

VNÍMÁNÍ BAREV PŘI FOTOPICKÝCH A MEZOPICKÝCH ADAPTAČNÍCH JASECH

Ing. Marcela Pechová

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Název disertační práce: Vnímání barev při fotopických a mezopických adaptačních jasech

Autor: Ing. Marcela Pechová

Obor doktorského studia: Textilní technika a materiálové inženýrství

Forma studia: Prezenční

Školící pracoviště: Katedra materiálového inženýrství FT TUL

Školitel: prof. Ing. Michal Vik, Ph.D.

Složení komise pro obhajobu disertační práce:

předseda:	
prof. Dr. Ing. Zdeněk Kůs	FT TUL, katedra oděvnictví
místopředseda:	
prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.	FT TUL, katedra materiálového inženýrství
prof. Ing. Dionýz Gašparovský, Ph.D.	FEI STU Bratislava, ústav elektroenergetiky a aplikovanéj elektrotechniky
prof. Ing. Jiří Militký, CSc.	FT TUL, katedra materiálového inženýrství
prof. Ing. Jiří Novák, Ph.D. (oponent)	FSV ČVUT, katedra fyziky
doc. Ing. Ladislav Burgert, CSc.	Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická
doc. Ing. Tomáš Novák, Ph.D. (oponent)	FEI VŠB-TU Ostrava, katedra elektroenergetiky

S disertační prací je možno seznámit se na studijním oddělení doktorského studia Fakulty textilní Technické univerzity v Liberci.

Liberec, 2023

Anotace

Disertační práce se zabývá problematikou vnímání barev a modelem barevného vzhledu CIECAM02 v podmínkách fotopických a mezopických adaptačních jasů. V teoretické části jsou stručně popsány základní poznatky související se zpracováním zrakového vjemu a rozlišováním barev v různých podmínkách adaptačních jasů. Dále je v teoretické části popsán model barevného vzhledu CIECAM02, který umožňuje predikovat vzhled za různých podmínek pozorování. V neposlední řadě je v teoretické části popsáno stanovení a hodnocení chyb, nejistot, preciznosti a přesnosti měření. V první části experimentu jsou na základě hodnocení chyb měření stanoveny korekční faktory, které jsou stanoveny pro přenositelnost dat mezi spektrofotometry. Další část experimentu se věnuje testování barvocitu a vizuálnímu experimentu s cílem zjistit, jak jsou pozorovatelé schopni rozlišovat barvy i při snížených úrovních adaptačních jasů. Hlavním cílem disertační práce je signifikantní zvýšení predikční schopnosti modelu CIECAM02 a CAM02–UCS v podmínkách mezopických úrovních adaptačních jasů. Pro tento účel jsou v závěru práce navrženy a testovány různé úpravy subjektivní chromatičnosti vedoucí ke zlepšení predikční schopnosti těchto modelů.

Klíčová slova: barva, barvivo, adaptační jas, CIECAM02, CAM02–UCS

Annotation

This dissertation addresses the issue of color perception and the evaluation of CIECAM02 and CAM02–UCS color appearance models. The main aim is to significantly increase the predictability of CIECAM02 and CAM02–UCS models under mesopic adaptive luminance levels. The theoretical section describes the basic information about visual perception processing and color discrimination under different adaptive luminance levels and describes the CIECAM02 color appearance model that allows predicting color appearance under different viewing and lighting conditions. This section also describes the determination and evaluation of errors, uncertainties, precision, and accuracy of the measurements. In the first part of the experiment, correction factors are determined for data portability between spectrophotometers based on the evaluation of measurement errors. The main part of the experiment is devoted to the color vision deficiency test and the visual experiment to determine how observers discriminate colors even at reduced levels of adaptive luminance. To accomplish the goal of this research, different adjustments of the colorfulness are proposed and tested leading to an improvement in the predictability of CIECAM02 and CAM02–UCS models.

Keywords: color, dye, adaptive luminance, CIECAM02, CAM02–UCS

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíle disertační práce	2
3. Přehled o současném stavu problematiky	2
3.1 Sítnice	2
3.2 Fotoreceptory	3
3.3 Funkce spektrální světelné účinnosti lidského oka	4
3.4 Purkyňův jev	4
3.5 Adaptace	5
3.6 Modely barevného vzhledu	5
3.6.1 Model barevného vzhledu CIECAM02	6
3.6.2 Příčný výpočet modelu CIECAM02	7
3.6.3 Výpočet parametrů odpovídajících vzorkům	8
3.6.4 Výpočet korelátů v modelu CIECAM02	9
3.7 Model CAM02–UCS	10
3.8 Určení chyb při spektrofotometrických měřeních	11
4. Příprava experimentu	12
4.1 Materiál	12
4.2 Příprava vizuálních experimentů	13
4.2.1 Příprava vizuálního experimentu TUL 1 a TUL 2	14
4.2.2 Vizuální experiment TUL 1	15
4.2.3 Vizuální experiment TUL 2	16
4.2.4 Vizuální experiment TUL 3	16
5. Výsledky a diskuze	17
5.1 Stanovení a hodnocení chyb při spektrofotometrických měřeních	17
5.2 Výsledky barvocitu	18
5.2.1 Barvocit pozorovatelů	18
5.3 Výsledky vizuálního experimentu	20
5.3.1 Převod šedé stupnice na vizuálně vnímanou barevnou odchylku	20
5.3.2 Index STRESS	20
5.4 Výsledky subjektivní chromatičnosti v CAM02–UCS	22
5.4.1 Úprava funkce subjektivní chromatičnosti pro model CAM02–UCS	22
6. Zhodnocení výsledků pro vědní obor nebo pro praxi	24
7. Doporučení na pokračování práce v daném tématu a oboru	26
8. Seznam publikovaných prací studenta DSP	26
8.1 Publikace se vztahem ke studované problematice	26
8.2 Ostatní publikace v odborných časopisech	26
8.3 Příspěvky ve sbornících se vztahem ke studované problematice	26
8.4 Ostatní příspěvky ve sbornících	27
9. Seznam použité literatury	28
10. Curriculum Vitae	30
11. Stručná charakteristika dosavadní odborné, výzkumné a vědecké činnosti	32
12. Vyjádření školitele doktoranda	33
14. Oponentské posudky disertační práce	34

1. Úvod

Disertační práce se zabývá rozlišováním barev a modelem CIECAM02 v podmínkách fotopických a mezopických úrovní adaptačních jasů a možnostmi využití tohoto modelu za zhoršených světelných podmínek.

Rozlišování barev při nízkých úrovních adaptačních jasů je široce diskutované téma napříč různými odvětvími. Součástí diskuzí jsou aktivní i pasivní ochranné prvky, které mají v případě zhoršených světelných podmínek při nepředvídatelných situacích, jakými jsou výpadek elektrického proudu, přírodní katastrofy, kdy může dojít k selhání bezpečnostních systémů, sloužit jako bezpečnostní a rozlišovací prvek. Další diskuzí je i zvýšená ochrana a viditelnost chodců. V posledních letech došlo k výraznému nárůstu usmrcených nebo zraněných osob při dopravních nehodách v důsledku nedostatečného používání bezpečnostních prvků, a v několika případech i vlivem nevhodně nastaveného pouličního osvětlení ve městech a obcích. Toto jsou jedny z důvodů pro sepsání této disertační práce. Nošení výstražných prvků je důležité nejenom mimo města a obce, ale i v nich. V blízkosti přechodů pro chodce je často osoba, která na sobě nemá žádné výstražné prvky nebo jsou tyto prvky nedostačující k zajištění dostatečné viditelnosti, a je proto snadno přehlédnutelná, stejně tak je viditelnost osob značně ovlivněna různými intenzitami pouličního osvětlení, kdy jsou v mnoha případech řidiči oslnění přechody mezi různě intenzivním pouličním osvětlením. Efektivita současných oděvů se zvýšenou viditelností je dostatečně známá, nicméně většina populace v případech, kdy se pohybují v nočním dopravním prostoru výhod těchto oděvů nevyužívá. Je proto určitou výzvou pro návrháře volnočasového oblečení a oblečení pro denní užívání, aby vhodným způsobem zapracovali do těchto oděvů barevně kontrastní prvky při zachování módnosti takovýchto modelů. Z tohoto důvodu se práce věnuje vnímání barev ve fotopické a mezopické oblasti, aby bylo možno doporučit vybrané odstíny jako určitý koncept pro takovéto návrhy.

V současné době je možné použít k popsání barevných povrchů při různých podmínkách různé prostory barev a modely barevného vzhledu. Nejpoužívanějším nástrojem pro tento popis jsou dva prostory barev CIEXYZ a CIELAB, které však mají některá omezení, díky kterým není možné popsat například Huntův či Stevensův efekt. CIELAB je přibližně rovnoměrný prostor barev a popisuje přibližné koreláty, kterými jsou chroma, světlost či úhel barevného tónu. Oproti tomu, modely barevného vzhledu (souhrnně označované jako CAM) umožňují popis barevného vzhledu se započítáním různých podmínek (vliv okolí, pozadí či úrovně adaptačního jasu), a tím pádem predikci barevného vzhledu i při velmi nízkých úrovních adaptačních jasů. Dále umožňují popsat barevný vzhled i pomocí korelátů atributů vnímání. CAM modely mají však jednu nevýhodu a to tu, že mají nízkou predikční schopnost predikovat vzhled u povrchů s malým barevným rozdílem. Zvýšení predikční schopnosti modelu barevného vzhledu CIECAM02 je i jedním z cílů disertační práce.

Model barevného vzhledu CIECAM02 zahrnuje dva typy adaptačních mechanismů, a to mechanismus chromatické a jasové adaptace. V modelu nejprve dochází k adaptaci chromatické, a až následně adaptaci jasové.

Proto, aby mohla být tato úprava navržena, byly připraveny, provedeny a vyhodnoceny tři vizuální experimenty se skupinou pozorovatelů bez předchozích zkušeností s hodnocením barevné odchylky při různých úrovních adaptačních jasů a při dvou různých typech uspořádání těchto experimentů (Grey-scale a Memory matching method). Pro vizuální experimenty byla připravena čtyři barevná centra tak, aby co nejvíce odpovídala základním barevným tónům definovaným pro model CIECAM02. Data získaná z vizuálních experimentů jsou použita pro hodnocení pozorovatelů a zároveň jako hodnoty pro testování predikční schopnosti modelů.

V rámci experimentální části je testována úprava modelu CIECAM02 s vlastní navrhovanou úpravou, která by měla vést ke zvýšení predikční schopnosti modelu.

V rámci vyhodnocení experimentální části jsou v disertační práci také hodnoceny nejistoty a chyby měření, díky jejichž eliminaci je možné použít pro měření různé spektrofotometry a jejich výsledky

pomocí korekčních faktorů použít jako přibližné referenčnímu spektrofotometru, tedy pro možnost vzájemné přenositelnosti dat mezi spektrofotometry.

2. Cíle disertační práce

Disertační práce je zaměřena na popis rozlišování barev při různých úrovních adaptačních jasů ve fotopické a mezopické oblasti adaptačních jasů (371 cd.m^{-2} až $0,01 \text{ cd.m}^{-2}$). K popisu barevného vzhledu, jak bylo zmíněno v úvodu této práce je používám model barevného vzhledu CIECAM02, který umožňuje zahrnutí různých podmínek pozorování a osvětlení do výpočtu a predikce barevného vzhledu. Dalším předmětem disertační práce je i stanovení nejistot, přesnosti a preciznosti měření v rámci krátkodobých a dlouhodobých měření, a také stanovení chyb u spektrofotometrických měření.

Na základě výše popsané problematiky byly sestaveny následující cíle disertační práce. Hlavní část je rozdělena do následujících částí:

- a) Příprava vzorků s vysokou chromatičností, které umožňují vytvoření datové sady pro vizuální testování. Většina dosud provedených experimentů obsahovala vzorky s nízkou nebo střední chromatičností. Pro přípravu vzorků byla zvolena kationtová barviva, která umožňují dosažení vysoce čistých odstínů.
- b) Příprava a realizace vizuálního experimentu se skupinou pozorovatelů bez předchozích zkušeností s vizuálním hodnocením na širokém rozsahu úrovní adaptačních jasů (fotopické úrovně adaptačních jasů – hranice mezopické a skotopické úrovně adaptačních jasů).
- c) Popis rozlišování barev a testování barvocitu pozorovatelů na různých úrovních adaptačních jasů.
- d) Popis barevného vzhledu na různých úrovních adaptačních jasů pomocí modelu barevného vzhledu CIECAM02.
- e) Zvýšení predikční schopnosti modelu CIECAM02 a CAM02–UCS. Ke zvýšení predikční schopnosti modelu je navrhována a testována úprava faktoru úrovně adaptačního jasu, který slouží v modelu CIECAM02 pro kompenzaci různých úrovní adaptačních jasů ve fotopické, mezopické a skotopické oblasti vidění.
- f) Zvýšení predikční schopnosti modelu CIECAM02 změnou funkce pro výpočet subjektivní chromatičnosti v oblasti nízkých úrovní mezopických adaptačních jasů.
- g) Testování a hodnocení nejistot, přesnosti a preciznosti měření pro možnou vzájemnou přenositelnost dat mezi spektrofotometry.
- h) Stanovení a hodnocení chyb měření pro spektrofotometrická měření a stanovení korekčních faktorů pro účely přenositelnosti dat mezi spektrofotometry v případě, kdy není k dispozici referenční spektrofotometr.

3. Přehled o současném stavu problematiky

3.1 Sítnice

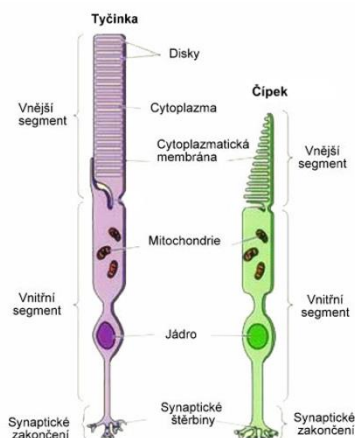
Sítnice se nachází na zadní stěně oka, je součástí vnitřní vrstvy oka označované tunica nervosa. Z anatomického hlediska je tvořena 10 vrstvami. Sítnice se skládá z optické části, která tvoří zadní segment oka (pars optica retinae), který je rozdělen na pigmentový epitel a neuroretinu, tj. vlastní nervovou vrstvu a slepé části (pars caeca retinae), která neobsahuje žádné nervové ani smyslové buňky. Hlavním úkolem sítnice je chemický proces, při kterém se dopadající světelné paprsky mění v elektrické impulsy/vzruchy, které jsou pomocí zrakové dráhy převáděny do mozku. Za tento proces jsou odpovědné vysoce specifické vrstvy sítnice nazývané fotoreceptory, bipolární a gangliové buňky. [1–3]

3.2 Fotoreceptory

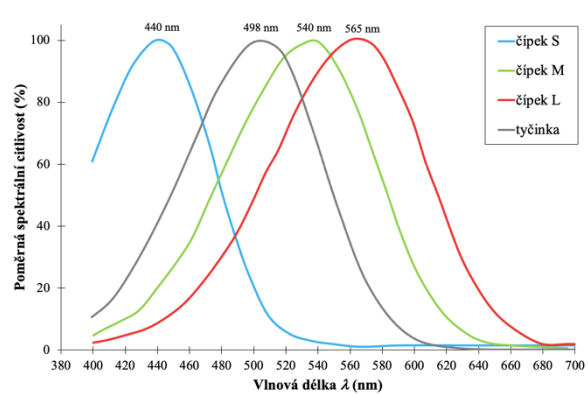
Fotoreceptory jsou světločivné buňky sítnice (vysoce senzitivní neurony), které jsou odpovědné za primární zpracování světelného signálu. Mezi fotoreceptory řadíme tyčinky a čípky, které jsou tvořené vnější částí (vlastní tyčinkou nebo čípkem, vnější segment), jádrou částí (oblast jádra, vnitřní segment) a částí se synapsemi. Schéma tyčinek a čípků je uvedeno na *obrázku 1*. [1–3]

Tyčinka je tvořena vnější částí (vnější segment), která se dále rozděluje na vnější a vnitřní výběžek. Ve vnějším výběžku se nachází pigment zvaný rodopsin, ve vnitřním výběžku se nacházejí mitochondrie a polyribosomy. Vnitřní část (vnitřní segment) je tvořena jádrem a nervovými vlákny. Synapse tvoří třetí část tyčinky, které tvoří spojení s bipolárními buňkami. Na sítnici se nachází 110 – 120 milionů tyčinek.

Čípky jsou zodpovědné za tzv. fopické vidění nebo také barevné vidění. Stejně jako tyčinky, mají i čípky vnitřní a vnější segment. Vnitřní segment je tvořen jádrem, vnější segment je tvořen vnějším výběžkem s mitochondriemi a vnitřním výběžkem, kde se nachází iodopsin. Poslední část tvoří synapse tvořící spojení s bipolárními buňkami. Na sítnici se nachází 6 milionů čípků.



Obrázek 1 – Schéma fotoreceptorů – tyčinka a čípek [4]



Obrázek 2 – Poměrná spektrální citlivost fotoreceptorů

Na sítnici se nacházejí tři typy čípků podle typu obsaženého iodopsinu, který je různě citlivý na různou vlnovou délku dopadající světla. Podle citlivosti (*obrázek 2*) rozlišujeme čípky typu L (citlivé na vlnovou délku 565 nm), čípky typu M (citlivé na vlnovou délku 540 nm) a čípky typu S (citlivé na vlnovou délku 440 nm).

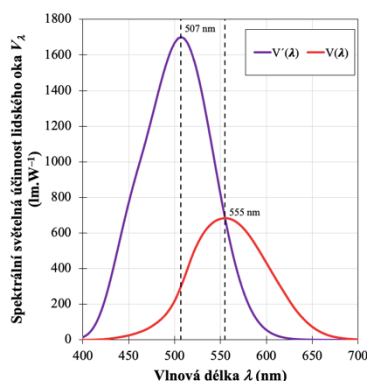
Fotopické vidění je označením pro vidění, při kterém převládají svojí funkcí čípky a při kterém je umožněno rozlišování a vnímání barev. Pro fotopické vidění odpovídají hodnoty jasu $10^1 - 10^8 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. [5,6]

Mezopické vidění je označením pro vidění, při kterém dochází k postupné ztrátě a schopnosti rozlišovat barvy a ztrátě zrakové ostrosti při snižování úrovně adaptačního jasu. Mezopická oblast vidění je popsána adaptačními jasy $10^{-2} - 10^1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. V této oblasti vidění fungují oba dva typy fotoreceptorů, se snižující se úrovní jasů postupně převládá zastoupení tyčinek. [5,6]

Skotopické vidění je vidění při snížených světelných podmínkách odpovídající jasům $10^{-6} - 10^{-2} \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Při tomto vidění odpovídají za vidění tyčinky, které jsou citlivé na světlo vlnové délky přibližně 500 nm. [5,6]

3.3 Funkce spektrální světelné účinnosti lidského oka

Pro popis spektrální citlivosti oka (obrázek 3) definovala Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) funkci Poměrné spektrální světelné účinnosti lidského oka V_λ , která popisuje spektrální citlivost oka ve fotopické oblasti vidění. Pro skotopickou oblast vidění definovala CIE funkci Poměrné spektrální světelné účinnosti lidského oka V'_λ . Pro mezopickou oblast vidění definovala CIE funkci Poměrné spektrální světelné účinnosti lidského oka v mezopické oblasti vidění $V_{mes,\lambda}$. Tato funkce je lineární kombinací mezi V_λ a V'_λ . [5,6]



Obrázek 3 – Funkce spektrální světelné účinnosti lidského oka (fotopická a skotopická)

Poměrná spektrální světelná účinnost v mezopické oblasti vidění je definována podle rovnice (1). Vztah mezi úrovní mezopického jasu a adaptačním koeficientem m je vypočten pomocí interačního výpočtu podle rovnic (2) a (3). [5,6]

$$M(m)V_{mes,\lambda} = mV_\lambda + (1 - m)V'_\lambda \quad \text{pro } 0 \leq m \leq 1 \quad (1)$$

$$L_{mes,n} = \frac{m_{1,(n-1)}L_P + (1 - m_{1,(n-1)})L_S V'_{\lambda_0}}{m_{1,(n-1)} + (1 - m_{1,(n-1)})V'_{\lambda_0}} \quad (2)$$

$$m_{1,(n-1)} = a + b \log L_{mes,n} \quad (3)$$

kde $M(m)$ je adjustační faktor takový, aby bylo dosaženo odpovídajícího poměrného průběhu funkce $V_{mes,\lambda}$, m je koeficient udávající poměr mezi V_λ a V'_λ s ohledem na úroveň adaptačního jasu, L_{mes} je mezopický jas v $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$, V_λ je funkce poměrné spektrální světelné účinnosti lidského oka ve fotopické oblasti vidění, V'_λ je funkce poměrné spektrální světelné účinnosti lidského oka ve skotopické oblasti vidění, L_P je úroveň jasu ve fotopické oblasti (shodná s hodnotou L_A), L_S je úroveň jasu ve skotopické oblasti, V'_{λ_0} je funkce poměrné spektrální světelné účinnosti lidského oka při 555 nm (683/1700), a a b jsou parametry s hodnotou 0,7660 a 0,3334. Koeficient m nabývá hodnoty od 0 do 1. Je-li hodnota $L_{mes} \geq 5 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, je hodnota koeficientu $m = 1$, je-li hodnota $L_{mes} \leq 0,005 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, je hodnota koeficientu $m = 0$ a $m_{1,0} = 0,5$, n je iterační krok. [5,6]

3.4 Purkyňův jev

Purkyňův jev (někdy též nazývaný efekt nebo posun) byl popsán Janem Evangelistou Purkyněm v jeho disertační práci předložené v roce 1819. Ve své disertační práci popsal vliv úrovně osvětlení na vnímání barev. Popsal zde své pozorování, při kterém pozoroval květiny v různé denní době (při svítání, jasném slunečním svitu, při západu slunce a v noci). Popsal, že barva květin se s ohledem na denní době

mění. Popsal, že před úsvitem viděl pouze černou a šedou barvu, při východu slunce pozoroval původně velmi jasné barvy (červené a zelené části květin) tmavší oproti pozorování při denním světle, při kterém byl schopen rozpoznat více barevných tónů červené. Tato jeho zjištění vedla k definování Purkyňova jevu. Ten popisuje posun maximální citlivosti lidského oka směrem ke kratším vlnovým délkám při snižování úrovně osvětlení. Purkyně (1825) popsal experiment s bílým hranolem, který provedl v počátečních fázích adaptace na tmu, kdy po desetiminutové adaptaci na tmu se nejjasnější část posunula směrem ke kratším vlnovým délkám. Na základě tohoto experimentu bylo definováno, že maximální spektrální citlivost lidských čípků je dosaženo při vlnové délce 555 nm, kde maximální spektrální světelná účinnost dosahuje hodnoty $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, zatímco maximální spektrální citlivosti lidských tyčinek je dosaženo při vlnové délce 507 nm s maximální světelnou účinností $1700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. [7-9]

3.5 Adaptace

Adaptace je vlastnost lidského oka reagovat na změny okolních podmínek a podnětů změnou citlivosti na tyto podněty. Popisuje schopnost lidského oka přizpůsobit se různými úrovním jasů okolního světla. Lidské oko je schopné rozlišovat široký rozsah jasů od velmi nízkých až po velmi vysoké úrovně. Adaptační mechanismy jsou spojené s foto-pupilárním reflexem, různou spektrální citlivostí lidských fotoreceptorů, přenosem elektrického signálu optickým nervem a následným zpracováním ve vyšších kortikálních oblastech. Adaptaci jako takovou dělíme na adaptaci na světlo, adaptaci na tmu a adaptaci chromatickou. [1,8,9]

Adaptace na světlo je proces, při kterém spektrální citlivost lidského oka klesá s rostoucí úrovní adaptačního jasu. Protože do oka vstupuje světlo s vyšší intenzitou, oko reaguje na tuto situaci snížením vizuální citlivosti. Adaptace na světlo trvá v řádu sekund až minut.

Adaptace na tmu je proces opačný procesu na světlo. Lidské oko reaguje zvýšením vizuální citlivosti pro zajištění správné vizuální citlivosti na vstupující světlo nižší intenzity. Úplná adaptace na tmu trvá 30 – 60 minut.

Chromatická adaptace je procesem, který popisuje změnu ve vnímání barevného vzhledu při použití různých zdrojů osvětlení, respektive popisuje schopnost lidského oka adaptovat se na různé typy osvětlení tak, aby přibližně zůstal zachován barevný vzhled podnětů.

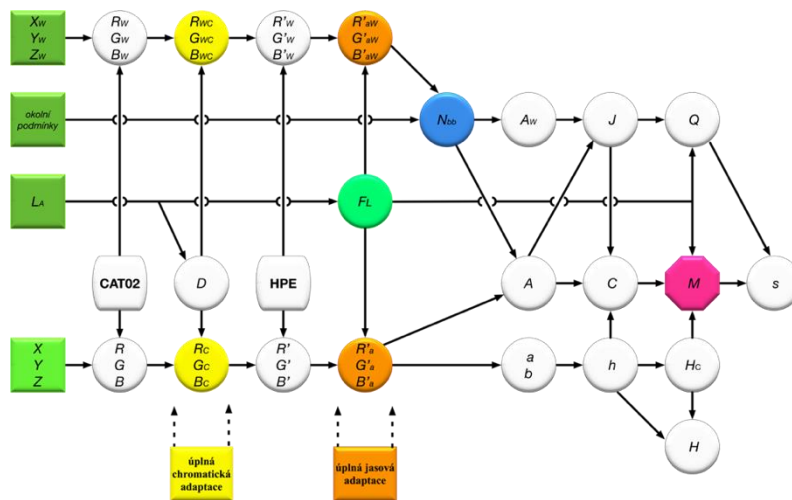
3.6 Modely barevného vzhledu

Hodnocení barevného vzhledu je možné provést pomocí subjektivního hodnocení a objektivního měření. Vizuální hodnocení (subjektivní) je ovlivněno různými faktory a aspekty, které mají různě velký vliv (adaptační jas, typ osvětlení, okolí, kontrast, bezdefektní barevné vidění pozorovatele). Stejně jako vizuální hodnocení, tak i to objektivní je ovlivněno různými faktory. Pro objektivní popis barevného vzhledu byly vyvinuty modely barevného vzhledu. Dva podněty se shodnými CIE trichromatickými složkami XYZ se budou pozorovateli jevit shodné v případě, budou-li dodrženy podmínky pozorování, mezi které patří například stejné pozadí, úroveň jasu, velikost a tvar vzorku, struktura povrchu, aj. V případě praktických aplikací však nebylo možné splnit všechny zmíněné podmínky a předpoklady pro predikci barevné shody pomocí trichromatické kolorimetrie. Pochopení nastalých jevů a jejich příčin při změně adaptačního jasu či změně podmínek pozorování vedlo k zavedení a odvození modelů pro popis barevného vzhledu. [8-15]

Stevens–Huntův efekt popisuje změnu ve vnímání kontrastu a subjektivní chromatičnosti při různých adaptačních jasech. Huntův efekt popisuje situace, kdy se se zvyšujícím adaptačním jasem zvyšuje vnímaná subjektivní chromatičnost (barevný kontrast). Stevensův efekt popisuje situace, kdy se se zvyšujícím se adaptačním jasem zvyšuje vnímaný kontrast (z hlediska světlosti či jasnosti).

3.6.1 Model barevného vzhledu CIECAM02

Model barevného vzhledu CIECAM02 byl schválen CIE v roce 2004. CIECAM02 vychází z předchozího modelu CIECAM97. Hlavní část modelu je tvořena popisem chromatické adaptace (CAT02) a rovnice pro výpočet vnímaných korelátů (souřadnic). Hlavním cílem je predikce barevného vzhledu při různých úrovních adaptačního jasu a různých podmínkách okolí, ve kterém jsou barevné povrchy pozorovány (pozadí, typ osvětlení, aj.). Model CIECAM02 umožňuje přímý a zpětný výpočet. Přímý výpočet (obrázek 4) je založen na výpočtu jednotlivých korelátů barevného vzhledu na základě znalosti CIE trichromatických složek XYZ a příslušných hodnotách adaptačního jasu a odraznosti okolí podnětu, zatímco zpětný (inverzní) postup je založen na principu, kdy na základě hodnot jednotlivých korelátů barevného vzhledu je možné vypočítat hodnoty CIE trichromatických složek XYZ pro příslušné hodnoty adaptačního jasu a odraznosti okolí. [8-15]



Obrázek 4 – Schéma přímého výpočtu modelu CIECAM02

Vstupní parametry modelu:

- trichromatické složky testovaného podnětu X, Y, Z .
- trichromatické složky referenční bílé odpovídající použitému typu osvětlení X_W, Y_W, Z_W .
- úroveň adaptačního jasu L_A .
- relativní jasnost pozadí Y_B .
- relativní jas okolí S_R .

Výstupní parametry modelu – koreláty barevného vzhledu:

- Světlost J .
- Jasnost Q .
- Subjektivní chromatičnost M .
- Chroma C .
- Sytost s .
- Úhel barevného tónu h .
- Kvadratura barevného tónu H .
- Složení barevného tónu H_C .
- Oponentní barevná odezva – a (červená–zelená) a b (žlutá–modrá).

Podmínky pozorování

Model CIECAM02 byl definován pro možnost predikovat barevný vzhled při různých podmínkách pozorování. Výsledná predikce barevného vzhledu je ovlivněna řadou vstupních parametrů. Mezi tyto

parametry patří jasnost pozadí, typ osvětlení, velikost, tvar a kvalita vzorků, struktura povrchu, adaptační jas.

Adaptační pole je souhrnným označením pro vše, co se nachází bezprostředně v okolí podnětu a ovlivňuje jej, tj. blízké okolí, pozadí a okolí. Adaptační pole je popsáno úrovní adaptačního jasu L_A , která je vztažena k jasnosti pozadí Y_b a jasnosti ideálně bílé Y_W .

$$L_A = \frac{L_W Y_b}{Y_W} \quad (4)$$

kde L_W je úroveň adaptačního jasu, Y_b je jasnost pozadí a Y_W je jasnost ideálně bílé.

Podnět je označení pro barevný povrch, jehož barevný vzhled je popsán pomocí modelu barevného vzhledu s ohledem na různé podmínky pozorování, osvětlení a adaptačního jasu. Je popsán CIE trichromatický složkami XYZ vypočtenými pro typ použitého osvětlení.

Blízké okolí je označením pro vše v okolí podnětu ve velikost 2° od jeho okraje uvažované do všech směrů. V rámci modelu CIECAM02 je zahrnuto do pozadí. Pozadí označuje vše v okolí podnětu ve velikost 10° od okraje podnětu.

Okolím je myšleno vše, co se nachází mimo pozadí. Okolí je popsáno pomocí relativního jasu okolí S_R , které je poměrem mezi jasnem okolní bílé a jasnem bílého podnětu. Podle jeho hodnoty jsou popsány tři typy okolí, tmavé, tlumené a světlé pro které jsou stanoveny tři parametry. Mezi parametry patří faktor stupně adaptace F , chromatický indukční faktor N_C a efekt okolí c . Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.

$$S_R = \frac{L_{SW}}{L_{DW}} \quad (5)$$

kde L_{SW} je jas okolní bílé a L_{DW} je jas bílé podnětu.

Tabulka 1 – Vstupní parametry okolí [8]

S_R	Okolí	F	N_C	c
$0,2 \leq S_R$	průměrné	1,0	1,0	0,69
$0 < S_R < 0,2$	tlumené	0,9	0,9	0,59
$S_R = 0$	tmavé	0,8	0,8	0,535

3.6.2 Přímý výpočet modelu CIECAM02.

Přímý výpočet je rozdělen do dvou souvisejících kroků. V prvním kroku jsou vypočteny všechny hodnoty parametrů, které nejsou ovlivněny vstupními hodnotami vzorků (faktor úrovně adaptačního jasu, indukční faktor, stupeň adaptace). V druhém kroku jsou vypočteny všechny parametry, které souvisejí s parametry vzorků a samotné výstupní koreláty. [8-15]

Stupeň adaptace D je funkce úrovně adaptačního jasu L_A a faktoru stupně adaptace F . Je definován pomocí rovnice

$$D = F \left[1 - \left(\frac{1}{3,6} \right) e^{\left(\frac{-L_A - 42}{92} \right)} \right] \quad (6)$$

kde F je faktor stupně adaptace, L_A je úroveň adaptačního jasu v $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

Stupeň adaptace D nabývá hodnot od 0 do 1. Hodnota stupně adaptace rovna 1 odpovídá úplné adaptaci, adaptace rovna 0 odpovídá žádné adaptaci, avšak hodnoty stupně adaptace nižší než 0,6 nastávají zcela výjimečně. Stupeň adaptace D je součástí chromatické adaptace, která je v modelu CIECAM02 zahrnuta v transformaci chromatické adaptace CAT02.

Faktor úrovně adaptačního jasu F_L je umožňuje kompenzaci efektů způsobených změnou úrovně jasu (osvětlení). Faktor úrovně adaptačního jasu je součástí jasové adaptace.

$$F_L = 0,2 k^4(5L_A) + 0,1(1 - k^4)^2(5L_A)^{1/3} \quad (7)$$

$$k = \frac{1}{5L_A + 1} \quad (8)$$

kde L_A je úroveň adaptačního jasu v $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Hodnota $5L_A$ je použita jako hodnota pravděpodobného jasu bílé. Při fotopických úrovních jasů je průběh faktoru F_L úměrný třetí odmocnině hodnoty $5L_A$, která dává částečnou kompenzaci změny úrovně adaptačního jasu. Při skotopických úrovních jasů je průběh faktoru F_L úměrný $5L_A$, ke kompenzaci změny úrovně adaptačního jasu nedochází.

3.6.3 Výpočet parametrů odpovídajících vzorkům

V druhém kroku jsou vypočteny hodnoty parametrů, které jsou závislé na vstupních parametrech posuzovaných vzorků. Rovnice v této části jsou použity rovněž pro výpočet parametrů odpovídající ideálně bílé. V případě vzorků jsou vstupními parametry hodnoty CIE trichromatických složek XYZ . V případě ideálně bílé jsou vstupními parametry hodnoty CIE trichromatických složek X_W, Y_W, Z_W . [8-15]

- a) **Výpočet ostrých odezev RGB** z CIE trichromatických složek XYZ vybraného vzorku. Pomocí transformace chromatické adaptace M_{CAT02} jsou tyto složky převedeny na odpovídající barvy, které odpovídají podnětu, která má stejný vzhled při referenčních podmínkách.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (9)$$

kde X, Y, Z jsou CIE trichromatické složky pro vybraný vzorek, R, G, B jsou RGB odezvy pro vzorek, M_{CAT02} je optimalizovaná transformační matice.

- b) **Výpočet odpovídajících adaptovaných čípkových odezev** pro jednotlivé čípky. V tomto kroku dochází k úplné chromatické adaptaci.

$$R_C = D_R R \quad (10)$$

$$G_C = D_G G \quad (11)$$

$$B_C = D_B B \quad (12)$$

kde D_R, D_G, D_B je stupeň adaptace pro RGB odezvy a R, G, B jsou RGB odezvy pro vzorek.

- c) **Výpočet Hunt–Pointer–Estevez čípkových odezev**, která lépe odpovídají čípkovým odezvám.

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = M_{HPE} M_{CAT02}^{-1} \begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} \quad (13)$$

kde R_C, G_C, B_C jsou odpovídající adaptované RGB odezvy, M_{HPE} je Hunt–Pointer–Estevez čípková matice, M_{CAT02}^{-1} je transponovaná optimalizovaná transformační matice.

- d) **Post-adaptační čípkové odezvy** pro jednotlivé čípky. V tomto kroku dochází k úplné jasové adaptaci.

$$R'_a = 400 \frac{\left(\frac{F_L R'}{100}\right)^{0,42}}{\left(\frac{F_L R'}{100}\right)^{0,42} + 27,13} + 0,1 \quad (14)$$

kde R' je Hunt–Pointer–Estevez odezva pro dlouhovlnný čípek, F_L je faktor úrovně adaptačního jasu. Obdobně jsou vypočteny odezvy i pro zbývající čípky G'_a a B'_a .

- e) **Výpočet achromatické odezvy** pro vzorek. Achromatická odezva je závislá na post-adaptačních čípkových odezvách a podmínkách pozorování.

$$A = \left[2R'_a + G'_a + \frac{B'_a}{20} - 0,305 \right] N_{bb} \quad (15)$$

kde R'_a, G'_a, B'_a jsou post-adaptační čípkové odezvy, N_{bb} je indukční faktor jasu okolí.

3.6.4 Výpočet korelátů v modelu CIECAM02

- a) **Oponentní barevné odezvy** a (červená–zelená) a b (žlutá–modrá) jsou vypočteny pomocí post-adaptačních čípkových odezev, poměr post-adaptačních čípkových odezev odpovídá poměru čípků na sítnici lidského oka podle Walravena a Boumana [8].

$$a = R'_a - \frac{12}{11} G'_a + \frac{B'_a}{11} \quad (16)$$

$$b = \frac{(R'_a + G'_a - 2B'_a)}{9} \quad (17)$$

kde R'_a, G'_a, B'_a jsou post-adaptační čípkové odezvy.

- b) **Světlost J** je definována jako: „Jasnost oblasti pozorované vzhledem k jasnosti stejně osvětlené oblasti, která se jeví jako bílá nebo vysoce propouštějící.“

$$J = \frac{Q_S}{Q_W} \quad (18)$$

$$J = 100 \left(\frac{A}{A_W} \right)^{cz} \quad (19)$$

kde Q_S je hodnota jasnosti pro vzorek a Q_W je hodnota jasnosti pro ideálně bílou, A je achromatická odezva pro vzorek a A_W je achromatická odezva pro ideálně bílou, c je efekt okolí, z je základní exponenciální nelinearita. Jsou-li si achromatické odezvy rovny, hodnota světlosti J je rovna 100.

- c) **Subjektivní chromatičnost M** je definována jako: „Atribut vizuálního vnímání, podle kterého se oblast jeví více či méně chromatická.“ Pro subjektivní chromatičnost a chroma platí stejný vztah jako v případě světlosti a jasnosti.

$$M = CF_L^{0,25} \quad (20)$$

kde C je chroma, F_L je faktor úrovně adaptačního jasu.

Pro výpočet barevné odchylky vyjádřené pomocí modelu CIECAM02 je nutné nejprve převést cylindrické souřadnice C , M nebo s do kartézské soustavy souřadnic pomocí jednoduché transformace. Pomocí této transformace jsou definovány tři prostory barev založené na těchto attributech. Pro příklad je zde uveden výpočet založený na subjektivní chromatičnosti M .

$$a_M = M \cos(h) \quad b_M = M \sin(h) \quad (21)(22)$$

kde M je subjektivní chromatičnost, h je úhel barevného tónu.

Barevná odchylka je vypočtena v modelu CIECAM02 podle rovnice

$$\Delta E_{CIECAM02} = \sqrt{(\Delta J)^2 + (\Delta a_i)^2 + (\Delta b_i)^2} \quad (23)$$

kde ΔJ je rozdíl ve světlosti dvou vzorků, Δa_i a Δb_i jsou rozdíl mezi barevnými souřadnicemi podle rovnic (21) – (22).

3.7 Model CAM02–UCS

Model CAM02–UCS je přibližně rovnoměrný model vycházející z modelu barevného vzhledu CIECAM02. Model byl vytvořen pro popis barevného vzhledu vzorků s malými i velkými rozdíly bez nutnosti používat 2 různé modely. Model byl definován pro fotopický adaptační jas 200 cd.m^{-2} . V jeho výpočtu jsou zaneseny dva modifikované koreláty, a to koreláty světlosti J' a subjektivní chromatičnosti M' . [8,9,11]

$$J' = \frac{(1 + 100c_1)J}{1 + c_1J} \quad (24)$$

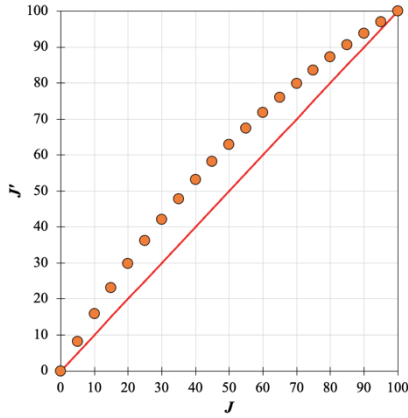
$$M' = \frac{1}{c_2} \ln(1 + c_2M) \quad (25)$$

kde J je světlost, M je subjektivní chromatičnost, c_1 a c_2 jsou váhové parametry uvedené v *tabulce 2*. [70]

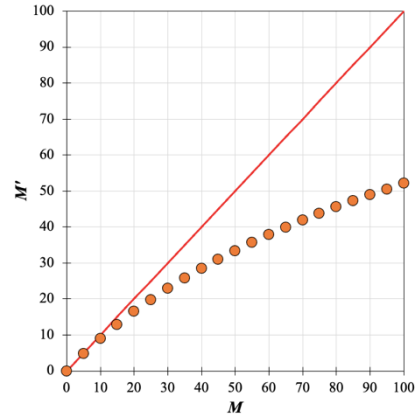
Tabulka 2 – Koeficienty a váhové parametry [11]

	K_L	c_1	c_2
CAM02–UCS	1	0,007	0,0228

Koeficienty c_1 a c_2 jsou uvedeny v *tabulce 2*. Na *obrázcích 5* a *6* je vidět vztah mezi modifikovanými a nemodifikovanými koreláty pro oba modely. Na základě modifikace jsou definovány i odpovídající prostory barev J' a a'_M, b'_M .



Obrázek 5 – Vztah mezi modifikovanou J' a nemedifikovanou hodnotou J [převzato 11]



Obrázek 6 – Vztah mezi modifikovanou M' a nemedifikovanou hodnotou M [převzato 11]

$$a'_M = M' \cos(h)$$

$$b'_M = M' \sin(h) \quad (26)(27)$$

Barevná odchylka v modelu CAM02–UCS je vypočtena podle rovnice

$$\Delta E'_{CAM02-UCS} = \sqrt{\left(\frac{\Delta J'}{K_L}\right)^2 + (\Delta a'_M)^2 + (\Delta b'_M)^2} \quad (28)$$

kde $\Delta J'$, $\Delta a'_M$ a $\Delta b'_M$ jsou rozdíly ve světlosti a souřadnicích a'_M a b'_M mezi dvěma vzorky, K_L je parametr světlosti podle tabulky 2.

3.8 Určování chyb při spektrofotometrických měřeních

Určování chyb při spektrofotometrických měřeních slouží ke stanovení systematických chyb. Při jejich stanovování se hodnotí to, jak tyto chyby ovlivňují výsledky měření na jednotlivých přístrojích. V případě spektrofotometrů mohou nastat tyto čtyři základní systematické chyby – chyba určení nulového odrazu (offset), chyba určení fotometrické linearit, chyba určení vlnové délky a chyba určení šířky spektrálního pásu. Pro zjištění těchto chyb je používána vícenásobná regrese, díky níž je možné stanovit podíl a velikost těchto chyb ve výsledné hodnotě spektrálního činitele odrazu. Velikost těchto chyb je určována mezi referenčním (vztažným) přístrojem a posuzovaným nebo porovnávaným přístrojem. [3,9,17-20]

Stanovení chyb je provedeno podle následující rovnice

$$\rho_0(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 \rho_t(\lambda) + \beta_2 \frac{d\rho_t(\lambda)}{d\lambda} + \beta_3 \frac{d^2 \rho_t(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (30)$$

kde $\rho_0(\lambda)$ je korigovaná hodnota spektrálního činitele odrazu, $\rho_t(\lambda)$ je měřená hodnota spektrálního činitele odrazu, β_0 je nejistota určení černé, β_1 je nejistota určení fotometrické linearit, β_2 je nejistota určení vlnové délky, β_3 je nejistota určení šířky spektrálního pásu, $\frac{d\rho_t(\lambda)}{d\lambda}$ je první derivace měřené hodnoty spektrálního činitele odrazu podle vlnové délky a $\frac{d^2 \rho_t(\lambda)}{d\lambda^2}$ je druhá derivace měřené hodnoty spektrálního činitele odrazu podle vlnové délky.

Chyba určení nulového odrazu (princiálně se jedná o chybu v nastavení v offsetu) způsobuje posunutí celé fotometrické stupnice. Je způsobena rozptýleným světlem spojeným se vstupní optikou nebo ignorováním tzv. černého proudu detektoru.

$$\rho_0(\lambda) = \rho_t(\lambda) + \beta_0 \quad (31)$$

kde $\rho_0(\lambda)$ je korigovaná hodnota spektrálního činitele odrazu, $\rho_t(\lambda)$ je měřená hodnota spektrálního činitele odrazu, β_0 je chyba určení nulového odrazu (černé).

Chyba určení fotometrické linearit je chyba úměrná měření spektrálního činitele odrazu. Může být způsobena nesprávnou kalibrací (fyzická změna bílého standardu) nebo odchylkou detektoru od lineární odezvy.

$$\rho_0(\lambda) = \rho_t(\lambda) + \beta_1 \rho_t(\lambda) \quad (32)$$

kde $\rho_0(\lambda)$ je korigovaná hodnota spektrálního činitele odrazu, $\rho_t(\lambda)$ je měřená hodnota spektrálního činitele odrazu, β_1 je chyba určení fotometrické linearit.

Chyba určení vlnové délky je chyba v hodnotě spektrálního činitele odrazu v důsledku posunu v měřítku vlnových délek.

$$\rho_0(\lambda) = \rho_t(\lambda) + \beta_2 \frac{d\rho_t(\lambda)}{d\lambda} \quad (33)$$

kde $\rho_0(\lambda)$ je korigovaná hodnota spektrálního činitele odrazu, $\rho_t(\lambda)$ je měřená hodnota spektrálního činitele odrazu, β_2 je chyba určení vlnové délky.

Chyba určení šířky spektrálního pásu souvisí se změnou spektrální šířky v závislosti na vlnové délce nebo pokud je šířka pásma příliš velká (šířka šterbiny).

$$\rho_0(\lambda) = \rho_t(\lambda) + \beta_3 \frac{d^2\rho_t(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (34)$$

kde $\rho_0(\lambda)$ je korigovaná hodnota spektrálního činitele odrazu, $\rho_t(\lambda)$ je měřená hodnota spektrálního činitele odrazu, β_3 je chyba určení šířky spektrálního pásu.

4. Příprava experimentu

4.1 Materiál

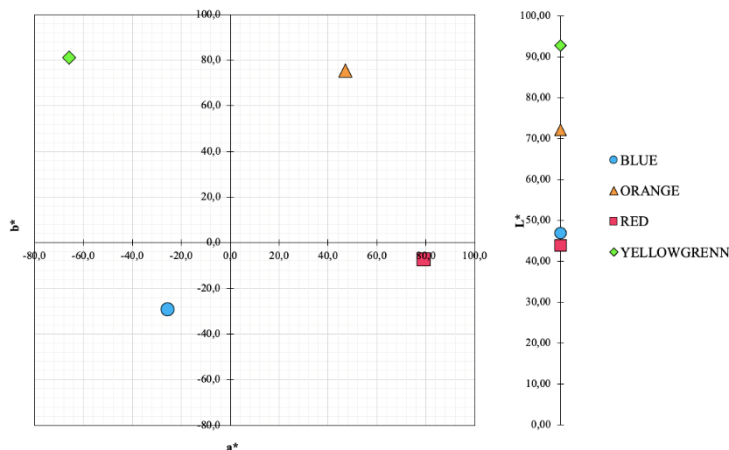
Pro hodnocení barevného vzhledu při různých adaptačních jasech byla připravena sada barevných textilních vzorků, pomocí kterých je mapován barevný prostor. Pro testování byl zvolen textilní materiál značky Dralon® (polyakrylonitril). Vlastnosti zvoleného materiálu jsou uvedeny v *tabulce 3*.

Polyakrylonitril byl zvolen pro barvení koncentračních řad a barevných vzorků pro možnost obarvení kationtovými (bazickými) barvivy, která umožňují dosažení vysoce čistých odstínů. Dostupná barviva použitá v této disertační práci byla dodána firmami Huntsman International LLC (dále Huntsman) a DyStar Textilfarben GmbH & Co. Deutschland KG (dále DyStar).

K barvení vzorků bylo použito barvicí zařízení Multicolor Pretema, systém Ellner se 6 barvicími místy, typ 311. Při barvení koncentračních řad a vzorků byl dodržen barvicí postup, který vycházel z doporučení výrobců barviv.

Tabulka 3 – Vlastnosti použitého textilního materiálu

Materiál	Dralon®
Struktura	plátno
Plošná hmotnost (g. cm⁻²)	220
Dostava osnovy (počet nití. 10 cm⁻¹)	325
Dostava útku (počet nití. 10 cm⁻¹)	140
Tloušťka (mm)	0,58



Obrázek 7 – Pozice středů zvolených barevných center v prostoru barev CIELAB

Barvením vzorků a pomocí informací o koncentračních řadách byla připravena 4 chromatická barevná centra, která vycházejí z barevných center definovaných podle CIE, a to barevná centra s označením blue (B), orange (O), red (R) a yellowgreen (YG). Na *obrázku 7* jsou zobrazeny středy zvolených center na chromatické ploše a^*b^* společně s hodnotami jejich měrné světlosti L^* .

V *tabulce 4* jsou uvedeny hodnoty chroma C^* a úhlu barevného tónu h_{ab} pro čtyři barevná centra. Pozice vzorků vůči středu barevného centra byla přibližně uniformní.

Tabulka 4 – Barevné souřadnice barevných center

Centrum	h_{ab}	C^*
O	63°	90
YG	126°	96
B	229°	39
R	354°	79

Pro každé barevné centrum bylo zvoleno celkem 18 barevných párů. Vždy 6 barevných párů mělo majoritní odchylky ve světlosti ΔL^* , chroma ΔC^* a úhlu barevného tónu ΔH^* . Celkem bylo vybráno 72 barevných párů, které jsou vypsány v příloze disertační práce v *tabulkách P1.1 – P1.4*.

4.2 Příprava vizuálních experimentů

Součástí experimentální části disertační práce byla příprava, realizace a vyhodnocení vizuálních experimentů provedených v koloristické skříni při definovaném osvětlení a při předem definovaných podmínkách. V rámci disertační práce byly připraveny, realizovány a vyhodnoceny tři základní experimenty s označením *TUL 1*, *TUL 2* a *TUL 3*. Vizuálních experimentů se zúčastnila skupina pozorovatelů bez předchozích zkušeností s vizuálním hodnocením.

Cíle vizuálního experimentu:

1. připravit různé úrovně adaptačních jasů, které pokryjí široké spektrum adaptačních jasů na fotopických a mezopických úrovních až na hranici mezopické a skotopické úrovně adaptačních jasů.
2. realizace vizuálních experimentů s pomocí skupiny pozorovatelů, kteří hodnotili vybrané barevné páry z centra blue, orange, red a yellowgreen.
3. zpracování a vyhodnocení výsledků získaných během vizuálních experimentů pro vyjádření pozorovatelské shody pozorovatelů a shody mezi pozorovateli.
4. zpracování a vyhodnocení výsledků získaných během vizuálních experimentů pro skupiny pozorovatelů rozdělených podle národnosti (skupina Evropa – pozorovatelé z České a Slovenské republiky, skupina Asie – pozorovatelé z Číny, Japonska a Indie, experiment TUL 3 – Španěle), kterou všichni pozorovatelé při experimentu uvedli a souhlasili s uvedením tohoto údaje při vyhodnocení.
5. vyhodnocení shody vizuálně určené barevné odchylky a přístrojově změřené barevné odchylky.
6. návrh úpravy stávajícího modelu barevného vzhledu CIECAM02 a CAM02-UCS.
7. testování barvocitu pozorovatelů účastnících se vizuálních experimentů TUL 1, TUL 2 a TUL 3.

4.2.1 Příprava vizuálního experimentu TUL 1 a TUL 2

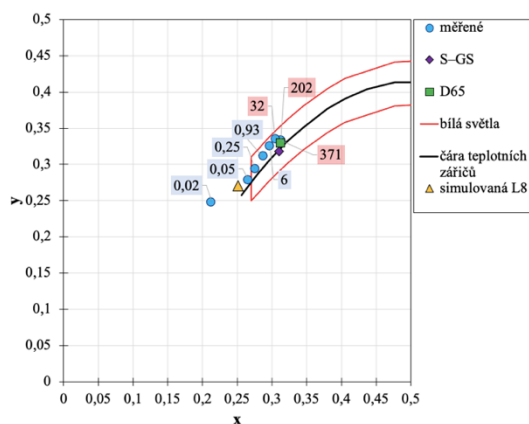
Pro vizuální experiment bylo nutné změřit úrovně adaptačních jasů vybraného simulátoru denního osvětlení F7 (zářivka) umístěného v koloristické skříni Atelier Technik Color (AT). Pro změření úrovní adaptačních jasů byl použit Photo Research SpectraScan® Spectroradiometer PR-740 se spektrálním rozsahem 380 – 780 nm. Všechna měření byla provedena po 10 opakováních. Měření bylo provedeno ze vzdálenosti 50 cm kolmo na standard Zenith Lite targets. Tento standard byl umístěn na podložce v úhlu 45 ° (obrázek 9). Toto uspořádání měření odpovídá i uspořádání při vizuálních experimentech. Hodnoty v tabulce 5 jsou vztaženy ke standardnímu kolorimetrickému pozorovateli CIE 1931. Pro úroveň 1 adaptačního jasů byly použity dvě sady shodných simulátorů F7. V tabulce 5 je navíc doplněna hodnota L_A . Jedná se o hodnotu úrovně adaptačního jasů vztaženou k pozadí použitému v koloristické skříni a typu použitého simulátoru denního světla. Výpočet je proveden podle rovnice (4). Hodnota S – GS odpovídá hodnotě úrovně adaptačního jasů pro skříň ICS-TEXICON, kde byla umístěna šedá stupnice sloužící k zapamatování pro následné vizuální hodnocení při experimentu TUL 2.

Tabulka 5 – Hodnoty adaptačních jasů L_A pro experiment TUL 1 a TUL 2

Úroveň	L_A (cd. m ⁻²)	CCT (K)	Adaptační čas (min)
1	371	6 431±41	2
2	202	6 466±19	2
3	32	7 458±46	5
4	6	7 458±14	7
5	0,93	8 486±11	10
6	0,25	10222±11	12
7	0,05	12793±42	12
8	0,01	N/A	15
S – GS	268	6724±35	2

Na následujícím obrázku 8 jsou do CIE kolorimetrického trojúhelníku vložena data odpovídající naměřeným datům ze spektrometru a data odpovídající hranici pro bílá světla podle CIE a data s pozicí bodu nepestrosti pro normalizovaný druh světla D65 (CIE D65). Na obrázku 8 jsou červeně vyznačeny úrovně ve fotopické oblasti vidění a modře úrovně v mezopické oblasti vidění. Jak je možné vidět na obrázku 8, úroveň 8 leží mimo hranici pro bílá světla, pro tuto úroveň nebylo možné pomoci

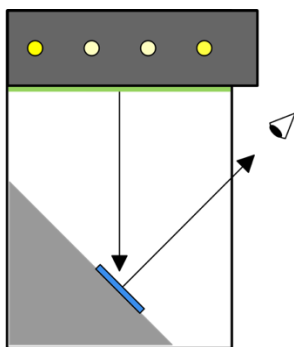
spektroradiometru naměřit hodnotu náhradní teploty chromatičnosti CCT. Pro tuto úroveň byla CCT odhadnuta s odkazem na čáru teplotních zářičů vztaženou ke standardnímu kolorimetrickému pozorovateli CIE 1931 na teplotu přesahující 25 000 K. Pro dosažení požadovaných úrovní adaptačních jasů byly použity filtry, s jejichž pomocí bylo možné postupně snižovat úroveň osvětlení. Filtry byly vyrobeny z PMMA desek, které byly potaženy tenkými fóliemi s propustností světla 6 a 16 %. Zároveň je na *obrázku 8* vidět, že vlivem použití filtrů dochází k posunu směrem k modrozelené oblasti diagramu chromatičnosti, nejvýraznější změna nastává u poslední 8. úrovně adaptačního jasů. V tomto případě je použit filtr B3, který je oproti ostatním filtrům s označením B1 a B2 více do zelena a do modra.



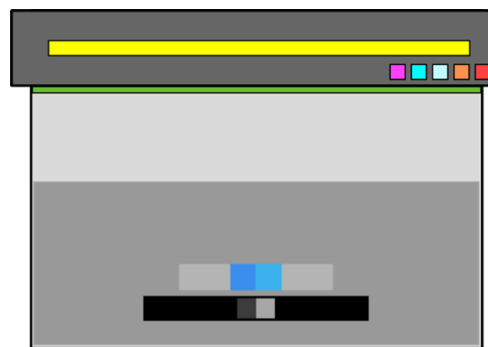
Obrázek 8 – Posuv bodu nepevnosti pro různé úrovně adaptačního jasů v CIE kolorimetrickém trojúhelníku pro experimenty TUL 1 a TUL 2

4.2.2 Vizualní experiment TUL 1

Vizualní experiment TUL 1 byl realizován v koloristické skříni Atelier Technik Color podle metody Gray scale method. Tato metoda popisuje hodnocení, při kterém je Šedá stupnice pro hodnocení změny odstínu odpovídající ISO normě 105A:02-1993 [21] umístěna ve stejné koloristické skříni jako posuzované barevné páry, tedy je stejně jako barevné páry ovlivněna snižující se úrovní adaptačního jasů (*obrázek 10*). Experiment byl proveden při 8 adaptačních jasech (*tabulka 5*). Experimentu se zúčastnilo 17 pozorovatelů různých národností a pohlaví bez předchozích zkušeností s hodnocením se šedou stupnicí.



Obrázek 9 – Uspořádání vizualního experimentu – boční pohled

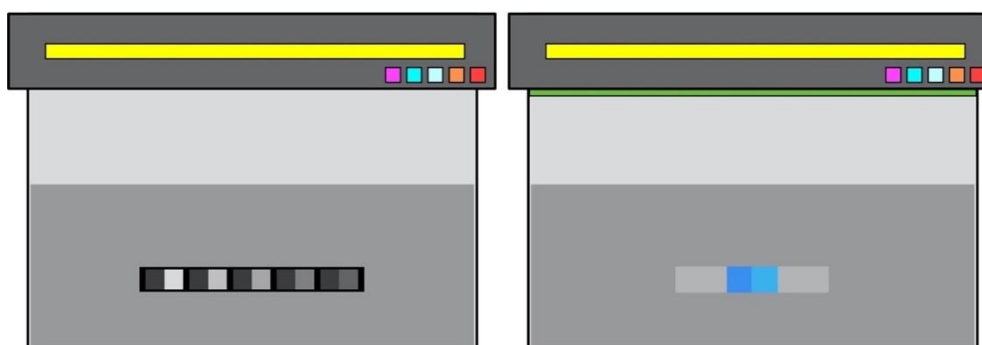


Obrázek 10 – Uspořádání vizualního experimentu TUL 1 – přímý pohled

Každý z pozorovatelů hodnotil všechny barevné páry 5krát pod každou úrovní jasů. Všichni pozorovatelé souhlasili se zveřejněním roku narození, pohlaví a národnosti během zpracování této práce. V *tabulce 5* jsou uvedeny hodnoty času, po který se pozorovatelé adaptovali na jednotlivé úrovně adaptačního jasů během vizualního experimentu TUL 1.

4.2.3 Vizuální experiment TUL 2

Vizuální experiment TUL 2 (obrázek 11) byl realizován v koloristické skříní Atelier Technik Color a koloristické skříní ICS-TEXICON podle metody Memory matching method, která spočívá v tom, že je šedá stupnice pro hodnocení změny odpovídající ISO normě 105A:02-1993 umístěna mimo hlavní skříně, tedy, že pozorovatel si před hodnocením barevných párů stupnici „zapamatuje“ a hodnotí pak barevné páry pouze pomocí paměti. Každý z pozorovatelů měl před každou úrovní čas 2 minuty, aby si zapamatoval šedou stupnici. Po zapamatování byla skříně vlevo zhasnuta, aby pozorovatele neovlivňovala během hodnocení barevných párů. Experiment byl realizován pod 5 úrovněmi jasu uvedených v tabulce 5, a to úrovněmi 2 – 5 a 7. Experimentu se zúčastnilo 10 pozorovatelů různých národností a pohlaví bez předchozích zkušeností s hodnocením. Každý z pozorovatelů hodnotil všechny barevné páry 5krát pod každou úrovní adaptačního jasu. Všichni pozorovatelé souhlasili se zveřejněním roku narození, pohlaví a národnosti během zpracování této práce.



Obrázek 11 – Uspořádání vizuálního experimentu TUL 2 a TUL 3 – přímý pohled

4.2.4 Vizuální experiment TUL 3

Vizuální experiment TUL 3 byl realizován v koloristické skříní GretagMacbeth SPECTRALIGHT® III (SPL III) a VeriVide CAC Portable. Jako osvětlení byl v koloristické skříní použit simulátor denního světla založený na kombinaci modrého filtru a halogenové žárovky. Obě skříně se nacházely v laboratoři na Universitě v Granadě. Pro změření úrovní jasů byl použit spektrometr Konica Minolta CS-2000 se spektrálním rozsahem 380 – 780 nm. Získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6. Vizuální experiment TUL 3 byl realizován podle stejné metody jako experiment TUL 2.

Tabulka 6 – Naměřené hodnoty úrovně adaptačních jasů L_A pro experiment TUL 3

Úroveň	L_A (cd. m^{-2})	CCT (K)	Adaptační čas (min)
G1	63,67	6 516	5
G2	2,43	6 466	10
G3	0,07	4 142	15
G – GS	146	6 941	2

Experiment se sestával ze 3 úrovní adaptačního jasu a zúčastnilo se jej 6 pozorovatelů různých národností a pohlaví bez předchozích zkušeností s hodnocením. Jeden pozorovatel měl již dříve diagnostikovanou vadu barvocitu, tudíž je jeho hodnocení vyhodnoceno samostatně (pozorovatel G6) a porovnává se zbývajících pozorovateli. Každý z pozorovatelů hodnotil všechny barevné páry 5krát pod každou úrovní adaptačního jasu. Všichni pozorovatelé souhlasili se zveřejněním roku narození, pohlaví a národnosti během zpracování této práce.

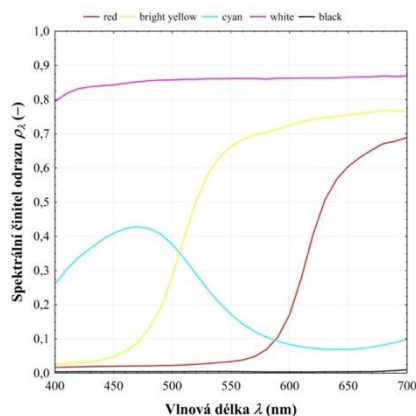
5. Výsledky a diskuze

5.1 Stanovení a hodnocení chyb při spektrofotometrických měřeních

Pro zjištění přesnosti měření použita sada 12 standardů Datacolor SN355 (obrázek 12). Tuto sadu tvoří standardy: pale grey, mid grey, deep grey, deep pink, red, orange, bright yellow, green, cyan, deep blue, white a black.



Obrázek 12 – Sada standardů s označením Datacolor SN355

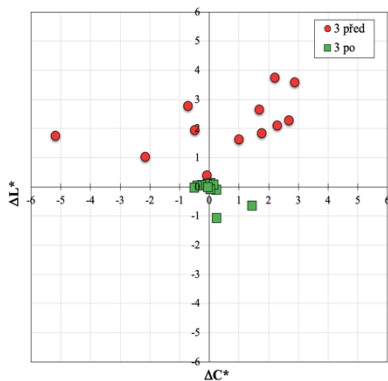


Obrázek 13 – Ukázka hodnot spektrálního činitele odrazu ρ_λ pro vybrané standardy naměřené na referenčním spektrofotometru 1

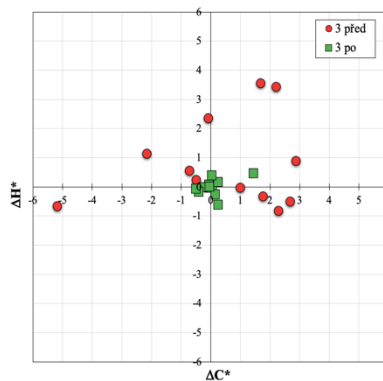
Všechny standardy ze sady Datacolor SN355 byly změřeny na spektrofotometrech s měřicí geometrií $d_e:8^\circ$, $d_i:8^\circ$ a úhlovou měřicí geometrií. V této části jsou uvedeny výsledky pro měřicí geometrii s nastavením $d_e:8^\circ$. Pro následné zpracování naměřených dat byla vybrána data spektrálního činitele odrazu pro všechny standardy odděleně pro všechny referenční spektrofotometry, dále data spektrálního činitele odrazu ρ_λ nebo β_λ pro ostatní posuzované spektrofotometry. Pro všechny spektrofotometry byla použita spektrální data v rozsahu 400 – 700 nm s rozlišením 10 nm. Na hodnoty spektrálního činitele odrazu ρ_λ měla nejvýraznější vliv korekce u vzorku mid grey. Pro tento standard měla korekce za následek snížení ρ_λ v oblasti 430 – 700 nm, tedy téměř v celém rozsahu vlnových délek. Největší vliv měla korekce na snížení spektrálního činitele odrazu ρ_λ na vlnových délkách delších než 500 nm. U vzorku green došlo vlivem korekce k hypochromnímu posunu v celém rozsahu vlnových délek. Hlavním důvodem je změna bílého kalibračního standardu způsobená jeho opotřebením a zažloutnutím. Tento vliv byl zmíněn i v kapitole 6 v disertační práci.

Změna v hodnotách spektrálního činitele odrazu ρ_λ přinesla i změny v hodnotách odchylek kolorimetrických souřadnic $L^*a^*b^*$ před a po korekci na referenční spektrofotometr 1. Změna všech hodnot barevnosti je vyjádřena pomocí odchylek v měrné světlosti ΔL^* , chroma ΔC^* a v úhlu barevného tónu ΔH^* a odchylek barevnosti Δa^* , Δb^* . Všechny hodnoty jsou vypočteny pro osvětlení D65 a standardního kolorimetrického pozorovatele CIE 1931.

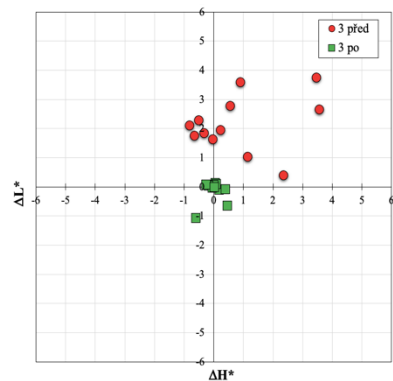
Na obrázků 14 – 16 jsou zobrazeny grafy rozdílů vyjadřující změnu měrné světlosti ΔL^* v závislosti na změně chroma ΔC^* , změnu měrného odstínu ΔH^* v závislosti na změně chroma ΔC^* a změnu měrné světlosti ΔL^* na změně měrného odstínu ΔH^* před a po korekci na referenční spektrofotometr 1. Vypočtená a provedená korekce hodnot získaných změřením na spektrofotometru 3 oproti referenčnímu spektrofotometru 1 výrazně napomohla ke snížení barevné odchylky ΔE^* mezi spektrofotometrem 3 a referenčním spektrofotometrem 1. Jak ukazují grafy na obrázcích 14 – 16, korekce pomohla výrazně i ke snížení odchylek v chroma, v úhlu barevného tónu i světlosti, a to ve všech směrech a se stejnou velikostí. Nejmenší vliv měla provedená korekce na vzorek s označením black a deep blue.



Obrázek 8.7 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔL^* a ΔC^* před a po korekci pro spektrofotometr 3



Obrázek 8.8 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔC^* a ΔH^* před a po korekci pro spektrofotometr 3



Obrázek 8.9 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔL^* a ΔH^* před a po korekci pro spektrofotometr 3

U těchto dvou vzorků s ohledem na jejich barevnost není mezi spektrofotometry tolik výrazný rozdíl jako u světlých vzorků (pale grey, mid grey, white), kde použití korekce má významný vliv na výsledné hodnoty odchylek. Odlišnost spektrálního činitele odrazu ρ_λ především v žlutočervené oblasti vlnových délek je způsobena především změnou barevnosti bílého kalibračního standardu. S použitím korekčních faktorů lze použít data naměřená na spektrofotometru 3 a nahradit je v případě, kdyby nebyl referenční spektrofotometr 1 k dispozici.

Cílem stanovení korekčních koeficientů bylo možné použití jiného spektrofotometru v případě, že by nebyl k dispozici zvolený referenční spektrofotometr nebo v případě, že by získané hodnoty mohly být pomocí korekčních koeficientů považovány za hodnoty blízké referenčnímu spektrofotometru, tzn. z důvodu přenositelnosti dat mezi spektrofotometry.

5.2 Výsledky barvocitu

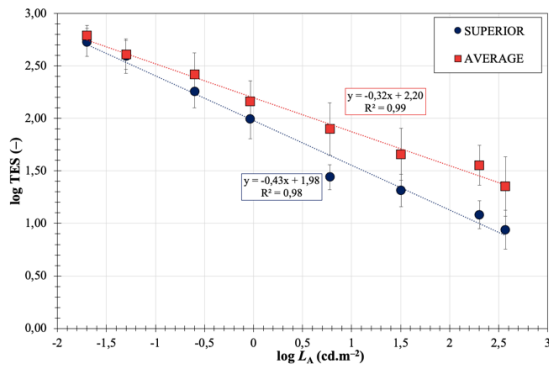
Každý z pozorovatelů účastnících se vizuálních experimentů TUL 1, TUL 2 a TUL 3 absolvoval test na barvocit. Testování proběhlo při všech adaptačních jasech. Testování barvocitu na různých úrovních adaptačních jasů bylo provedeno s cílem zjistit, při které z adaptačních úrovní a jak je pozorovatel ještě schopen rozlišovat barvy, a jak úroveň adaptačního jasu ovlivňuje barvocit. Pozorovatelé byli hodnoceni na základě celkového chybového skóre (TES skóre). Rozdělení byli na nejvyšší úrovni do dvou kategorií podle výsledků TES skóre. Pro experimenty TUL 1 a TUL 2 to byla 2. úroveň s hodnotou adaptačního jasu $202 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Pro experiment TUL 3 se jednalo o 1. úroveň s hodnotou adaptačního jasu $63,67 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

5.2.1 Barvocit pozorovatelů

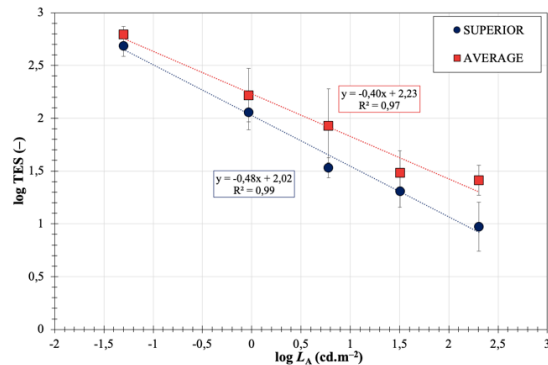
V rámci hodnocení experimentu TUL 1, TUL 2 a TUL 3 nebyl na nejvyšší úrovni jasu žádný z pozorovatelů testován s poruchou barvocitu vyjma pozorovatele G6 z experimentu TUL 3. Pozorovatel G6 byl již před testem diagnostikován jako osoba s poruchou barvocitu.

Během testování a následujícího vyhodnocování bylo zjištěno, že při nízkých adaptačních úrovních (nižších než $0,25 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$) dochází u 2/3 pozorovatelů k výraznému navýšení hodnoty TES skóre především ve žlutozelené, modrozelené a modré oblasti terčů, což u těchto pozorovatelů bylo ovlivněno tzv. pseudotritanopickým efektem. Tento efekt je způsoben postupnou adaptací oka na nízké adaptační jasy a posunem citlivosti lidského oka směrem ke kratším vlnovým délkám a může být způsoben tzv. „oslepnutím“ krátkovlnných čípků. U zbývajících pozorovatelů byla na základě výsledků zjištěna snížená nebo velmi nízká rozlišovací schopnost při nízkých úrovních adaptačních jasů. Na

obrázcích 17 – 19 je vyjádřena závislost TES skóre pozorovatelů účastnících se experimentu TUL 1 – 3 na úrovni adaptačního jasu.

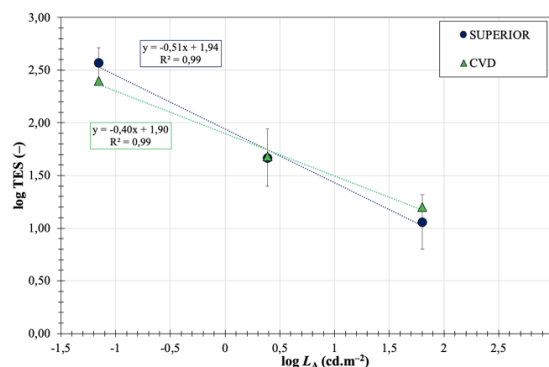


Obrázek 17 – TES skóre pozorovatelů z experimentu TUL 1 v závislosti na úrovni adaptačního jasu



Obrázek 18 – TES skóre pozorovatelů z experimentu TUL 2 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

Z obrázku 17 a 18 vyplívá, že vlivem snížení úrovně adaptačního jasu došlo u pozorovatelů ze skupiny superior i average k postupné ztrátě schopnosti rozlišovat barvy, což potvrzuje i platnost Purkyněho jevu. Zároveň je vidět, že se snižující se úrovní adaptačního jasu dochází ke stírání rozdílu mezi skupinami pozorovatelů superior a average. Jak je možné vidět na nejnižší úrovni adaptačního jasu, která je blízká hranici skotopické oblasti, rozdíl mezi pozorovatelem superior a average je velmi malý (2,15 – 3%). Je nutno podotknout, že FM 100-Hue test se provádí vždy při denním osvětlení, tedy vyhodnocení pro úrovně 3 – 8 je potřeba brát spíše jako orientační. Na druhou stranu je to také ukazatel toho, do jaké míry je rozlišování barev ovlivněno úrovní adaptačního jasu. Rovněž jako u předchozích dvou experimentů, i u experimentu TUL 3 došlo u pozorovatelů k postupné ztrátě rozlišování barev. Jak bylo napsáno výše, pozorovatelé z tohoto experimentu byli zařazeni do skupiny s vynikající rozlišovací schopností (superior) vyjma pozorovatele G6 (CVD), kterému byla již dříve diagnostikována porucha barvocitu (protanomálie). Na obrázku 19 je rovněž vidět, že ačkoliv se jedná o pozorovatele s diagnostikovanou poruchou barvocitu, jeho výsledky se příliš neliší od výsledků pozorovatelů ze skupiny superior. U pozorovatele s touto poruchou barvocitu je důležité říci, že rozlišování barev na fotopické úrovni je ovlivněno posunem absorpčního maxima čípků směrem ke kratším vlnovým délkám. Jedinec s takovou poruchou není schopen rozlišit mezi sebou červené a zelené odstíny. Na nejnižší úrovni adaptačního jasu je dokonce jeho výsledek lepší, než u ostatních pozorovatelů. Jak vyplývá z Purkyněho jevu, s klesající úrovní adaptačního jasu dochází u člověka k postupné ztrátě schopnosti rozlišovat barvy od červené po modrou barvu.



Obrázek 19 – TES skóre pozorovatelů z experimentu TUL 3 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

5.3 Výsledky vizuálních experimentů

Výsledky vizuálních hodnocení pozorovatelů jsou hodnoceny z hlediska několika různých pohledů (experiment, pohlaví, národnost, výsledek testu na barvocit).

5.3.1 Převod šedé stupnice na vizuálně vnímanou barevnou odchylku

Vizuálně vnímaná barevná odchylka je vyjádřením barevného rozdílu mezi dvěma vzorky, podněty. K vyjádření barevného rozdílu jsou při vizuálních hodnoceních používány šedé stupnice. V této práci jsou použity šedé stupnice pro hodnocení změny odstínu odpovídající normě ČSN EN ISO 105A:02 [21]. Při vizuálních hodnoceních uvádějí pozorovatelé stupeň šedé stupnice. Pro další hodnocení je proto potřebné převést stupně šedé stupnice (dále označeny jako GS) na vizuálně vnímanou odchylku (dále označena jako ΔV , respektive ΔV_{rp}).

Pro výpočet odchylky ΔV (35) bylo použito proložení spektrofotometricky naměřených a vypočtených hodnot odchylek ΔE^* pro jednotlivé stupně šedé stupnice pomocí funkce One Phase Decay v programu GraphPad Prism 8. Obecný tvar rovnice pro výpočet ΔV je uveden níže

$$\Delta V_i = (Y_0 - Y_\infty) * e^{-k*GS} + Y_\infty \quad (35)$$

kde Y_0 je taková hodnota, pro kterou je $X = 0$, Y_∞ je hodnota Y v nekonečnu, k je rychlostní konstanta vyjádřená v reciprokých jednotkách X a GS je stupeň šedé stupnice.

Výsledky proložení parametrů pro výpočet vizuálně vnímané barevné odchylky pro jednotlivé experimenty TUL 1 – TUL 3 je uveden v *tabulce 7*.

Tabulka 7 – Parametry rovnice pro výpočet vizuálně vnímané barevné odchylky

Experiment	Y_0	Y_∞	k
TUL 1	25,30	-0,7430	0,6224
TUL 2	25,89	-0,7823	0,6182
TUL 3	28,86	-0,2746	0,7221

Odlišné hodnoty jednotlivých parametrů jsou způsobeny z důvodu použití třech různých stupnic, avšak všech splňujících normu ČSN EN ISO 105A:02. Šedá stupnice pro experiment TUL 1 a TUL 3 byla vyrobena firmou SDC Enterprises Limited, šedá stupnice pro experiment TUL 2 byla vyrobena firmou AATCC. Posledně jmenovaný typ stupnice byl použit především proto, že lze od sebe snadno oddělit jednotlivé poloviny stupnice a lépe ji tak umístit na podložku pro tento typ experimentu.

5.3.2 Index STRESS

Standardizovaná suma residuálních čtverců (index STRESS nebo Kruskalův STRESS) je multidimenzionální škálovací metrika. [22] Index STRESS (36) je mimo jiné používán pro hodnocení predikční schopnosti rovnic a modelů pro výpočet barevné odchylky, kdy je porovnávána vizuálně vnímaná barevná odchylka ΔV s naměřenou barevnou odchylkou ΔE . Index STRESS je používám i pro vyjádření pozorovatelské shody (intra-observer variability) a shody mezi pozorovateli (inter-observer variability). [22]

$$S_i = 100 \sqrt{\frac{\sum_i^n (\Delta E_i - F_3 \Delta V_i)^2}{\sum_i^n (\Delta E_i^2)}} \quad (36)$$

$$F_3 = \frac{\sum_i^n \Delta E_i - F_3 \Delta V_i}{\sum_i^n (\Delta V_i^2)} \quad (37)$$

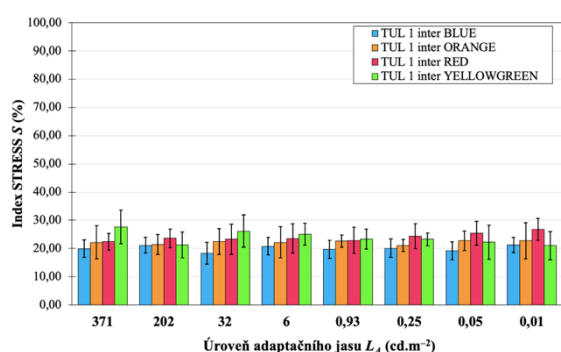
kde ΔE_i je barevná odchylka, ΔV_i je vizuálně vnímaná barevná odchylka.

V případě hodnocení shody pozorovatele (vnitro-pozorovatelské shody) dochází v rovnicích pro výpočet indexu STRESS (36) a (37) pouze k úpravě vstupních dat, kde barevná odchylka ΔE_i je nahrazena vizuálně vnímanou barevnou odchylkou ΔV_i a ΔV_i je nahrazena robustní průměrně vizuálně vnímanou barevnou odchylkou ΔV_{rpi} .

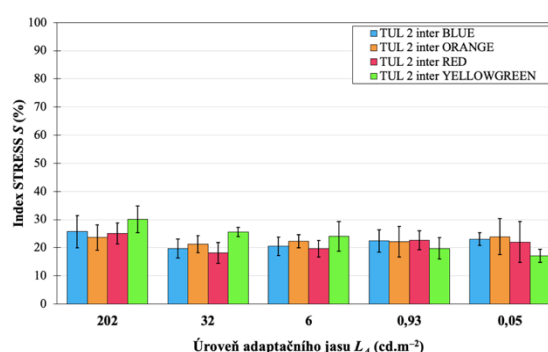
Hodnota indexu STRESS nabývá hodnot od 0 – 100 %, přičemž čím vyšší je hodnota indexu STRESS, tím je predikční schopnost rovnice či modelu pro vyjádření barevné odchylky menší, tedy vizuálně vnímaná barevná odchylka a barevná odchylka se liší.

Hodnocení pozorovatelů

Hodnocení pozorovatelů bylo pro všechny experimenty hodnoceno především z hlediska pozorovatelské shody (intra-observer variability) a shody mezi pozorovateli (inter-observer variability). Hodnocení shody mezi pozorovateli bylo vyhodnoceno pro celé skupiny pozorovatelů v jednotlivých experimentech, ale rovněž podle pohlaví, národnosti a výsledku testu na barvocit. Všichni pozorovatelé hodnotili barevné páry na všech úrovních jasů 5krát. V rámci experimentu TUL 1 bylo všemi pozorovateli uskutečněno 48 960 posudků. V rámci experimentu TUL 2 bylo uskutečněno 18 000 posudků a v rámci experimentu TUL 3 bylo uskutečněno 6 480 posudků. Vzhledem k časové náročnosti vizuálního hodnocení související i s potřebnou adaptací na různé úrovně adaptačního jasu, byl stanoven čas 40 minut jako maximální pro jedno sezení každého pozorovatele. Mezi opakovanými hodnoceními byl dodržen časový rozestup alespoň 24 hodin. Hodnocení pozorovatelské shody a shody mezi pozorovateli bylo hodnoceno pomocí indexu STRESS.



Obrázek 20 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele z vizuálního experimentu TUL 1 v závislosti na úrovni adaptačního jasu



Obrázek 21 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele z vizuálního experimentu TUL 2 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

Z výsledků získaných hodnocením pozorovatelské shody pomocí indexu STRESS je zřejmé, že průměrná hodnota indexu STRESS je rovna $24,46 \pm 1,28$ % (TUL 1), $22,84 \pm 3,07$ % (TUL 2) a $16,33 \pm 1,82$ % (TUL 3), což znamená, že se pozorovatelé během svých hodnocení shodovali ve více než 75 % opakovaných hodnocení. Průměrná hodnota indexu STRESS pro shodu mezi pozorovateli je rovna $22,54 \pm 2,14$ % (TUL 1), $22,45 \pm 2,97$ % (TUL 2) a $16,41 \pm 5,19$ % (TUL 3). Z grafu lze také vyčíst, že se snižující se úrovní adaptačního jasu dochází k nárůstu indexu STRESS pro centrum red, což ukazuje na fakt, že se od sebe liší hodnocení pozorovatelů. Zároveň, jak bylo zjištěno při vyhodnocení testu na barvocit (kapitole 9), tak pozorovatelé v oblasti nízkých adaptačních jasů ztrácejí schopnost rozlišovat barvy. Porovnáním výsledků shody mezi pozorovateli pro experimentu TUL 1 a TUL 2 bylo zjištěno, že se výsledky pozorovatelů v jednotlivých experimentech mezi sebou výrazně neliší. Výsledky pozorovatelů TUL 3 se od výsledků experimentů TUL 1 a TUL 2 liší, ale tento rozdíl není signifikantní.

V rámci disertační práce byly rovněž porovnány skupiny pozorovatelé rozdělené podle pohlaví, národnosti a výsledku FM 100-Hue testu. Výsledky pro tyto skupiny jsou uvedeny v disertační práci v kapitole 9.

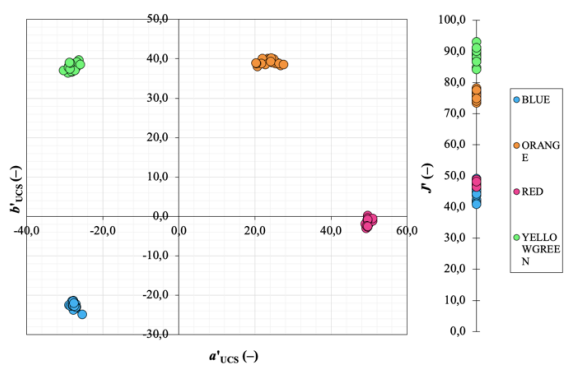
5.4 Výsledky subjektivní chromatičnosti v CAM02–UCS

Model CIECAM02 i jeho přibližně rovnoměrná verze umožňují odhady (predikci) vzhledu s ohledem na různou úroveň adaptačního jasu a podmínek osvětlení a pozorování. Při testování predikční schopnosti těchto modelů bylo zjištěno, že v oblasti mezopických adaptačních jasů dochází ke zhoršení predikční schopnosti modelů oproti hodnotám predikční schopnosti v oblasti fotopických adaptačních jasů. Tento důvod vedl k zamyšlení a návrhu úpravy modelu CAM02–UCS s cílem zvýšit predikční schopnost tohoto modelu v mezopické oblasti adaptačních jasů. Model CAM02–UCS byl odvozen pro fotopickou úroveň adaptačního jasu $200 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, a jak bylo potvrzeno testováním predikční schopnosti barevná centra blue, orange, red a yellowgreen, v oblastech mezopických adaptačních jasů došlo ke snížení predikční schopnosti nejen modelu CAM02–UCS, ale i modelu CIECAM02.

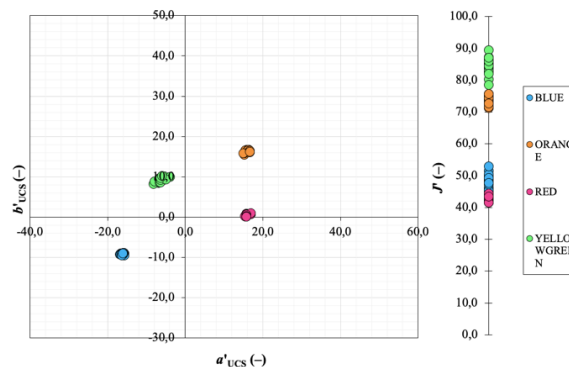
Na základě tohoto zjištění bylo přistoupeno k úpravě funkce subjektivní chromatičnosti pro model CAM02–UCS. Cílem této navrhované úpravy je zvýšení predikční schopnosti modelu CAM02–UCS v oblasti mezopických adaptačních jasů.

5.4.1 Úprava funkce subjektivní chromatičnosti pro model CAM02–UCS

V teoretické části bylo uvedeno a v experimentální části potvrzeno, že pro každé barevné centrum je nutná různě velká komprese mezi hodnotou subjektivní chromatičnosti v modelu CIECAM02 a CAM02–UCS. Závislost modifikované hodnoty subjektivní chromatičnosti M' pro model CAM02–UCS a subjektivní chromatičnosti M pro model CIECAM02 je uveden na *obrázku 6*. Na *obrázku 22* a *23* je zobrazena změna barevnosti v prostoru CAM02–UCS mezi nejvyšší a nejnižší úrovní adaptačního jasu. Na *obrázcích* je vidět, že vlivem samotného snížení úrovně adaptačního jasu dochází ke ztrátě barevnosti, respektive snížení hodnoty subjektivní chromatičnosti vlivem Stevens–Huntova jevu. Jak je možné rovněž vidět na grafech na *obrázcích 22* a *23*, u modifikované světlosti J' v modelu CAM02–UCS nedochází k tak výrazné změně mezi úrovněmi 1 a 8 jako je tomu u M' .



Obrázek 22 – Pozice barevných center v prostoru CAM02–UCS na úrovni adaptačního jasu $371 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$



Obrázek 23 – Pozice barevných center v prostoru CAM02–UCS na úrovni adaptačního jasu $0,01 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$

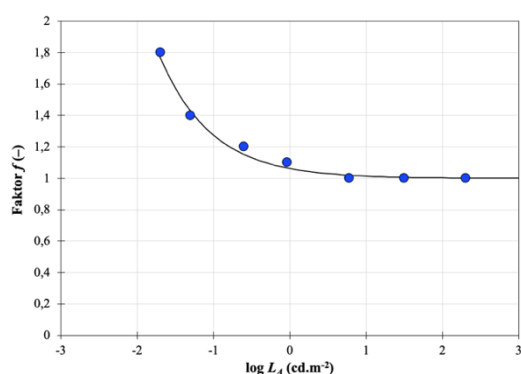
V rámci předchozích testování predikční schopnosti bylo zjištěno, že v oblasti mezopických adaptačních jasů ($-0,01 - 6 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$) dochází ke snížení predikční schopnosti modelu oproti fotopickým adaptačním jasům. V prvním kroku byla provedena optimalizace ke zjištění velikosti korekčního faktoru

pro úpravu hodnoty subjektivní chromatičnosti v modelu CAM02–UCS a zvýšení predikční schopnosti modelu.

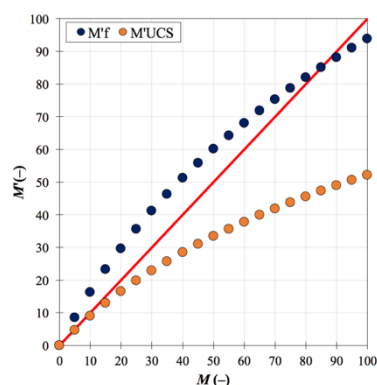
$$M'_f = M' \cdot f \quad (38)$$

kde M' je hodnota subjektivní chromatičnosti pro model CAM02–UCS, f je korekční faktor.

Závislost korekčního faktoru na úrovni adaptačního jasu je na *obrázku 24*. Na *obrázku 24* je vidět, že v oblastech vyšší adaptačních jasů zůstává hodnota faktoru f konstantní a mění se až v oblasti mezopických adaptačních jasů. Příslušné hodnoty faktoru f jsou odvozeny pro úrovně adaptačních jasů v experimentu TUL 1, neboť byl u tohoto experimentu rozsah adaptačních jasů nejširší. Průběh korekčního faktoru f ukazuje, že se snižujícím se adaptačním jasem dochází k tomu, že se upravená subjektivní chromatičnost M'_f z modelu UCS blíží nekorigované subjektivní chromatičnosti M z modelu CIECAM02. Na *obrázku 25* je zobrazena závislost mezi M' a M bez použití faktoru f a závislost mezi M'_f a M s použitím faktoru f pro nejnižší úroveň adaptačního jasu.



Obrázek 24 – Graf zobrazující závislost korekčního faktoru na úrovni adaptačního jasu



Obrázek 25 – Graf zobrazující závislost M' a M'_f na M s použitím faktoru f pro úroveň adaptačního jasu $0,01 \text{ cd.m}^{-2}$

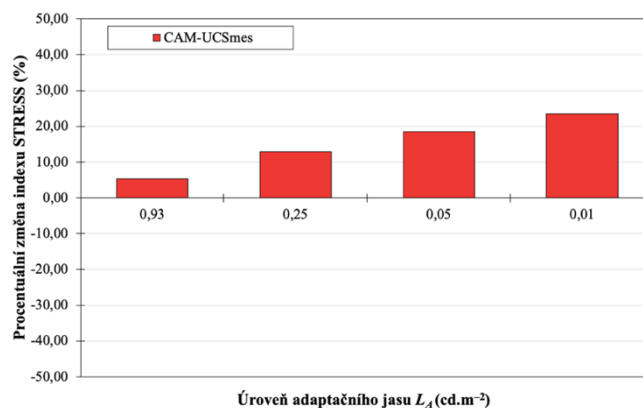
Úprava M'_f měla za následek zvýšení hodnot subjektivní chromatičnosti především u vzorků s vyšší chromatičností oproti vzorkům s nižší chromatičností. Jak je možné vidět použití faktoru f tedy vede k tomu, že hodnota M'_f pro model CAM02–UCS se blíží hodnotě M pro model CIECAM02, tzn. že navrhovaná úprava zvyšuje vnímanou subjektivní chromatičnost na těchto úrovních adaptačních jasů. Znamená to tedy, že v oblastech mezopických adaptačních jasů by měla být pro výpočet funkce subjektivní chromatičnosti použita funkce odpovídající výpočtu subjektivní chromatičnosti v modelu CIECAM02. U nejnižší úrovně adaptačního jasu došlo ke zvýšení predikční schopnosti modelu přibližně o 20 %.

Z tohoto důvodu je navržena úprava výpočtu subjektivní chromatičnosti M' ve shodě s koncepcí uvedenou v *rovnicích* (1) – (3). Výpočet funkce subjektivní chromatičnosti s návrhovou úpravou je proveden podle rovnice (39).

$$M'_{mes} = m \cdot M' + (1 - m) \cdot M \quad (39)$$

kde M je subjektivní chromatičnost odpovídající výpočtu v modelu CIECAM02, M' je subjektivní chromatičnost odpovídající výpočtu v modelu CAM02–UCS a m odpovídá hodnotám vypočteným pro úrovně adaptačních jasů pro experiment TUL 1.

Nově vypočtené hodnoty subjektivní chromatičnosti M'_{mes} bylo vloženo do modelu CAM02–UCS. Pro tento model (označení CAM02–UCSmes) byla znovu vypočtena predikční schopnost. Změna predikční schopnosti modelu CAM02–UCSmes je vyjádřena procentuální změnou indexu STRESS, která byla vypočtena mezi indexem STRESS pro CAM02–UCS a CAM02–UCSmes. Procentuální změna indexu STRESS v závislosti na úrovni adaptačního jasu je zobrazena na *obrázku 26*, kde kladné hodnoty odpovídají zvýšení predikční schopnosti modelu, zatímco záporné hodnoty odpovídají snížení predikční schopnosti modelu.



Obrázek 26 – Graf zobrazující procentuální změnu indexu STRESS v závislosti na úrovni adaptačního jasu

Jak je vidět na *obrázku 13.5*, zavedení koeficientu m při výpočtu funkce subjektivní chromatičnosti v oblasti mezopických adaptačních jasů přineslo zvýšení predikční schopnosti. Nejvyšší změny bylo dosaženo na nejnižší úrovni adaptačního jasu, přibližně 24 % oproti modelu CAM02–UCS. Na úrovni 0,93 $cd.m^{-2}$ se zvýšila predikční schopnost modelu přibližně o 5,5 %.

6. Zhodnocení výsledků pro vědní obor nebo pro praxi

V rámci zpracování disertační práce byla provedena literární rešerše týkající se stavu aktuální problematiky v oblasti zabývající se popisem barevného vzhledu při různých úrovních adaptačních jasů. Dále byla zpracována rešerše související s možností přenositelnosti dat mezi spektrofotometry (stanovení nejistot a chyb měření, hodnocení preciznosti a přesnosti měření).

Experimentální část disertační práce byla tvořena třemi hlavními částmi. První část se zabývala hodnocením nejistot a chyb měření, hodnocením preciznosti měření na základě opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření a hodnocením přesnosti měření. V rámci zpracování výsledků nebyl žádný ze spektrofotometrů ani v jedné skupině rozdělené podle typu měřicí geometrie (de:8°, di:8° a 45°:0°) vyřazen z hodnocení z důvodu nízké preciznosti nebo přesnosti měření. Bylo zjištěno, že na základě stanovení chyb měření, je při použití korekčních faktorů možné v případě, kdy není k dispozici referenční spektrofotometr, použít s využitím těchto korekčních faktorů měření z jiného spektrofotometru.

Druhá část experimentální části se zabývala přípravou, realizací a vyhodnocením vizuálního experimentu, testováním a hodnocením barvocitu pozorovatelů. Příprava vizuálního experimentu spočívala v přípravě barevných center s vysokou chromatičností. Důvod, proč byla zvolena vysoká chromatičnost byl ten, že vzorky s vyšší chromatičností by měly být rozlišitelné i při nižších úrovních adaptačních jasů a usnadnit tak rozpoznání osoby při snížených světelných podmínkách. Zvoleno bylo 18 párů pro každé barevné centrum, páry byly rozděleny podle odchylek v měrné světlosti ΔL^* , chroma ΔC^* a úhlu barevného tónu ΔH^* , tzn. 6 párů pro každou ze zmíněných odchylek. V rámci realizace vizuálních experimentů byly připraveny 3 samostatné vizuální experimenty. Experiment TUL 1, který byl založen na metodě Grey Scale, která spočívá v tom, že je šedá stupnice pro hodnocení změny odstínu

po celou dobu experimentu k dispozici pozorovatelům při hodnocení barevné odchylky mezi jednotlivými páry. Je tedy ovlivněna změnou úrovně adaptačního jasu. Experiment TUL 2 byl založen na metodě Memory matching method, tedy metodě spočívající v tom, že pozorovatel měl čas na zapamatování si šedé stupnice při konstantní úrovni adaptačního jasu a teprve potom, po doporučené době pro adaptaci hodnotil páry v hlavní skříni experimentu, tedy podle paměti. Experiment TUL 3 byl shodný s experimentem TUL 2, ale byl proveden v rámci pracovní stáže na Universitě v Granadě. Oproti experimentům provedeným na TUL se liší v tom, že byl z technických důvodů použit jiný typ simulátoru D65 a jiné úrovně adaptačních jasů, které však byly zvoleny tak, aby co možná nejvíce odpovídaly úrovním použitým na TUL. Při realizaci vizuálních experimentů TUL 1 – TUL 3 bylo celkem provedeno 73 440 individuálních posudků, které byly hodnoceny z hlediska pozorovatelské shody a shody mezi pozorovateli. Na základě výsledků lze říci, že hodnocení vybraných skupin pozorovatelů je konzistentní a shoda mezi nimi je v případě shody mezi pozorovateli vyšší než 70 %. Na základě výsledků indexu STRESS nebyly výsledky pro žádného z pozorovatelů vyřazeny z dalšího testování. Porovnány byly výsledky i pro skupiny pozorovatelů z Evropy a Asie, žen a mužů a podle výsledku FM-100 Hue testu. Bylo zjištěno, že výsledky pozorovatelů ze skupiny superior jsou v průměru lepší než u skupiny average. Z výsledků vizuálního experimentu bylo zjištěno, že ke změně rozlišovací schopnosti dochází na úrovni $0,93 \text{ cd. m}^{-2}$.

Na základě hodnocení barvocitu na nejvyšší společné úrovni adaptačního jasu pro experimenty TUL 1 a TUL 2 a nejvyšší úrovně adaptačního jasu pro experiment TUL 3 nebyl žádný z testovaných pozorovatelů vyřazen z dalšího hodnocení z důvodu nízké rozlišitelnosti barev. Pozorovatelé byli na základě vyhodnocení testu rozřazeni do dvou kategorií s vynikající (superior) a (average) průměrnou rozlišovací schopností podle TES skóre. Při vyhodnocení výsledků FM-100 Hue testu bylo zjištěno, že se snižující se úrovně adaptačního jasu dochází ke stírání rozdílu mezi hodnocením pozorovatelů ze skupiny superior a average a při nejnižších úrovních adaptačních jasů je rozdíl mezi těmito skupinami přibližně 3 %. Zároveň bylo zjištěno, že se snižující se úrovně adaptačního jasu dochází k postupné ztrátě rozlišovací schopnosti barev. U některých pozorovatelů se objevil tzv. pseudotritanopický efekt. Ten se projevuje tím, že při snižující se úrovni adaptačního jasu došlo k tzv. oslepnutí krátkovlnných čípků, a pozorovatelé tak hůře rozlišovali modrozelené terčíky FM-100 Hue testu oproti červeným a žlutým terčíkům.

Třetí část experimentální části se zabývala testováním současného modelu barevného vzhledu CIECAM02 a CAM02–UCS. Z výsledků testování predikční schopnosti bylo zjištěno, že na úrovni mezopických adaptačních jasů dochází k výraznému snížení predikční schopnosti těchto modelů oproti fotopickým úrovním adaptačních jasů. Vzhledem ke snížení predikční schopnosti modelu CAM02–UCS v této oblasti adaptačních jasů byla navržena a testována úprava subjektivní chromatičnosti pro mezopické oblasti adaptačních jasů. Při testování modelů bylo zjištěno, že vlivem Stevens–Huntova efektu dochází ke ztrátě barevnosti bez výjimky pro všechna barevná centra. Oproti tomu vlivem klesající úrovně adaptačního jasu nedochází ke snížení světlosti vzorků.

Navržená úprava funkce subjektivní chromatičnosti v mezopické oblasti adaptačních jasů spočívá ve využití koncepce používané při výpočtu funkce spektrální účinnosti lidského oka v mezopické oblasti adaptačních jasů. Testováním této úpravy bylo dosaženo signifikatního zlepšení predikční schopnosti modelu CAM02–UCS v oblasti mezopických adaptačních jasů přibližně o 24 %.

7. Doporučení na pokračování práce v daném tématu a oboru

V rámci disertační práce byla během vizuálních experimentů testována čtyři barevná centra blue, orange, red a yellowgreen. Pro další testování modelu CIECAM02 i CAM02–UCS by bylo vhodné rozšířit tato barevná centra o alespoň dvojnásobek počtu stávajících barevných center, jejichž úhly barevného tónu by se nacházely v oblasti mezi úhly barevného tónu čtyřech vybraných center v této disertační práci a zároveň k nim zařadit i tři achromatická centra pro sledování citlivosti lidského oka na změnu světlosti jednotlivých center.

Protože model CIECAM02 i model CAM02–UCS jsou navrženy pro predikci barevného vzhledu v případě bezdefektního vnímání pozorovatelů, bylo by vhodné sledovat predikční schopnost těchto modelů v případě, kdy by pozorovatel byla osoba s vadou barvocitu.

Na základě výsledků z experimentů provedených v disertační práci, je dalším možným krokem návrh a testování designu oblečení pro rozlišení osob v nočním dopravním prostoru. Změna designu by se však neměla týkat pouze zvýšení viditelnosti osob, ale také rozpoznatelnosti a rozlišitelnosti informačních tabulí či map v případech nenadálých živelných katastrof a výpadků elektrické a mobilní sítě, ať už jako následek těchto katastrof nebo z jiných důvodů. Protože informační tabule a mapy slouží při výpadku elektrické sítě k jednom z důležitých prvků při orientaci osob v prostoru.

8. Seznam publikovaných prací studenta DSP

8.1 Publikace se vztahem ke studované problematice

- [1] Pechová, M., Vik, M., & Viková, M. (2022). Color Difference Evaluation in Photopic, Mesopic and Scotopic Vision. In *Advances in Science and Technology. 20th AUTEX World Textile Conference - Unfolding the future*, 113, 99-110. doi.org/10.4028/p-e52lq1

8.2 Ostatní publikace v odborných časopisech

- [2] Vik, M., Pechová, M., Viková, M., Viková, M. & Periyasami, A. P. (2016). Vliv světelných zdrojů na hodnocení bílé barvy – 1. část. *Světlo*, 19(2), 56-61. Retrieved from <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/cislo-2-rocnik-2016--1094>
- [3] Vik, M., Viková, M., Pechová, M., Viková, M. & Periyasami, A. P. (2016). Vliv světelných zdrojů na hodnocení bílé barvy – 2. část. *Světlo*, 19(4), 41-46. Retrieved from <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/cislo-4-rocnik-2016--1117>
- [4] Vik, M., Kolčavová Sirková, B., Viková, M., Duchoňová, L., & Pechová, M. (2016). Measuring Techniques for Retroreflectivity Levels of Small Signs. *Defect and Diffusion Forum*, 368, 193-197. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.368.193>
- [5] Vik, M., Viková, M., Kolčavová Sirková, B., Pechová, M. & Duchoňová, L. (2017). Měření retroreflexe a kolorimetrických parametrů materiálů s vysokou viditelností. *Světlo*, 20(5), 40-44. Retrieved from <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/cislo-5-rocnik-2017--1143>
- [6] Viková, M., & Pechová, M. (2020). Study of adaptive thermochromic camouflage for Combat Uniform. *Textile Research Journal*, 90(17-18), 2070-2084. doi:10.1177/0040517520910217
- [7] Pechová, M., Vik, M., & Viková, M. (2022). Color Difference Evaluation in Photopic, Mesopic and Scotopic Vision. In *Advances in Science and Technology. 20th AUTEX World Textile Conference - Unfolding the future*, 113, 99-110. doi.org/10.4028/p-e52lq1

8.3 Příspěvky ve sbornících se vztahem ke studované problematice

- [8] Vik, M., Viková, M. & Pechová M. (2015). Color discrimination on the border of photopic/mesopic vision. *21st International Conference Světlo Light 2015*, 1, 97-100. doi: 10.13140/RG.2.1.2914.3521.
- [9] Pechová, M., Vik, M. & Viková, M. (2015). Evaluation of color samples at mesopic luminance levels. *Workshop for Ph.D. students of Faculty of Textile Engineering and Faculty of Mechanical Engineering TUL*, 134-139. doi: 10.13140/RG.2.1.2728.1368
- [10] Pechová, M., Kašparová, M., Vik, M., Viková, M. & Štefl, J. (2016). Influence of luminance levels of illumination D65 on evaluation of high chromatic colour. *Proceedings of the 4th CIE*

- Expert Symposium on Colour and Visual Appearance*, 269-277. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/309788475_Influence_of_luminance_levels_of_illumination_d65_on_evaluation_of_high_chromatic_colour
- [11] Kašparová, M., Pechová, M., Viková, M., Vik, M., Štefl, J. & Ulmanová, M. (2016). Visual evaluation samples with high chromaticity under the two types of daylight simulators. *Proceedings of the 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance*, 278-286. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/309788536_Visual_evaluation_samples_with_high_chromaticity_under_the_two_types_of_daylight_simulators
- [12] Pechová, M., Vik, M., Viková, M. & Čandová, J. (2017). The influence of two daylight simulators on the visual assessment of blue samples under different luminance levels. *Fibre-grade polymers, chemical fibres and special textiles: 9th Central European Conference: book of abstracts*, 89-93.
- [13] Pechová, M., Vik, M. & Viková, M. (2018). Visibility of selected samples at low luminance. *Book of Extended Abstracts, 22nd International Conference STRUTEX*, 56-60. Retrieved from http://strutex.ft.tul.cz/2018/Phd/BookOfExtendedAbstracts_STRUTEX_2018_International_PhD_student_day.pdf
- [14] Vik, M., Glombikova, V., Viková, M., Havelka, A., Adamcová, J. & Pechová, M. (2019). Pedestrians visibility at night: Effects of pedestrian clothing, balancing safety and culture. *47th Textile Research Symposium 2019*, 128-129. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/337825130_Pedestrians_visibility_at_night_effects_of_pedestrian_clothing_balancing_safety_and_culture
- [15] Pechová, M., Vik, M. & Viková, M. (2019). The effect of luminance level on color difference evaluation. *Proceedings of the 23rd International Conference Light – Světlo 2019, 1*, 55-58.
- [16] Pechová, M., Vik, M. & Viková, M. (2021). Color difference evaluation in photopic, mesopic and scotopic vision. *20th World Textile Conference (AUTEX 2021), 1*, ID 279.

8.4 Ostatní příspěvky ve sbornících

- [17] Vik, M., Viková, M., Sušická, D., Držková, M., Šašková, J., Panák, O., ...Petruř, K. (2017). Evaluation of whiteness in case of highly tinted white materials. *Asia and Africa Science Platform Program Seminar Series 10*, 62–69. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/315613924_Evaluation_of_whiteness_in_case_of_highly_tinted_white_materials/related
- [18] Viková, M., Periyasami, A. P., Pechová, M., Čandová, J., Šašková, J. & Vik, M. (2017). Colorchangeable sensorial fibres, fastness and dynamic properties. *Asia and Africa Science Platform Program Seminar Series 10*, 90–95. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/315613836_Colorchangeable_sensorial_fibres_fastness_and_dynamic_properties
- [19] Vik, M., Viková, M., Pechová, M., Čandová, J. & Šašková, J. (2018). Textile application of new whiteness formula based on CIECAM02. *18th World Textile Conference (AUTEX 2018), 1*, 578-581.
- [20] Viková, M., Pechová, M., Ctiborová, M. & Vik, M. (2018). Color and fastness properties of the thermochromic inks used as SMART camouflage system. *18th World Textile Conference (AUTEX 2018), 1*, 880-883.
- [21] Viková, M., Solanki, U. B., Vik, M. & Pechová, M. (2021). New method for prediction of photochromic textiles fatigue behavior. *20th World Textile Conference (AUTEX 2021), 1*, ID 31.

9. Seznam použité literatury

- [1] Benjamin, W. J., & Borish, I. M. (2006). *Borish's clinical refraction*. St. Louis Mo., US: Butterworth Heinemann/Elsevier.
- [2] Gross, H., Blechinger, F., & Achtner, B. (2015). Human eye. *Handbook of Optical Systems*, 1-87. doi:10.1002/9783527699247.ch1
- [3] Malacara, D. (2011). *Color vision and colorimetry: Theory and applications*. Bellingham, US: SPIE.
- [4] Cones and Rods [Image] (2018). Retrived from <https://www.blueconemonochromacy.org/how-the-eye-functions/>
- [5] International Commission on Illumination (2010). *Recommended system for mesopic photometry based on visual performance* (CIE 191:2010). Retrieved from <https://cie.co.at/publications/recommended-system-mesopic-photometry-based-visual-performance>
- [6] Halonen, L. & Puolakka, M. (2011). CIE and Mesopic Photometry. In *Proceedings of the 27th Session of the CIE, 9-16 July 2011, Sun City, South Africa*. (pp. 3-9). Vienna: CIE.
- [7] Wade, N. J., Brozek, J., & Hoskovec, J. (2013). *Purkinjes vision: The dawning of neuroscience*. Hove, England: Psychology.
- [8] Fairchild, M. D. (2013). *Color appearance models*. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons.
- [9] Hunt, R.W.G., & Pointer, M. R. (2011). *Measuring colour*. Chichester, England: John Wiley and Sons.
- [10] Schanda, J. (2007). *Colorimetry: Understanding the CIE system*. Vienna, A: CIE.
- [11] Luo, M. R., & Li, C. (2013). CIECAM02 and Its Recent Developments. In C. Fernandez-Maloigne (Ed.), *Advanced Color Image Processing and Analysis* (pp. 19-58). New York, NY: Springer New York.
- [12] Li, C. J., Luo, M. R., & Hunt, R. W. (2000). A revision of the CIECAM97s model. *Color Research & Application*, 25(4), 260-266. doi:10.1002/1520-6378(200008)25:43.0.co;2-9
- [13] Li, C., Li, Z., Wang, Z., Xu, Y., Luo, M. R., Cui, G., & Pointer, M. (2016). A revision of CIECAM02 and its CAT and UCS. *Color and Imaging Conference*, 24(1), 208-212. doi:10.2352/issn.2169-2629.2017.32.208
- [14] Moroney, N., Fairchild, M., Hunt, R. & Li, C. (2002). The CIECAM02 Color Appearance Model. *10th IS&T/SID Color Imaging Conference 2002*. 23-27.
- [15] Li, C. J., & Luo, M. R. (2005). Testing the robustness of CIECAM02. *Color Research & Application*, 30(2), 99-106. doi:10.1002/col.20087
- [16] Li, C., Luo, M.R., Hunt, R.W., Moroney, N., Fairchild, M.D., & Newman, T. (2002). The Performance of CIECAM02. *10th IS&T/SID Color Imaging Conference 2002*. 28-32.
- [17] Hiltunen, J. (2002). *Accurate color measurement* (Master's thesis, Joensuu yliopisto, 2002) (pp. 1-88). Joensuu: University of Joensuu.
- [18] Berns, R. S., & Petersen, K. H. (1988). Empirical modeling of systematic spectrophotometric errors. *Color Research & Application*, 13(4), 243-256. doi:10.1002/col.5080130409
- [19] Chung, Y. S., Xin, J. H., & Sin, K. M. (2004). Improvement of inter-instrumental agreement for Reflectance Spectrophotometers. *Coloration Technology*, 120(6), 284-292. doi:10.1111/j.1478-4408.2004.tb00232.x
- [20] Perales, E., Yamanoi, Y., Dietz, C., Martinez-Verdu, F. M., Huraibat, K., & Mico-Vicent, B. (2019). Review of instrumental inter-agreement study of spectral and colorimetric data of commercial multiangle spectrophotometers. *Color Research & Application*, 44(2), 168-175. doi:10.1002/col.22320

- [21] International Organization for Standardization (1993). *Textilie. Zkouška stálobarevnosti. Část A02: Šedá stupnice pro hodnocení změny odstínu* (ISO 105-A02:1993). Retrieved from <https://shop.normy.biz/detail/17367>
- [22] Melgosa, M., García, P. A., Gómez-Robledo, L., Shamey, R., Hinks, D., Cui, G., & Luo, M. R. (2011). Notes on the application of The Standardized Residual Sum of Squares index for the assessment of intra- and inter-observer variability in color-difference experiments. *Journal of the Optical Society of America A*, 28(5), 949-953. doi:10.1364/josaa.28.000949

10. Curriculum Vitae

PERSONÁLNÍ INFORMACE

Jméno:	Marcela PECHOVÁ
Pohlaví:	žena
Datum narození:	14.09.1989
Místo narození:	Pelhřimov
Emailová adresa:	marcela.pechova@tul.cz

VZDĚLÁNÍ

2015 – dosud	doktorské studium, Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní disertační práce – <i>Vnímání barev při fotopických a mezopických adaptačních jasech</i>
2012 – 2015	magisterské studium, Ing., Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní diplomová práce – <i>Vliv intenzity osvětlení na rozlišování malých barevných diferencí</i>
2009 – 2012	bakalářské studium, Bc., České vysoké učení technické, Fakulta biomedicínského inženýrství bakalářská práce – <i>Vnímání barev, jeho testování a měření barev</i>

STÁŽE

2019	Kyoto Institute of Technology, Kyoto, Japonsko, 1 měsíc
2018	Huntsman, s.r.o., Liberec, Česká republika, 2,5 měsíce
2017	University of Borås, Borås, Švédsko, 14 dnů
2016	University of Granada, Granada, Španělsko, 3 měsíce

VÝUKA

2015, 2017–2022	KMI/KOL a KMI/COL Koloristika, cvičící
2021–2022	KMI/SMM Speciální měřicí metody, cvičící
2016	KMI/ZKB Zkoušení textilií, cvičící
2015	KMI/TCH Textilní chemie, cvičící

VEDENÉ PRÁCE

2019	Nikola Ctiborová, Kamuflážní termochromní výstroj, DP, konzultant
------	---

2018	Petra Honejsková, Termochromní textilie – vybrané uživatelské stálosti a receptování, BP, konzultant
2016	Nikola Ctiborová, Sledování kolorimetrických parametrů a kryvosti termochromních pigmentů pro kamuflážní efekt, BP, konzultant

AKTIVITY

adaptace, mezopické oblast vidění, vnímání barev, subjektivní a objektivní hodnocení barevného vzhledu, spektrometrická, spektrofotometrická a spektroradiometrická měření, testování a hodnocení stálobarevnosti, tisk a zlepšování stálosti (zušlechťování) fotochromních a termochromních pigmentů, barvení

OSOBNÍ SCHOPNOSTI A DOVEDNOSTI

Jazykové dovednosti	anglický jazyk – aktivní německý jazyk – mírně pokročilý
Počítačové dovednosti	MS Office, Matlab, Statistika, GraphPad Prism
Komunikační schopnosti	pracovitost, spolehlivost, samostatnost, učenlivost, práce v týmu

11. Stručná charakteristika dosavadní odborné, výzkumné a vědecké činnosti

Doktorské studium

Seznam zkoušek	KMI/D05 Optika pevných látek, 19.10.2015 KAP/D02 Matematická statistika a analýza dat, 29.06.2016 KMI/D07 Struktura a vlastnosti textilních vláken, 03.07.2017 KMI/D33 Experimentální technika oboru, 09.11.2018 KMI/D08 Teorie zkušebních metod a zpracování dat, 07.05.2019
SDZ	Státní doktorská zkouška vykonána dne 07.11.2019 s celkovým hodnocením prospěla.

Pedagogická činnost

Výuka	KMI/KOL a KMI/COL Koloristika, 2015, 2017–2022, cvičící KMI/SMM Speciální měřicí metody, 2021–2022, cvičící KMI/ZKB Zkoušení textilií, 2016, cvičící KMI/TCH Textilní chemie, 2015, cvičící
Vedení DP a BP	Nikola Ctiborová, Kamuflážní termochromní výstroj, DP, 2019 Petra Honejsková, Termochromní textilie – vybrané uživatelské stálosti a receptování, 2018 Nikola Ctiborová, Sledování kolorimetrických parametrů a kryvosti termochromních pigmentů pro kamuflážní efekt, BP, 2016

Výzkumné projekty

	SGS 21242 Viditelnost za nízkých osvětleností, řešitel, 2018 SGS 21156 Vliv snížení spektrální distribuce na rozlišování barevných diferencí u vysoce čistých vzorků, spoluřešitel, 2016
--	---

Ostatní projekty

	„Inovativní výrobky a environmentální technologie“, reg. č. CZ.1.05/3.1.00/14.0306, spoluřešitel, 2015
--	--

Další aktivity

	testování a hodnocení stálobarevnosti, zlepšování stálobarevnosti fotochromních a termochromních pigmentů a jejich testování, spektrometrická, spektrofotometrická a spektroradiometrická měření, subjektivní hodnocení barevného vzhledu Den otevřených dveří, Noc vědců
--	--

12. Vyjádření školitele doktorandky

FAKULTA TEXTILNÍ TUL



HODNOCENÍ ŠKOLITELE

NÁZEV PRÁCE: Vnímání barev při fotopických a mezopických adaptačních jasech

AUTORKA: Ing. Marcela Pechová

Předložená disertační práce zpracovává aktuální a specifickou oblast pokročilé kolorimetrie, která se týká problematiky modelů barevného vzhledu a vnímání rozdílů barev na širokém rozmezí adaptačních jaseů zahrnující jak fotopickou, tak mezopickou oblast. Toto je důležité pro celou řadu aplikací, mezi kterými je možno jmenovat například bezpečnost silničního provozu, a to jak v denním, tak nočním dopravním prostoru. Tím se dostáváme k hlavnímu cíli této disertační práce a sice ověření platnosti predikcí barevného vzhledu textilií při nízkých adaptačních jasech. Autorka ve své práci postupně zpracovává jednotlivé kroky v dopředném výpočtovém modelu CIECAM02 a pro testování připravila sadu textilních vzorků s vysokou chromatičností za použití kationtových barviv. Vzhledem ke specifickým podmínkám experimentu se rovněž zabývala otázkou hodnocení nejistot a přenositelnosti dat mezi jednotlivými měřicími systémy, které bylo nutné během experimentálních prací používat. Věnovala se jak problematice vlivu geometrického uspořádání měřících soustav jednotlivých přístrojů, tak přesnosti a preciznosti měření.

Jako velmi cenné lze spatřovat výsledné datové soubory vizuálních hodnocení zařazování barev u Farnsworth-Munsellova 100 Hue testu při různých adaptačních jasech, tak samotných posudků rozdílů barev skupinami pozorovatelů během tří experimentů. Výsledkem je unikátní souhrnný soubor obsahující více jak 70 000 individuálních posudků. Tato data umožnila autorce provést zevrubnou analýzu modelu barevného vzhledu CIECAM02 a jeho přibližně rovnoměrně odstupňované verze označované jako CIECAM02-UCS. Experimentální výsledky ukázaly, že od úrovně 1 cd.m⁻² adaptačního jasu je nutné postupně konvergovat od UCS formy k obecné kolorimetrické soustavě CIECAM02, aby bylo dosaženo vyšší predikční účinnosti takového kombinovaného modelu v případě poklesu adaptačního jasu. Tato konverze implikuje omezenou platnost logaritmické komprese používané jako obecný nástroj pro tvorbu UCS modifikací obecných kolorimetrických soustav.

Lze konstatovat, že autorka naplnila prezentované cíle své disertační práce, vhodným způsobem testovala jednotlivé hypotézy a její práci lze považovat za přínosnou. Z pohledu školitele lze ocenit samostatnost studentky a její orientaci v této komplexní problematice.

Kontrola plagiátorství 22. 3. 2023 a nebyla zde nalezena relevantní podobnost s jinými literárními zdroji. Nejvyšší míra podobnosti byla 4%. Z hlediska obsahu, úpravy a použitých odkazů práce splňuje požadavky kladené na disertační práce.

Předloženou práci **DOPORUČUJI** k obhajobě

prof. Ing. Michal Vik, Ph.D.

V Liberci dne 25. 4. 2023

13. Oponentské posudky disertační práce

OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Oponent: doc. Ing. Tomáš Novák, Ph.D., VŠB-TU Ostrava
Doktorand: Ing. Marcela Pechová
Téma: Vnímání barev při fotopických a mezopických adaptačních jasech

Zhodnocení významu disertační práce pro obor:

Vnímání barev při fotopických a mezopických adaptačních jasech je téma, které je aktuální nejen z hlediska upřesňování matematických modelů, ale zejména z pohledu reálných dopadů na bezpečnost v nočním dopravním prostoru. Při promítnutí daného tématu do praktických aplikací se de-facto jedná o veřejné osvětlení a osvětlení pomocí potkávacích svítlen automobilů. Celá tato oblast osvětlování se právě v mezopických adaptačních jasech vyskytuje. Potřeba podobných výzkumů je dále akcelerována „revolucí“ v používání světelných zdrojů v této oblasti. Dochází k posunu z vysokotlakých sodíkových výbojek a halogenových žárovek k LED, které disponují zcela odlišným spektrálním vyzařováním. Dále dochází k tlakům na omezení rušivého světla a s tím spojených požadavků nejen na minimalizaci jasů způsobených těmito osvětlovacími systémy, ale i na minimalizaci krátkovlnných složek viditelného záření. Výše popsané změny mají vliv na viditelnost překážek a tedy i na bezpečnost. Zkoumání vnímání barev v mezopické oblasti a jeho porovnávání s oblastí fotopickou je tedy nezbytně nutné z pohledu možnosti vyhodnocování informací na dopravních značkách, ale i na svislých překážkách, což mohou být i chodci.

Vyjádření k postupu řešení problému:

Práce má jasně definovanou strukturu, která má logický spád a systém. Toto tvrzení lze sledovat již od kapitoly III, která shrnuje současný stav poznání dané problematiky. Autorka zde provedla přehledný a téměř učebnicový rozbor s využitím široké škály literárních zdrojů. V této souvislosti bych rád vyzdvihl fakt, že autorka nevyužila pouze standardní a očekávatelné světové zdroje z oblasti zraku, barevného vidění, kolorimetrie a světla, ale nebála se vyžít například i méně známé a starší (i když stále aktuální) tuzemské publikace jako je například odkaz na doc. Maňáka z roku 1977. Tato kapitola přehledně popisuje informace o lidském oku, přes stávající modely barevného vzhledu, možnosti měření barev až po chyby měření, které v prováděných experimentech mohou nastat. Navazující kapitola IV by měla popisovat použité metody. Kapitola je z pohledu celé práce relativně subtilní autorka se zde věnuje, oproti hlavnímu nadpisu popisu provedených experimentů. V této kapitole postrádám kvalitnější práci s literaturou a to zejména ve vazbě na přípravu měřených (hodnocených) vzorků. Postrádám zde i konkrétnější popis (fotografie) vyrobených vzorků a nastavení měřících sestav. Jediná bližší informace o výše uvedeném je k dispozici na obrázcích 5.5 a 5.6. V následující kapitole V je k dispozici velmi kvalitní a široký rozbor chyb a nejistot provedených měření a experimentů. Celkové zhodnocení a vliv změn vnímání barev v závislosti na snižování adaptačních jasů je pak následně vyhodnocen v závěrečné kapitole.

Vyjádření k použitým metodám

Zvolené metody využité pro zpracování disertační práce odpovídají svým rozsahem požadavkům stanoveným v jejích cílech. V oblasti ověřování použitých metod z pohledu chyb, nejistot a přenositelnosti výsledků v rámci použitých materiálů a přístrojů je tato práce ještě podrobnější a tuto část by bylo možné uchopit jako téměř kompletní samostatné téma disertační práce.

Vyjádření ke splnění stanoveného cíle:

Lze konstatovat, že autorka splnila všech 8 cílů, které si velmi ambiciózně stanovila.

- K přípravě vzorků by bylo vhodné práci doplnit o obrazovou (popřípadě jinou) dokumentaci, která mohla být v práci uvedena formou příloh.
- K přípravě realizace vizuálního experimentu mám podobnou připomínku ve smyslu přehlednější dokumentace vlastní geometrie experimentu. Z hlediska moderního pohledu na možnosti vlastního nastavování adaptačního jasu by bylo minimálně vhodné nastínit možnosti regulace samotných světelných zdrojů v porovnání s aktuálně použitými filtry.
- Popis rozlišování barev a testování barvocitu byl proveden s vysokou mírou preciznosti na širokém vzorku testovaných osob. V práci samotné opět postrádám některé grafické výstupy samotných experimentů, které by zvýšily přehlednost práce. Například uvedení obrázků z TES skórem pro všechny pozorovatele v přílohách. Tabelizovaná prezentace naměřených dat v příloze P.2 neumožňuje získání komplexního přehledu.
- K popisu barevného vzhledu pomocí modelu CIECAM02 a k návrhu zvýšení jeho predikční schopnosti v oblastech nízkých adaptačních jasů nemám připomínky.
- Hodnocení nejistot a přenositelnosti naměřených dat ve vazbě na korekční faktory použitých spektrofotometrů jsem již zmínil jako téma velmi široce vyřešené, které by mohlo být jádrem samostatné dizertační práce.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a významu původního konkrétního přínosu autora disertační práce:

Zásadním přínosem této disertační práce je korekce modelu umožňující odhady vzhledu pro úroveň nízkých jasů. Dle zjištěných výsledků se současné modely začínají významněji odlišovat už na úrovni jasu okolo 1cd/m^2 což odpovídá hodnotám jasů na vysokých třídách komunikací. O významu a potřebnosti této práce svědčí i fakt, že korekční faktor na rozhraní mezopického a skotopického vidění má hodnotu cca 1,8.

Vyjádření k systematičnosti, přehlednosti, formální a jazykové úrovni.

Práce je zpracovaná systematicky a jednotlivé kapitoly na sebe logicky navazují. Nicméně je nutné konstatovat, že některé zavádějící názvy mírně snižují přehlednost. Přehlednosti práce by také velmi prospěla rozsáhlejší přílohová část s podrobněji popsány experimenty a jejich výsledky. K formální a jazykové stránce nemám připomínky. Pouze prosím autorku, aby si do budoucna sjednotila gramatiku slova vyplývá.

Vyjádření k publikační činnosti spojené s jádrem disertační práce:

Jádro disertační práce bylo publikováno na mezinárodním i národním textilním i světelně-technickém fóru. Autorka publikovala řešenou problematiku v indexovaných časopisech a konferencích zaměřených na materiálové vlastnosti a zároveň na úrovni mezinárodní komise pro osvětlování (CIE). Publikace se týkají i příbuzných aktivit, které autorka mohla v rámci přípravy práce využít také. Z těchto aktivit autorka publikovala v časopise na úrovni Q2. Na základě seznamu tvůrčích aktivit lze konstatovat, že se jedná o pracovníka s vědeckou erudicí.

Závěrečné vyjádření:

Disertační práci Ing. Marcely Pechové **doporučuji k obhajobě.**

Dotazy k obhajobě:

Existuje nějaký rozdíl mezi přípravou tekutých a práškových barviv?

Čím si vysvětlujete rozdíly naměřených spekter u spektrofotometrů s difúzní a úhlovou geometrií?

Lze z naměřených výsledků získat podrobnější informace (od všech pozorovatelů) ve vazbě na barevné odstíny při snižování adaptačních jasů?

V Ostravě 11.1.2023

doc. Ing. Tomáš Novák, Ph.D.

Posudek dizertační práce

Název práce: „Vnímání barev při fotopických a mezopických adaptačních jasech“

Autor: Ing. Marcela Pechová

Vedoucí práce: prof. Ing. Michal Vik, Ph.D.

Obor: Textilní technika a materiálové inženýrství

Pracoviště: Katedra materiálového inženýrství, Fakulta textilní TUL

Předložená dizertační práce se zabývá problematikou rozlišování barev a zlepšení schopnosti rozlišování barev na základě kolorimetrických modelů za fotopických a mezopických úrovní jasů. Zvolené téma je aktuální v praxi v situacích a aplikacích, kdy dochází k rozlišování barev za zhoršených jasových podmínek, což je i autorkou práce zmiňovaná oblast ochranných bezpečnostních prvků v dopravě. Autorka se zaměřila ve své práci jak na teoretický popis predikce barevného vzhledu za různých podmínek pozorování, tak především na experimentální výzkum schopnosti rozlišovat barvy i při snížených úrovních adaptačních jasů.

Dizertační práce se skládá ze třech zásadních částí. Nejprve je podrobně nastíněn současný stav problematiky v oblasti vnímání barev, modelů barevného vzhledu a metod měření barev pomocí spektrofotometrických metod. Dále jsou podrobně rozebírány použité metody pro experimentální výzkum prováděný v rámci práce. Jedná se zejména o popis metod přípravy barevných vzorků a přípravu vizuálních experimentů pro rozlišování barev pro různé úrovně adaptačních jasů. Poslední, nejobsáhlejší část práce se zabývá popisem a diskuzí dosažených výsledků. Jde zejména o porovnání měření pomocí různých spektrofotometrů z hlediska přesnosti a preciznosti měření. Dále jsou vyhodnoceny prováděné vizuální experimenty při rozlišování barev za různých jasových podmínek a na jejich základě je navržena určitá úprava funkce subjektivní chromatičnosti pro model barevného prostoru CAM02-UCS. V závěru práce byly poté přehledně shrnuty výsledky dizertační práce. Trochu v této části chybí citace vlastních publikovaných prací autorky práce, které by dávaly do souvislosti publikované výsledky a popisovaný výzkum v dizertační práci.

Dizertační práce měla stanoveny několik cílů (podrobně zmíněny na str.14), které se zaměřovaly především na experimentální výzkum vizuálního hodnocení rozlišitelnosti barev při různých úrovních adaptačních jasů, zvýšení predikční schopnosti modelů barevných prostorů CIECAM02 a CAM02-UCS v oblasti nízkých úrovní mezopických jasů na základě provedených experimentů a testování a hodnocení nejistot, přesnosti a preciznosti měření pro možnou vzájemnou přenositelnost dat mezi různými spektrofotometry.

Lze konstatovat, že cíle práce byly splněny. Postup řešení práce a použité metody jsou relevantní a odpovídají současnému stavu v dané oblasti vědeckého výzkumu. Pokud jde o formální stránku prezentované práce, nemá závažnějších nedostatků, je psána srozumitelně a přehledně. Autorka ji zpracovala pečlivě a systematicky, jazyková, matematická i grafická úroveň jsou na velmi dobré úrovni, práce obsahuje pouze velmi malé množství překlepů.

Jak je z výše uvedeného patrné, zhostila se doktorandka dané problematiky velmi dobrým způsobem. Práce obsahuje původní výsledky, které charakterizují vlastní výzkumný přínos autorky práce. Tyto výsledky byly primárně publikovány ve sbornících z národních i mezinárodních konferencí. Jistým nedostatkem může být to, že alespoň některé výsledky práce nebyly publikovány v impaktovaném časopise. Předložená dizertační práce přesto

představuje velmi hodnotný příspěvek v oblasti výzkumu rozlišování barev při snížených jasových podmínkách.

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem **doporučuji práci k obhajobě a po jejím obhájení udělení titulu „doktor“** (ve zkratce Ph.D.).

K předložené práci mám následující poznámky a doplňující dotazy:

- 1) Na str 73. je uváděn pojem „černý proud“ (angl. dark current). Obvykle se používá českého odborného termínu „temný proud“
- 2) Na str.94 (vzorec (3.62)) jsou používány indexy „abc“ aniž by bylo vysvětleno v textu, o co se jedná. Navíc o kousek dál jsou používány Lab barevné souřadnice, takže to značení může být určitým způsobem matoucí.
- 3) Na mnoha místech textu jsou zapisovány hodnoty veličin s nejistotami tak, že nejistota je uvedena na 3 platné číslice (např. str.123,133,143,145,190,...). Na jaký počet cifer má smysl uvádět nejistotu nějaké veličiny?
- 4) Proč bylo provedeno rozdělení skupin podle národností? Existují některé výzkumy, které naznačují určitou genetickou rozdílnost ve vnímání barev u různých národností? V práci toto nebylo podrobněji zmíněno. Pokud se nemýlím, tak výsledky práce neprokázaly žádné statisticky významné rozdíly mezi vnímáním barev za různých jasových úrovní mezi posuzovanými skupinami.
- 5) Jak byla nastavována úhlová velikost měřicí apertury A (str.122) pro různé úrovně jasu?
- 6) Zjištěnou závislost korekčního faktoru f na úrovni adaptačního jasu (obr.13.3) je možno určitě vyjádřit vhodným matematickým modelem.
- 7) Budete ve výzkumu pokračovat dále? Jaké vidíte možnosti dalšího potenciálního výzkumu v dané oblasti?

V Praze, dne 19.prosince 2022

Prof.Ing.Jiří Novák, Ph.D.
katedra fyziky
ČVUT v Praze, Fakulta stavební
Thákurova 7
16629 Praha 6