo metu atliekamas tik apšvietimo derinimas išilgai izotemperatūrinės tiesės (D_{uv}) be galimybės keisti CCT. Antrasis eksperimentas leidžia keisti abu parametrus. Pirmasis eksperimentas atliktas tikintis, kad pakaks tik D_{uv} derinimo, norint sulyginti pcAGN ir RGN šviesos šaltinių spalvius. Šį eksperimentą atliko 2 patikrintos spalvinės regos tyrimo dalyviai (28 metų vyras ir 21 metų moteris). Šie dalyviai dalyvavo visuose ankstesniuose psichofizikiniuose tyrimuose ir pasirašė sutikimą dalyvauti eksperimente laisva valia. Tokia maža imtis grindžiama tuo, kad ilgai trunkančius eksperimentus atlieka tik ribotas dalyvių skaičius. Panašus dalyvių skaičius buvo Kruithofo ar MacAdamo eksperimentuose. Jų rezultatais dabar yra paremta fotometrija ir apšvietimo vertinimas. Antrojo eksperimento metu imtis buvo praplėsta iki 20 tyrimo dalyvių – 13 vyrų ir 7 moteris, kurių vidutinis amžius 28 metai. Jie atrinkti patogios netikimybinės atrankos būdu

tarp Vilniaus universiteto darbuotojų. Visi tyrimo dalyviai dalyvavo laisva valia bei buvo patikrinti su Ishihara spalvų testu, siekiant nustatyti spalvų skyrimo anomalijas, tačiau jų nepastebėta.

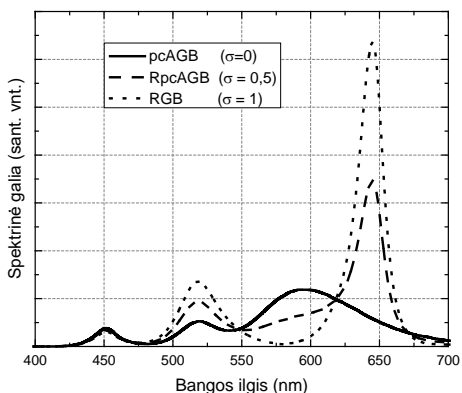
Šiems eksperimentams atlikti sukonstruotas apšvietimo stendas su 10 x 10 cm dydžio juodo matinio polivilinchlorido sienelėmis. Dėžutės centre įmontuota 3 mm plokštė atliko apšvietimo spektrinės galios skirstinių atskyrimo funkciją (2.1 pav.). Skiriančioje plokštėje palikta



2.1 pav. Eksperimentinio stendo matymo laukas su baltu atspindžio etalonu centre. 10 × 10 cm dėžutė perskirta juoda 3 mm plokštė spektrinės galios skirstiniams atskirti.

anga sumontuoti balto atspindžio 32 mm diametro cilindrinį etaloną, pagamintą iš chloropolimerinės medžiagos – Spektralono® [72]. Bandinys apšviestas viršuje atskirtais nepriklausomai derinamais RpcAGN šaltiniais su 300 lx apšvieta ant dėžės pagrindo. Tyrimo dalyviai sėdėjo taip, kad jų akių atstumas nuo bandinio būtų 18 cm ir atitiktų 10 laipsnių standartinio fotometrinių stebėtojų lauką 32 mm bandiniui. Galvos padėtis šiuo metu nebuvo fiksuojama. Toks stabėjimo atstumas leidžia pritaikyti 10 laipsnių fotometrinių stebėjimo spalvų atitikties funkcijas, kurios realiau atitinka bendrojo apšvietimo sąlygas. Eksperimentas atliktas tamsiame kambaryje be papildomos šviesos, krintančios į eksperimentinį standą. Naudoti tokie patys šviestuvai, kaip ir pirmojo skyriaus 2 bei 3 eksperimentams.

Esminis skirtumas – šviestuvai sukalibruoti pagal 10 laipsnių fotometrinių stebėjimo spalvų atitikties funkcijas [61] esant 3000 K CCT. Spektrinės galios skirstiniai esant SKSK (σ) = 0 (pcAGN), 0,5 (RpcAGN) ir 1 (RGN) pavaizduoti 2.2 pav. Šviestuvai sukalibruoti naudojant Illumia Pro® sistemą



2.2 pav. Metamerinių RpcAGN šaltinių 10 laipsnių standartiniam fotometriniams stebėtojui spektrinės galios skirstiniai esant 3000 K CCT.

ir kalibracija patikrinta su Avantes AvaSpec-ULS2048x64TEC spektrometru eksperimentiniame stende. Taip pat pakeista šviestuvų valdymo programa pagal 1 skyriaus 2 eksperimento pavyzdį, kuomet įtrauktas šviestuvo valdymas išilgai izotemperatūrinės tiesės tiek fiksuota CCT. Valdymas atliekamas keičiant du parametrus: CCT ir D_{uv} . D_{uv} atitinka nuokrypį nuo Planko lanko CIELUV spalvių diagramoje pagal formulę:

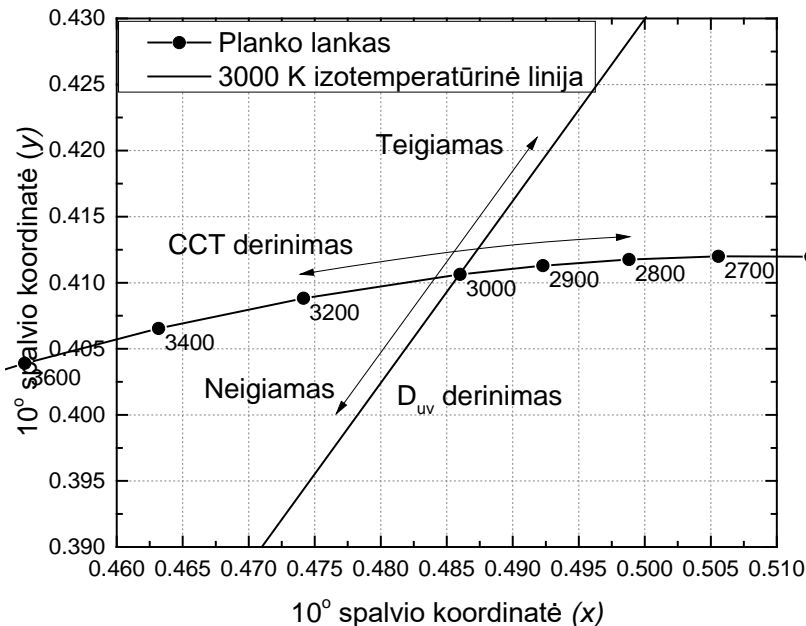
$$D_{uv} = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2} \quad (2.1)$$

kur u_0 ir v_0 yra žinomos CCT spalvio koordinatės CIELUV erdvėje, o u ir v - testuojami šviesos šaltinio spalvio koordinatės. u ir v randamos iš x ir y spalvio koordinatinių pagal šias lygtis:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (2.2)$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}$$

Šviestuvo valdymas atliekamas derinant apšvietimą su valdymo pultu. Pulto svirties palenkimas į atitinkamą kryptį keičė apšvietimo parametrus išlaikant pastovų šviesinį srautą (2.3 pav.). CCT žingsnis ~10 K, D_{uv} ~0,0008.



2.3 pav. Apšvietimo valdymo metodas išilgai Planko lanko (CCT derinimas) ir išilgai 3000 K izotemperatūrinės tiesės (D_{uv} parametras).

Be to, eliminuojant konfigūracijos poslinkius, buvo keičiama šviestuvų padėtis (kairė ir dešinė pusės), keičiami SPD (RGN, RpcAGN ir pcAGN) ir tyrimo dalyvio atidengta akis (kairė ir dešinė). Vienas šviestuvus turėjo fiksuotą SPD su nustatyta SKSK verte 0, 0,5 ir 1. Kitas derinamas šviestuvus turėjo 11 pradinių SKSK (nuo 0 iki 1 kas 0,1, pateikiamų atsitiktine tvarka) kiekvienai fiksuoto šviestuvo SKSK vertei. Viso abu tyrimo dalyviai atliko 792 šviestuvo derinimo veiksmus. Eksperimento eiga susideda iš kelių etapų: uždengiama viena akis ir atsidedama taip, kad atidengta akis tiesiai stebi apšviečiamą bandinį; 5 minučių adaptacija; vyksta apšvietimo derinimas keičiant fiksuoto šviestuvo SKSK (trys vertės) ir derinamo šviestuvo SKSK (11 verčių); keičiami derinami šviestuvai programiškai (fiksuotas šviestuvus tampa derinamu ir atvirkščiai); 5 minučių adaptacija ir atliekamas koks pat derinimas; keičiama šviestuvų fizinė pozicija; adaptacija ir derinimas; keičiami derinami šviestuvai programiškai; 5 minučių adaptacija ir derinimas. Atidengtos akies keitimas atliekamas po kiekvieno derinimo tai pačiai eksperimento konfigūracijai. Testai atlikti iki 30 minučių su pertraukomis tarp jų bei skirtingomis dienomis, siekiant išvengti nuovargio. Akyje ir visoje regos sistemoje vyksta greitas metabolizmas, todėl nuovargis ir energijos stoka lemia prastas regos savybes [73].

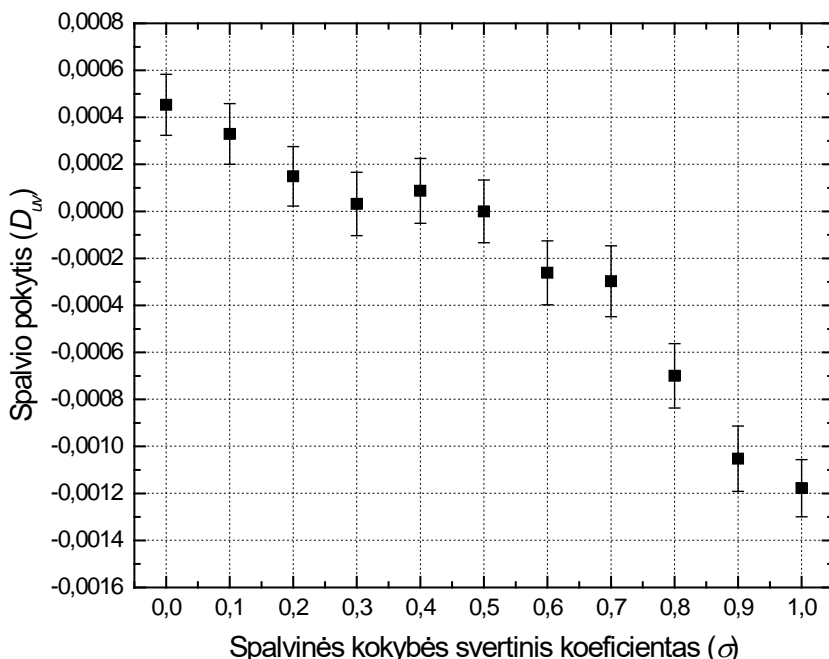
Antrojo eksperimento metu šviestuvo derinimas papildytas CCT valdymu. Eksperimento eiga sutrumpinta padidinus imtį (SKSK verčių keitimo atsisakyta ir vienas šviestuvus kairėje su pcAGN SPD paliktas derinimui, o dešinėje esantis šviestuvus su RGN nustatytas į 2 laipsnių fotometrinio stebėjimo ~3000 K SPD. Pradiniai pcAGN SPD parametrai buvo atsitiktine tvarka nustatomi į spalvio tašką, artimą ~3000 K RGN spalviui. Į šviestuvų padėties ar derinamo apšvietimo pusės kuriamus konfigūracinius poslinkius neatsižvelgta ir naudota binokuliarinė rega.

Pirmojo eksperimento rezultatai sunormuoti pagal fiksuoto šviestuvo $\sigma = 0,5$, kad atitinka vidutinį spalvinės kokybės valdymo tašką. Tuomet spalvio pasirinkimai suvidurkinti ir paskaičiuotas 95 proc. pasikliovimo intervalas kiekvienai derinamo šviestuvo σ vertei. Akių, šviestuvo padėčių ir šviestuvų kalibracijos lemiami skirtumai paskaičiuoti atskirai prieš abiejų tyrimo dalyvių pasirinkimų vidurkinimą. Antrojo eksperimento metu pasirinkti spektrinės galios skirstinių spalvis atvaizduotas CIEXYZ spalvių erdvėje, perskaičiuojant pagal 10 ir 2 laipsnių spalvų atitikmens funkcijas. Vidutinis nuokrypis nuo pradinio taško įvertintas pasitelkus D_{uv} vertę.

2. 3. Spalvių sulyginimo eksperimento rezultatai

Pirmojo eksperimento rezultatai rodo (2.4 pav.), kad centrinio $\sigma = 0,5$ taško atžvilgiu spalvas blukinantis apšvietimas (pcAGN) suvokiamas kaip per rausvas, todėl jo spalvis nutolęs į žalių spalvinių tonų pusę. Tuo tarpu su spalvas sodrinančiu apšvietimu (RGN) pasielgta priešingai, o jo spalvis atrodė žalsvas. Tai priklauso nuo tyrimo dalyvių, kaip nestandartinių fotometrinių stebėtojų savybių.

Stendo, šviestuvų ir akių lemiami kofigūraciniai poslinkiai pašalinti iš bendrų rezultatų. Gauta, kad akių (vyriui - $\Delta D_{uv}=0,0002$ ir moteriai - $\Delta D_{uv}=0,001$), šviestuvų ($\Delta D_{uv}=0,0003$) bei stendo ($\Delta D_{uv}=0,0003$) poslinkis nesiekė net pusę minimalaus valdymo žingsnio, kurį sudarė $\Delta D_{uv}=0,0008$ kai MacAdamo elipsės dydis siekia 0,0025 izotemperatūrinės tiesės kryptimi. Teoriškai vienos MacAdamo elipsės ribose 99 procentai populiacijos neturėtų pastebėti spalvių skirtumo. Nepaisant to, abu tyrimo dalyviai teigė, kad šio šviestuvo valdymo pagal izotemperatūrinę tiesę nepakako suderinti spalvius, todėl buvo atliktas antrasis eksperimentas.



2.4 pav. Metamerinių 10 laipsnių standartiniame fotometriniame stebėtojų RpcAGN šviesos šaltinių spalvių sulyginimo rezultatai kintant apšvietimo spalvinei kokybei (σ). Rezultatai sunormuoti pagal $\sigma = 0,5$.

Prieš atliekant antrąjį eksperimentą įvertintas 10 ir 2 laipsnių standartinių fotometrinių stebėtojų suvokiamų šviesos šaltinių LER palyginimas (2.1 lentelė). Čia pastebime, kad mažiausias suvokiamo šviesinio srauto skirtumas yra tarp plačiajuosčių šviesos šaltinių su fosforų spinduoliais. Tuo tarpu trumpėjant bangos ilgiui, suvokiamas šviesinis srautas auga 10 laipsnių standartiniam fotometriniam stebėtojui. Yra nustatyta, kad regos laukui didėjant iki 20 laipsnių, vis dar pastebimas suvokiamo šviesinio srauto didėjimas [62, 7]. Deja, šios plataus kampo funkcijos nėra taikomos plačiaja prasme ir galėtų įnešti fotometrinių dydžių vertinimo sumaištį prekinėje aplinkoje. Vien pritaikius 10 laipsnių funkcijas, 6500 K baltas LED turi 12 % didesnę spindulinį srautą. Šis srautų pokytis yra esminis spalvų maišyme, nes nežymus vienos spalvos srauto pokytis gali lemti stiprų sumaišytos šviesos šaltinio spalvio pokytį. Atlikę eksperimentus tyrimo dalyviai galėjo didesniu atstumu pažvelgti į apšvietimo stendą ir informavo, kad mato visai kitas spalvius nei eksperimento metu. Tai susiję su kintančiomis standartinio fotometrinio stebėtojo funkcijomis kintant stebėjimo laukui.

2.1 lentelė. Šviesos veiksmingumo tarp 10 ir 2 laipsnių standartinių fotometrinių stebėtojų palyginimas skirtingiems šviesos diodams

LED	$LER_{10^\circ}/LER_{2^\circ}$	LED	$LER_{10^\circ}/LER_{2^\circ}$
Gilus mėlynas (451 nm)	2,09	Oranžinis (624 nm)	1,05
Mėlynas (470 nm)	1,71	Raudonas (638 nm)	1,05
Žydras (505 nm)	1,20	Baltas 2700 K	1,04
Baltas 6300 K	1,12	Baltas 2000 K	1,04
Žalias (518 nm)	1,08	Gintarinis (600 nm)	1,03
Baltas 3000 K	1,07	Konversijos fosfore gelsvai žalsvos spalvos	1,03
Baltas 5300 K	1,05	Konversijos fosfore gintarinis	1,02
Baltas 3800 K	1,05		

2.2 lentelė. 3000 K metametrinių šaltinių 10 laipsnių standartiniam fotometriniam stebėtoji fotometrinių ir kolorimetrinių parametrai.

10 laipsnių standartinio fotometrinių stebėtojo šviesos šaltinis	CIE x^*	CIE y^*	CCT* (K)	D_{uv}^*	dStep**	CRI*	CQS Q_f^*	CQS Q_g^*
pcAGN ($\sigma = 0$)	0,478	0,417	2511	0,0012	1,4	70	75	84
RpcAGN ($\sigma = 0,22$)	0,482	0,413	2440	-0,0004	0,5	94	88	98
RpcAGN ($\sigma = 0,5$)	0,486	0,408	2350	-0,0024	2,9	61	65	111
RGN ($\sigma = 1$)	0,494	0,398	2201	-0,0056	6,8	-5	21	122
	GAI*	CFI*	CSI*	CDI*	R_f^*	R_g^*	LER* (lm/W)	
pcAGN ($\sigma = 0$)	39	31	0	55	75	93	348	
RpcAGN ($\sigma = 0,22$)	46	83	5	3	90	104	303	
RpcAGN ($\sigma = 0,5$)	51	19	70	1	70	113	257	
RGN ($\sigma = 1$)	53	5	85	1	30	117	203	

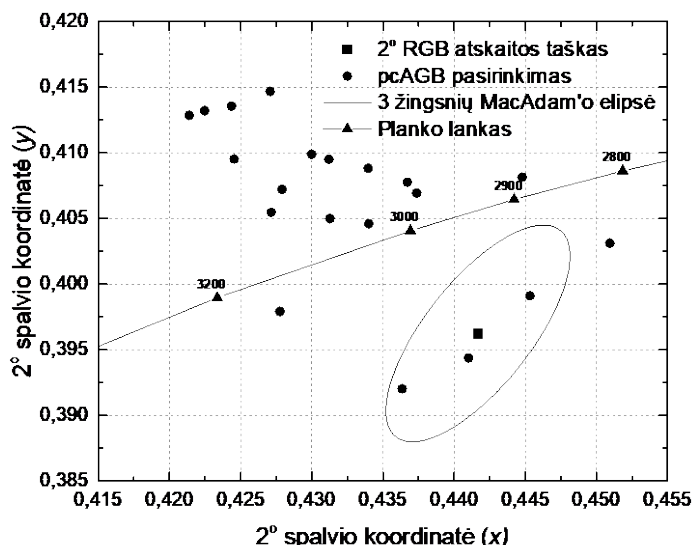
* - parametrai įvertinti naudojant CIE 1931 spalvių erdvę su 2 laipsnių standartiniu fotometriniu stebėtoju

** - atstumas nuo Planko lanko MacAdamo elipsės žingsniais.

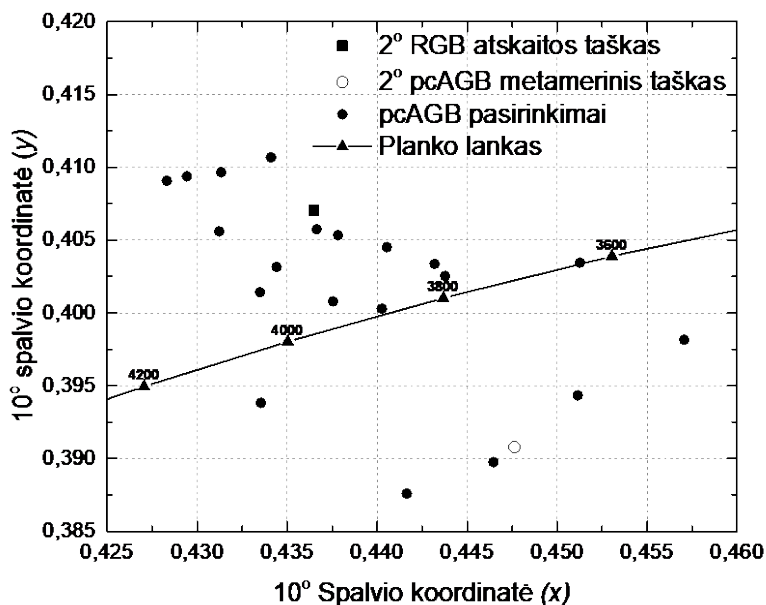
Įvertinus eksperimente naudoto šviestuvo fotometrinius ir kolorimetrinius parametrus (2.2 lentelė), galime teigti, kad metameriniai šaltiniai 10 laipsnių standartiniam fotometriniam stebėtoji yra visiškai skirtingo spalvio šviesos šaltiniai 2 laipsnių standartiniam fotometriniam stebėtoji. Kintant SKSK nuo 0 iki 1, $\Delta CCT = 310$ K, o D_{uv} pokytis rodo, kad pcAGN suvokiamas kaip gelsvai žalsvas, o RGN kaip rausvas. Spalvinės kokybės rodikliai rodo, kad blukinančio (pcAGN) ir sodrinančio (RGN) apšvietimas nepakito, nes naudojama spalvinė adaptacija ir nežymus nuokrypis nuo Planko lanko (dStep) yra kompensuojamas. Taip pat nuokrypis tarp SKSK 0 ir 0,5 yra mažiau pastebimas negu tarp SKSK 0,5 ir 1 vertinant spalvinę kokybę. Šią tendenciją matome ir pirmojo eksperimento pasirinkimuose (2.4 pav.). Tai lemia nuokrypį nuo natūralios baltos šviesos, kuomet pcAGN spalvinė kokybė yra artimesnė nei RGN šaltinio.

Antrojo eksperimento spalvių sulyginimo rezultatai pateikti 2.5 ir 2.6 pav. 10 laipsnių stebėjimo lauko pasirinkimus įvertinus su 2 laipsnių standartinio fotometrinių stebėtojų funkcijomis, matome, kad didžioji dalis tyrimo dalyvių pasirinko žalsvesnio atspalvio pcAGN apšvietimą. Tuo tarpu rezultatai su 10 laipsnių fotometrinių stebėtojų funkcijomis rodo, kad spalvio pasirinkimas tiksliau atitinka RGN šaltinio tašką. Įvertinus vidutinį rezultatų nuokrypį nuo RGN atskaitos taško, matome, kad D_{uv} lygus $0,0082 \pm 0,0027$ ir $0,011 \pm 0,0025$ atitinkamai 10 laipsnių ir 2 laipsnių standartinių fotometrinių stebėtojų funkcijoms. Šie nuokrypiai statistškai patikimai nesiskiria ($p = 0,0096$), bet parodo, kad 10 laipsnių fotometrija tiksliau aprašo spalvių skirtumus. Rezultatų sklaida rodo, kad reikia atsižvelgti ne tik į fotometrines funkcijas, bet ir žmonių, kaip skirtingų metameriškų, grupes [65].

Šie eksperimentai atlikti su jaunais tyrimo dalyviais, kurių spalvinė rega yra viena geriausių per visą žmogaus gyvenimą [43], todėl nėra atsižvelgta į akies lęšiuko pralaidumo kitimą senstant žmogui [74]. Tyrimo dalyvių spalvinės regos skirtumai ir neatitikimas teorinėms vertėms rodo, kad naudojamos standartinio fotometrinių stebėtojų funkcijos nepakankamos aprašyti metameriniams šviesos šaltiniams. Šios problemos sprendimas yra individualiai valdomas kietakūnis apšvietimas, kurio SPD galima paderinti priklausomai nuo norimo taikymo.



2.5 pav. Spalvių sulyginimo eksperimento rezultatai 1931 CIEXYZ spalvių erdvėje. RGN atskaitos taškas pavaizduotas juodu kvadratu, pcAGN pasirinkimai – juodi apskritimai. 3 žingsnių MacAdamo elipsė žymi teorinę spalvių diskriminacijos ribą.



2.6 pav. Spalvių sulyginimo eksperimento rezultatai perskaičiuoti su 10 laipsnių standartinio fotometrino stebėtojo funkcijomis. Juodas kvadratas žymi RGN atskaitos tašką, juodi apskritimai – pcAGN pasirinkimai. Baltas apskritimas žymi teorinį metamerinį pcAGN tašką RGN šaltiniui.

2. 4. Antrojo skyriaus išvados

Metamerinių šviesos šaltinių subjektyvus vertinimas priklauso nuo tyrimo dalyvio, kaip metameriko, spalvinės regos savybių. Lyginant tos pačios spalvinės temperatūros metamerinius baltos šviesos šaltinius, jų derinimo išilgai izotemperatūrinės tiesės neužtenka spalvio sulyginimui tarp pcAGN ir RGN šaltinių. Šaltiniai, su didele raudona spektrine komponente yra subjektyviai labiau atskiriami nuo natūralaus apšvietimo nei šaltiniai su maža raudona komponente. 10 laipsnių regėjimo lauke esančių metamerinių objektų spalvio sulyginimui aprašyti tiksliai netinka nei 10, nei 2 laipsnių fotometrino stebėjimo funkcijos, todėl universalus metamerinio šaltinio naudojime reikia į tai atsižvelgti dėl pastebimo spalvių skirtumo.

3. Daugiaspalvio šviesos šaltinio spalvų atgavos inžinerija į žmogų orientuotam apšvietimui

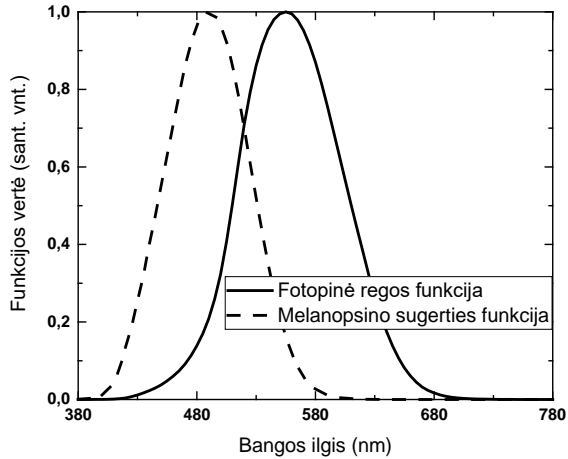
Vystantis kietakūnio apšvietimo technologijai ir plečiantis taikymų sričiai, keliami vis daugiau reikalavimų, kuriuos turi tenkinti apšvietimas. Teoriniai modeliai ir optimizavimas leidžia įvertinti aibę kietakūnių šviesos šaltinių, tačiau praktinių sistemų kūrimas su turimais technologiniais sprendimais yra ribotas. Šiame skyriuje aptariama praktinė daugiaspalvė kietakūnė apšvietimo sistema, skirta į žmogų orientuotam apšvietimui. Pademonstruota penkiaspalvė RGB+W+W sistema su valdoma susietąja spalvine temperatūra, spalvine kokybe ir cirkadiniu poveikiu bei galimybe atkurti pirmenybinį apšvietimą. Rezultatai panaudoti pirmenybinio apšvietimo patente [P5].

3. 1. Literatūros apžvalga

Šviesos šaltinių parinkimas ilgą laiką buvo nukreiptas į aukštos spalvinės kokybės šaltinius [75] arba žmogui patraukliausią pirmenybinį apšvietimą [76]. Kita apšvietimo tyrimų kryptis susieta su SPD derinimu dinaminėse sistemose [77, 78, 79] siekiant kuo aukštesnio CRI esant užsibrėžtomis CCT. Sparti kietakūnio apšvietimo raida per paskutinius du dešimtmečius leido sukurti derinamos spalvinės kokybės šaltinius, kurie leidžia valdyti nuokrypį nuo baltos šviesos [80], [P3]. Tobulėjant kietakūnio apšvietimo technologijai, sudėtingėja ir LED šaltinių apšvietimui keliami reikalavimai. Turint pažangią statistinę spalvų atgavos metriką [3], galima sumodeliuoti LED šaltinius, kurie atitiktų didžiausią galimą spalvų blukinimą [81], spalvų sodrinimą [82] ar spalvinę kokybę [83]. Taip pat galima parodyti, kad natūralus apšvietimas su aukštu CRI nėra pats patraukliausias žmonėms [P1], [17]. Nustatyta, kad žmonėms labiausiai patinka apšvietimas su nežymiai padidintu sodriu žaliaje bei raudonoje srityje. Raudonos spalvos netgi yra svarbesnės nei žalios. Būtent siauras LED SPD leidžia atlikti spalvų atgavos valdymą tinkamai parenkant pradinis šaltinius. Tuo tarpu natūralaus apšvietimo kūrimas daro įtaką kompleksiniams šviesos šaltiniams, kuriuos sudaro daugiau nei 5 pradiniai LED su skirtingu SPD [39]. Tokių šaltinių kūrimas yra komplikuoatas dėl LED SPD maišymo, kalibravimo ir ribotų prekinų LED modelių praktinėms sistemoms.

Šio amžiaus pradžioje nustačius, kad žmogaus akis reaguoja į šviesą ir per nevizualinę sistemą [84, 46, 4], prasidėjo aktyvūs nevizualinės sistemos tyrimai. Buvo ir vis dar yra siekiama nustatyti, kaip šviesa veikia žmogaus ir

kitų organizmų cirkadinę sistemą – biologinį laikrodį [85, 86, 87]. Tyrimų metu nustatyta, kad mėlyna šviesa slopina melatonino išskyrimą. Melatoninas yra vienas stipriausių hormonų su antioksidacinėmis savybėmis bei kartu su kortizoliu lemiantis miego/budrumo ciklą. Žmogaus cirkadinė sistema yra sudėtinga: mėlyna šviesa



3.1 pav. Melanopsino sugerties funkcija [47] (punktyrinė linija) ir fotopinės regos (ištisa linija) funkcijos.

suaktyvina nevizualinės sistemos šviesai jautrias tinklainės ganglines ląsteles (pRGCs), kurios turi fotopigmento melanopsino, signalas optiniu nervu keliauja į tarpinį šoninį kelinį branduolį tarpinėse smegenyse per suprachiasmatinį branduolį. Iš jo signalas keliauja į kankorėžinę liauką per viršutinį kaklo nervinį mazgą. Kankorėžinėje liaukoje vyksta melatonino išskyrimas. Melatoninas gaminamas iš serotonino, o jų balansas valdo žmogaus paros laikrodį. Kadangi žmogaus nervinė sistema yra labai sudėtinga, pats cirkadinis šviesos poveikis vertintas pagal melatonino koncentraciją priklausomai nuo šviesos ir tokiu būdu sukurta Gall funkcija su ~480 nm maksimaliu jautriu [45]. Ši funkcija naudota 1 skyriaus pirmame eksperimente. Vėliau ji buvo patikslinta [88], tačiau iškelta teorija, kad cirkadinė sistema yra susieta ir su spalviniais regos receptoriais ir jos atsako funkcija į šviesą turi neigiamų verčių geltonoje srityje [89]. Galiausiai sutarta, kad pats cirkadinės sistemos atsakas į šviesą nėra tiksliai ištirtas ir negalima kokybiškai apskaičiuoti šviesos poveikį [47]. Nustatyta, kad mėlyna šviesa (~480 nm) ir jos kiekis stipriai slopina melatonino išskyrimą lyginant su kitų bangos ilgių šviesa, bet visuotinai priimto metodo įvertinti cirkadinį poveikį nėra. Pasiūlytas cirkadinio poveikio vertinimo metodas su melanopsino jautrio funkcija (3.1 pav.), kurio vertes galima sunormuoti pagal etaloninio A šviesmens cirkadinį poveikį:

$$C_p = \int S_T(\lambda)S_M(\lambda)d\lambda / \int S_A(\lambda)S_M(\lambda)d\lambda \quad (3.1)$$

Čia $S_T(\lambda)$ – testuojamas SPD, $S_M(\lambda)$ – melatonino jautrio funkcija ir $S_A(\lambda)$ – etaloninio A šviesmens esant 2856 K SPD. $S_T(\lambda)$ ir $S_A(\lambda)$ normuoti pagal šviesinį srautą. C_p toliau bus vadinamas cirkadiniu poveikiu. C_p vertė 1 atitinka tokio pačio šviesinio srauto A šviesmens cirkadinį poveikį. Šis apšvietimo cirkadinis vertinimas naudojamas pastatų WELL standarto apšvietimo skiltyje [90]. Įvesti cirkadinio poveikio vertinimo metodai tik apibūdinam šviesos šaltinio parametrus, todėl yra įvestas patikslinimas, kokio cirkadinio poveikio reikia. 2011 metais Langas [74] parodė, kad efektyviam cirkadinės sistemos stimuliavimui slopinant melatonino gamybą reikia aukšto cirkadinio poveikio su stipria mėlyna spektrine komponente apšvietimo ryte, patenkančio vertikaliai 0–45 laipsnių kampu į akis, o vakare – pažeme esančio apšvietimo su maža mėlyna spektrine komponente.

Iki rekomenduojamos melanopsino funkcijos buvo naudojamas skotopinės/fotopinės regos šviesos veiksmingumų santykis (S/P). Skotopinė rega yra nespalvinė rega labai žemo skaisčio sąlygomis ($<0,01 \text{ cd/m}^2$), kurią lemia tinklainės lazdelės su jautrio smaile 505 nm. Vėliau įvestas cirkadinio poveikio faktorius (CAF) [38], cirkadinės šviesos (CL_A) ir cirkadinio stimulo (CS) rodikliai [89], tačiau nė vienas nepripažintas pagrindiniu įverčiu žmogaus cirkadinės sistemos atsakui į šviesą vertinti. Todėl šiame į žmogų orientuotos praktinės sistemos modeliavime naudosime cirkadinio poveikio apibūdinimą naudojant melanopsino jautrio funkciją.

Kuriant dinamines apšvietimo sistemas svarbu tenkinti daugybę parametrų. Aptartas cirkadinis poveikis turi būti kuo didesnis aukštesnėse CCT ir kuo žemesnis žemose CCT. Valdoma apšvietimo spalvinė kokybė privalo tenkinti visas tris sąlygas: blukinti, sodrinti ir natūraliai perteikti spalvas. Natūralaus apšvietimo šaltinis laikomas tokiu, kurio CRI > 95 esant visoms CCT. Tai pasiekama tik su metamerinėmis apšvietimo sistemomis sudarytomis iš kelių spalvų. Minimalus nepriklausomų spalvų kiekis minėtame šaltinyje turi būti 4, kad tenkintų anksčiau išvardintas sąlygas su konversijos fosfore LED [91]. Pastarasis darbas parodo, kad reikia unikalių LED ir fosforų, kurie leistų praktinių sistemų sukūrimą, tačiau pademonstruota tik laboratorinio apšvietimo koncepcija.

Didžioji dalis prekių šviesos šaltinių (LED, kompaktinės fluorescencinės lempos, metalų halogenidų su CRI < 80) pasižymi maža perteikiama spalvų gama ir prasta spalvine kokybe, todėl priskiriami spalvas blukinantiesiems šaltiniams. Šiuo metu plačiai taikomos RGB apšvietimo sistemos yra sodrinančio apšvietimo pavyzdys. Maišant šių blukinančių ir sodrinančių

šaltinių spalvines komponentes, galime gauti RGB+W sistemą apšvietimo taikymams [92] bei šį keturspalvį spalvų telkinį pritaikyti televizorių ir telefonų ekranams [93, 94, 95, 96]. Panaši keturspalvė sistema su aukštos spalvinės kokybės W esant 4000 K, ~460 nm B, ~528 nm G ir ~660 nm D sumodeliuota saulės cirkadiniam poveikiui ir CCT kitimui paros metu atkartoti [97]. Tyrime nepateiktas apšvietimo spalvinės kokybės įvertinimas ir CCT derinimo intervalas yra nuo 4000 K iki 6500 K. Pirmenybiniam apšvietimui, kuris subjektyviai vertinamas geriau už kitus, būdingas toleruojamas sodrinimų spalvinių tonų iškraipymas, kuris vis dar priimtinas [80]. Yra parodyta, kad padidinus spalvų gamos ploto rodiklius, subjektyviai pagerėja apšviestų objektų vizualinis patrauklumas [98], o baltos šviesos nuokrypis nuo Planko lanko su Duv iki -0,015 dar padidina spalvų gamos rodiklius [99]. Dinaminės sistemos nėra detalios iširtos ir aptartos į žmogų orientuotam apšvietimui, todėl tolesnis modeliavimas remsis praktinės sistemos sukūrimu ir aprašymu.

3. 2. Praktinio daugiaspalvio šviestukų telkinio optimizavimas

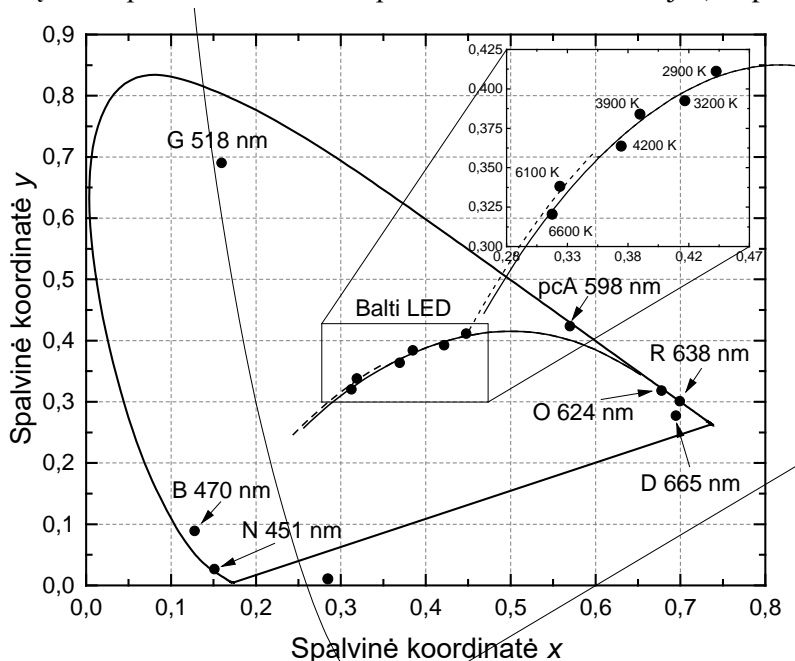
Daugiaspalvio kietakūnio apšvietimo modeliavimui parinktas aprašytas spalvinės kokybės valdymo modelis [P1], kuriame tiesiškai derinamo dviejų priešingų kokybių apšvietimai: spalvas blukinantis ir spalvas sodrinantis. Formulė, kuri aprašo bendrą SPD keičiant SKSK (σ) lygi:

$$S_{TOTAL}(\lambda) = \sigma S_{SAT}(\lambda) + (1 - \sigma) S_{DUL}(\lambda) \quad (3.2)$$

Čia $S_{SAT}(\lambda)$ atitinka SPD su spalvų sodrinimo galimybe, o $S_{DUL}(\lambda)$ – SPD su spalvų blukinimo galimybėmis. Abu SPD atitinka vienodą šviesinį srautą.

Norint pasiekti aukštos spalvinės kokybės, plataus cirkadinio poveikio bei spalvinės kokybės derinimo intervalus, reikia parinkti apšvietimą keturioms sąlygoms – optimalus SPD spalvų blukinimui ir spalvų sodrinimui, aukšti spalvinės kokybės rodikliai, aprašantys natūralų apšvietimą, bei cirkadinio poveikio derinimas plačiame CCT intervale. Šiam tikslui pasiekti buvo modeliuojami daugiaspalviai šviestukų telkiniai su Cree XP-E2 serijos prekiniiais šviestukais. Atrinkti tamsios mėlynos (N – 451 nm), mėlynos (B – 470 nm), žalios (G – 518 nm), konversijos fosfore gintarinės (pcA – 598 nm), oranžinės (O – 624 nm), raudonos (R – 638 nm) ir tamsios raudonos (D – 665 nm), aukštos spalvinės kokybės (CRI = 95) 3200 K, 4200 K ir 6600 K, o taip pat žemos spalvinės kokybės (CRI = 70) 2900 K, 3900 K ir 6100 K balti šviestukai. Remiantis ankstesnio darbo patirtimi, į modeliavimą

neįtraukti žydras (C ~500 nm), konversijos fosfore gelsvai žalsvos spalvos (pcL ~550 nm), tiesioginės emisijos gintarinis (A ~590 nm) šviestukai. Žydras LED nėra tinkamas plačiam CCT valdymui, gelsvai žalsvos spalvos LED neleidžia pasiekti aukšto spalvų sodrinimo, o tiesioginės emisijos gintarinis yra vienas nestabiliausių šviestukų dėl emisijos smailės ir spindulinio srauto temperatūrinio kitimo ir retai naudojamas praktikoje. Būtent našių, prekiškai prieinamų, stabilių ir didelės galios šviestukų pasirinkimas buvo prioritetas. Parinktų LED spalvinės koordinatės pateiktos CIEXYZ erdvėje (3.2 pav.).



3.2 pav. Kietakūnio apšvietimo modeliavime naudotų šviestukų spalvio koordinatės CIEXYZ spalvų erdvėje. Juoda linija (išdidinta sritis) žymi Planko lanką, o punktyrinė – dienos šviesos šaltinių pataisą.

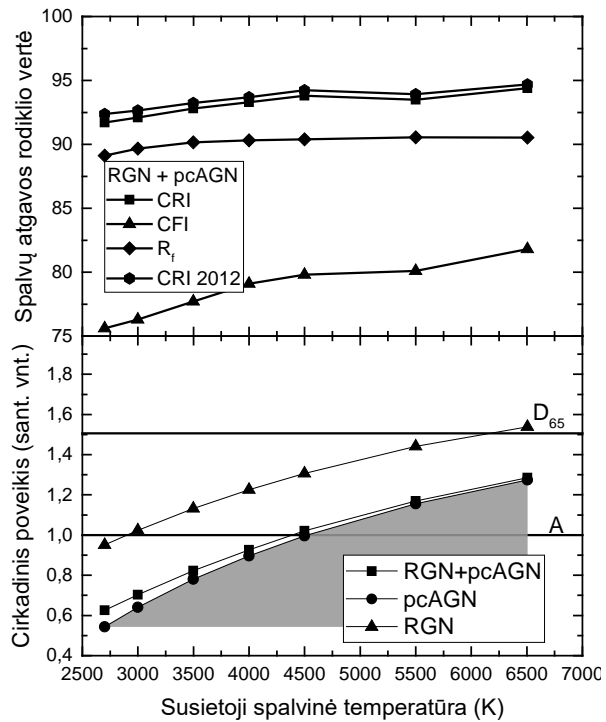
Šioje spalvų erdvėje spalvų maišymas vyksta spalvinių koordinatė ribojamame plote (3 ir daugiau spalvų) arba tiesėje (2 spalvos). Balti šviesos šaltiniai, pasižymintys spalvų blukinimu, visada sudaryti iš kelių spalvinių komponentių, kurios, paprasčiausiu atveju, atitinka mėlyną ir geltoną komponentes. Spalvų sodrinimas priklauso nuo 3 šviesos šaltinių spalvinių koordinatė ribojamo ploto – didesnis plotas lygus didesniam sodrinimui, bet tai pasiekama mažėjančio LER sąskaita.

Tolesniam modeliavimo žingsniui buvo užsibrėžtas minimalus SKSK pokytis 0,01, tad valdymas tarp blukinimo ir sodrinimo sudarytas iš 101

žingsnio. Natūralus apšvietimas prilygintas tokiam SKSK, kuriuo CRI yra didžiausias. Turima R_{pc}AGN keturspalvio apšvietimo sistema, kuri naudota 1 ir 2 skyriaus eksperimentuose, įvertinta pagal natūralaus apšvietimo spalvinės kokybės rodiklius. pcAGN telkinys prilygintas spalvas blukinančiam, o RGN – sodrinančiam. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.3 pav. Čia pastebime, kad toks LED telkinys su didžiausiu natūraliu apšvietimu pasižymi CRI > 93, R_f > 94 tarp 2700 K ir 6500 K. Cirkadinis poveikis kinta 2,8 karto, tačiau tik sodrinantis apšvietimas esant D₆₅ (6504 K) ir A (2856 K) šviesmenų CCT turi tokį patį cirkadinį poveikį. Be to, iš 3.3 pav. apatinės dalies pastebime, kad natūralus apšvietimas ir spalvas blukinantis apšvietimas neišsiskiria aukštose CCT ir netenkame spalvų blukinimo galimybės su aukštu LER. Kaip parodyta meno kūrinių apšvietimo taikymuose [P3, P4], R_{pc}AGN šaltinis yra vienas iš

fotochemiškai saugiausių jautrių objektų apšvietimui, tačiau netinka į žmogų orientuotam apšvietimui dėl žemo cirkadinio poveikio. Vertinant pirmenybinį apšvietimą [P1, P5], matome, kad sąlygą $0,3 < CSI/CFI < 3$ R_{pc}AGN telkinys tenkinta tarp SKSK = 0,23 – 0,48 esant 3000 K ir SKSK = 0,12 – 0,48 esant 6500 K. CSI/CFI = 1

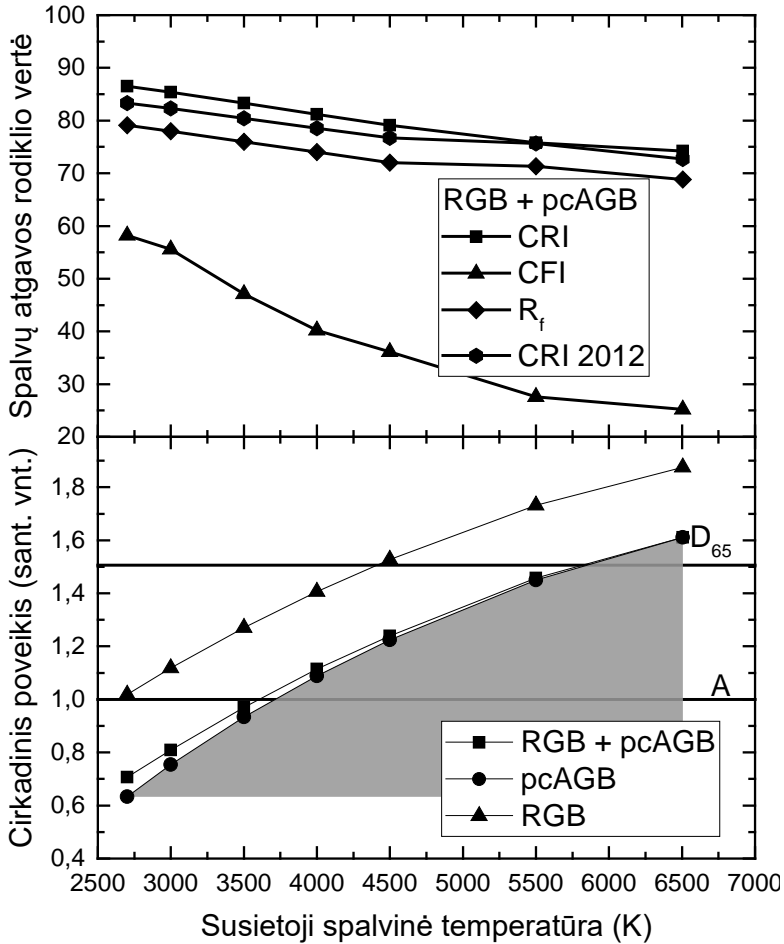
tenkinama tarp 0,32 ir 0,23 didėjant CCT nuo 3000 K iki 6500 K. Šis vertinimas įvestas siekiant palyginti



3.3 pav. R_{pc}AGN šviestukų telkinio spalvinės kokybės rodikliai esant tiksliausiai spalvas atkuriančiam apšvietimui (viršuje) bei cirkadinio poveikio įvertinimas (apačioje) keičiant susietąją spalvinę temperatūrą. Linijos (apačioje) žymi D₆₅ ir A etaloninių šviesmenų cirkadinį poveikį.

skirtingų telkinių galimybes sukurti žmogui subjektyviai patraukliausią apšvietimą.

Ankstesni modeliavimai [82, 81, 38] rodo, kad telkiniai su N LED pasižymi aukštu spalvų sodrinimo (RGN telkinyje) ir žemiausiu cirkadinio poveikio rodikliais, kai B LED keičiantis N LED susiaurina spalvų gamą ir padidina cirkadinį poveikį. Todėl tolesniam modeliavimo etapui N LED buvo pakeistas į B LED, siekiant padidinti cirkadinį poveikį, bet sumažinant spalvų sodrinimo galimybes.

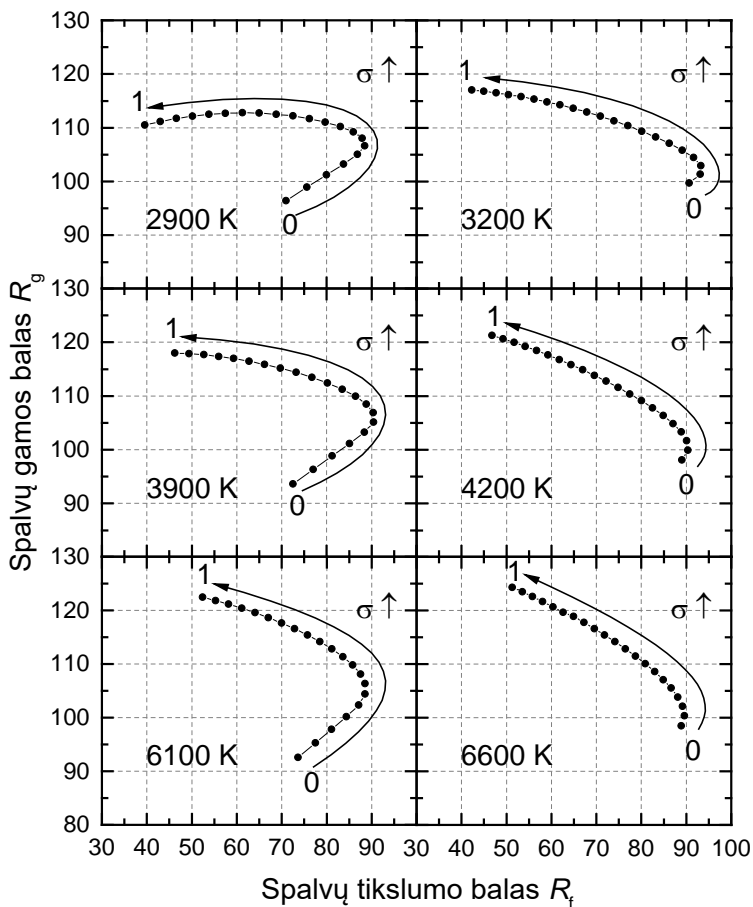


3.4 pav. RpcAGB šviestukų telkinio spalvinės kokybės rodikliai esant tiksliausiai spalvas atkuriančiam apšvietimui (viršuje) bei cirkadinio poveikio įvertinimas (apačioje) keičiant susietąją spalvinę temperatūrą. Linijos (apačioje) žymi D_{65} ir A etaloninių šviesmenų cirkadinį poveikį.

RpcAGB telkinio natūralaus apšvietimo spalvinės kokybės rodikliai ir cirkadinis poveikis pateiktas 3.4 pav. Pastebimas žymus natūralaus apšvietimo spalvinės kokybės mažėjimas didėjant CCT dėl trūkstamos tamsios mėlynos komponentės. CRI sumažėja iki 75 esant 6500 K natūralam apšvietimui, todėl šis telkinys netinkamas naudoti bendrajam apšvietimui, nes neatitinka Europos standarto EN 12464-1 reikalavimo — $CRI \geq 80$. Išlaugęs cirkadinis poveikis iki 2,95 karto jau peržengia D_{65} cirkadinių poveikį esant 6500K, todėl net ir blukinantis apšvietimas pasižymi didesniu cirkadinės sistemos stimuliavimu. 2856 K CCT cirkadinis poveikis nežymiai padidėja, bet galimas sodrio valdymas su SKSK leidžia atkurti A šviesmeniui tapatų cirkadinių poveikį. Taip pat, kaip ir RpcAGN atveju, neturime galimybės valdyti spalvų blukinimą didėjant CCT. Intervalas tarp spalvų blukinimo ir natūralaus apšvietimo yra labai ribotas ir žemose CCT, todėl šis sprendimas nėra tinkamas į žmogų orientuotam apšvietimui. Be to, pirmenybinis apšvietimas pasiektas su $SKSK = 0,19 - 0,43$ esant 3000 K ir su $SKSK = 0 - 0,18$ esant 6500 K. $CSI/CFI = 1$ pasiekiamas su $SKSK = 0,28$ ir 0 esant 3000K ir 6500 K atitinkamai. Matome, kad aukštoje CCT spalvinė kokybė net riboja pirmenybinio apšvietimo intervalą.

RpcAGN ir RpcAGB vertinimas parodė, kad abu telkiniai nėra optimalūs į žmogų orientuotam apšvietimui ir kitas žingsnis yra pakeisti pcA šaltinį baltu LED. Buvo sumodeliuoti keturspalvių RGB+W SPD esant balto šviestuvo CCT. RGB šaltinis paliktas kaip spalvas sodrinantis, o W LED atitiko spalvas blukinantį šaltinį. Dviejų spalvinių kokybių ($CRI = 70$ ir $CRI = 95$) balti LED atitinka plačiausiai prieinamus baltos šviesos šaltinius. W LED, kurio $CRI = 80$, atitinka spalvinę kokybę tarpę tokių W LED, kurių $CRI = 70$ ir $CRI = 95$, todėl jie nenaudoti.

3.5 pav. matome spalvinės kokybės kitimą pagal TM-30-15 metriką keičiant SKSK su kiekvienu skirtingu W LED RGB+W telkinyje. Matome, kad žemos spalvinės kokybės W LED pasižymi žemu tikslumu ir gamos balu, bet tuo pasiekiamas platus spalvų blukinimo derinimo intervalas, kurios neturi LED telkiniai su aukšto CRI W LED (3200 K, 4200 K ir 6600 K). Taip pat matomas spalvų gamos didėjimas didėjant CCT. Vertinant pirmenybinio apšvietimo ribas, nustatyta, kad SKSK intervalas yra tarp 0,3 — 0,57, 0,14 — 0,44, 0,31 — 0,6, 0,21 — 0,46, 0,32 — 0,63 ir 0,13 — 0,47 esant 2900 K, 3200 K, 3900 K, 4200 K, 6100 K ir 6600 K, atitinkamai. $CSI/CFI = 1$ esant 0,37, 0,24, 0,41, 0,46, 0,43, 0,24 atitinkamai esant 2900 K, 3200 K, 3900 K, 4200 K, 6100 K ir 6600 K. Pirmenybinio apšvietimo intervalai nėra ribojami, todėl tenkina prioritetinio apšvietimo standartą [P5]. Visi duomenys



3.5 pav. RGB+W šviestukų telkinių spalvinės kokybės rodikliai pagal TM-30-15 metodą. Kreivė žymi spalvinės kokybės rodiklio didėjimo nuo 0 (baltas LED) iki 1 (RGB) kryptį.

rodo, kad fiksuotai CCT yra racionalu pakeisti pcA LED į žemos spalvinės kokybės W LED. Parinkus fiksuotus 2900 K ir 6100 K CCT LED buvo sumodeliuoti visi keturspalviai telkiniai, kuriuose sodrinančio telkinio mėlyną komponentę atitiko B arba N, žalią – G, o raudoną – O, R arba D. Spalvinės kokybės ir kitų rodiklių vertės pateiktos 3.1 lentelėje. Čia matome, kad turint tik 6 skirtingus sodrinančius šaltinius, didžiausias cirkadinis poveikis pasiekiamas su DGB šaltinius abiem CCT vertėms. Tačiau DGB+W telkinys esant natūraliam apšvietimui pasižymi žemesne spalvine kokybe. Cirkadinis poveikis kinta tiesiškai, o CRI tarp 90 ir 80 skiriasi du kartus suvokimo

prasmė. Todėl DGB+W esant $SKSK = 0,22$ su 6132 K CCT nuo OGB+W su $SKSK = 0,28$ spalvinės kokybės prasmė skiriasi ~60 %. Tokiu atveju DGB telkinys toliau nevertinamas, nes didesnis cirkadinis poveikis gali būti mažinamas didinant spalvinę natūralaus apšvietimo kokybę.

3.1 lentelė. Metamerinių telkinių spalvinės kokybės rodikliai esant 2880 K.

LED telkinys	SKSK σ	LER (lm/W)	CRI	R9	R _f	R _g	GAI	CFI (%)	CSI (%)	CDI (%)	C _p
Baltas WW	0	338	72,8	-23	71	96	52	26,6	0,9	54,9	0,48
OGB	0,26	332	94,2	52	89	102	55	89,0	0,6	4,9	0,62
RGB	0,23	318	95,7	87	90	104	57	91,3	0,8	2,1	0,62
DGB	0,16	257	92,3	95	88	106	58	82,9	3,4	6,0	0,59
OGN	0,27	334	93,5	53	87	104	57	86,5	1,0	5,3	0,61
RGN	0,23	320	94,6	85	88	106	58	87,7	1,2	3,0	0,60
DGN	0,16	259	91,3	96	86	106	58	76,5	3,9	7,0	0,57
OGB	0,5	326	80	84	80	103	57	28,8	52,5	2,3	0,75
RGB	0,5	297	68,3	2	76	107	60	23,4	62,2	0,4	0,77
DGB	0,5	171	49,7	-127	61	112	64	13,9	68,4	1,1	0,80
OGN	0,5	329	81,2	87	81	108	59	32,5	51,5	1,7	0,71
RGN	0,5	300	70,1	6	77	111	62	26,2	60,6	0,2	0,73
DGN	0,5	172	50,4	-123	61	116	66	14,3	67,2	1,1	0,77
OGB	1	315	34,5	-28	45	94	52	5,7	75,8	5,5	1,02
RGB	1	264	12,7	-168	35	98	55	4,0	79,4	4,3	1,06
DGB	1	114	-22	-379	14	99	57	2,5	80,5	4,8	1,13
OGN	1	320	37,7	-23	51	106	58	6,9	76,4	2,8	0,94
RGN	1	269	14,7	-163	41	110	62	5,6	79,4	1,3	0,99
DGN	1	116	-20,3	-373	17	110	64	3,1	80,7	3,1	1,05

Lyginant RGB+W ir OGB+W telkinius pastebime, kad jų spalvinė kokybė yra panaši esant natūraliam apšvietimui, tačiau RGB+W šaltinis turi didesnę R9, gamos ploto rodiklius ir tapatų cirkadinį poveikį. Vienu balu žemesnis CRI standartiniam žmogui yra neatskiriamas, vertinant panašios spalvinės kokybės šaltinius. Ryškiai raudonos (R9) spalvos atgava yra esminė, vertinant pirmenybinį apšvietimą, todėl ir pasirenkamas RGB telkinys vietoj OGB.

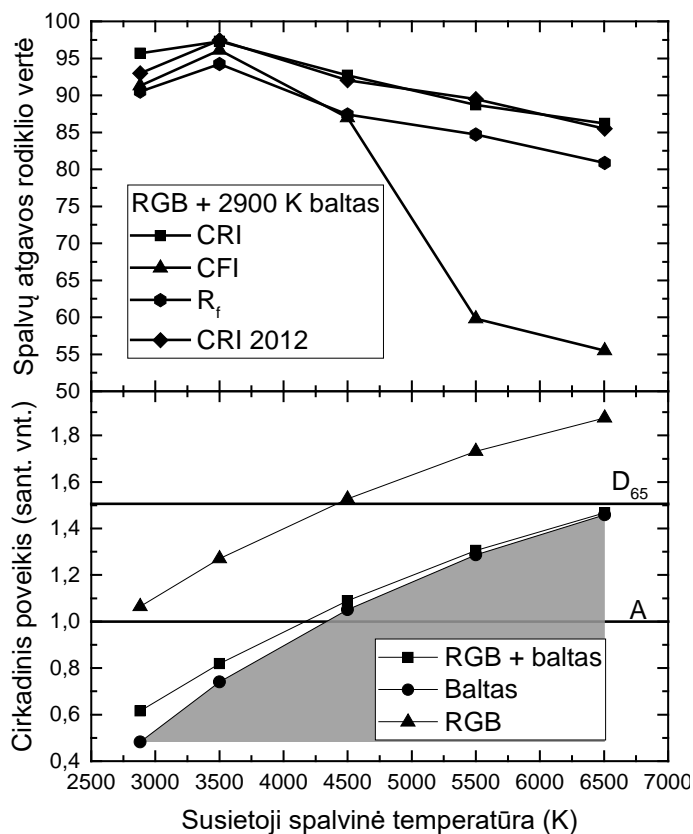
Lyginant sodrinančius telkinius su B ir N komponente, matoma, kad telkinių su N komponente cirkadinis poveikis kritęs ~18 %, natūralaus apšvietimo spalviniai rodikliai žemesni, bet išaugini sodrinančio apšvietimo spalvų gama bei LER. Kadangi prioritetu laikome natūralaus apšvietimo rodiklius bei cirkadinį poveikį, tolesniam vertinimui paliktas tik RGB sodrinantis šaltinis. Šio šaltinio kombinacija su baltu šviestuku pasižymi aukšta spalvine kokybe ir cirkadiniu poveikiu, R9. Būtent šios vertės ir yra esminės kuriant į žmogų orientuotą apšvietimą.

3.2 lentelė. Metamerinių telkinių spalvinės kokybės rodikliai esant 6130 K.

LED telkinys	SKSK σ	LER (lm/W)	CRI	R9	R _f	R _g	GAI	CFI (%)	CSI (%)	CDI (%)	C _p
Baltas CW	0	325	75,7	-19	74	93	83	23,6	0,8	52,3	1,06
OGB	0,28	309	96,8	89	90	100	97	92	0	2,7	1,26
RGB	0,23	303	95,7	87	91	101	98	89	0,2	3,3	1,23
DGB	0,22	245	90,4	31	86	104	101	69	11,6	3,5	1,23
OGN	0,32	314	93,5	92	89	104	100	73	5,4	3,7	1,19
RGN	0,25	306	91,7	88	89	104	100	70,3	4	5,5	1,17
DGN	0,18	262	88,2	73	85	104	99	55,2	7,1	11,6	1,14
OGB	0,5	298	80,7	34	81	103	105	28,5	49,5	1,4	1,42
RGB	0,5	280	73,3	-44	77	106	111	23,2	54,3	0,5	1,43
DGB	0,5	187	61,1	-163	63	110	119	15,2	57,7	1,7	1,45
OGN	0,5	307	84,6	51	86	109	109	39,1	38,5	0,9	1,26
RGN	0,5	289	76,7	-24	82	112	115	31,2	47,9	0,6	1,28
DGN	0,5	194	63,7	-138	67	116	123	18,7	53,1	2,9	1,30
OGB	1	275	38,5	-113	48	100	115	3,4	71,6	6,9	1,78
RGB	1	245	25	-243	41	104	124	3	73,7	6,8	1,81
DGB	1	131	2,5	-434	21	107	136	2,4	72,8	8,7	1,85
OGN	1	291	49,7	-85	63	118	129	10,2	70,8	0,7	1,47
RGN	1	261	34,3	-211	54	122	138	8,3	71,2	1	1,50
DGN	1	139	10,7	-396	30	124	150	4,1	69,9	5,5	1,54

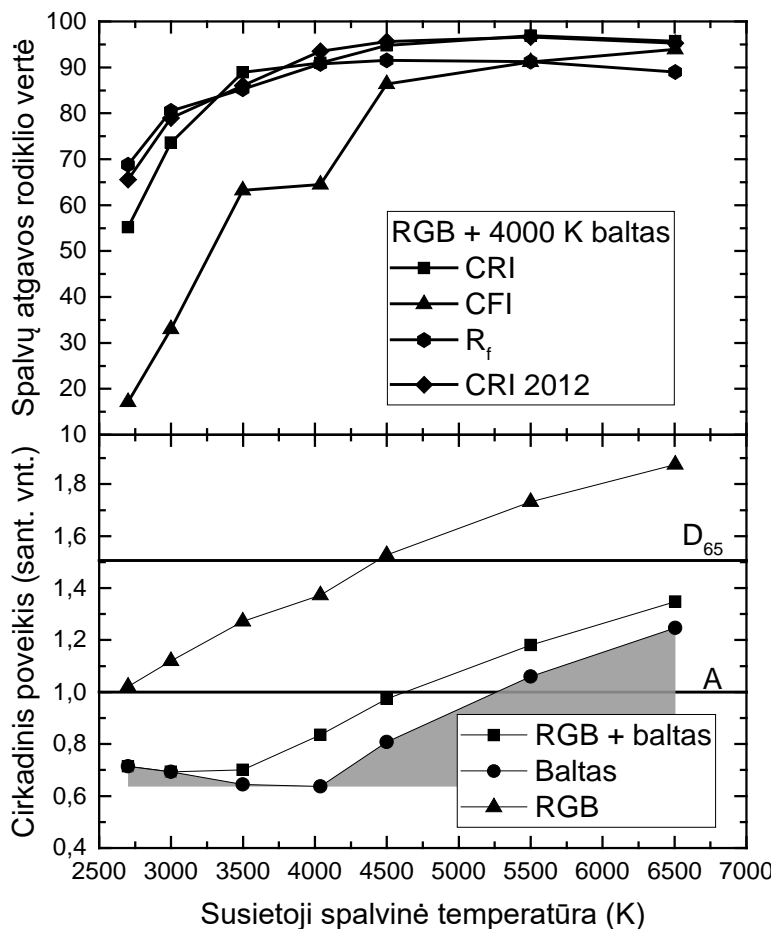
Parinkus optimalų sodrinančią RGB šaltinį, lieka įvertinti jo ir blukinančio šaltinio savybes visame derinamame CCT intervale (2700 K – 6500 K).

Palyginimui parinktos 3 baltų šviestukų CCT su 2900 K, 3900 K ir 6100 K. 3.6, 3.7 ir 3.8 paveikluose pavaizduota jų natūralaus apšvietimo spalvinės kokybės rodiklių bei cirkadinio poveikio priklausomybė nuo CCT. 3.6 pav. matome, kad CRI krenta iki 86 aukštoje CCT, cirkadinio poveikio intervalas 3,9 karto ir turime minimalų spalvų blukinimo intervalą. Šis RGB+W telkinys su 2900 K CCT nėra pranašesnis už RpcAGN sistemą pagal natūralaus apšvietimo rodiklius. Modeliavime spalvas blukinantis baltas šviesos šaltinis yra sudarytas iš WGR telkinio, jei CCT yra mažiau nei W LED CCT, bei iš WGB telkinio, jei CCT daugiau už W LED CCT. Šis patikslinimas galioja visiems trims RGB+W telkinių modeliams.



3.6 pav. RGB + 2900 K W šviestukų telkinio spalvinės kokybės esant tiksliausiai spalvas atkuriančiam apšvietimui (viršuje) bei cirkadinio poveikio įvertinimas (apačioje) keičiant susietąją spalvinę temperatūrą. Linijos (apačioje) žymi D₆₅ ir A etaloninių šviesmenų cirkadinį poveikį.

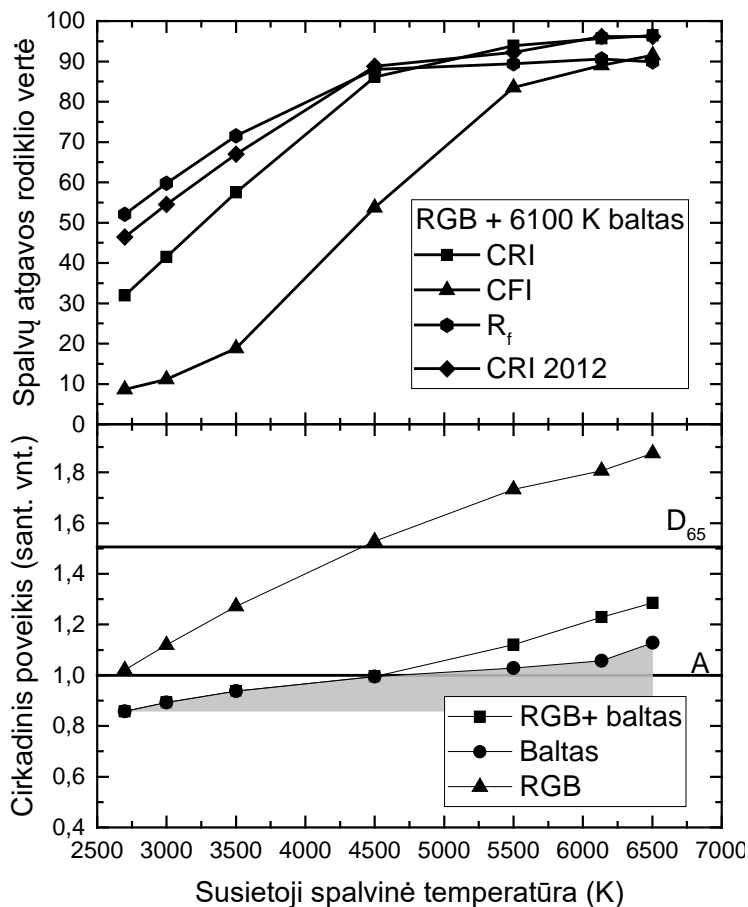
3.7 paveiksle su 3900 K CCT W LED pastebimas CRI kritimas iki 55 mažėjant CCT nuo 5500 K, cirkadinio poveikio intervalas 2,9 su mažiausia verte esant 4000 K. Neišlaikoma aukšta spalvinė kokybė esant natūraliam apšvietimui, cirkadinio poveikio intervalo ribojimas nuo 4000 K rodo, kad šis šaltinis nėra universalus dinaminei sistemai. Ši sistema pranašesnė už RpcAGN sistemą tik CCT > 4000 K su išlaikoma spalvų blukinimo galimybe.



3.7 pav. RGB + 4000 K W šviestukų telkinio spalvinės kokybės rodikliai esant tiksliausiai spalvas atkuriančiam apšvietimui (viršuje) bei cirkadinio poveikio įvertinimas (apačioje) keičiant susietąją spalvinę temperatūrą. Linijos (apačioje) žymi D_{65} ir A etaloninių šviesmenų cirkadinį poveikį.

RGB + W su 6100 K CCT modeliavimas rodo (3.8 pav.), kad CRI mažėja iki 31 mažėjant CCT visame intervale, cirkadinio poveikio intervalas yra tik

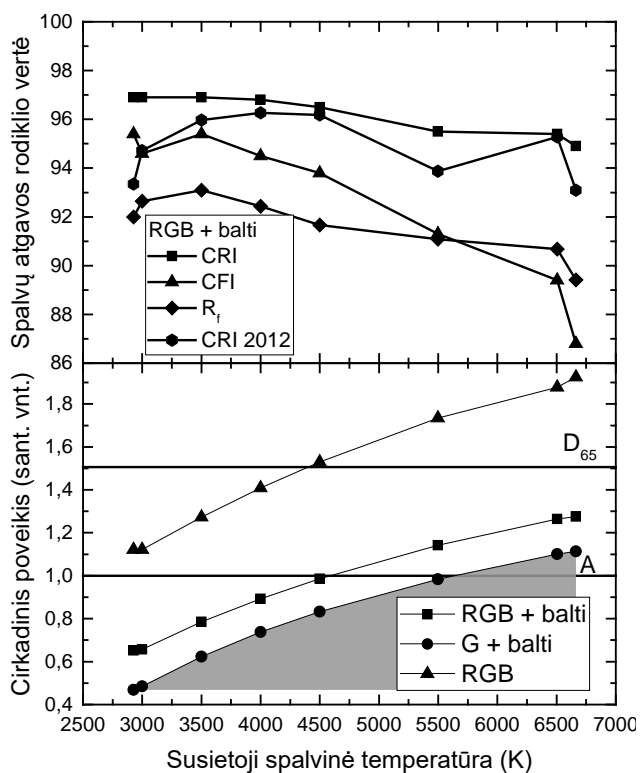
2,2 karto. Prarandamas spalvų blukinimas nuo ~4500 K siejamas su spalvinės kokybės kritimu, nes tuomet didžiausio CRI telkinys sudarytas tik iš WGR LED. 6100 K LED tinka tik labai aukštoms CCT, nes pasižymi natūraliu apšvietimu. Žemesnėse CCT nei W LED, šis keturspalvis telkinys netinkamas į žmogų orientuotam apšvietimui dėl riboto cirkadinio poveikio valdymo.



3.8 pav. RGB + 6100 K W šviestukų telkinio spalvinės kokybės rodikliai esant tiksliausiai spalvas atkuriančiam apšvietimui (viršuje) bei cirkadinio poveikio įvertinimas (apačioje) keičiant susietąją spalvinę temperatūrą. Linijos (apačioje) žymi D_{65} ir A etaloninių šviesmenų cirkadinį poveikį.

Aptarti trys variantai su W LED rodo, kad dinaminei sistemai neužteks vienos spalvos W LED. Todėl į keturspalvio telkinio modelį įtrauktas penktas narys. Šiuo atveju sodrinantį šviesos šaltinį atitiks aptartas RGB telkinys, o

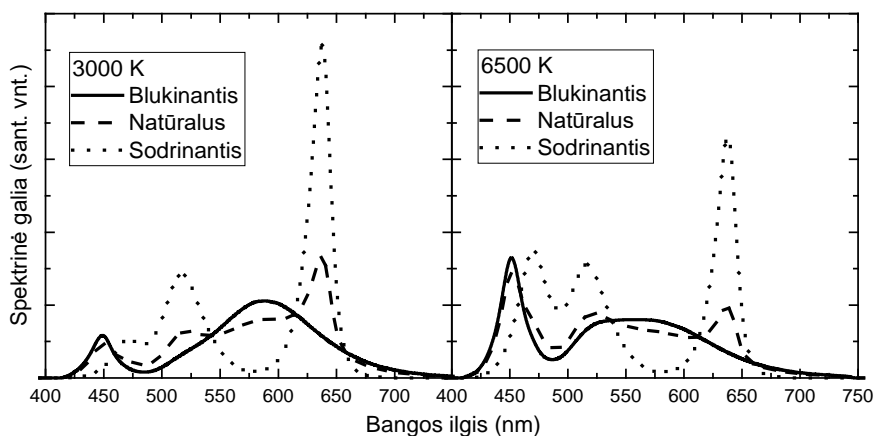
blukinantį sudarys baltų ir kitų spalvų LED kombinacijos. Toliau žemos CCT W LED žymėsime W_L , o aukštos – W_H . Jei modeliuojama žemesnėje CCT nei W_L LED, tai blukinantį šviesos šaltinį sudaro W_LGR telkinys. Tarpinėje CCT tarp W_L ir W_H , blukinantis šaltinis yra sudarytas iš W_LGW_H telkinio. Aukštesnėje CCT nei W_H LED telkinį sudaro W_HGB šaltinis. Čia remiamasi spalvų maišymo taisykle, kuomet norimą spalvio koordinatę riboja mažiausio ploto trikampis tarp galimų maišomų spalvų.



3.9 pav. RGB+W_L+W_H šviestukų telkinio spalvinės kokybės esant tiksliausiai spalvas atkuriančiam apšvietimui (viršuje) bei cirkadinio poveikio įvertinimas (apačioje) keičiant susietąją spalvinę temperatūrą. Linijos (apačioje) žymi D₆₅ ir A etaloninių šviesmenų cirkadinį poveikį.

Sumodeliavus penkiaspalvę sistemą (3.9 pav.) matome, kad pasiekiamas natūralus apšvietimas su CRI > 95 visoje CCT derinimo srityje. Toks valdomas šaltinis tinka meno kūrinių apšvietimui, kuomet reikalaujama ne mažiau 95 CRI. R_f vertės viršija 89, o patobulintas CRI 2012 – 90. CFI vertės rodo, kad virš 87 % Munsell paletės bandinių perteikiama su nepakitusia

spalva. Pirmenybinių apšvietimo intervalas yra nuo 0,34 iki 0,53 su vidurio (CSI/CFI = 1) tašku 0,41 SKSK vertėmis esant 3000K, bei nuo 0,31 iki 0,51 su vidurio tašku 0,38 SKSK esant 6500 K. Čia matome, kad intervalo plotis nekinta derinant CCT ir nėra ribojamas spalvinės kokybės derinimo. Cirkadinio poveikio derinimo intervalas yra didžiausias iš vertintų telkinių – 4 kartai. Etaloninio A šviesmens CCT ribose blukinantis telkinys gali iki 2 kartų sumažinti cirkadinį poveikį, o D_{65} CCT ribose – padidinti 25 %. Blukinimo valdymas (tamsiai pilka zona 3.9 pav.) yra plačiausiais ir tolygiausiais visose CCT, lyginant su ankstesniais keturspalviais šaltiniais.

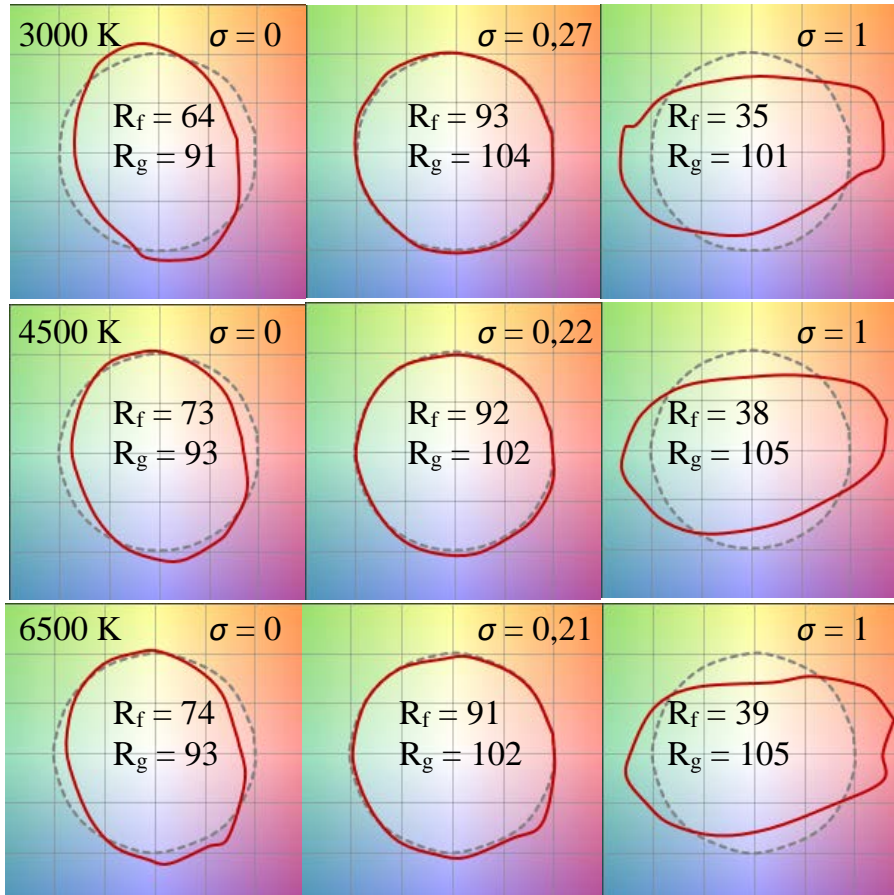


3.10 pav. RGB+W_L+W_H šviestukų telkinio spektrinės galios skirstiniai, kurie atitinka blukinantį (vientisa linija), natūralų (brūkšninė linija) ir sodrinantį (taškuota linija) apšvietimui esant 3000 K ir 6500 K susietąja spalvine temperatūra.

Sumodeliuoti penkiaspalvio telkinio SPD pavaizduoti 3.10 pav. esant 3000 K ir 6500 K su spalvų blukinimo, natūralaus apšvietimo ir sodrinimo galimybėmis. Šių apšvietimų spalvinės kokybės rodikliai pateikti 3.3 lentelėje, o spalvų piktogramos - 3.11 pav. Piktogramos parodo, kad turime universalią spalvinės kokybės derinimo sistemą, kuomet esant blukinančiam apšvietimui sodrinamos gelsvai žalios bei purpurinės spalvos, o esant sodrinančiam apšvietimui stipriai sodrinamos žalios ir raudonos spalvos. Toks spalvų gamos valdymas leidžia patogiai pritaikyti apšvietimą konkrečiai scenai be sudėtingo SPD skaičiavimo.

3.3 lentelė. RGB+W_L+W_H spalvinės kokybės rodikliai.

CCT (K)	SKSK (σ)	CRI	CRI 2006	R _f	R _g	CQS Q _g	GAI	CFI (%)	CSI (%)	CDI (%)	R ₉	LER (lm/W)
3000	0	65	64	64	91	85	53	19	1	62	-56	363
	0,27	97	95	93	104	101	62	95	0	2	92	325
	1	11	27	35	101	113	64	4	79	4	-192	254
6500	0	77	76	74	93	90	86	24	1	50	-16	318
	0,21	95	95	91	102	103	100	89	0	3	89	296
	1	23	30	39	105	123	130	3	74	7	-266	236



3.11 pav. RGB + 2900 K W + 6100 K W šviestukų telkinio spalvinės kokybės įvertinimas, esant skirtingoms susietosioms spalvinėms temperatūroms ir naudojant spalvų piktogramą CIECAM02 spalvų erdvėje. Spalvinės kokybės svartiniai koeficientai (σ) žymi spalvas blukinantį (0), natūralų (0,27-0,21) ir spalvas sodrinantį (1) apšvietimą. Punktyrinė linija atitinka natūralų apšvietimą, raudona – testuojamą.

Pademonstruotas prekinių LED penkiaspalvis RGB+W_L+W_H telkinys leidžia plačiame intervale keisti cirkadinį poveikį, spalvinę kokybę su aukšto CRI natūraliu apšvietimu. Toks apšvietimas yra patobulinta RpcAGN telkinio versija, kurį sunkiau valdyti programiškai. Technologinis apšvietimo įgyvendinimas nežymiai keičiasi, jei naudojami 5 spalviniai kanalai, nes gali būti naudojama tas pats techninis sprendimas su papildomu spalviniu keturspalvėje sistemoje. RGB+W_L+W_H telkinio diegimas į praktines sistemas leidžia padidinti jų energetinį našumą dėl plataus ir didelio našumo W LED pasirinkimo. pcA LED pasižymi apie 80 lm/W šviesiniu našumu, kai tuo tarpu W LED pasiekia 200 lm/W priklausomai nuo modelio. Pateikti kitų keturspalvių sistemų skaičiavimai gali būti pritaikyti esamoms RGB+W sistemos be išmanaus valdymo.

3. 3. Trečiojo skyriaus išvados

Penkiaspalvė praktinė RGB+W_L+W_H sistema, sudaryta iš raudonos, žalios, mėlynos spalvų bei žemos ir aukštos susietosios spalvinės temperatūros šviestukų, pasižymi aukšta spalvine kokybe bei plačiu cirkadinio poveikio derinimo intervalu 2700 K – 6500 K susietosios spalvinės temperatūros ribose. Žemos spalvinės kokybės baltos šviesos šviestukai yra optimalūs daugiaspalviuose valdomos kokybės šviestukų telkiniuose dėl didesnio šviesos veiksmingumo, galimybės blukinti spalvas bei mažinanti cirkadinį poveikį.

4. Šviestuvai su 10 spalvinių kanalų senstančių pigmentų neinvaziniam spalvų atstatymui

Meno kūrinių spalvų restauracijai dažniausiai naudojami invaziniai paviršiaus apdorojimo ir naujų sluoksnių padengimo medotai. Šiame skyriuje bus parodyta, kad galimas ir neinvazinis neinvazinis kietakūnio apšvietimo taikymas vizualiai „atstatyti“ išblukusias ir pakitusias spalvas. Šiame skyriuje aprašytas pigmentų sendinimas su UV apšvietimu ir jų neinvazinis spalvų atstatymas su kietakūniu apšvietimu bei pademonstruotas pažangus prototipinis 10 spalvinių kanalų šviestuvai su lanksčiu spektrinės galios skirstinio valdymu. Rezultatai pateikti publikacijose: P3, P4, C5, C6, C9, C12, C13.

4. 1. Literatūros apžvalga

Vystantis kietakūnio apšvietimo technologijai, viena iš taikymo sričių tapo meno kūrinių apšvietimas. Jiems apšviesti keliami pagrindiniai reikalavimai: žema apšvieta, minimali UV ar IR spinduliuotė, žema sukeliama fotocheminė žala [100]. Tokias sąlygas gali tenkinti tiesioginės ir konversijos fosfore LED telkiniai dėl galimo lankstaus valdymo. Lyginant su kaitinamaisiais, fluorescenciniais ar išlydžio šaltiniais, tiesioginės emisijos LED pasižymi siauru SPD, greitaveika, grynomis spalvomis ir technologiniu lankstumu, todėl jų taikymo pranašumai yra akivaizdūs.

Optimalaus šviesos šaltinio paieškos meno kūrinių atvaizdavimui buvo nukreiptos į tinkamiausios CCT ir spalvinės atgavos paieškas. Tinkama CCT buvo ieškoma su kaitinamaisiais šaltiniais [15], vaizdų modeliavimu pagal hiperspektrinius duomenis [101, 102] ar Xe lempa su išmanių valdymu [103]. Nustatytos 3600 K – 5700 K CCT ribos buvo žemiau nei dienos šviesos CCT su saugia 50 – 200 lx apšvieta, kas siejasi su pirmojo skyriaus pirmojo eksperimento rezultatais.

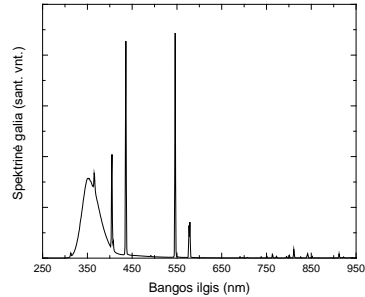
Meno kūrinių apšvietimo tyrimai susiję su apšviečiamų paviršių vertinimu ir degradacija [104] ir jų spalvinių atstatymu [103, 105]. Vertinant sukeltą fotocheminę žalą [106, 107] galime teigti, kad jos ribojimas turi būti pasvertas dėl spalvų diskriminacijos prastėjimo ir vizualinio patrauklumo. Spalvas blukinantis šaltinis (žemo CRI W LED ar pcAGN, pcAGB telkiniai) pasižymės žemesne fotochemine žala nei spalvas sodrinantis (DGN, RGB) [P4, P5]. Kita vertus, turime iširti spalvinių bandinių aibę ir jos degradaciją, nes nuo atspindžio spektro priklauso ne tik fotocheminė žala, bet ir visos

spalvinės charakteristikos. Bandinėlių parinkimas yra labai svarbus uždavinys spalvinės kokybės vertinime [36], o spalvinės kokybės valdymas [P1] bei tinkamai parinkti SPD gali sukurti vizualiai patrauklų apšvietimą [108].

Toliau pažvelgsime į meno kūrinių apšvietimą iš netradicinės pusės, kuomet apšvietimas turi tiksliai atstatyti fotochemiškai paveiktą spalvą su ribota spalvinių bandinių aibe.

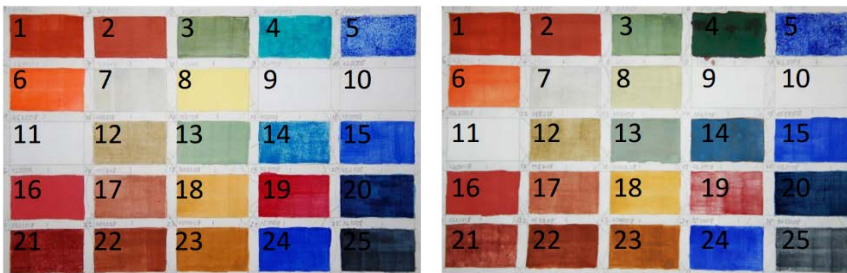
4. 2. Pigmentai ir jų sendinimas

Norint įvertinti kietakūnio apšvietimo galimybes neinvaziniu būdu atstatant fotochemiškai pažeistų pigmentų spalvą, jie buvo sendinami UV apšvietimu Prano Gudyno restauravimo centre. Apšvietimui naudotos prekinės OSRAM EVERSUN L40W/79K UV lempos. Spektrinės galios skirstinys pavaizduotas 4.1 pav.



4.1 pav. UV apšvietimo spektrinės galios skirstinys.

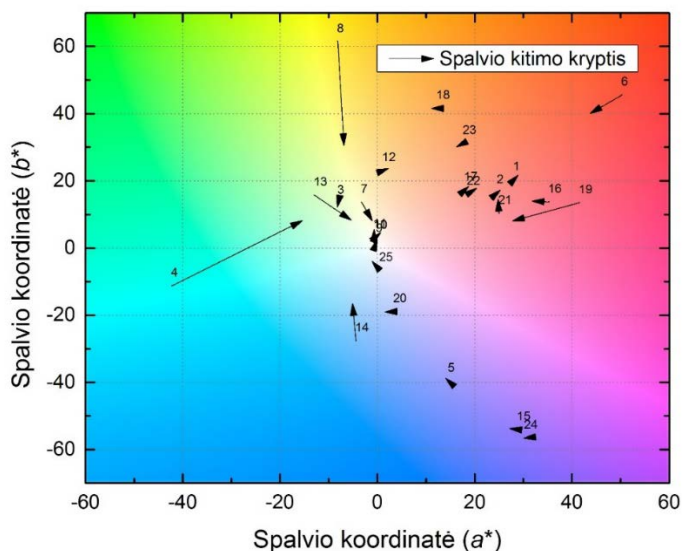
Pirmasis pigmentų rinkinys buvo 25 vnt. akvarelinių dažų (pigmentas su rišikliu), kuriuos sudaro istoriniai pigmentai ir gumiarabiko rišamoji medžiaga. Šie, naudojami restauracijai, prekiniai akvareliniai dažai teptuku tepami ant chromatografinio popieriaus kelis kartus palaukiant kol kiekvienas sluoksnis išdžius taip suformuojant reikiamo intensyvumo dažų sluoksnį. Paruošti mėginiai dirbtinai sendinami 1000 lx UV apšvietoje (stendo temperatūra dėl UV lempų kaitimo – 40°C) ir matuoti difuziniai atspindžio spektrai absoliutiniais vienetais regimajame diapazone su Avantes AvaSpec-ULS2048x64TEC spektrometru, integruojančia sfera su šviesolaidiniu halogeniniu pašvietimu.



4.2 pav. Bandinių nuotraukos prieš (kairėje) ir po (dešinėje) fotocheminio sendinimo naudojant UV apšvietimą.

Mėginių sendinimas vyko 153 dienas su tarpiniais matavimais (atitinkamai 3, 11, 28 ir 77 dienos) spalvio kitimo dėsningumui nustatyti. Šis pagreitinoto sendinimo laikas atitinka ~1500 metų apšvietimo su D_{65} šviesmeniu esant 50 lx apšvietai (UV dalis D_{65} yra 183 kartus mažesnė nei naudojamos lempos). Kaip ir buvo galima tikėtis (dėl cheminių reakcijų, nulemiančių pigmentų pokyčius, spartos) bandinių spalvinio nuokrypio vertės logaritmiškai priklauso nuo sendinimo (arba, matuojant eksponentiškai augančiais laiko intervalais, tiesiškai).

Sunumeruotų bandinių nuotraukos prieš ir po sendinimo pateiktos 4.2 pav., o spalvio kitimas pavaizduotas į etaloninę D_{65} šviesmenį normuotoje CIELAB erdvėje 4.3 pav..

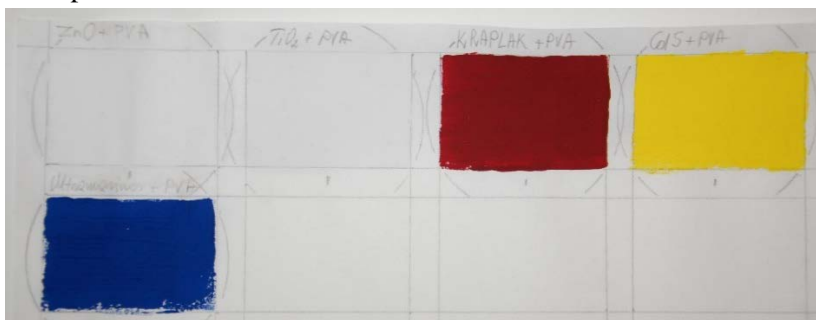


4.3 pav. Senstančių pigmentų spalvio kitimas CIELAB spalvų erdvėje

Matome, kad žymiausius spalvinius pokyčius turi 4, 6, 7, 8, 13, 14, 16 ir 19 bandiniai. Šių pigmentų sudėtyje yra vario ir švino, kas lemia žymią spalvio degradaciją. Turimos žinios apie 8 bandinį (švino alavo geltonasis) teigia, kad spalvio pokyčio neturi būti, tačiau užfiksuotas vienas didžiausių spalvio koordinatė poslinkių, kuris gali būti susijęs su ozono įtaka, atsiradusio UV sendinimo metu. Likusių kitų akvarelinių dažų spalvio pokyčiai mažiau pastebimi ir reikalauja mažesnės apšvietimo korekcijos.

Taip pat buvo panaudoti 1970 metų gamybos (Leningrad) skirtingų spalvų dažai (4.4 pav.), kurių rišamoji medžiaga yra polivinilo acetatas (PVA), ir iš kurių galima gauti visas likusias spalvas. Priešingai nei apšvietime su

raudonu, žaliu ir mėlynu pirminiu šaltiniu, dailėje žalia yra keičiama geltona spalva, nes žalią galima gauti sumaišius mėlyną ir geltoną. Pakanka 4 spalvų (baltos, mėlynos, geltonos ir raudonos), kad dailės kūrinyje gautume visas norimas spalvas. Šių pigmentų sendinimo eksperimentas neparodė esminių spalvio pokyčio (lyginant su 25 pigmentų aibe), tik vizualiai pakito geltona ir raudona spalvos.



4.4 pav. Papildomi pirminių dažų bandiniai.

Panaudoti du skirtingi baltos spalvos dažai: vienuose kaip pigmentas yra cinko baltasis (ZnO) pigmentas, kurio pramoninė gamyba pradėta nuo 1840 metų; kituose baltuose dažuose kaip pigmentas yra titano baltasis (TiO_2) pigmentas, titano baltasis atrastas 1908 m. ir pradėtas pramoniniu būdu gaminti 1909 m. Norvegijoje ir JAV. Visos iki 1938 m. gaunamos titano baltųjų rūšys buvo anatazinės formos, kuri yra labai aktyvi fotochemiškai, turi oksidacinių savybių, veikia aliejinius rišiklius bei organinius dažiklius. Nuo 1938 m. susintetintas rutilinės kristalų modifikacijos TiO_2 , kuris naudojamas kaip pigmentas meno kūrinų tikslams.

Raudonų dažų sudėtyje yra kraplako pigmentas sintetinio alizarino pagrindu; sintetinį alizariną 1868 m. susintetino vokiečių chemikai S. T. Grèbè (S. T. Gräbe) ir K. Lybermanas (K. Liebermann). Geltonų dažų sudėtyje dominuoja kadmio geltonasis (CdS) pigmentas, kuris nuo 1846 m. pasirodė prekyboje. Kadmio geltonojo spalva priklauso nuo dalelių dydžio ir kristalų formos. Keičiant gamybos sąlygas, galima gauti įvairius atspalvius nuo citriniškai geltono iki oranžinio. Mėlynų dažų sudėtyje panaudotas pigmentas sintetinis ultramarinas. Tai vienas svarbiausių XIX a. susintetintų pigmentų. Jį nepriklausomai vienas nuo kito susintetino du mokslininkai: 1822 m. vokiečių chemikas L. Gmelin (Leopold Gmelin, 1788–1853), o 1828 m. J. B. Gime (Jean-Baptiste Guimet, 1795–1871). Sintetinis ultramarinas imtas plačiai vartoti, XIX a. viduryje gamyba vienu metu buvo įsisavinta įvairiose šalyse. Sintetinio ultramarino sudėtis nepastovi, apytikriai ją galima

išreikšti formule $(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2)_x \cdot \text{Na}_2\text{S}_n$. Jo kristalai smulkūs, tamsiai mėlynos spalvos, dalelės vienodo dydžio, apvalios, taisyklingos formos.

Pigmentai visada maišomi su rišikliu, kad būtų pasiekama tiršta terpė. Atlikus šių rišiklių spalvinės degradacijos tyrimus juos sendinant lygiagrečiai pagrindinių pigmentų, nustatyta, kad jų daroma įtaka trumpabangėje srityje pigmento spalvai yra nereikšminga ir galime vertinti viso pigmento, kaip dažo, spalvą.

4. 3. Pigmentų spalvinio atstatymo modeliavimas

Bendru atveju apšviesto paviršiaus SPD nusakoma šaltinio SPD bei stebimo paviršiaus atspindžio spektro sandauga: $S_A(\lambda) = S_L(\lambda) * \rho(\lambda)$, kur $S_L(\lambda)$ šaltinio spektrinės galios skirstinys, o $\rho(\lambda)$ – atspindžio spektras. Įprastų dažų (pigmentų) atveju: $0 < \rho(\lambda) < 1$ visame regai jautriame banginiame intervale (380 - 780 nm). Stebima spalva apibrėžiama kaip tiesinė projekcija į triveikmių sandų (X, Y, Z) erdvę, kur kiekvienas X, Y, Z sandas apibrėžiamas naudojant CIE 1931 m. standartizuotas funkcijas $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ integralais:

$$X(S_A) = \sum(S_A * \bar{x}); Y(S_A) = \sum(S_A * \bar{y}); Z(S_A) = \sum(S_A * \bar{z}). \quad (4.1)$$

Senėjimo poveikį paviršiaus atspindžio funkcijai $\rho(\lambda)$ galime apibrėžti kaip naują funkciją $d(\lambda)$. Tada $S_A(\lambda) * d(\lambda)$ yra pakitusi bandinio spalva. Jeigu turime konkrečią dažų aibę $\{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$, apšvietimo modeliavimo uždavinys gali būti formuluojamas taip, kaip žinant pradines pigmentų spalvas $\{\rho_1(\lambda), \rho_2(\lambda), \dots, \rho_n(\lambda)\}$ bei senėjimo poveikio funkciją $\{d_1(\lambda), d_2(\lambda), \dots, d_n(\lambda)\}$ galime rasti apšvietimo spektrą S_{test} , kuomet

$$S_{Refi}(\lambda) * \rho_i(\lambda) = S_{Test1}(\lambda) * d_i(\lambda) * \rho_i(\lambda), \text{ kiekvienam } i=1, \dots, k. \quad (4.2)$$

Čia $S_{Refi}(\lambda) * \rho_i(\lambda)$ – duoti pradinių bandinių spalva, esant pradiniam apšvietimui su SPD lygia S_{ref} , o $S_{Test1}(\lambda) * d_i(\lambda) * \rho_i(\lambda)$ – spalvą atstatančio apšvietimo sąlyga.

Šiame darbe senėjimo poveikio funkcija degraduojantiems pigmentams nėra tiksliai aprašyta dėl galimo kelių faktorių veikimo: UV spinduliuotė, regimoji spinduliuotė, temperatūra, ozonas, santykinė oro drėgmė ir t.t., todėl naudotas tik atspindžio spektrų skirtumas $d_i(\lambda)$. Toliau laikysime, kad senėjimo funkcijos poveikio rezultatas yra išmatuotas po sendinimo eksperimento.

Praktiškai apšvietimo SPD pasirinkimas yra ribotas dėl galimų LED SPD ir spalvų maišymo taisyklės. Laikysime, kad

$$S_{test}(\lambda) = c_1 * S_1(\lambda) + \dots + c_j * S_j(\lambda), \quad (4.3)$$

kur $S_j(\lambda)$ – individualios komponentės su žinomu SPD, o $C = \{c_1, \dots, c_n\}$ – intensyvumai, kuriuos reikia parinkti ir

$$c_j \geq 0, \text{ visiems } j = 1, \dots, n. \quad (4.4)$$

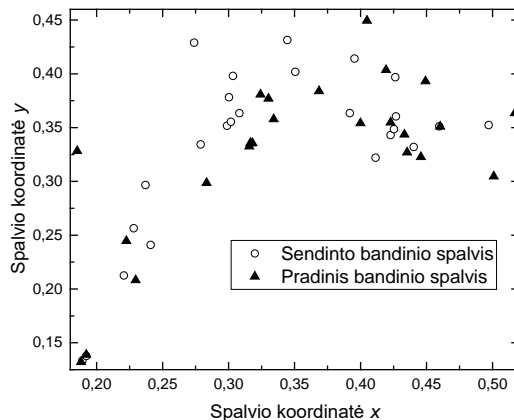
Taip apibrėžiame galimus apšvietimo SPD su j spektrinių komponentių ir nagrinėsime du atvejus:

- (1) kai bazinių komponentių aibė fiksuota (ribota prekinių LED SPD aibė);
- (2) kai kiekvienos apšvietimo komponentės SPD galime pasirinkti pagal Gauso forma [82, 81] aprašomą LED SPD. Teorinis LED SPD priklauso nuo smailės bangos ilgio ir pločio. Šis atvejis tinka tik teoriniam spalvų atstatymo modeliavimui, nes praktinių LED SPD aibė labai ribota.

Fiksuoto pasirinkimo (1) SPD atvejis yra paprastesnis, kadangi nesudėtingomis transformacijomis suvedamas į tiesinių lygčių sistemų sprendimą, kurį gali apunkinti didelis šviestukų kiekis. LED kiekis parinktas pagal galimus atrinktus 10 prekinių LED variantų. Jei turime N spalvų, tada atstatymui reikia naudoti iki $3 \cdot N$ apšvietimo komponentių, nes kiekviena spalva sudaryta iš trijų sandų (X, Y, Z).

Prof. Rimanto Vaicekausko sukurta programinė įranga šio uždavinio sprendimui įgalino patikrinti 25 sendintų bandinių (akvarelinių dažų) spalvų atstatymo uždavinį su 10 spalvotų šviestukų (kitas poskyris, 4.8 pav.), kai naudojami pirmojo ir paskutiniojo sendinimo pigmentų atspindžio spektrų matavimo duomenys. D_{65} šviesmuo su 6504 K CCT buvo pasirinktas kaip etaloninis šaltinis $S_{Ref}(\lambda)$.

Nustatyta, kad nagrinėjamas 10 šviestukų rinkinys leidžia tiksliai atstatyti kiekvieną atskirai paimtą bandinį naudojant nebūtinai baltą šviesą. Iš viso buvo rasta 738 metameriniai vieno dažo atžvilgiu (t.y., išlaikantys dažo spalvą) šaltiniai visiems 25 bandiniams, susidedantys iš 3 pirminių spalvinių komponentių.



4.5 pav. Sendintų pigmentų spalvio skirtumai apšvietus 1 ir 24 spalviniam bandiniui metameriniu šaltiniu.

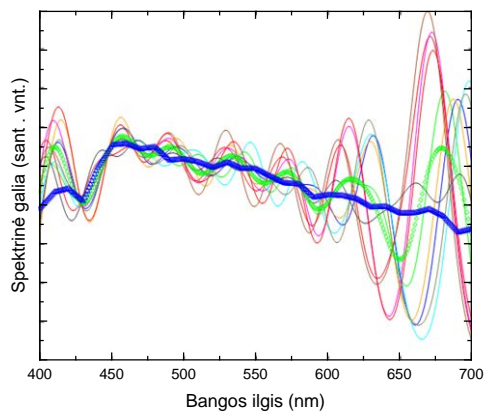
Pavyzdžiui, atlikus metamerinių 1 (raudonas) ir 24 (mėlynas) spalviniams bandiniams praktinių LED telkinių su ne mažiau 6 skirtingomis LED spalvinėmis komponentėmis modeliavimą, nustatyta, kad be 1 ir 24, tik 15 bandinio spalva gali būti atstatyta, nes jos spalvio pokytis degradacijos metu yra vienas mažiausių (4.5 pav.). Pačių metamerinių šaltinių rasta 10, tačiau jų taikymas neturi prasmės dėl riboto degradavusių spalvų atstatymo.

Kitas žingsnis buvo teorinių LED SPD su normaliuoju 30 nm skirstiniu modeliavimas spalvų perteikimui su nepakitusiu sodriu pradiniams pigmentams, t.y. natūralaus apšvietimo radimas fotochemiškai nepažeistiems pigmentams. Atstatančiojo skirstinio $S_{Test}(\lambda)$ paieška suvedama į šviestukų smailių pozicijų $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ paiešką, kuris tenkintų spalvų atstatymo sąlygą (4.2), intensyvumų C ribojimą (4.4) bei sąlygą:

$$\lambda_{min} \leq \lambda_j \leq \lambda_{max} \quad (4.5)$$

Kaip ir buvo galima tikėtis – sprendinių $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ radimą labai apsunkina (4.2), (4.4), (4.5) suvaržymai, todėl tikslaus sprendinio paieškos buvo supaprastintos įtraukiant šviesos veiksmingumo funkcija, kurią norime maksimizuoti. Tai yra svarbu praktiniam taikymui dėl energetinio efektyvumo. Žemo LER šaltinis bus energetiškai neefektyvus generuojant šviesinį srautą. Banginė sritis apribota intervalu $\lambda_{min} = 400$ nm, $\lambda_{max} = 700$ nm.

Modeliavimas su teoriniais LED SPD buvo išbandytas didžiausio sodrio bandiniams Nr. 4, 6, 8, 24, bei neutralios spalvos bandiniui Nr. 9. Gautas rezultatas – visų išvardintų bandinių aibei metamerinių spektrų, sudarytų iš 15 Gauso formos modelinių SPD LED 4.6 pav.), CRI (99,0-99,7) mažai skyrėsi nuo idealios (100) . Tai reiškia, jog pasirinkta bandinių aibė su didelio sodrio bei viena balta spalvomis yra pakankamai reprezentatyvi. 12 metamerinių SPD, jų vidurkis (žalia juosta) bei D_{65} SPD (mėlyna juosta) pateikti 4.6 paveikslėlyje.

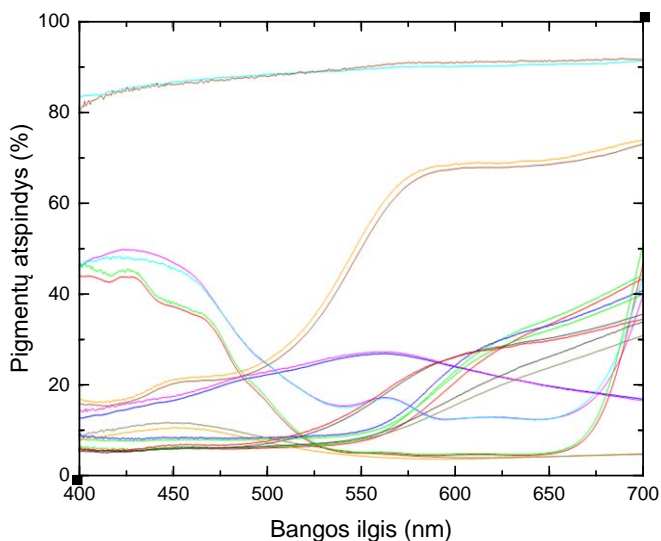


LED SPD smailių padėtys visuose iš 12 metamerinių baltų SPD, kurių spalvis atitinka D_{65} , pasiskirstę

4.6 pav. Metameriniai spektrai, jų vidurkis (žalia juosta) bei D_{65} spektrinės galios skirstinys (mėlyna juosta).

414 – 669 nm intervale. Šio intervalo reikia metameriniams SPD gauti, kurie tiksliai atkurtų minėtų spalvinių bandinių spalvą. Palyginimui, modeliuojant su 1 nm spektro pločio šviestukais, galime sumažinti reikalingą intervalą iki 439 – 663 nm. Realūs šviestukų spektrai raudonojoje srityje yra truputį siauresni negu 30 nm, todėl tikslesnį intervalą, esant poreikiui, būtų galima nustatyti parinkus artimesnį realiems šviestukams spektrinį modelį. Visais nagrinėtais atvejais reikalingas N LED su smaile < 450 nm bei D LED su smaile 660 nm.

Modeliavimo rezultatai atstatant sendintų 25 pigmentų spalvas parodė, kad daugelio pigmentų porų spalva gali būti atstatoma (išskyrus poras su dažais Nr. 4, 7, 8, 13, 14, 19, 21). Pasisekė atstatyti aštuonis spalvų trejetus (3 pigmentų aibė) iš dažų Nr. 1, 2, 3, 5, 9, 18, 20, 22, 23, 24 aibės. Optimizavimo procedūra nedavė rezultato, bandant atstatyti 4 ar daugiau sendintus pigmentus apšviečiant juos vienu metu. Žemiau pateiktas paveikslėlis (4.7 pav.) vaizduoja atspindį nuo 10 porų originalių ir dalinai atstatytų sendintų pigmentų, kurių trejetus galima atstatyti. Pastebėsime, kad spektriniai pokyčiai nėra dideli.



4.7 pav. 10 atspindžių porų nuo originalių ir dalinai atstatytų sendintų pigmentų, kurių trijų pigmentų aibę galima pilnai atstatyti. Skirtumas tarp originalaus ir atstatyto atspindžio nėra žymus, todėl porų žymėjimas neišskirtas.

Reziumuojant antrojo modeliavimo su teoriniais LED SPD rezultatus galima teigti, kad visiškas sendintų pigmentų atstatymas yra įmanomas tik nedidelei gana ribotai ir iš anksto pasirinktai pigmentų/dažų aibei.

Toliau modelyje visiško spalvinio atstatymo reikalavimas buvo pakeistas spalvinio atstatymo klaidos kriterijumi, kuomet leidžiamas mažiausių kvadratų metodu nustatytas nuokrypis nuo pradinio spalvos taško. Nagrinėjamai praktinių 10 šviestukų sistemai atstatymo vidutinės kvadratinės šaknies klaida (rmse) yra 5,35 Δa^*b^* CIELAB spalvių erdvėje, kai nublukusių (neatstatytų) pavyzdžių skirtumas nuo pradinių yra 10,36 Δa^*b^* . Taigi galime daryti išvadą, kad ir bendru atveju visų 25 bandinių tikslus atstatymas yra neįmanomas teorinių SPD LED sistemoje. Taip pat prekinių LED naudojimas yra ribotas dėl mažo LED SPD pasirinkimo.

Nagrinėjant 4.1 lentelėje pateiktą 5 spalvų atstatymą mažiausių kvadratų metodu CIELAB erdvėje, matome, kad pradinis rmse=3.19. Atstačius spalvas, rmse=1.66, t. y., vidutinis kvadratinis nuokrypis priartėjo prie vos juntamo pokyčio visai spalvinių bandinių aibei. Šis Δa^*b^* pokytis CIELAB erdvėje apibrėžiamas kaip iki 1,5, kuomet dar galimas spalvų neatskyrimas. Tuo remiantis 1 baltas pigmentas yra iškraipomas, kai antrasis atstatomas į pradinį lygį. Raudona ir geltona spalvos taip pat yra atstatomos, tačiau ne mėlyna. Vertinant ir šią spalvinių bandinių aibę, turime rezultatą, analogišką 25 bandinių aibei, kuomet atstatoma tik daugiausiai 3 spalvinių bandinių rinkinys.

4.1 lentelė. Penkių spalvinių bandinių paletės blukinimo ir atstatymo nuokrypiai CIELAB spalvų erdvėje.

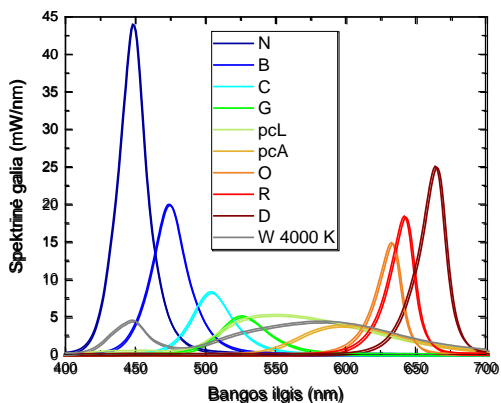
Nr.	Spalva	Blukinimo CIELAB pokytis	Atstatytos spalvos pokytis
1	Balta	0,83	2,01
2	Balta	3,51	1,33
3	Raudona	4,33	0,92
4	Geltona	2,09	1,22
5	Mėlyna	3,81	2,37
	Suminis efektas (rmse)	3,19	1,66

Remiantis modeliavimo rezultatais negalima teigti, kad kietakūniu apšvietimu galima iš esmės atstatyti dėl fotocheminio poveikio nublukusias spalvas. Esant gausnei spalvinių bandinių paletei (daugiau negu 4 nublukusios skirtingos spalvos) spalvų atgalinė korekcija su dabartine kietakūnio apšvietimo technologija yra neįmanoma. Nepaisant to, daliniais

atvejais, kai atstatomos 1 ar 2 bazinės spalvos ar jų mišiniai, optimizavimo metodas gali būti pritaikomas.

4. 4. Universalus daugiaspalvis kietakūnis šaltinis

Prototipinis šviestuvų daliniam ar visiškam ribotos aibės spalvinių bandinių neinvaziamam spalvų atstatymui projektuotas naudojant su rinkoje esančius prekinius šviestukais, siekiant kuo daugiau skirtingų spalvų sudėti į kompaktišką baltos šviesos telkinį. Parinktų šviestukų SPD pavaizduoti 4.8 pav., jų parametrai įvertinti 4.2 lentelėje. Parinkti



4.8 pav. Atskirų šviestukų spektrinės galios skirstiniai prototipiniame šviestuve

“Cree XQ-E” serijos (tik D LED) ir “Lumileds Luxeon C color” (likę) šviestukai. Gamintojai siūlo ir ~730 nm fotografijai skirtą bei konversijos fosfore mėtinės spalvos šviestukus, kurie šiam meno kūrinį apšvietimo taikymui netinka. ~730 nm LED žmogaus regai nėra tinkamas dėl žemo šviesos veiksmingumo, o konversijos fosfore mėtinės spalvos LED atitinka pcL SPD su didesne mėlyna komponente. Viso sumontuoti 38 šviestukai: 3 N, 3B, 4 C, 5 G, 3 pcL, 5 pcA, 4 O, 4 R, 4 D ir 3 W. Bendras šviestuvo šviesinis srautas įskaičius nuostolius spalvų maišymo optikoje (iki 20 %) siekia 3000 lm su ~70 W elektrine galia, o šviesinis našumas ~43 lm/W. Visų spalvinių kanalų bendra spalva atitinka ne baltą šviesą, todėl nėra praktiškai naudojama.

Prototipas sudarytas iš 10 srovės valdymo grandinių su AL8807 srovės valdikliais, ATxmega16U4A mikrovaldiklio su grįžtamuoju šiluminiu ryšiu, Bluetooth 2.0 ryšio modulio, dviejų įtampos stabilizavimo grandinių (viena mikrovaldikliui, kita 12 V membraniniam ventiliatoriui) ir LED. Atskiri spalviniai kanalai valdomi 12 bitų moduluoto pločio impulsų (PWM) signalais. Šiluminis grįžtamasis ryšys turi dviejų pakopų šviesinio srauto kompensavimo algoritmą. Pirmasis atlieka srauto korekciją pagal PWM signalą, o antrasis – pagal MCPCB temperatūrą. Mikrovaldiklio kodą parengė tuometinis Matematikos ir Informatikos fakulteto (VU) studentas Denis Lebedenko, vadovaujamas prof. Rimanto Vaicekausko. 24 V maitinimo

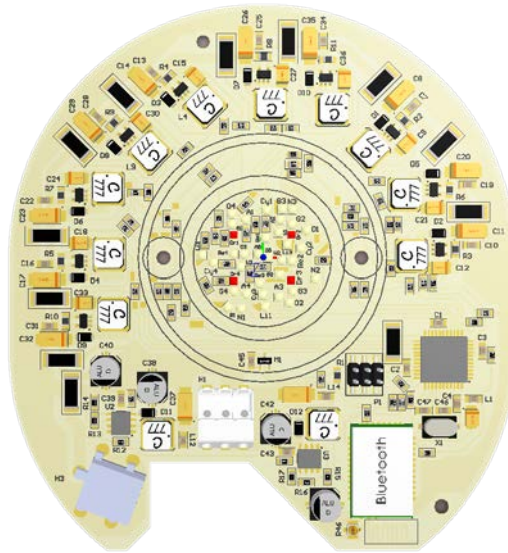
šaltiniu maitinami elektronikos komponentai sumontuoti ant MCPCB (4.8 pav.), kuri sumontuota ant standartinio šviestuvo radiatoriaus su įmontuotu membraniniu ventiliatoriumi galinėje pusėje. Optikos laikiklis prisuktas prie MCPCB, kuris laiko LEDIL kompanijos spalvas maišančią optiką. Frezavimo staklėmis pagamintu baltu dangteliu uždengta elektronika ir šis dangtelis laiko šviestuvo laikiklį, kuris tvirtinimas naudojant trikojį ar apšvietimo bėgelį.

4.2 lentelė. Prototipiniam šviestuvui parinktų šviestukų parametrai esant 700 mA srovės stipriui ir 60 °C MCPCB temperatūra

Šviestukas	Šviestinis srautas (lm)	Spindulinis srautas (W)	Šviestinis našumas (lm/W)	Efektyvumas (%)	CIE x	CIE y	Smailės bangos ilgis	Pusplotis (nm)
N	29,7	0,79	14,4	38,3	0,1559	0,0248	448	21
B	56,0	0,45	26,0	21,0	0,1176	0,1136	474	27
C	104,2	0,28	55,1	15,0	0,0916	0,5658	504	34
G	120,2	0,20	61,2	10,4	0,2076	0,7046	526	39
pcL	230,2	0,52	115,7	26,2	0,4122	0,5185	550	120
pcA	122,9	0,33	62,0	16,8	0,5714	0,4233	596	83
O	75,4	0,39	46,7	24,0	0,6851	0,3097	633	21
R	68,7	0,48	44,7	31,3	0,6961	0,2979	642	21
D	37,9	0,59	26,6	41,4	0,7107	0,2816	664	22
W 4000 K	195,3	0,58	97,3	28,9	0,3787	0,3683	448	30

MCPCB projektavimas atliktas su Altium Designer programa, kurioje pateikiamas plokštės 3D vaizdas su naudojamais elektronikos komponentais. Centrinėje dalyje išdėstyti LED bei naudoti nulinės varžos rezistoriai (trumpikliai). Skirtingų spalvų LED yra išmaišyti dėl geresnio spalvų maišymo, o elektriniams takeliams tarp skirtingų LED naudotas Luxeon C serijos šviestukų šiluminis padelis leido panaudoti vieno sluoksnio MCPCB plokštę. Taip buvo sumažinta sistemos kaina, bet išlaikytas aukštas MCPCB (3 W/m·K) šiluminis laidumas. Šviestuvo funkcinis dizainas pritaikytas patogiam naudojimui ir transportavimui (4.10 pav.). Taip pat parengtas šviestuvo 3D brėžinys SolidWorks projektavimo programoje, kuris gali būti naudojamas šiluminiam modeliavimui. Šviestuvo galinėje pusėje sumontuotas membraninis ventiliatorius sumažina naudojamą elektrinę galią, nes yra efektyvesnis už tradicinius sprendimus. Išorinis maitinimo šaltinis jungiamas 2,5/5,5 mm jungtimi prie šviestuvo (4.10 pav juodas laidas

dešinėje). Šviestuvo išoriniai matmenys be juodo laikiklio yra 150x125x120 mm.



4.9 pav. Šviestuvo su elektronikos komponentais MCPCB 3D modelis Altium Designer programoje.



4.10 pav. Šviestuvo 3D modelio vaizdas Solidworks programoje (kairėje) ir veikiančio šviestuvo nuotrauka (dešinėje)

Šviestuvo valdymo programos vartotojo sąsaja (4.11 pav.) buvo parašyta naudojantis Visual Basic .NET programavimo kalba Windows platformoje. Programos vartotojo sąsają sudaro du langai: demonstracinės ir detalaus valdymo. Demonstracinėje versijoje skirtoje apšvietimo demonstracijai pateikti 5 fiksuoti apšvietimo režimai: liepsnos šviesos telkinys [P2], RpcAGN telkinio natūralus apšvietimas esant 3000 K (namų



4.11 pav. Šviestuvo valdymo programos vartotojo sąsajos langai. Kairėje - demonstracinė versija, dešinėje – detalus apšvietimo valdymas.

Apšvietimo atitikmuo), 4500 K (ofiso atitikmuo) ir 6500 K (dienos šviesos atitikmuo) bei sodrinantis 4500 K RGN telkinys. Pastarasis apšvietimas demonstruoja sodrinantį vaizdą, kuris gaunamas atlikus nuotraukas išmaniuoju telefonu su programiniu spalvų sodrinimu. Šiuos apšvietimus galima temdyti pagal poreikį. Kiti 3 dinaminiai režimai skirti perteikti besikeičiantį apšvietimą: greitas ir lėtas klubinis režimas su paskiromis spalvomis ir spalvinės kokybės svertinio koeficiento kitimas RpcAGN telkinyje. SKSK valdymo demonstravimas supažindina su kietakūnio apšvietimo besikeičiančia spalvine kokybe ir perteikiamu spalvų gamos plotu. Pažangaus valdymo lange galimas visų spalvinių kanalų valdymas. Lango viršuje (4.11 pav. dešinėje) pavaizduota adaptuota CIELAB spalvų erdvė. Ji parinkta vizualiniam pasirenkamos apšvietimo spalvos pavaizdavimui. Paveikslo centre atvaizduoti baltos šviesos CCT nuo 2100 K iki 10000 K miredų skalėje, todėl CCT pasirinkimas yra tolygus subjektyviu požiūriu. Spalvių sritys virš ir po baltos šviesos tiese vaizduoja spalvų nuokrypį nuo Planko lanko. Galimas $\pm 0,005$ Duv valdymas kiekvienam CCT taškui. Šviestuve palikta galimybė valdyti visus spalvinius kanalus nepriklausomai, kur kiekvienas kanalas pažymėtas savo spalva (centrinė dalis). 10 nepriklausomų spalvinių kanalų įveda papildomus 6 laisvės laipsnius sudėtiniam šviestuvo SPD lyginant su keturspalviu RpcAGN šaltiniu, kuris turi tik 1 laisvės laipsnį metameriniams šaltiniams. Tas 1 laisvės laipsnis yra

SKSK valdymas. Šiam šviestuvui pritaikytas panašus SPD valdymas. Kadangi ne visi trispalviai telkiniai gali sudaryti baltą šviesą visame CCT intervale, todėl paskirų šviestukų triveikmiai sandai, reikalingi spalvų maišyme, sugrupuoti pagal spalvos grupę. Kairėje esantys slankikliai suskirstyti į 4 grupes: mėlyną (B) sudaro N ir B, žalią (G) – C, G ir pCL, geltoną (A) – pcA ir W, o raudoną (R) – O, R ir D. Sudėtinis šviestuvo SPD valdomas taip:

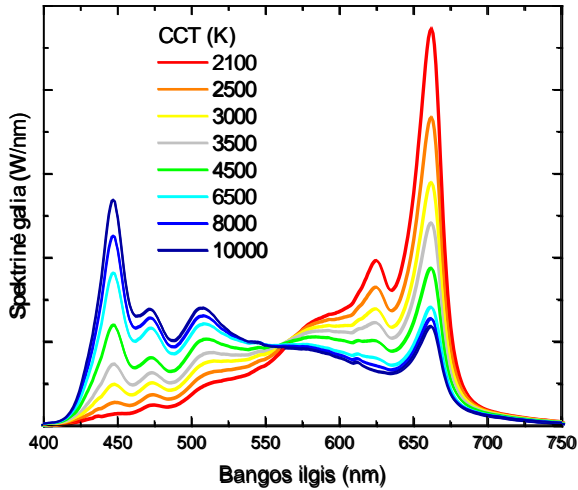
$$\left\{ \begin{array}{l} S_{TOTAL}(\lambda) = \sigma(S_{Red}(\lambda) + S_{Green}(\lambda) + S_{Blue}(\lambda)) + \\ \quad + (1 - \sigma)(S_{Amber}(\lambda) + S_{Green}(\lambda) + S_{Blue}(\lambda)); \\ S_{Red}(\lambda) = \alpha_1 S_D(\lambda) + \alpha_2 S_R(\lambda) + \alpha_3 S_O(\lambda) \\ S_{Amber}(\lambda) = \alpha_4 S_{pcA}(\lambda) + (1 - \alpha_4) S_W(\lambda) \\ S_{Green}(\lambda) = \alpha_5 S_{pCL}(\lambda) + \alpha_6 S_G(\lambda) + \alpha_7 S_C(\lambda) \\ S_{Blue}(\lambda) = \alpha_8 S_B(\lambda) + (1 - \alpha_8) S_N(\lambda) \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Čia σ yra SKSK su vertėmis nuo 0 iki 1. Spalvų svertiniai rodikliai $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8$ nuo 0 iki 1 valdo kiekvienos spalvos sandą į SPD. Įvestas apribojimas nenustatyti vienos grupės sandų į 0 palieka paskutinę valdytą spalvą su sandu 1.

Toks SPD valdymas leidžia tiesiogiai keisti spalvų atgavą norimoje spalvų erdvėje, pavyzdžiui, mėlyną pakeitus tamsiai mėlynu ar oranžinį tamsiai raudonu. Jei nustatyto SPD raudonos, gintarinės, žalios ir mėlynos spalvų sandai neleidžia atkurti norimos CCT ar Duv, programa neatlieka šviestuvo derinimo ir palieka paskutinę galimą vertę. Dešinėje esantys slankikliai leidžia keisti baltos šviesos CCT su Duv = 0, SKSK (σ) ir bendrą šviestuvo srautą. Pažymėjimas „Natural lighting“ leidžia atkurti natūralų apšvietimo visoje CCT srityje, kuris nebūtų atskiriamas nuo kito natūralaus apšvietimo šaltinio (žiūrėti kitą pastraipą). „Max flux“ leidžia padidinti šviestuvo srautą iki maksimalaus, kurį riboja vienas spalvinis kanalas, priklausomai nuo norimo SPD. Šviestuvo spalvų sandus galima įrašyti į atmintį su „Write to memory“ mygtuku, kad naujai įjungus maitinimą, šviestuvai atkurtų norimą apšvietimą. Taip pat įdiegta funkcija atskirus spalvinius kanalus įjungti su klaviatūra, skirta praktinėms demonstracijoms.

Šviestuvo daugiaspalviškumas leidžia atkurti natūralaus apšvietimo sąlygas, kurios nesiskirtų nuo teorinių SPD spalvinės kokybės. Spalvinių kanalų sandai buvo optimizuoti taip, kad pasiektų didžiausią CRI visoje CCT srityje. Modeliavimą atliko prof. Rimantas Vaicekuskas. Teorinis modeliavimas parodė, kad tam užtenka 8 spalvų be G ir R LED, kuomet pasiekimas CRI ~ 99 (4.3 lentelė). Šaltiniai, su CRI = 95 ir daugiau nėra atskiriami nuo idealaus 100. Ši riba įgudusiam tyrimo dalyviui prasideda nuo

CRI = 97. Kaip matome, teoriškai šviestuvais atkuria natūralų apšvietimą labai plačiame CCT intervale. Papildomi spalvų atgavos rodikliai (CRI 2012, R_f, R_g ir R₉ 2012) rodo, kad šviestuvai yra tiksliai atkuriantis spalvas. Praktiškai įvedus teorinius duomenis



4.12 pav. Šviestuvo teoriniai natūralaus apšvietimo spektrinės galios su skirtingomis susietosiomis spalvinėmis temperatūromis.

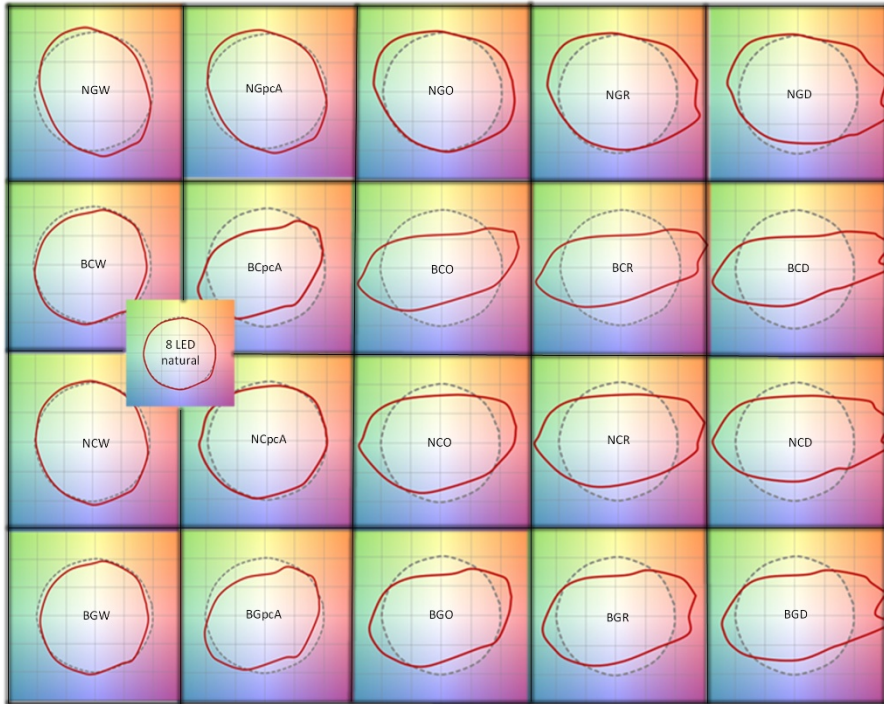
eksperimentinėmis kreivėmis į šviestuvo programą paskirų spalvų valdymui, turime 1 balu mažesnius rodiklius dėl neatitikimų ir spektrų smailių poslinkių esant skirtingoms temperatūroms. 4.12 pav. pateikti modeliniai SGS esant skirtingoms CCT.

4.3 lentelė. Teoriniai prototipinio šviestuvo natūralaus apšvietimo parametrai

CCT (K)	CRI	CRI 2012	R _f	R _g	R ₉	R ₉ 2012	LER (lm/W)
2100	99,4	99,4	98,1	99,9	98,9	99,2	245,3
2500	99,5	99,4	97,8	100,2	98,9	99,2	263,8
3000	99,5	99,4	97,1	100,4	98,9	99,3	275,6
3500	99,5	99,3	96,6	100,5	98,8	99,3	280,2
4500	99,3	99,1	95,6	100,6	98,7	99,3	278,8
6500	99,3	99,1	95,4	100,6	98,5	99,3	270,0
8000	99,1	99,0	94,7	100,3	98,1	99,1	261,4
10000	99,0	98,8	94,0	100,3	97,8	99,0	252,8

Šviestuvo spalvinių komponentų derinimas leidžia pasiekti įvairius atkuriamų spalvų sodrio ir spalvinio tono pokyčius (4.13 pav.). Sudarant trispalvius telkinius su N, B, C, G, O, R ir D LED turime stiprų spalvų sodrinimą raudonoje ir žalioje spalvų srityse. B, C ir O ar R, ar D telkinys pasižymi stipriu spalvinio tono iškraipymu bei sodrinimu žydrėje ir raudonoje

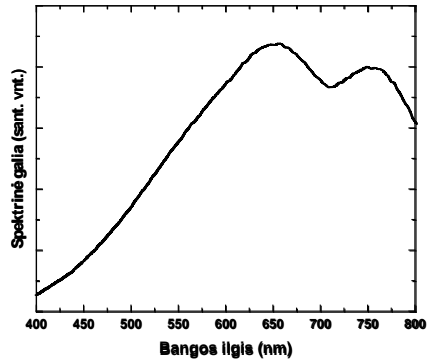
srityse, kuris kompensuojamas blukinimu geltonoje bei mėlynoje srityse. pCL LED įtraukiamas tik į spalvų blukinimą kartu su N ir W LED. Natūralus apšvietimas tiksliai atkuria spalvas visoje spalvų gamoje naudojant 8 LED be G ir R LED. Tiesioginės emisijos gintarinio/geltono LED trūkumas atsispindi spalvų gamos valdyme geltonoje srityje, nes nepasiekiamas geltonų spalvų sodrinimas.



4.13 pav. Šviestuvo trispalvių telkinių spalvinės kokybės galimybės spalvų gamos valdymui. Centre kairiau pateiktas natūralaus apšvietimo spalvų atkūrimas

Turimi modeliavimo rezultatai parodo, kad visoms CCT turime natūralų apšvietimą, kuris nesiskiria nuo etalonu meno kūrybai apšvietimui laikomos halogeninės lempučių šviesos, atitinkančios absoliučiai juodojo kūno spinduliuotę. Tiriant halogeninės lempučių su daugiasluoksnio reflektoriu SPD nustatyta, kad daugiasluoksnis reflektorius keičia SPD šviesos sklaidimo kryptimi, nes raudonos ir infraraudonos spinduliuotės dalį nukreipia į priešingą pusę. Tokiu būdu pastebime, kad ~3000 K halogeninė lempučių nėra idealus natūralios šviesos šaltinis (4.14 pav.), nes jo CRI siekia 96 (4.4 lentelė) ir neatitinka teorinės juodojo kūno spinduliuotės spektro.

Matuojant integruotą SPD, turime juodojo kūno spinduliuotės atitikmenį, tik keliais šimtais žemesnėje CCT. Šiuo atveju yra taip, kad halogeninės lempučių su daugiasluoksniu reflektoriumi (MR) spalvinė kokybė yra neatskiriama nuo balto šviestuko su CRI = 95 spalvinės kokybės. UV filtras, kuris gali būti panaudotas nufiltruoti bangos ilgus iki 420 nm, sumažina halogeninės lempučių CRI dar 1 balu. Šiuo atveju manymas, kad halogeninė lempučių yra idealus šviesos šaltinis meno kūrinių apšvietimui yra labai klaidingas. Šie neatitikimai buvo nustatyti naudojant integruojančią sferą, kuomet matuotas halogeninės lempučių SPD šviesos sklidimo kryptimi.



4.14 pav. Halogeninės lempučių su daugiasluoksniu reflektoriumi spektrinės galios skirstinys šviesos sklidimo kryptimi.

4.4 lentelė. Halogeninės lempučių ir prototipinio šviestuvo spalvinės kokybės parametrai esant 2930 K CCT.

Šaltinis	CRI	CRI 2012	R _f	R _g	R ₉	R ₉ 2012	LER (lm/W)
Halogeninė lempučių	96,0	95,6	95,5	96,4	83,8	93,1	194,9
8 kanalų LED telkinys	99,5	99,3	97,3	100,4	98,4	99,2	274,1

Pagamintas prototipinis daugiaspalvis šviestuvus leidžia atkurti žvakių šviesos apšvietimą su žemu cirkadiniu poveikiu (pcA+N telkinys) [P2], valdyti spalvinę kokybę su R_{pcAGN} telkiniu [P1], kuris pasižymi žema fotochemine žala [P3, P4], sukurti žmogaus patraukliausią apšvietimą [P1, P5]. Valdymas išilgai izotemperatūrinės tiesės leidžia sumažinti metamerinių RGN ir pcAGN telkinių spalvų skirtumus [P6], cirkadinio poveikio įvertinimas galimas dinaminiam apšvietimui [P7]. Toks šviesos šaltinis sujungia visus autoriaus ir jo vadovo apšvietimo tyrimų grupės tyrimus bei patentuotas technologijas.

4. 5. Ketvirtojo skyriaus išvados

UV apšvietimo paveikti meno kūrinių restauracijai naudojami pigmentai degraduoja skirtingai ir priklausomai nuo cheminės sudėties. Pigmentų neinvazinis spalvinis atstatymas galimas tik su teoriniais normaliojo skirstinio šviestukų spektrinės galios skirstiniais bei ribotam spalvinių bandinių kiekiui. Pavienių pigmentų spalva gali būti atstatyta naudojant ir praktinius šviestukų telkinius. Tiksliam meno kūrinių neinvaziniam spalvos atstatymui gali būti naudojamas projektorius su valdoma spalvine kokybe apšviečiamai skirtingų spalvų plotų aibe. Pademonstruotas 10 spalvinių kanalų šviestukas apjungia visas pažangaus kietakūnio apšvietimo galimybes.

IŠVADOS

- 1) Maloniausia susietoji spalvinė temperatūra esant 1900 K adaptacinei spalvinei temperatūrai žemos apšvietos sąlygomis esant 5 lx ir 50 lx su natūraliu keturspalviu apšvietimu pasirenkama esant atitinkamai 3000 ± 200 K ir 3500 ± 250 K.
- 2) Nustatyta 3350 K susietoji spalvinė temperatūra, kuomet adaptacinė susietoji spalvinė temperatūra sutampa su pasirinkta maloniausia pasirinkta susietąja spalvine temperatūra.
- 3) Žemos apšvietos sąlygomis apšvietimas su spalvas blukinančiu, natūraliu ir pirmenybiniu apšvietimu lemia statistiškai panašius spalvų skyrimo rezultatus, todėl natūralaus apšvietimo naudojimas netenka prasmės dėl ekonominių sumetimų.
- 4) Tiesiškai didėjant apšvietimo atkuriamam spalvų gamos plotui, tiesiškai didėja ir spalvų rikiavimo klaidos, lemiamos spalvinio tono iškraipymų.
- 5) Metamerinių 3000 K konversijos fosfore gintarinės, žalios ir tamsiai mėlynos bei raudonos, žalios ir tamsiai mėlynos šviestukų telkinių dalinei spalvos korekcijai galima panaudoti telkinių spalvos valdymą išilgai izotemperatūrinės tiesės.
- 6) Pademonstruota praktinė dinamiškai valdoma penkiaspalvė sistema, sudaryta iš raudonos, žalios ir mėlynos spalvų bei žemos ir aukštos susietosios spalvinės temperatūros šviestukų pasižymi plačiu cirkadinio poveikio, spalvinės kokybės, susietosios spalvinės temperatūros ir pirmenybinio apšvietimo valdymo intervalu bei tinka į žmogų orientuotam apšvietimui.
- 7) UV spinduliuotės fotochemiškai pažeistų pigmentų neinvazinis spalvinis atstatymas gali būti atliktas naudojant kietakūnį apšvietimą tik kiekvienai spalvai atskirai.
- 8) Didelės praktinių pigmentų spalvų aibės spalvinis atstatymas negalimas dėl riboto spalvų sodrinimo galimybių naudojant bendrąjį apšvietimą, todėl siūlomas sprendimas pasitelkti valdomos spalvinės kokybės „projektorius“ kaip apšvietimo prietaisus.
- 9) Pademonstruotas 10 spalvinių kanalų kietakūnis šviestuvus pasižymi plačiomis spalvų gamos ploto valdymo savybėmis ir leidžia atlikti dalinį spalvinį atstatymą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] Commission Internationale de l'Eclairage, „Colour rendering of white LED sources,“ *Pub. CIE 177* (2007).
- [2] A. David, P. T. Fini, K. W. Houser, Y. Ohno, M. P. Royel, K. A. G. Smet, M. Wei and L. Whitehead, „Development of the IES method for evaluating the color rendition of light sources,“ *Optics Express* **23**(12), 15888-15906 (2015).
- [3] A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, F. Ivanauskas, H. Vaitkevičius, P. Vitta ir M. S. Shur, „Statistical approach to color quality of solid-state lamps,“ *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 15, 1753–1762 (2009).
- [4] G. C. Brainard J. P. Hanifin, J. M. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, M. D. Rollag, „Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor,“ *The Journal of Neuroscience* 21, 6405-12 (2001).
- [5] A. A. Kruithof, „Tubular luminescence lamps for general illumination,“ *Philips Techn. Rev.* 6, 65–73 (1941).
- [6] N. Moroney, M. D. Fairchild, R. W. G. Hunt, C. Li, M. R. Ronnier, T. Newman, „The CIECAM02 Color Appearance Model,“ *IS&T/SID Tenth Color Imaging Conference*, The Society for Imaging Science and Technology, Scottsdale, Arizona (2002).
- [7] Commission Internationale de l'Eclairage, „Guidance towards Best Practice in Psychophysical Procedures Used when Measuring Relative Spatial Brightness,“ *CIE 212:2014* (2014).
- [8] R. Likert, „A Technique for the Measurement of Attitudes,“ *Archives of Psychology* 140, 1-55 (1932).
- [9] H. W. Bodmann, „Quality of interior lighting based on luminance,“ *Trans. Illum. Eng. Soc. (London)* 32, 22–40 (1967).
- [10] A. H. Cockram, J. B. Collins and F. J. Langdon, „A study of user preferences for fluorescent lamp colours for daytime and night-time lighting,“ *Lighting Res. Technol.* 2, 249–256 (1970).
- [11] P. R. Boyce, „Investigations of the subjective balance between illuminance and lamp colour properties,“ *Lighting Res. Technol.* 9, 11–24 (1977).
- [12] T. Wake, T. Kikuchi, K. Takeichi, M. Kasama ir H. Kamisasa, „The effects of illuminance, color temperature and color rendering index of light sources upon comfortable visual environments in the case of office,“ *J. Lighting Vis. Env.* 1, 31–39 (1977).
- [13] P. R. Boyce and C. Cuttle, „Effect of correlated colour temperature on the perception of interiors and colour discrimination performance,“ *Lighting Res. Technol.* 22, 19–36 (1990).
- [14] R. G. Davis and D. N. Ginthner, „Correlated color temperature, illuminance level and the Kruithof curve,“ *Journal of the Illuminating Engineering Society* 19, 27-39 (1990).
- [15] M. Scuello, I. Abramov, J. Gordon and S. Weintraub, „Museum lighting: Why are some illuminants preferred?,“ *J. Opt. Soc. Am. A* 21, 306–311 (2004).

- [16] M. Scuello, I. Abramov, J. Gordon and S. Weintraub, „Museum lighting: Optimizing the illuminant,” *Color Res. Appl.* 29, 121–127 (2004).
- [17] A. Liu, A. Tuzikas, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta and M. Shur, „Cultural preferences to color quality of illumination of different artwork objects revealed by a color rendition engine,” *EEE Photonics J.* 5, 6801010 (2013).
- [18] M. Miki, Y. Motoya, H. Ikegami and S. Fujimoto, „Combination of preferred illuminance and preferred color temperature for work,” *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Manchester, United Kingdom (2013).
- [19] S. Fotios, „A Revised Kruithof Graph Base on Empirical Data,” *LEUKOS* 13, 3-17 (2017).
- [20] P. R. Boyce and L. D. Bruno, „An evaluation of high pressure sodium and metal halide light sources for parking lot lighting,” *J. Illum. Eng. Soc.* 28, 16–32 (1999).
- [21] M. S. Rea, J. D. Bullough and Y. Akashi, “Several views of metal halide and high-pressure sodium lighting for outdoor applications,” *Lighting Res. Technol.* 41, 297–320 (2009).
- [22] C. Knight, “Field surveys of the effect of lamp spectrum on the perception of safety and comfort and night,” *Lighting Res. Technol.* 42, p. 313–329 (2010).
- [23] H. Nikunen, M. Puolakka, A. Rantakallio, K. Korpela and L. Halonen, “Perceived restorativeness and walkway lighting in near-home environments,” *Lighting Res. Technol.* 46, p. 308–328 (2014).
- [24] F. Li, D. Chen, X. Song and Y. Chen, “LEDs: a promising energy-saving light source for road lighting,” in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Wuhan, China (2009).
- [25] M. Miki, H. Ikegam, Y. Motoya and S. Fujimoto, „Combination of preferred illuminance and preferred color temperature for work,” *in Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMS)*, Manchester, United Kingdom (2013).
- [26] A. H. Munsell, „A color notation,” Michigan university: Munsell color company, inc., 65 (1954).
- [27] Commission Internationale de l'Eclairage, „Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources,” *Pub. CIE 13.3* (1995).
- [28] K. Houser, „Opinion on Proposed Rulemaking: CRI Should Not Become Law,” *LEUKOS* 10(4), 181-182 (2014).
- [29] T. Smith and J. Guild, „The C.I.E. colorimetric standards and their use,” *Transactions of the Optical Society* 33(3), 73-134 (1932).
- [30] D. L. MacAdam, „Visual sensitivities to color differences in daylight,” *J. Opt. Soc. Am.* 32(5), 247–274 (1942).
- [31] A. Thwaites, C. Wingfield, W. Wieser, A. Soltan, W. D. Marslen-Wilson, I. Nimmo-Smith, „Entrainment to the CIECAM02 and CIELAB colour appearance models in the human cortex,” *Vision Research* 145, 1-10 (2018).

- [32] K. Smet, J. Schanda, L. Whitehead and R. M. Lou, „CRI2012: A proposal for updating CIE colour rendition index,“ *Lighting Research & Technologies* 45, 689-709 (2013).
- [33] W. Davis and Y. Ohno, „Color quality scale,“ *Opt. Eng.* 49, 033602 (2010).
- [34] M. S. Rea and J. P. Freyssinier-Nova, „Color rendering: A tale of two metrics,“ *Color Res. Appl.* 33,192–202 (2008).
- [35] Illuminating Engineering Society of North America, „IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition,“ *New York, NY: IESNA* (2015).
- [36] K. Smet, A. David and L. Whitehead, „Why color space uniformity and sample set spectral uniformity are essential for color rendering measures,“ *LEUKOS* 12, 39-50 (2015).
- [37] E. de Beer, P. van der Burgt and J. van Kemenade, „Another Color Rendering Metric: Do We Really Need It, Can We Live without It?,“ *LEUKOS* 12, 51-59 (2016).
- [38] A. Žukauskas, R. Vaicekauskas and P. Vitta, „Optimization of solid-state lamps for photobiologically friendly mesopic lighting,“ *Appl. Opt.* 51, 8423–8432 (2012).
- [39] T. Esposito and K. Houser, „A new measure of colour discrimination for LEDs and other light sources,“ *Lighting Res. Technol* 0, 1-19 (2017).
- [40] S. Ishihara, „Tests for color-blindness,“ Handaya, Tokyo: Hongo Harukicho (1917).
- [41] M. P. Royer, K. W. Houser and A. M. Wilkerson, „Color Discrimination Capability Under Highly Structured Spectra,“ *COLOR research and application* 37(6), 441-449 (2012).
- [42] S. Jost-Boissard, P. Avouac and M. Fontoynt, „Assessing the colour quality of LED sources: Naturalness, attractiveness, colourfulness and colour difference,“ *Lighting Research & Technology* 47(7), 769-794 (2014).
- [43] K. J. Hardy, B. Craven, D. H. Foster and J. H. Scarpello, „Extent and duration of practice effects on performance with the Farnsworth-Munsell 100-Hue test,“ *Ophthalmic and Physiological Optics* 14, 306-306 (1994).
- [44] P. R. Kinneer and A. Sahraie, „New Farnsworth-Munsell 100 hue test norms of normal observers for each year of age 5–22 and for age decades 30–70,“ *British Journal of Ophthalmology* 86(12), 1408-1411 (2002).
- [45] D. Gall, „Circadiane Lichtgrößen und deren messtechnische Ermittlung,“ *Licht* 54, 1292–1297 (2002).
- [46] K. Thapan, J. Arendt and D. J. Skene, „An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans,“ *Journal of Physiology* 535, 261-7 (2001).
- [47] R. J. Lucas, S. Peirson, D. M. Berson, T. M. Brown, H. M. Cooper, C. A. Czeisler, M. G. Figueiro, P. D. Gamlin, S. W. Lockley, J. B. O’Hagan, L. L. A. Price, I. Provencio, D. J. Skene and G. C. Brainard, „Measuring and using light in the melanopsin age,“ *Trends Neurosci.* 37, 1-9 (2014).
- [48] G. E. Kearney, „Hue preferences as a function of ambient temperatures,“ *Aust. J. Psychol.* 18, 271–275 (1966).

- [49] M. D. Fairchild and L. Reniff, "Time course of chromatic adaptation for color-appearance judgements", *J. Opt. Soc. Am. A* 12(5), 824-833 (1995).
- [50] Á. Logadóttir, J. Christoffersen and S. A. Fotios, „Investigating the use of an adjustment task to set the preferred illuminance in a workplace environment,“ *Lighting Res. Technol.* 43, 403-422 (2011).
- [51] Á. Logadóttir, S. A. Fotios, J. Christoffersen, S. S. Hansen, D. D. Corell and C. Dam-Hansen, „Investigating the use of an adjustment task to set the preferred colour of ambient illumination,“ *Color Res. Appl.* 38, 46-57 (2013).
- [52] I. G. Priest, „A proposed scale for use in specifying the chromaticity of incandescent illuminants and various phases of daylight,“ *J. Opt. Soc. Am.* 23, 41-45 (1933).
- [53] Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministerija, „Dėl Lietuvos higienos normos HN 98 : 2000 "Natūralus ir dirbtinis darbo vietų apšvietimas. Apšvietos ribinės vertės ir bendrieji matavimo reikalavimai,“ internetinis šaltinis: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.101854/CDRsKAXdBk>. [žiūrėta 21 08 2018].
- [54] A. Pastoors and G.-C. Weniger, „Cave Art in Context: Methods for the Analysis of the Spatial Organization of Cave Sites,“ *J. Archaeol. Res.* 19, 377-400 (2011).
- [55] M. R. Luo, G. Cui and C. Li, „Uniform color spaces based on CIECAM02 colour appearance model,“ *Color Res. Appl.* 31(4), 320-330 (2006).
- [56] R. Pridmore and M. Melgosa, „Effect of luminance of samples on color discrimination ellipses: Analysis and prediction of data,“ *Color Res. Appl.* 30(3), 186-197 (2005).
- [57] Y. Taniguchi, M. Miki, H. Tomoyuki and M. Yoshimi, „Preferred illuminance and color temperature in creative works,“ įtraukta *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMS)*, Manchester, United Kingdom (2011).
- [58] K. W. Houser and X. Hu, „Visually Matching Daylight Fluorescent Lamplight with Two Primary Sets,“ *Color Res. Appl.*, 29(6), 428-437 (2004).
- [59] A. Vidovszky-Németh and J. Schanda, „White light brightness-luminance relationship,“ *Lighting Res. Technol.* 44(1), 55-68. (2012).
- [60] Commission Internationale de l'Eclairage, „Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes - Part 1,“ *Pub. CIE, 170-1* (2006).
- [61] Commission Internationale de l'Eclairage, „CIE 10 Degree Photopic Photometric Observer,“ *Pub. CIE 165:2005* (2005).
- [62] K. W. Houser and X. Hu, „Large-Field Color Matching Functions,“ *Color Res. Appl.* 31(1), 18-29 (2005).
- [63] G. Wyszecki and W. S. Stiles, "Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae," New York: Wiley, 278-394 (1982).
- [64] A. Huang, A. Hon, C. Tyler and E. Altschule, „Metameric intransitivity,“ *Attention, Perception, & Psychophysics* 72(4), 891-893 (2010).

- [65] A. Sarkar, L. Blonde, P. le Callet, F. Autrusseau, P. Morvan, J. Stauder, „Toward Reducing Observer Metamerism in Industrial Applications: Colorimetric Observer Categories and Observer Classification.,“ *Eighteenth Color and Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, and Applications*, Society for Imaging Science and Technology, San Antonio, 307-313 (2010).
- [66] D. Foster, K. Amano, S. M. Nascimento, M. J. Foster, „Frequency of metamerism in natural scenes,“ *Journal of the Optical Society of America A* **23**(10), 2359-2372 (2006).
- [67] W. A. Thornton, „How strong metamerism disturbs color spaces,“ *Color. Research and application* **23**(6), 402-407 (1998).
- [68] W. R. J. Brown, „Color Discrimination of Twelve Observers,“ *J. Opt. Soc. Am.* **47**, 137-143 (1957).
- [69] G. Wyszecki and G. H. Fielder, „New Color-Matching Ellipses,“ *J. Opt. Soc. Am.* **61**, 1135-1152 (1971).
- [70] D. MacAdam, „Geodesic chromaticity diagram based on variances of color matching by 14 normal observers,“ *Appl. Opt.* **10**(1), 1-7 (1971).
- [71] M. D. Fairchild and R. L. Heckaman, „Measuring observer metamerism: The Nimeroff approach,“ *Color. Research and application* **41**(2), 115-124 (2016).
- [72] Lapsphere, Inc., „Spectralon® Diffuse Reflectance Standards,“ Lapsphere, internetinis šaltinis: <https://www.labsphere.com/labsphere-products-solutions/materials-coatings-2/targets-standards/diffuse-reflectance-standards/diffuse-reflectance-standards/>. [žiūrėta 29 08 2018].
- [73] J. Niven and S. Laughlin, „Energy limitation as a selective pressure on the evolution of sensory systems.,“ *J Exp Biol.* **211**, 1792-1804 (2008).
- [74] D. Lang, „Energy efficient illumination for the biological clock,“ *Proc. SPIE* **7954**, 795402 (2011).
- [75] W. Zhang, W. Yang, P. Zhong, S. Mei, G. Zhang, G. Chen, G. He and R. Guo, „Spectral optimization of color temperature tunable white LEDs based on perovskite quantum dots for ultrahigh color rendition,“ *Optical Materials Express* **7**(9), 3065 – 3076 (2017).
- [76] Y. Lin, M. Wei, K. A. G. Smet, A. Tsukitani, P. Bodrogi and T. Q. Khanh, „Colour preference varies with lighting application,“ *Lighting Res. Technol.* **49**, 316–328 (2017).
- [77] G. He, L. Zheng and Y. Huafeng, „LED white lights with high CRI and high luminous efficacy,“ *LED and Display Technologies, edited by Gang Yu, Yanbing Hou, Proc. of SPIE Vol. 7852, 78520A-1 - 78520A-9* (2010).
- [78] E. E. Dikel, G. J. Burns, J. A. Veitch, S. Mancini and G. R. Newsham, „Preferred Chromaticity of Color-Tunable LED Lighting,“ *LEUKOS* **10**, 101-115 (2014).
- [79] I. Speier and M. Salsbury, „Color Temperature Tunable White Light LED System,“ *Sixth International Conference on Solid State Lighting Proc. of SPIE Vol. 6337, 63371F-1 - 63371F-12* (2006).

- [80] L. Whitehead, K. Papamichael and M. Siminovitch, „Correspondence: Colour preference in lighting – A misleading name for an unscientific idea,“ *Lighting Research & Technology* 49, 285-288 (2017).
- [81] A. Žukauskas, R. Vaicekauskas and M. S. Shur, „Color-dulling solid-state sources of light,“ *Opt. Express* 20, 9755–9762 (2012).
- [82] A. Žukauskas, R. Vaicekauskas and M. S. Shur, „Solid-state lamps with optimized color saturation ability,“ *Opt. Express* 18, 2287–2295 (2010).
- [83] A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, F. Ivanauskas, H. Vaitkevičius, P. Vitta and M. S. Shur, „Color rendition properties of solid-state lamps,“ *J. Phys. D. Appl. Phys.* 43, 354006 (2010).
- [84] D. M. Berson, F. A. Dunn and M. Takao, „Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock,“ *Science* 295, 1070–1073 (2002).
- [85] W. J. M. van Bommel, „Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning of light for work,“ *Appl. Ergon.* 37, p. 461–466 (2006).
- [86] C. Cajochen, M. Munch, S. Kobińska, K. Krauchi, R. Steiner, P. Oelhafen, S. Orgul, A. Wirz-Justice, „High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation and heart rate to short wavelength light,“ *J Clin Endocrinol Metab.* 90, 1311-6 (2005).
- [87] F. Falchi, P. Cinzano, C. D. Elvidge, D. M. Keith, A. Haim, „Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility,“ *J. Environ. Manage.* 92, 2714–2722 (2011).
- [88] G. C. Brainard, D. Sliney, J. P. Hanifin, G. Glickman, B. Byrne, J. M. Greeson, S. Jasser, E. Gerner, M. D. Rollag, „Sensitivity of the human circadian system to short-wavelength (420-nm) light,“ *J Biol Rhythms* 23(5), 379-389 (2008).
- [89] M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman and R. Hammer, „Modeling the spectral sensitivity of the human circadian system,“ *Lighting Research and Technology* 44(4), 386–396 (2012).
- [90] Well Building Institute, „The WELL Building Standard,“ internetinis šaltinis: <https://standard.wellcertified.com/light>. [žiūrėta 10 09 2018].
- [91] J. H. Oh, S. J. Yang and Y. R. Do, „Healthy, natural, efficient and tunable lighting: four-package white LEDs for optimizing the circadian effect, color quality and vision performance,“ *Light: Science & Applications* 3, e141 (2014).
- [92] M. Tanaka and S. Tominaga, „Color Control of a Lighting System Using RGBW LEDs,“ *Color Imaging XVI: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications. Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE Vol. 7866, IS&T/SPIE Electronic Imaging 2011, San Francisco Airport, California, United States* (2011).
- [93] K. L. Kwon, M. B. Kim, C. Heo, S. G. Kim, J. S. Beak, Y. H. Kim, „Wide color gamut and high dynamic range displays using RGBW LCDs,“ *Displays* 40, 9-16 (2015).
- [94] A. D. Arnold, P. E. Castro, T. K. Hatwar, M. V. Hettel, P. J. Kane, J. E. Ludwicki, M. E. Miller, M. J. Murdoch, J. P. Spindler, S. A. Van Slyke, K.

- Mameno, R. Nishikawa, T. Omura. S. Matsumoto, „Full-color AMOLED with RGBW pixel pattern,“ *Journal of the SID* **13**(6), 525-535 (2015).
- [95] L. Wang Y. Tu, L. Chen, K. Teunissen, I. Heynderickx, „Trade-off between Luminance and Color in RGBW Displays,“ *SID*, **38**(1), 1142-1145 (2007).
- [96] M. E. Miller, J. W. Hamer, J. E. Ludwicki, A. D. Arnold, „Exploiting the Flexibility of RGBW OLED Displays,“ *SID* **40**(1), 935-938 (2012).
- [97] J. Bohar, G. Fernandes and J. Xu, „Spectral-Temporal LED Lighting Modules for Reproducing Daily and Seasonal Solar Circadian Rhythmicities,“ *2017 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)* Hong Kong, China (2017).
- [98] T. Esposito and K. W. Houser, „Models of colour quality over a wide range of spectral power distributions,“ *Lighting Research and Technology online version* (2018).
- [99] X. Feng, W. Xu and S. Zhang, „LED light with enhanced color saturation and improved white light perception,“ *OPTICS EXPRESS* **24**(1), 573-85 (2016).
- [100] Commission Internationale de l'Eclairage, „Control of damage to museum objects by optical radiation,“ *Pub. CIE 157* (2004).
- [101] D. Pinto, J. Linhares and S. Nascimento, „Correlated color temperature preferred by observers for illumination of artistic paintings,“ *J. Opt. Soc. Am. A* **25**(3), 623–630 (2008).
- [102] D. Pinto, P. Felgueiras, J. Linhares and S. Nascimento, „Chromatic effects of metamers of D65 on art paintings,“ *Ophthalmic Physiol. Opt.* **30**(5), 632–637 (2010).
- [103] S. Nascimento and O. Masuda, „Best lighting for visual appreciation of artistic paintings—experiments with real paintings and real illumination,“ *J. Opt. Soc. Am. A* **31**(4), A214-A219 (2014).
- [104] S. M. Pinilla, D. Vazquez, A. A. Fernandez-Balbuena, C. Muro, J. Munoz, „Spectral damage model for lighted museum paintings: Oil, acrylic and gouache,“ *Journal of Cultural Heritage* **22**, 931-939 (2016).
- [105] F. Viénot, G. Coron and B. Lavedrine, „LEDs as a tool to enhance faded colours of museums artefacts,“ *J. Cult. Herit.* **12**(4), 431-440 (2011).
- [106] C. Cuttle, „Damage to museum objects due to light exposure,“ *Lighting Res. Tech.* **28**(1), 1–9 (1996).
- [107] C. Cuttle, „Lighting works of art for exhibition and conservation,“ *Lighting Res. Tech.* **20**(2), 43–53 (1988).
- [108] M. Wei, K. W. Houser, A. David, M. R. Krames, „Colour gamut size and shape influence colour preference,“ *Lighting Research & Technology* **49**(8), 992-1014 (2016).

PADĖKA

Noriu padėkoti savo darbo vadovui prof. Artūriui Žukauskui už įtraukimą į įvairiaspalvį kietakūnio apšvietimo technologijų pasaulį ir galimybes kurti naujas technologijas.

Dėkoju prof. Rimantui Vaicekaskui už pagalbą kuriant išmanius šviestuvus ir jų valdymo algoritmus.

Nuoširdžiai dėkoju dr. Pranciškui Vittai už pasitikėjimą ir pagalbą sprendžiant praktines darbo užduotis bei diegiant naujas technologijas.

Atskirai noriu padėkoti straipsnių bendraautoriams ir jaunesiems kolegoms už bendrą darbą ir gebėjimą įveikti tarpdisciplininių tyrimų kliūtis.

Ačiū tėvams, Ievai ir dukrai Sofijai. Jūsų neįkainojama parama padėjo parengti šį darbą.

PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Straipsniai, konferencijų darbai ir patentai disertacijos tema

- P1. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Tuzikas, **A. Petrulis**, and M. Shur, “Color rendition engine”, *Opt. Express* 20(5), pp. 5356–5367 (2012).
- P2. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, A. Tuzikas, **A. Petrulis**, R. Stanikūnas, A. Švegžda, P. Eidikas, P. Vitta, “Firelight LED source: Toward a balanced approach to the performance of solid-state lighting for outdoor environments,” *IEEE Photonics J.* 6(3), 8200316 (2014).
- P3. A. Tuzikas, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, **A. Petrulis**, P. Vitta, M. S. Shur, “Artwork visualization using a solid-state lighting engine with controlled photochemical safety,” *Opt. Express* 22(14), 16802–16818 (2014).
- P4. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, A. Tuzikas, P. Vitta, **A. Petrulis**, “Daugiaspalviai kietakūniai šviesos šaltiniai skirti fotochemiškai jautrių objektų apšvietimui”, patento nr. LT6238 (2015 12 28).
- P5. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Tuzikas, A. Zabaliūtė, **A. Petrulis**, “Solid-state sources of light for preferential colour rendition”, patento nr. US9370072 B2 (2016-06-14).
- P6. **A. Petrulis**, P. Vitta, J. Aglinskaitė, R. Vaicekauskas, A. Žukauskas, “Metameric Light Sources: A Recent Paradigm for Functional Lighting,” *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences* 71(5), 366-371 (2017).
- P7. **A. Petrulis**, P. Vitta, L. Petkevičius, R. Vaicekauskas, A. Žukauskas, “Exploring preferred correlated color temperature in outdoor environments using a smart solid-state light engine”, *LEUKOS* 14(2), 95-106 (2018).
- P8. **A. Petrulis**, J. Aglinskaitė, P. Vitta, R. Vaicekauskas, A. Žukauskas, “Colour rearrangement and colour gamut tunability with multicolour solid-state light engine under low luminance levels,” pateiktas spaudai.

Konferencijų pranešimai disertacijos tema

- C1. P. Vitta, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Eidikas, A. Zabaliūtė, R. Stanikūnas, A. Švegžda, A. Tuzikas, and **A. Petrulis**, “Extra low colour temperature solid-state sources for artificial night lighting,” 1st International Conference on Artificial Light at Night (Berlin, Germany, October 28-30, 2013). Abstract Book, p. 111.
- C2. A. Zabaliūtė, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Tuzikas, **A. Petrulis**, and A. Žukauskas, “Phosphor converted light-emitting diodes with advanced color rendition properties,” Conference on LED and Its Industrial Applications (Pacifico Yokohama, Japan, April 22-24, 2014). Extended Abstracts, p. 24p-LEDp6-32.
- C3. **A. Petrulis**, A. Tuzikas, P. Vitta, R. Vaicekauskas, and A. Žukauskas, “Validation of the Kruithof rule in an outdoor environment using a smart solid-state lighting engine,” 14th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (Como, Italy, June 22-27, 2014). LS14 Conference Program, CP117.
- C4. **A. Petrulis**, R. Vaicekauskas, A. Žukauskas, “Optimization of a polychromatic solid-state source of light for the dynamical control of circadian rhythms,” 14th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (Como, Italy, June 22-27, 2014). LS14 Conference Program, CP75.
- C5. A. Tuzikas, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, **A. Petrulis**, P. Vitta, and M. Shur, “Smart lighting for artworks with controlled photochemical safety,” 14th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (Como, Italy, June 22-27, 2014). LS14 Conference Program, CP75.
- C6. A. Tuzikas, **A. Petrulis**, R. Vaicekauskas, M. S. Shur, and A. Žukauskas, “Smart restorative illumination of artwork and museum exhibits,” 13th International Conference on Solid State Lighting and LED-based Illumination Systems SPIE Optics+Photonics (San Diego, California, USA, August 17-21, 2014). Conference Program, Paper 9190-23.
- C7. **A. Petrulis**, A. Tuzikas, P. Vitta, R. Vaicekauskas, A. Žukauskas, „Kruithof Rule and Circadian Lighting Tests in an Outdoor Environment using a Smart Solid-State Lighting Engine,“ 16th International Conference-School Advanced materials and

- Technologies (Palanga, Lithuania, August 27-31, 2014) program and abstract book, p. 95. Geriausias stendinis pranešimas.
- C8. P. Vitta, **A. Petrulis**, A. Tuzikas, R. Vaicekauskas and A. Žukauskas, “Finding “pleasing” illumination condition in outdoor environments using an intelligent lighting installation,” international conference on the effects of light on wellbeing, Experiencing light (Eindhoven, The Netherlands, 10-11 November, 2014), Proceedings Experiencing light 2014, p. 136.
- C9. **A. Petrulis**, P. Vitta, R. Vaicekauskas, A. Žukauskas, “Išmanaus kietakūnio apšvietimo tyrimai ir taikymai Lietuvoje,” 41-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija (Vilnius, Birželio 17–19 d., 2015), Programa ir pranešimų tezės p. S2-48.
- C10. **A. Petrulis**, P. Vitta, R. Vaicekauskas, A. Žukauskas, “Selecting “pleasing” correlated color temperature for illumination of outdoor environments,” 13th International Conference on Solid State Lighting SPIE Optics+Photonics (San Diego, California, USA, August 9-13, 2015), paper 9571-9.
- C11. J. Aglinskaitė, **A. Petrulis**, „Investigation of the Colour Differences Using Metameric Light Sources,“ 18th International Conference-School Advanced materials and Technologies (Palanga, Lithuania, August 27-31, 2016) program and abstract book, p. 89.
- C12. **A. Petrulis**, J. Senvaitienė, J. Bagdzevičienė, R. Vaicekauskas, „Non-invasive Restoration of UV-treated Pure Watercolor Pigments Using a Smart Lighting,“ 18th International Conference-School Advanced materials and Technologies (Palanga, Lithuania, August 27-31, 2016) program and abstract book, p. 90.
- C13. **A. Petrulis**, P. Vitta, J. Bagdzevičienė, J. Senvaitienė, and R. Vaicekauskas, „Restoration of the Photochemically Degraded Watercolour Pigments Using a LED Based Light Source,“ International conference OSA Light, Energy and the Environment Congress (Leipzig, Germany, November 14-17, 2016), Solid-state lighting 2016, JW4A.3.
- C14. **A. Petrulis**, P. Vitta, R. Vaicekauskas, „Metameric light sources: a recent paradigm for functional lighting,“ 1st International symposium on visual physiology, environment, and perception VisPEP2016 (Riga, Latvia, October 6-8, 2016), Conference program, P1-7.

Publikacijos neįtrauktos į disertaciją

- P9. P. Vitta, R. Stanikūnas, A. Tuzikas, I. Reklaitis, A. Stonkus, **A. Petrulis**, H. P. Vaikevičius, and A. Žukauskas, “Energy-saving approaches to solid state street lighting”, Proc. SPIE 8123, Art. No 81231H, p. 7 (2011).
- P10. P. Vitta, L. Dabasinskas, A. Tuzikas, **A. Petrulis**, D. Meskauskas, and A. Zukauskas, “Concept of intelligent solid-state street lighting technology,” Elektron. Elektrotech. 18(10), 37-40 (2012).
- P11. V. Kulbokaitė, R. Stanikūnas, A. Švegžda, A. Žukauskas, A. Tuzikas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, **A. Petrulis**, P. Eidikas, A. Zabaliūtė, “Visual performance in the mesopic range of outdoor lighting”, Perception 42, 65 (2013).
- P12. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Zabaliūtė, **A. Petrulis**, and M. Shur, “Color rendition engineering of phosphor-converted light-emitting diodes”, Opt. Express 21(22), pp. 26642-26656 (2013).
- P13. V. Viliūnas, H. Vaitkevičius, R. Stanikūnas, P. Vitta, R. Bliumas, A. Auškalnytė, A. Tuzikas, **A. Petrulis**, L. Dabašinskas, and A. Žukauskas, “Subjective evaluation of luminance distribution for intelligent outdoor lighting,” Lighting Res. Technol. 46(4): 421-433 (2014).

UŽRAŠAMS

UŽRAŠAMS

Vilniaus universiteto leidykla
Universiteto g. 1, LT-01513 Vilnius
El. p. info@leidykla.vu.lt,
www.leidykla.vu.lt
Tiražas 12 egz.