

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
BIOMEDICÍNSKÉHO
INŽENÝRSTVÍ**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

**ANNA
PENKEROVÁ**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra přírodovědných oborů

Poruchy barvocitu – testy a korekce

Color vision deficiencies – tests and corrections

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

Autor bakalářské práce: Anna Penkerová

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Písařík, Ph.D.

Kladno 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Penkerová** Jméno: **Anna** Osobní číslo: **491797**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra přírodovědných oborů**
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**
Studijní obor: **Optika a optometrie**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Poruchy barvocitu - testy a korekce

Název bakalářské práce anglicky:

Color vision deficiencies - tests and corrections

Pokyny pro vypracování:

Student formou rešerše zpracuje problematiku barevného vidění lidí - fyziologii barevného vidění, poruchy vnímání barev a výskyt poruch barvocitu v populaci. V rámci rešeršní práce student dále popíše princip jednotlivých testů pro vyšetření barvocitu a jejich výhody a nevýhody. Zaměří se i na kompenzaci, korekci či jiné alternativy odstranění poruchy vnímání barev. V praktické části student prověří pomocí spektrometru kvalitu testů barvocitu a pomůcek pro zmírnění/odstranění poruchy vnímání barev. Naměřená data zpracuje a vyhodnotí.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Česká oční optika, Současné metody vyšetřování barvocitu. Brno, 2010, roč 51, č.4, s.8. ISSN 1211-233X
- [2] WENZEL, K., URBIN, A., Lumen V4 Conference, ed. 1, ročník 1, kapitola Improving colour vision, 2014, Budapest: MEE Lighting Society, pp. 427-438, ISBN: 978-963-9299-21-4
- [3] Colorlite Ltd., Colorlite - Information about color blindness correction, 2021, <https://www.colorlitelens.com/color-blindness-correction-info.html>

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Písařík, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2023**

prof. RNDr. MUDr. Petr Maršálek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA
děkan

Název bakalářské práce: Poruchy barvocitu – testy a korekce

Abstrakt:

Práce se věnuje problematice poruch barevného vidění, jejich příčinách jak vrozených, tak získaných způsobených například některými farmaky. V úvodu práce je popsána fyziologie barevného vidění a trichromatická teorie. Jednotlivé diagnostické a screeningové testy jsou rozděleny do kategorií a každý test je podrobně popsán. Dále jsou uvedeny možnosti korekce, zlepšení vnímání barev pomocí dostupných barevných filtrů, brýlí, či barevných kontaktních čoček kde je dále uvedeno, jak tyto pomůcky fungují. V závěru teoretické části jsou také nastíněny alternativní možnosti jako například chytré brýle či genová terapie prováděna na primátech. Experimentální část se zabývá funkčností filtrů využívajících se pro korekci barvocitu a porovnáním reálné a počítačové verze testu určeného k diagnostice poruchy barvocitu. Cílem práce je přiblížit problematiku osob s poruchami barvocitu, popsat jednotlivé testy a seznámit s dostupnými korekčními pomůckami, objasnit funkčnost filtrů a porovnat testy. Práce byla zhotovena pomocí rešerše z velké části z cizojazyčných zdrojů a studií, aby přinesla nové informace týkající se tohoto tématu.

Klíčová slova:

Barevné vidění, poruchy barvocitu, korekce barvocitu, barevné filtry, D-15 test

Bachelor's Thesis title: Color vision deficiencies – tests and correction

Abstract:

The project deals with the problem of colour vision disorders, their causes, both congenital and acquired, caused for example by certain drugs. The physiology of colour vision and the trichromatic theory are described in the introduction. The various diagnostic and screening tests are divided into categories and each test is described in detail. Furthermore, the possibilities of correction, improvement of colour perception by means of available colour filters, glasses or coloured contact lenses are presented, and how these aids work is also described. Finally, alternative options such as smart glasses or gene therapy performed on primates are also outlined at the end of the theoretical part. The experimental part deals with the functionality of the filters used for color vision correction and a comparison of the test designed to diagnose color vision disorders. The aim of the paper is to give an overview of the problems of people with colour vision disorders, to describe the different tests and to introduce the available corrective aids, to explain the functionality of the filters and to compare the tests. The thesis has been compiled by means of a search of largely foreign language sources and studies in order to provide new information on this topic.

Key words:

Color vision, color vision defects, color vision correction, filters for color vision correction, D-15 panel test

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Písaříkovi, Ph.D., za ochotný přístup, pomoc při měření a zpracování práce, také za odborné rady a poznatky. Dále bych ráda poděkovala panu doc. MUDr. Jánmu Leštákovi, CSc., MBA za odbornou pomoc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „*Poruchy barvocitu – testy a korekce*“ vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne

.....

podpis

Obsah

1	Úvod	7
2	Vznik barevného vidění.....	8
2.1	Fyziologie barevného vidění.....	8
2.1.1	Stavba sítnice.....	8
2.1.2	Fotoreceptory.....	8
2.1.3	Fovea	9
2.1.4	Zraková dráha.....	9
2.2	Rozlišování barev.....	9
2.3	Trichromatická teorie barevného vidění	10
2.4	Barvy a míšení	10
3	Poruchy barvocitu.....	12
3.1	Vrozené poruchy barvocitu.....	12
3.1.1	Monochromázie.....	13
3.1.2	Dichromázie.....	13
3.1.3	Anomální trichromázie.....	13
3.2	Získané poruchy barvocitu.....	14
3.2.1	Glaukom	14
3.2.2	Katarakta.....	14
3.3	Změny ve vnímání barev způsobené farmakoterapií	14
3.3.1	Chlorochinová retinopatie	14
3.3.2	Optická neuropatie.....	15
4	Výskyt poruch barvocitu v populaci.....	16
5	Vyšetřování.....	17
5.1	Rozlišovací testy	17
5.1.1	Pseudoizochromatické testy	17
5.2	Seřazovací testy.....	19
5.2.1	Farnsworth Munsell 100 Hue Test	19
5.2.2	Farnsworth Panel D-15 test	20
5.2.3	Lanthony New Colour test.....	20
5.3	Míchací testy	21
5.3.1	Anomaloskop.....	21
5.3.2	OSCAR (Medmont C-100).....	21

5.3.3	City University Test (CUT).....	22
5.4	Pojmenovávací testy	23
5.4.1	FaLant test	23
5.4.2	H-W Lantern test	24
5.5	Testy na LCD tabulích a monitorech.....	25
6	Korekce barvocitu.....	26
6.1	Barevné filtry	26
6.1.1	EnChroma brýlové čočky	26
6.1.2	ChromaGen brýlové čočky.....	27
6.1.3	Colorlite barevné filtry	27
6.2	Kontaktní čočky.....	29
6.2.1	X-Chrome kontaktní čočky	29
6.2.2	ChromaGen kontaktní čočky.....	30
6.2.3	Barvené kontaktní čočky Atto barvivem.....	31
6.2.4	Kontaktní čočky se zlatými nanokompozity	32
6.3	Další varianty korekce	33
7	Experimentální část	34
7.1	Úvod.....	34
7.2	Předpoklady – cíle.....	35
7.3	Měření barevných filtrů	36
7.4	Měření a porovnání F D-15 panel testů	41
8	Diskuze	52
8.1	Barevné filtry	52
8.2	Porovnání Farnsworth D-15 panel testů.....	52
9	Závěr.....	54
	Seznam použité literatury	55
	Seznam zkratk.....	63
	Seznam obrázků.....	64
	Seznam tabulek.....	65
	Seznam grafů	66

1 Úvod

Vnímání barev a barevné vidění ovlivňuje náš každodenní život. Na světě je kolem 300 milionů lidí trpících poruchou barvocitu, jelikož se jedná o většinou dědičné onemocnění. Existuje mnoho variant, jak danou poruchu barvocitu diagnostikovat a určit, slouží k tomu celá škála jednotlivých testů.

Poruchy barvocitu není možné nijak vyléčit či trvale odstranit, avšak je mnoho pomůcek, které zlepšují barevný kontrast jednotlivých barev. Patří mezi ně například barevné filtry, které se dají zabrousit do brýlové obruby. Těchto filtrů je na trhu mnoho, všechny fungují na obdobném principu, který bude přiblížen v teoretické části. Další možnou korekcí jsou například barevné kontaktní čočky naopak působící více esteticky oproti celozabarveným brýlovým čočkám.

V bakalářské práci budou popsány jednotlivé používané testy a principy těchto testů. Dále se budu věnovat korekcí či jinými alternativami, které mohou pomoci zlepšit barevné vnímání. Bakalářská práce bude obsahovat mnoho zdrojů z různých studií, aby obohatila danou problematiku.

V experimentální části bakalářské práce se budu zabývat právě funkčností barevných filtrů používajících se ke korekci barvocitu, ve snaze zjistit jejich účinnost. Dále se budu věnovat porovnáním testů určených ke diagnostice poruchy, konkrétně Farnsworth D-15 panel testem, který budu porovnávat s počítačovou verzí tohoto testu.

2 Vznik barevného vidění

2.1 Fyziologie barevného vidění

Správná anatomická stavba sítnice a její části jsou nezbytné pro vznik a uvědomění si barevného vidění.

2.1.1 Stavba sítnice

Sítnice se nachází v nejvnitřnější vrstvě oka. Sítnice neboli retina má dvě části, optickou (*pars optica retinae*) a slepou (*pars coeca retinae*). Ve slepé části nejsou obsaženy žádné smyslové ani nervové buňky, je ve formě dvouvrstevného epitelu v přední části a ve vnitřní části pokrývá povrch řasnatého tělíska a zadní plochu rohovky. Optická část pokrývá celý vnitřní povrch retiny a slouží ke zrakové funkci. Tyto části jsou od sebe odděleny *ora serrata* neboli zubovitou linií. Retina vypadá jako velice jemná transparentní blána mající růžovou barvu. Tloušťka je mezi 0,1 – 0,3mm. Senzorická část retiny a retinální pigmentový epitel jsou připojeni pevně pouze v oblasti *ora serrata* a u papily. Pozice jednotlivých vrstev v této oblasti je zajištěna například nitroočním tlakem. [1], [2], [3]

Histologická stavba sítnice se skládá z devíti vrstev a to: 1) vrstva fotoreceptorů, 2) membrána *limitas externa*, 3) zevní jádrová vrstva, 4) zevní plexiformní vrstva, 5) vnitřní jádrová vrstva, 6) vnitřní plexiformní vrstva, 7) vrstva gangliových buněk, 8) vrstva nervových buněk, 9) membrána *limitas interna*. Dále sítnice obsahuje tři vertikální neurony vedené od receptorů ke gangliovým buňkám, které jsou uloženy v nejvnitřnějších vrstvách retiny. Vrstva receptorů se nachází těsně u pigmentového epitelu. [2]

Funkcí sítnice je přijímat světelné paprsky do oka, které pak procházejí přes gangliové a bipolární buňky a vnitřní vrstvy až k fotoreceptorům, kde následně dochází k procesu a převodu světelného stimulu na elektrický vzruch vedený do *cerebrum*. [2]

2.1.2 Fotoreceptory

V retině lidského oka se nachází cca 5 milionů čípků a cca 140 milionů tyčinek. Procesem stárnutí se nesnižuje počet čípků, ale mění se jejich hustota a to o 30 %. Největší hustota čípků je v oblasti fovei, počet naopak rychle klesá v makule. [2]

Tyčinky jsou zodpovědné za vidění v šeru, ale jsou natolik citlivé, že se za běžného denního světla přetíží a nejsou schopny světlo signalizovat. Obsahují červené barvivo rodopsin. Denní světlo je zprostředkováno pomocí čípků, které dokážou fungovat ve větší intenzitě.

Barevný vjem nám zprostředkovávají čípky. V lidské sítnici nalezneme tři typy čípků, každý typ obsahuje jiný pigment a je zodpovědný za absorpci jiné vlnové délky světla. V základu rozlišujeme krátkovlnné (S čípky), středně (M čípky) a dlouhovlnné čípky (L čípky). Samotné fotoreceptory nejsou specializované pro přenos signálů, na jednom konci každé buňky je vnější segment, který pohlcuje světlo a generuje eklektické signály. Na druhém konci buňky je synaptický konec, který přenáší signály na další neurony (bipolární a horizontální buňky). Mezi vnějším segmentem a synaptickým zakončením leží oblast zvaná vnitřní segment. [4]

2.1.3 Fovea

Nejcentrálnější část žluté skvrny *fovea centralis* je tvořena centrální asi o 0,35 mm širokou prohlubní a představuje oblast sítnice, kde se nachází nejlepší zraková ostrost tedy místo nejostřejšího vidění. *Foveola* má největší hustotu čípkových fotoreceptorů ($199\ 000/\text{mm}^2$), které jsou v tomto místě zúžené a prodloužené, aby dále maximalizovaly detekci světla. *Foveola* obsahuje pouze čípkové fotoreceptory a některé Müllerovy buňky, neobsahuje tedy tyčinky. [3]

2.1.4 Zraková dráha

Zraková dráha patří mezi sensorické dráhy a je tvořena čtyřmi neurony, z čehož první tři neurony se nachází v sítnici. První neuron je tvořen vrstvou fotoreceptorů tyčinek a čípků. Druhý neuron obsahuje bipolární buňky sítnice a třetí neurony jsou velké multipolární buňky. *Ganglion opticum* mají dlouhé axony probíhající přes *nervus opticus* až do *corpus geniculatum laterale*. Čtvrté neurony jsou umístěny v *corpus geniculatum laterale*. [5]

Hlavní funkcí zrakové dráhy je přenos informací zachycený světločivnými buňkami do korového zrakového pole, kde si uvědomujeme vidění. [5]

2.2 Rozlišování barev

Lidské oko dokáže rozlišovat barvy v oblasti světelného spektra o vlnových délkách v rozmezí 400- 760nm. Světelné paprsky o kratších vlnových délkách, než je 400nm jsou pohlcovány oční čočkou, rohovka pohlcuje paprsky o vlnových délkách kratších než 315 nm, které jsou pro oko škodlivé. V sítnici oka se nacházejí tři čípkové pigmenty, které reagují na různé barevné pigmenty tj. 445 nm modrý, 535nm zelený a 570 nm žlutý pigment. Při optimálních podmínkách je člověk schopný rozlišit odstíny barev na jednotlivé nanometry. [5]

Sítnice se dokáže přizpůsobit na rozdílné úrovně osvětlení a světelných podmínek. V závislosti na úroveň světla můžeme mluvit o přizpůsobení na světlé a fotopické vidění nebo tmavé a skotopické vidění. Adaptace na světlo trvá několik vteřin, avšak adaptace na tmu může trvat až hodinu a déle. Důležitým rysem fotopického vidění je chromatická adaptace a proces přizpůsobující se převládající barvě. Zrakový systém dokáže kompenzovat a neutralizovat chromatické změny v osvětlení tak, že vnímaná barva odrazného povrchu je poměrně konstantní. Bílé povrchy tedy vnímáme bílé například i pod světlem ze žlutých zářivek. Pomocí barevné stálosti dokážeme rozpoznat jednotlivé barevné objekty při různé variaci osvětlení. [5], [6], [7]

2.3 Trichromatická teorie barevného vidění

Barevné vidění je ve zrakovém systému vyvoláno absorpcí světla pomocí tří různých spektrálních čípků. V důsledku toho je barevné vidění popisováno jako tri-variantní nebo trichromatické. V roce 1802 Thomas Young navrhl model, že vnímání barev může být kódováno třemi základními barevnými receptory spíše než tisíci barevnými receptory kódující jednotlivé barvy. [6]

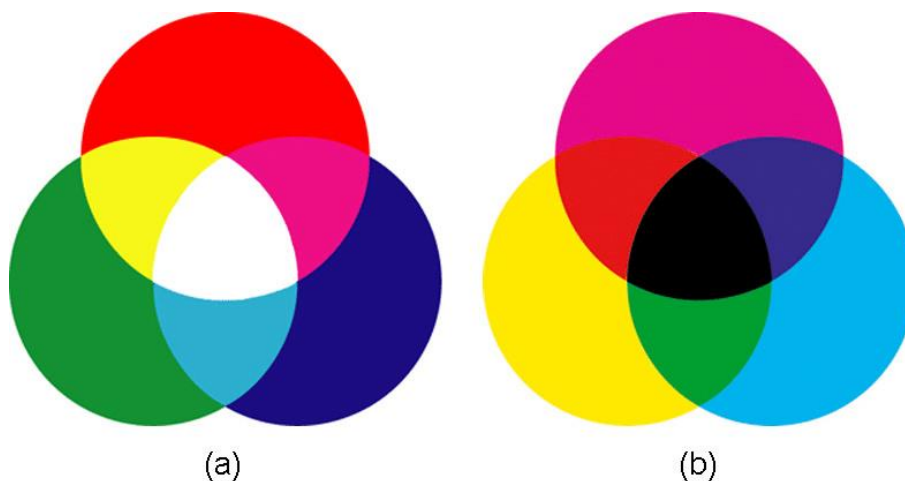
Spektrální sensitivita čípků může být určena několika metodami. Dvě z těchto metod zahrnují izolaci receptorových odpovědí. Z lidské sítnice byly izolované tři třídy čípků. Tyto tři třídy jsou citlivé na krátkou vlnovou délku (S-čípky), citlivé na střední vlnovou délku (M-čípky) a citlivé na dlouhé vlnové délky (L-čípky). Všechny mají různé, ale překrývající se spektrální citlivosti. S-čípky mají spektrální citlivost přibližně 440 nm, M-čípků při 545nm a L-čípků při 565nm. [6], [8]

2.4 Barvy a míšení

Existují dva modely generování barev aditivní a subtraktivní míšení. Televize, plochý displej nebo projektor používají aditivní barevný model. Barvy jsou generovány přidáváním tří základních barev červené, zelené a modré v různých poměrech. Sekundární barvy lze vytvořit přidáním dvou základních barev. Přidáním červené a zelené vznikne barva žlutá, červená a modrá vytvoří purpurovou barvu a modrá a zelená barvu azurovou. Bílá je vytvořena kombinací červené zelené a modré barvy. Černá je barva výchozí. [7], [9]

Subtraktivní míšení se používá pro tisk. Vytisknutý obrázek nebo dokument odráží pouze světlo které ho osvětluje. Část světla je absorbována zbytek je odražen.

Světlo odražené bodem na povrchu určuje barvu bodu. Barvy vznikají ukládáním pigmentu, které absorbují jednu primární barvu. Tři základní barvy jsou v tomto případě žlutá, tyrkysová a purpurová. Žlutá barva absorbuje modrou a odráží červenou a zelenou. Purpurová absorbuje zelenou a odráží červenou a modrou. Tyrkysová barva absorbuje červenou a odráží zelenou a modrou. Pokud zkombinujeme žlutou a purpurovou, zelená a modrá jsou pohlceny a zůstane pouze červená. Barvu červenou tedy dokážeme vytvořit míšením žluté a purpurové. Zelená může být vytvořena kombinací žluté a tyrkysové. Žlutá absorbuje modrou kdežto tyrkysová barva červenou. Modrá barva může být tedy vytvořena spojením barvy purpurové a tyrkysové. Purpurová absorbuje zelenou, zatímco tyrkysová absorbuje červenou. Sekundární barvy jsou červená, zelená a modrá. Černá je utvořena kombinací žluté, purpurové a tyrkysové. [7]



Obrázek 1 Aditivní (a) a subtraktivní (b) míšení [9]

3 Poruchy barvocitu

Na světě žije více než 300 milionů lidí s poruchou barvocitu. První vědecký článek ohledně poruchy barvocitu byl napsán v roce 1794 Johnem Daltonem. Dalton sám trpěl červeno-zelenou barvoslepostí a jakožto vědec se tímto tématem zabýval. Tvrdil, že jeho komorová voda je zabarvena do modra, což má za následek rozdílnost v barevném vidění. Po jeho smrti byly jeho oči použity k pitvě a bylo dokázáno, že se mýlil, jelikož se v nich žádná barevná tekutina nenacházela. Ukázalo se, že trpěl deuteranopií. [10], [11], [12]

Existuje více příčin poruch barvocitu. V základu je můžeme rozdělit do dvou, a to vrozené a získané. Obecně jako poruchu barvocitu označujeme za nesprávné vnímání barvy či barevného odstínu. [12]

3.1 Vrozené poruchy barvocitu

Ve většině případů je porucha barvocitu dána geneticky. Znamená to tedy, že jeden anebo oba z rodičů trpí nějakou poruchou barvocitu a je tedy určitá šance, že potomek bude mít stejnou poruchu taktéž. Pravděpodobnost dědičnosti záleží na tom, o jakou poruchu se jedná. [13]

Červeno-zelená porucha je vázaná na pohlavní chromozom a je recesivní. Modro – žlutá porucha barevného vidění je autozomálně dominantní. [13]

Červeno-zelená porucha barevného vidění je ve většině případů způsobena defektem X-chromozomu. Člověk má 23 párů chromozomů, kdy je z toho jeden pár tzv. pohlavní chromozom. Tento pár obsahuje dva X-chromozomy u ženy, a jeden X a druhý Y-chromozom u muže. Barevné vidění v modro-zelené oblasti je zakódováno na X-chromozomu. Pokud tedy muž ponese poškozený X – chromozom bude trpět poruchou barvocitu. V případě ženy je ve vedení nepoškozený chromozom, tedy nebude barvoslepá, ale bude poruchu pouze přenášet. Ženy tedy potřebují oba dva X – chromozomy s defektem, aby poruchou trpěly. Pouze ženy jsou přenašečky na své syny, ne otcové. [14]

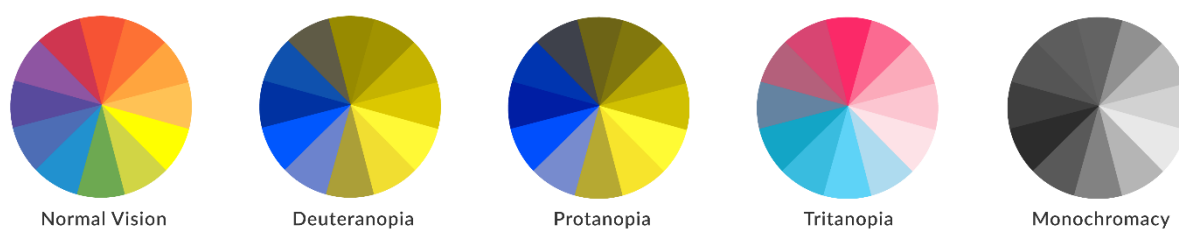
Modro-žlutá porucha barvocitu (tritanopie) je umístěna na 7 páru chromozomu (autozomu), který je pohlavně nezávislý. [14]

3.1.1 Monochromázie

Monochromázie patří k vrozeným poruchám barvocitu. Znamená úplnou ztrátu barvocitu kvůli absenci dvou nebo všech tří typů pigmentů pro barevné vidění. Jedná-li se o monochromázii tyčinkovou, jedinec není schopen rozeznat jakoukoli barvu. Často se zároveň vyskytuje fotofobie, nystagmus a snížená zraková ostrost. Monochromázie čípková se vyskytuje méně, je při ní možné zachovat normální vidění. [15]

3.1.2 Dichromázie

Dichromázie je stav, kdy jeden typ čípků zcela chybí, anebo je nefunkční. Tento stav se dělí na protanopii, deuteranopii a tritanopii, to znamená že oko postrádá čípek zodpovědný za červené, zelené a modré vlnové délky. [15]



Obrázek 2 Vidění s vrozenými poruchami barvocitu [17]

3.1.3 Anomální trichromázie

Anomální trichromázie patří mezi jedny z nejčastějších poruch barvocitu. Jedná se o snížené vnímání jedné ze základní barev tedy zelenou, červenou a méně často modrou barvu. Člověk tedy vnímá obraz v jiném barevném poměru, v sítnici mají tři rozdílné typy čípků, avšak díky mutacím kódujících genů mají odlišné absorpční vlastnosti v porovnání s normálními trichromaty. [16]

Na dlouhém raménku chromozomu 23 jsou uloženy geny jak pro středně vlnný (M) opsin, tak gen pro dlouhovlnný (L) opsin blízko u sebe. Právě blízkost má za následek vložení frekvence genu L opsinu do M opsinu při růstovém dělení chromozomů. Pak vzniká deuteranomálie. Vytvořený anomální opsin pro střední vlnové délky (M opsin), získal mutací vlastnosti absorpce podobné L-opsinu. Poté dochází ke snadné záměně červené, žluté a zelené barvy. Obdobně to funguje u protanomálie, kde je do L opsinu vložena část M opsinu, vlastnost absorpce anomálního L opsinu se blíží M opsinu. Dochází tedy ke ztížení rozlišování barev v oblasti dlouhých vlnových délek. [73]

3.2 Získané poruchy barvocitu

K poruchám barvocitu může docházet při některých očních onemocněních jako jsou atrofie papily zrakového nervu (porucha vnímání červené a zelené barvy), glaukom, afakie, hemoftalmus, katarakta, dystrofie fotoreceptorů konkrétně progresivní dysfunkce čípků, u kongenitální anomálie zrakového nervu (Hypoplazie n.II.). U celkových onemocnění jako je Turnerův syndrom, chromozomální aberace typu 45, X, u dívek. Změny ve vnímání některých barev mohou sloužit jako indikace k některému očnímu onemocnění ze výše uvedených. [2]

V následujících kapitolách popíšete pouze vnímání barev při glaukomu a kataraktě.

3.2.1 Glaukom

V případě glaukomového onemocnění dochází převážně k poruše barvocitu vnímání barvy modré a její dalších oblastí. Odlišné vnímání barev může být zjistitelné dříve než například změny ve vnímání zorného pole. Vyšetření se provádí rozlišovacími testy barevných signálů, anebo použitím pseudoizochromatických tabulek. Typ poruchy se určuje na anomaloskopu. [2]

3.2.2 Katarakta

Katarakta způsobuje zakalení oční čočky, a tedy následnou neprůhlednost.

Dle studie FRISTRÖM [18] nejsou významné rozdíly v citlivosti na centrální nebo periferní barevný kontrast mezi různými typy katarakty. Nejvíce postižena byla osa tritanopie, tedy porucha vnímání modré barvy, jak v centrální, tak v periferní oblasti testu barevného kontrastu. Výsledek byl očekávaný, jelikož katarakta vyřazuje kratší vlnové délky a funguje jako žlutý filtr. Testování barevného kontrastu se provádělo na heterochromatickým blikajícím testu. [18]

3.3 Změny ve vnímání barev způsobené farmakoterapií

Léky používané k léčbě srdečních problémů, vysokého krevního tlaku, infekcí, nervových poruch a psychologických problémů mohou ovlivňovat barevné vidění. [19]

3.3.1 Chlorochinová retinopatie

Retinopatie způsobená chlorochinem je jedna z nejčastějších nemocí. Nejdříve se tento medikament používal proti malárii. Mnoho pacientů tento lék používá dlouhodobě, kdy se lék ukládá do určitých tkání, a i malé dávky se kumulují do značného množství. Ke kumulaci v oku dochází především v cévnatce a epitelu pigmentu sítnice, což vede k poškození sítnice.

„Býčí oko“ se vyvíjí v centrální oblasti sítnice jako reakce na poranění různými způsoby, např. chlorochinem. Přestože je v tomto případě ostrost vidění pacienta stále dobrá na 0.5 D při vyšetření barvocitu na pseudoizchromatických tabulkách se vykazují chyby a výsledky Farnsworthova panel D-15 testu ukazují záměny na tritanopové ose. Tyto záměny jsou charakteristické pro nález na Nagelově anomaloskupu, kdy je zjištěna pseudoprotomálie, která v případě chlorochinové retinopatie někdy vykazuje na panelových D-15 testech záměny nikoliv na tritanopové ose, ale na vertikální červeno-zelené se. Nicméně panel D-15 test je důležitá diagnostická pomůcka pro screening vedlejších účinků chlorochinu na sítnici. Nebylo definitivně objasněno, zda vady barevného vidění skutečně předchází drobným vadám v zorném poli či nikoliv. [20]

3.3.2 Optická neuropatie

Zcela odlišné jsou poruchy barevného vidění způsobené léky, které způsobují poškození zrakového nervu.

Inhibitory monoaminoxidázy (MAOI) velice agresivní léky které vedly k těžkým neuropatiím zrakového nervu. Podávaly se jako antihypertenziva a antidepresiva. Ve velmi raném stádiu, kde se zraková ostrost pohybuje mezi 0,6 a 0,8 již nelze rozlišit červenou a zelenou barvu. Pacienti si tento jev začnou nejčastěji uvědomovat na semaforech. Chovají se jako deuteranopové. Žádné z pseudoizochromatických tabulek není možné přečíst. Po přerušení léčby se vrací normální barevné vidění. Při delším podávání léku se objevují centrální skotomy a později temporální atrofie disku. Nejnebezpečnější formy těchto léků byly z trhu dávno staženy. [20]

Ethambutol je preferovaný lék využívající se v antituberkolotické léčbě ve srovnání s jinými látkami, které jsou méně bezpečné či méně účinné. Etambutol primárně ovlivňuje červeno-zelené vnímání barev, jak ukazuje Panel D-15 test. Může se vyskytovat i modro-žlutá porucha vnímání barev. Studie prokazují modrožluté chyby v rané fázi intoxikace, červeno-zelené nebo tritanomální vady v pozdějším stádiu intoxikace u pacientů léčených etambutolem. Tyto změny barevného vidění se mohou objevit ještě před postižením zrakové ostrosti a zorného pole. Poruchy barevného vidění jsou pravděpodobně nejcitlivějším ukazatelem časně etambutolové optické neuropatie. [21], [22]

4 Výskyt poruch barvocitu v populaci

Odhaduje se, že na světě žije 300 milionů lidí s poruchou barevného vidění. Nejčastější poruchou barvocitu jsou vady červenozeleného vidění, tento stav postihuje mnohem častěji muže než ženy. V populacích se severoevropskými předky se vyskytuje přibližně u 1 z 12 mužů a 1 z 200 žen. Vady červeno-zeleného vidění mají nižší výskyt téměř u všech ostatních studovaných populací. [23]

Vady modrozlutého vidění jsou vzácnější, postihují stejnou měrou muže i ženy. Tento stav se celosvětově vyskytuje u méně než 1 z 10 000 osob. Monochromázie modrých čípků je vzácnější než ostatní formy poruch barvocitu a postihuje cca 1 ze 100 000 osob na celém světě, a postihuje častěji muže než ženy. [23]

Počet postižených osob se u jednotlivých skupin populace liší. V izolovaných komunitách s omezeným genofondem se někdy vyskytuje vysoký podíl barvosleposti včetně neobvyklých typů. Příkladem je Finský venkov, Maďarsko a některé skotské ostrovy. Naopak v subsaharské Africe je málo barvoslepých lidí. V zemích, jako je Indie a Brazílie, je výskyt barvosleposti poměrně vysoký, protože se v jejich genetické historii vyskytuje velké množství lidí s rasově smíšenými geny. [24]

Statistické údaje o lidech se získanou poruchou se hledají obtížně, ale může se jednat až o 3% populace, jelikož věkem podmíněná porucha je relativně častá u osob starších 65 let, a proto se ve vyspělých zemích zvyšuje vzhledem k rostoucímu počtu starších osob na obyvatele. [24]

5 Vyšetřování

Mezi často používané vyšetřovací metody barevného vidění patří isochromatické tabulky, seřazovací testy, anomaloskop a lanter test. Každá kategorie testů má specifický znak, který určuje vhodnost pro konkrétní klinickou situaci. Někdy může být vhodná série testů. Kvalita osvětlení, velikost zorného pole a další faktory jsou důležité při zařizování správné vyšetřovny pro testování barvocitu. V současné době neexistuje léčba vrozených vad barevného vidění. Studie však ukazují, že včasná diagnóza těchto vad v raném věku může pomáhat dětem lépe se přizpůsobit úkolům ve škole a může pomoci dospělým v případném pracovním omezení. [25]

5.1 Rozlišovací testy

Nejpoužívanějšími rozlišovacími testy jsou pseudoizochromatické tabulky, které jsou popsány v následující podkapitole.

5.1.1 Pseudoizochromatické testy

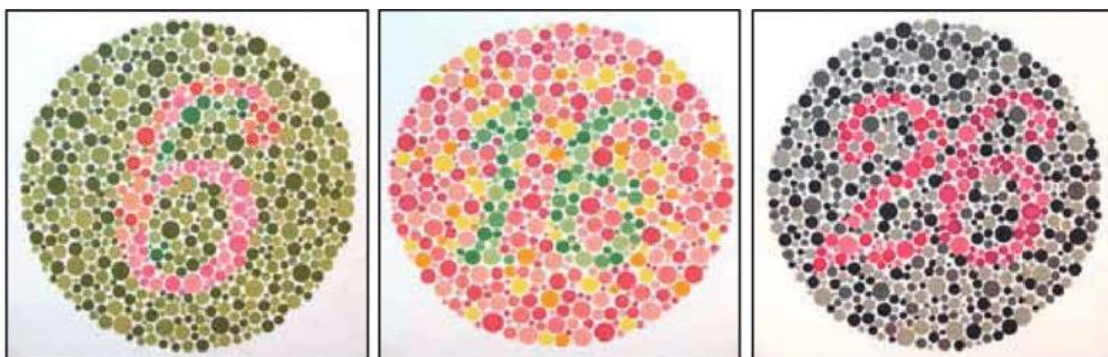
J. Stilling byl první, který představil v roce 1873 design pseudoizochromatických destiček. V dnešní době jsou tabulky používány jako screeningové testy pro zjištění poruch barvocitu. Testy jsou nejčastěji ve formě tabulek, které fungují na principu splývání barev, které se dají zaměnit. Existuje mnoho druhů tabulek, jsou pojmenovány podle tvůrců např. Ishihara, Stilling, Rabkin, Velhagen a další. Tabulky jsou konstruovány do obrázků, ve kterých jsou písmena, čísla anebo tvary složené z barevných bodů. Každý barevný bod má jiný odstín než okolí. Jas jednotlivých bodů je stejný. Výhodou tabulek je jejich cenová nenáročnost, výdrž a dostupnost. Většina testů umožňuje velice přesný výsledek kongenitální červeno-zelené poruchy. Tabulky jsou používány pouze jako screeningový nástroj k hodnocení kvality barvocitu, nikoliv jako diagnostický. [25], [26], [27]

Vyšetření se provádí nejčastěji ve vzdálenosti 40 cm za optimálních světelných podmínek pro vyšetření zraku. Použitá spektrální kvalita světla může ovlivnit výsledky testu. Jednotlivé obrázky by měly být na samostatné stránce. Vyšetřovaný se dívá na jednotlivou stránku cca 4 sekundy, pokud nelze určit co je na daném obrázku po uplynulém času, měl by vyšetřující instruovat k pokračování na další stránku. Instrukce by měly být jasné, a neměly by pacienta omezovat v nepřesných nebo nesprávných odpovědích, je tedy dobré například zmínit, že na některých stránkách nemusí vyšetřovaný identifikovat číslo nebo obrazec.

Stránky by měl otáčet vyšetřující, aby se podchytil čas pozorování jednotlivých obrazců a instrukce během screeningu. Tabulky je vhodné uchovávat v tmavém prostředí, aby nedošlo ke ztrátě kontrastu. [25], [28]

5.1.1.1 Ishihara tabulky

Ishihara tabulky jsou jedny z nejvíce populárních a jsou považovány za jedny z nejúčinnějších tabulek pro screening červené a zelené poruchy barvocitu. Bylo publikováno několik verzí těchto tabulek. Originální verze má 38 destiček, také existují verze s 24 nebo 16 destičkami. První stránka každé tabulky je informativní, obsahuje tedy destičku, kterou lze přečíst i pacient s poruchou, slouží k vysvětlení testu. U každé tabulky je odlišné bodové hodnocení na základě z kolika destiček se tabulka sestává. Jedná-li se o 38 destičkovou verzi dovolují se čtyři nebo méně chyb pro normální skóre, u 24 destičkové jsou dvě nebo méně chyb normální, taktéž u 16nácti destičkové. [25]



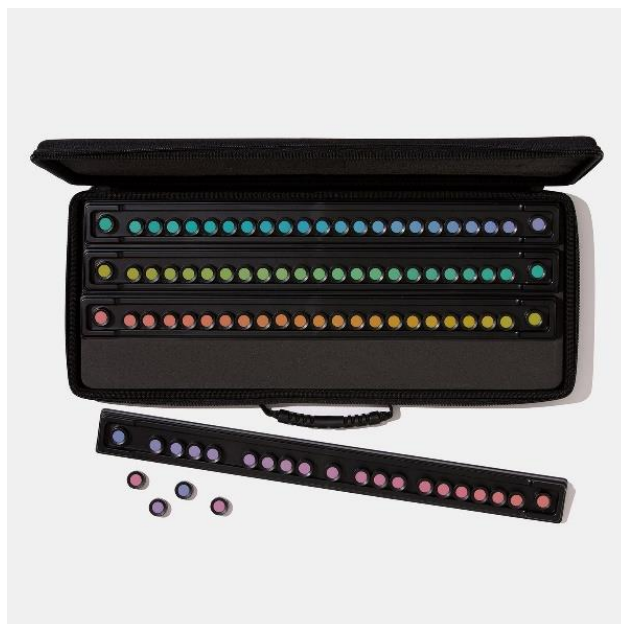
Obrázek 3 Ishihara testy ukázka [29]

5.2 Seřazovací testy

Moderní seřazovací testy byly poprvé použity ve 40. a 50. letech 20. století Deanem Farnsworthem. Navrhl původně FM 100 Hue test a Farnsworthův dichromatický test Farnsworth Panel D-15. Později oba testy upravil. Testy jsou sestaveny k vyhodnocení rozlišovací schopnosti barev a ke kategorizaci jednotlivce do skupin: deutan, protan a tritan na základě chybové osy výsledků. [26]

5.2.1 Farnsworth Munsell 100 Hue Test

Farnsworth Munsell 100 Hue test je dalším testem používaným na zjištění kvality barvocitu. Principem jsou barevné terčíky, které jsou seřazovány do správného pořadí v různých odstínech v oblasti celého rozsahu barevného spektra. Jas a sytost barev jsou identické. Test FM 100 se skládá ze čtyř krabic po 21 až 22 čepcích. Celkem je k dispozici 85 terčů. Barevné odstíny mezi jednotlivými terči jsou velmi malé. Vyšetřující může výsledky hodnotit během vyšetření, terčíky jsou označeny ze spodní části číslicemi. Test lze vyhodnotit graficky, kde je zobrazena případná porucha barvocitu. Skóre testu je dáno celkovým chybovým skórem (TES). [25], [26]



Obrázek 4 Farnsworth Munsell 100 Hue Test [30]

5.2.2 Farnsworth Panel D-15 test

D-15 test byl vyvinut, jelikož test FM-100 může trvat příliš dlouho jako rutinní vyšetřování. Test byl navržen tak, aby měl větší barevné rozdíly, aby se osoby s normálním barevným viděním byly lehce ovlivněny a osoby s poruchou prováděly chyby. Na rozdíl od testu FM 100 – Hue je vyšetřovanému předložena pouze jedna krabička obsahující 15 pohyblivých barev, které se seřazují a jeden bod je pevný. Může tedy dojít k záměně barev nejen v barevných oblastech. Od subjektu se vyžaduje uspořádat pohyblivé barvy v pořadí, počínaje stálou barvou. Vyšetření je vyhodnocováno v kruhovém diagramu, který se sestává z 16 barev spojené body v grafu v pořadí ve kterém je subjekt uspořádal. [25], [31]



Obrázek 5 Farnsworth Panel D-15 test [32]

5.2.3 Lanthony New Colour test

Lanthony navrhl tento test s ohledem na získané poruchy barvocitu, ale lze jej použít i pro hodnocení vrozených. Test je kombinací uspořádání pomocí odstínů, oddělení barev od šedé a uspořádání šedých barev na základě odrazivosti. Test má čtyři úrovně obtížnosti (Munsellova barva 2,4,6, a 8). Prvním stupněm je test oddělování barev a šedí. Barvy, které zůstanou s šedou, jsou zobrazené na polárním grafu. Druhým stupněm je test uspořádání D-15 a posledním testem je uspořádání zbylých barev s šedí (pokud nějaké zbydou), aby se zjistilo, zda jsou červené barvy uspořádány s tmavšími odstíny šedé což ukazuje na pseudo-protanomálii svědčící o onemocnění receptoru. Ve formátu D-15 jsou barvy přibližně rovnoměrně rozmístěny kolem kruhu odstínů, aby nedocházelo ke zkreslení některé odpovědi.

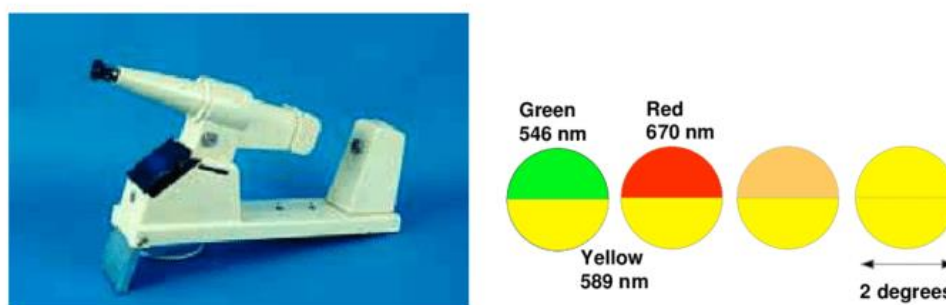
Na rozdíl od testů D-15 není stanovena žádná výchozí barva. Struktura tohoto testu je dostatečně jednoduchá, aby mohla být použita u dětí od šesti let věku a dostatečně citlivá, aby ukázala pomalejší vývoj v rozlišování modro – žluté. [31]

5.3 Míchací testy

Míchací testy jsou dalším možným testováním poruch barvocitu. Patří mezi ně například níže uvedený přístroj Anomaloskop, dále OSCAR a CUT (City University test) testy.

5.3.1 Anomaloskop

Přístroj používaný pro zjištění poruchy barvocitu. Principem anomaloskopu je modifikace spektroskopu, jedná se tedy o spektrální přístroj, který je založen na principu porovnání barev. Vyšetřovaný se dívá na dvě poloviny zorného pole, kdy je jedna polovina zbarvena do spektrálně žlutého světla, druhá polovina se skládá z červeného a zeleného světla. V druhé polovině vyšetřovaný smíchává aditivní metodou červenou a zelenou barvu tak, aby byly stejné. Anomaloskopem lze vyšetřit pouze poruchy barvocitu červeno zelené barvy. Trichromatičtí subjekti srovnávají obě pole ve známých poměrech, kdežto vyšetřovaní s poruchou barvocitu mají rozdílné poměry v polích podle toho, o jakou poruchu barevného vidění se jedná. Deuteranopie vyžaduje více zeleného světla, zatímco protanopie více červené. [33], [34]



Obrázek 6 Nagelův anomaloskop [35]

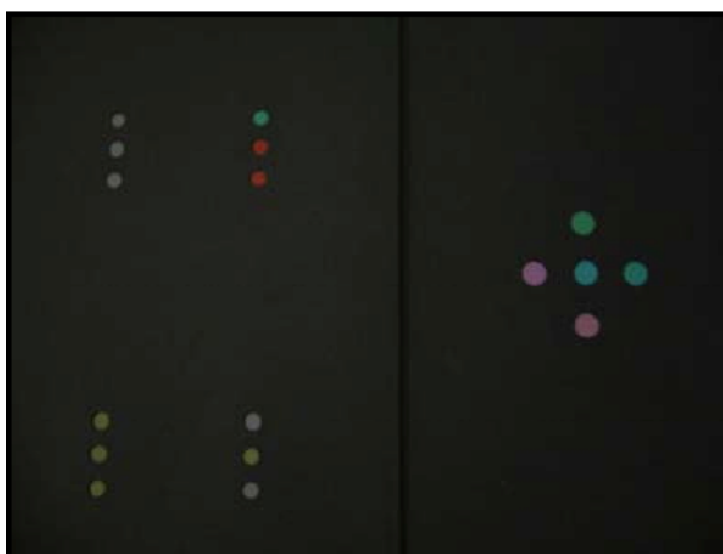
5.3.2 OSCAR (Medmont C-100)

Test Medmont C-100 je relativně nový a nepříliš známý, nicméně byl doporučen jako součást základních testů barevného vidění. Test měří relativní spektrální citlivosti pomocí fotometrického blikání k rozlišení protanopů a deuteranopů. [36]

Medmont C-100 představuje jedno generované světlo pomocí dvou střídající se diod červené a zelené blikající barvy. V daném okamžiku svítí pouze jedna z diod, rychlost záblesku je taková, že výsledný vzhled podnětu je blikající žluté světlo. Pacient provádí kontrolu na základě úpravy relativního jasů obou LED diod, kdy je svítivost výsledného blikajícího žlutého stimulu konstantní. Vyšetřovaný je poučen, aby prováděl kontrolu, pokud není blikání sníženo na minimum. K tomu dochází jel-li u konkrétního pacienta svítivost červené a zelené diody stejné. Protanopové si volí nastavení ovládacího prvku, který zvyšuje svítivost červené LED v porovnání s pacienty mající normální barevné vidění, jelikož mají sníženou citlivost na červenou barvu. Deuteranopové si volí nastavení, které naopak zvyšuje jas zelené barvy. [36]

5.3.3 City University Test (CUT)

Tento test byl navržen na základě eliminace chyb, které mohly vznikat při D-15 testu. Druhé vydání obsahuje deset testovacích stránek. Každá stránka má centrální referenční barvu a čtyři okolní testovací barvy. Úkolem vyšetřovaného je identifikovat která ze čtyř testovacích kruhů je nejvíce barevně podobná referenční barvě. Tři testující barvy byly vybrány, aby byly přibližně isochromatické a odpovídali protanopii, deuteranopii nebo tritanopii. Čtvrtá barva je zvolena, aby byla jen o poznání odlišná od základních barev. Výběr několika barevných kombinací je založen na D-15 testu, a proto je CUT test částečně považován za náhradu D-15. Obě první i druhé vydání obsahuje desky, které hodnotí záměny šedé barvy.



Obrázek 7 Screeningová demonstrační deska vlevo, testová demonstrační deska vpravo [38]

Druhá edice obsahuje stránky s méně chromaticky barevnými disky. Ačkoliv test CUT by měl eliminovat problémy spojené s D-15, při testování s CUT existují určité potenciaální problémy. Je možné, že se žádná z testovacích barev blízce neshoduje s referenční barvou, anebo je více než jedna barva blízce shodná. Vyšetřovaný také musí ukazovat anebo slovně popisovat jaká z barev je shodná. [37]

5.4 Pojmenovávací testy

Testy založené na principu pojmenování barvy jsou nejčastěji využívány při testování barevného vidění u profesí jako je pilot, námořník, řidič, strojívedce apod.

5.4.1 FaLant test

Farnsworth Lantern test vnímání barev byl vyvinut pro testování amerického námořnictva v roce 1954. FaLant je také v současné době využíván armádou, letectvem, pobřežní stráží apod., jako finální test potvrzující barevného vidění. Účelem je poskytnout spolehlivé a snadné testování, které oddělí osoby s normálním barevným viděním a velmi mírným stupněm poruchy pro červenou (protanop) a zelenou barvu (deuteranop), od osob s velmi vážným vnímáním barev, které by měly problém vykonat činnost která vyžaduje dobré barevné vidění. Porucha pro vnímání modrá barvy (tritanopie) v tomto testu není zahrnuta, poněvadž je extrémně vzácná. Tritanopové zaměňují červenou a zelenou barvu. [39]



Obrázek 8 FaLant test [40]

FaLant představuje kombinaci dvou červených, zelených a bílých světel najednou, jeden nad druhým, kdy subjekt musí pojmenovat barvy, které vidí. Test se provádí v normálně osvětlené místnosti. Začíná se s červeno-zelenou kombinací anebo zeleno-červenou, všech devět párů světel jsou v nahodilém pořadí po dobu asi dvou sekund. Vyšetřovaný stojí ve vzdálenosti 8 stop (cca 2,5 metru) od přístroje a pojmenovává barvy od horních po dolní. Chyba je chybné označení jedné nebo obou barev světelného páru. Nejsou-li žádné chyby v prvním testování, subjekt prošel. Pakliže dojde k chybě, první testování je zahazeno a přistupuje se k dalším dvou setům devíti párů, které jsou prezentovány. Chybové skóre pro poslední dva sety testů je zprůměrováno, jestliže je průměr více než jedna chyba za set, subjekt neprošel. Vyšetřovaný projde, je-li průměrně jedna chyba nebo méně. [39]

V porovnání s pseudoizochromatickými tabulkami, je FaLant test navržen tak, aby prošli i subjektové s mírnými poruchami barvocitu, které má většina mužské populace, aby mohli sloužit v námořnictví apod. [39]

5.4.2 H-W Lantern test

Existují dva typy A a B Holmes-Wright Lantern testu. Typ B se využívá pro testování námořnictva a rybářského loďstva v Británii a dalších kolonií Spojeného Království. Typ B je určen pro širší použití, využívá se pro letecké účely a královské námořnictvo. Barvy použité v obou typech jsou stejné, dvě červené, jedna tmavě červená pro protanopového pozorovatele, dvě zelené a jedna bílá. Lucerna typu B má jednu clonu o průměru 2,9 úhlových minut, ve zkušební vzdálenosti 6 metrů, která se používá pro demonstrační účely a horizontálně oddělenou dvojici clon, z nich má každá průměr 18 úhlových sekund. [41]

Typ A má tři filtry, které poskytují tři úrovně intenzity, 2000, 200 a 20 μcd . Nejvyšší intenzita se využívá pouze pro demonstrační účely, intenzita 200 μcd je používána při sníženém osvětlení nebo v temnější místnosti, 20 μcd intenzita je určena pouze pro podmínky přizpůsobené tmě. HWA se využívá pro zjištění, zda má osoba s poruchou barevného vidění dostatečné vidění pro identifikaci malých signálních světel, které se používají v letectví. Test se skládá z devíti dvojic zkušebních světel složených z různých kombinací barevných odstínů. Jedno zelené zkušební světlo má modro zelenou barvu, která je pro protanopa pravděpodobnější k zaměnění s barvou bílou. Druhá zelená barva je mírně nažloutlá a je tedy pravděpodobnější, že si ji deuteranop splete s barvou bílou. Jedna z červené barvy má odstín do oranžové a druhá je tmavě červená. Sytě červená byla vybrána, aby byla reprezentativní pro železniční signalizační světla, je tedy větší pravděpodobnost že si ji osoba s protanopií splete. [41], [42]

Několik studií uvádí, že pouze malá část jedinců s vrozenou poruchou vnímání červeno-zelené barvy projde testem HWA. [42]

5.5 Testy na LCD tabulích a monitorech

Testy pro vyšetření barvocitu mohou být součástí také moderních LCD optotypů, anebo LCD obrazovek, kde většinou potřeba přesná kalibrace barev. Nejčastěji se jedná o Ishihara test či test FM100. [43]

Ishihara test je jedním z nejrozšířenějších testů, který se vyskytuje v moderních LCD optotypech. Testy jsou obdobné jako v tištěné verzi, jedná se tedy o nejčastěji číslice zobrazené na optotypu. Ishihara test lze také provést na LCD monitoru, kde bylo zjištěno dle studie Marey [45] že výsledky jsou totožné jako při testování na klasických tabulkách. LCD verze tohoto testu je cenově příznivější a vyhodnocování testů je snazší. [44], [45]

FM100 hue test bývá také součástí některých LCD optotypů a také existují počítačové verze tohoto testu. Jako jediný z testů vyhodnocuje jak kvantitativní skóre, tak porovnává statistické normy, je tedy používán při výzkumech i pro klinické účely. Testování se provádí monokulárně asi z 1 metru. Pacient seřazuje barevné terče pomocí kurzoru dle barevných odstínů a vyplňuje čtyři sady terčů u kterých je vždy fixní první a poslední barevný terč. Celkem je tedy 85 terčů. Vyhodnocuje se polarita a celkové skóre. [43], [46]

Nebyly zjištěny žádné zásadní odchylky ve skórování proti klasickému testu, je tedy možné pro větší testovací pohodlnost test využívat v novějších variantách. [46]

6 Korekce barvocitu

Deficit barevného vidění je dědičná genetická porucha. I když v současné době neexistuje žádný lék, ke zvýšení vnímání barev u postižených lze dosáhnout několika metodami. Jednou z takových metod je například použití barevných filtračních skel. [12]

Ztráta informací při vnímání barevného vidění zhoršuje kvalitu života, ztěžuje zpracování a kvalitu informací a tím negativně ovlivňuje celkový život. Jsme schopni rozlišovat věci a okolí na základně odstínů světla a barevných kontrastů. Osoby s poruchou barvocitu tedy mají menší schopnost rozeznat detaily v našem okolí. Ve výzkumech se potvrdilo, že korekce barvocitu dokáže zlepšit vnímání barevných kontrastů skoro na úroveň osob bez poruchy. [12]

Zdravý člověk od sebe dokáže rozlišit několik miliónů barev, kdežto člověk s poruchou barvocitu dokáže rozeznat pouze tisíce anebo jen pár stovek barev. U více než 150 povolání znamená porucha barvocitu velký problém a osoby tedy danou profesy nemohou vykonávat. Jedná se například o řidiče tramvaje, autobusu či letadla, malíře, dekorátéra, kadeřníka, kosmetičku, doktora, zubaře anebo zubního technika, v potravinářském průmyslu, u výroby léčiv apod. V dětském věku je vnímání barev velmi důležité při budování sebevědomí. [47]

6.1 Barevné filtry

První brýle s barevnými čočkami byly použity v roce 1857 Maxwellem. Tyto brýle měly jednu brýlovou čočku nabarvenou na červenou a druhou na zelenou barvu. Použitím těchto brýlí dokázali subjektivě odlišit více barev než předtím. Na základě těchto výsledků Maxwell usoudil, že po delším použití těchto brýlí by mohlo být možné rozlišit mezi sebou více odstínů červené a zelené. [48], [49]

6.1.1 EnChroma brýlové čočky

EnChroma brýlové čočky selektivně filtrují vlnové délky světla v přesném bodě, ve kterém dochází ke špatné barevné citlivosti. Technologie zvětšuje kontrast mezi červenými a zelenými barevnými signály, zmírňuje příznaky barvosleposti. Brýlové čočky jsou vyvinuty ke korekci anomální trichromázie, která je nejčastější. [50]

Dle studie L. Gómez-Robledo [51] jsou tyto brýlové čočky efektivní spíše pouze pro červeno-zelenou poruchu vnímání nikoliv pro korekci tritanomálie (modro-žluté). [51]

Dle studie Almutairi [52] použití těchto brýlí subjektům nepomohlo v korekci barvocitu. Subjekty si nebyly vědomi žádného zlepšení ve vidění. Efekt brýlových čoček je tedy na základě studií natolik nízký, že pomáhá zlepšit pouze vnímání některých barevných odstínů. EnChroma brýle mohou zlepšit vnímání některých odstínů, ale nikdy nestimulují normální vidění barev. [52]



Obrázek 9 EnChroma brýle pro protanopii [53]

6.1.2 ChromaGen brýlové čočky

ChromaGen brýlové čočky jsou jedny ze systémů tónovaných brýlových čoček, které jsou určeny k podpoře vnímání barev u pacientů s poruchami barevného vidění. Čočkové filtry ChromaGen fungují tak, že mění vlnovou délku každé barvy vstupující do jednoho nebo obou očí, což zlepšuje vnímání barev a jejich rozlišení. Brýlové čočky jsou dostupné v jednoohniskové variantě, astigmatické a multifokální. Pro kosmetickou úpravu barvených čoček je dostupná neutrální šedá povrchová úprava. [54]

ChromaGen brýle jsou jediné FDA schválené optické pomůcky, které jsou určeny pro pacienty mající problémy se čtením spjatým s dyslexií a poruchou barvocitu. ChromaGen brýlové čočky mění vlnové délky světla, které vstupuje do obou očí, čímž se vyrovná rychlost informací putujících po neurologických drahách do mozku. [55]

6.1.3 Colorlite barevné filtry

Colorlite barevné filtry byly uvedeny na trh v roce 1998. Set představuje 10 filtrů, které jsou rozděleny do dvou skupin a je navržen pro protanopy (protanomálie) a deuteranopy (deuteranomálie). Každý skupina obsahuje 5 filtrů určených pro různé stupně barevné vady. Jednotlivé filtry mění vlnové délky světla vstupujícího do oka a zlepšují tak rozpoznávání barev.

Filtry jsou zasazeny do objímek, stejných jako jsou čočky používané při refrakci, aby je při vyhodnocení mohl optometrista pohodlně použít zároveň s pseudoizochromatickým testem vyvinutým společností Colorlite. Tato technologie byla také zabudována do některých chytrých televizí jako možné řešení poruch barvocitu. [56], [57]

Výrobce uvádí, že s brýlemi by mělo být dosaženo výrazně lepších výsledků u testů na barvocit, avšak není to garantováno. Brýlové čočky vedou k výraznému zlepšení ve více než 95 % případů poruchy barevného vidění, a objeví se s nimi barvy a odstíny které dříve nebyly rozpoznány. Není doporučeno brýle používat v noci, jelikož absorbují méně než 40 % propuštěného světla. Důležitá je adaptace na brýlové čočky, která trvá několik minut. Po úplné adaptaci by měla být bílá zeď viděná jako bílá. [56], [57]



Obrázek 10 Colorlite brýle [58]

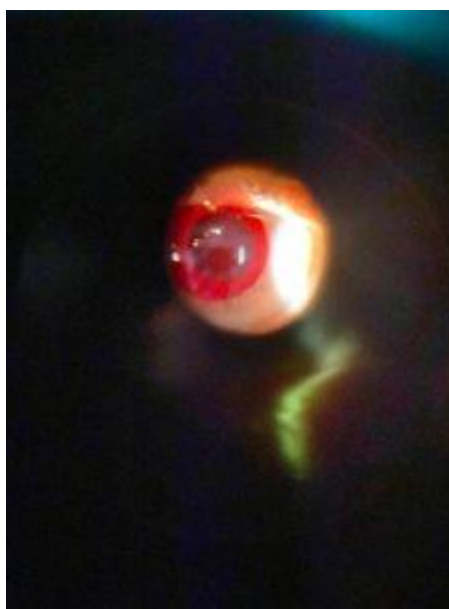
6.2 Kontaktní čočky

Korekce barvocitu kontaktními čočkami umožňuje korekci celého zorného pole a vyvaruje se tedy nekorigovanému perifernímu vidění, jak je tomu u brýlových čoček. Kontaktní čočky jsou barvené, je tedy třeba předejít možné toxicitě. [59]

Již v roce 1837 Seebeck navrhl použití filtrů pro pomoc barevným vadám. V roce 1894 Mauthner doporučil použití červeného filtru pouze před jedno oko. Cornsweet tuto myšlenku zpopularizoval pod názvem „Lék na barvoslepost“ a popsal, jak by subjekt s poruchou barvocitu mohl odlišit vnímání barev před každým okem. [59]

6.2.1 X-Chrome kontaktní čočky

Jedná se o červenou tvrdou korneální polymethakrylovou kontaktní čočku, které se aplikuje na rohovku pouze na nedominantní oko. Je dostupná i ve formě měkké kontaktní čočky. Používají se pro červeno-zelenou poruchu barvocitu. Kontaktní čočka propouští světlo v podstatě pouze v červené oblasti, od 590 do 700 nm. Vynálezce X-Chrome kontaktních čoček uvádí, že není účinná pro tritanomálii a je méně účinná pro dichromaty než pro anomální trichromaty. Není aplikovatelná pro pacienty s patologií rohovky nebo monokulárním viděním. Redukuje zrakovou ostrost na 20/40 nebo více, a většina nositelů nesnáší nošení těchto čoček při sníženém osvětlení či v noci. Dále se uvádí že čočka není lékem nýbrž pouze pomůckou, která má zlepšit barevné vidění. Přestože se kontaktní čočka aplikuje pouze na jedno oko, nositel může porovnávat různé kontrasty mezi oběma očima. [59], [60]



Obrázek 11 X-Chrome kontaktní čočka [62]

Dle studií byly prokázány změny ve výsledcích po nošení červené kontaktní čočky na pseudoizochromatických tabulkách, ale nebyly prokázány změny ve vnímání odstínů tedy znatelné zlepšení na Farnsworth D-15 či FM 100 testu. U pseudoizochromatických tabulek nebylo dokázáno, zda pacient vidí barvy lépe, anebo je pouze větší jas mezi ostatními barvami, a proto je tedy schopnější rozpoznat jednotlivé obrazce od sebe. Kontaktní čočky je tedy doporučeno používat pro možné zlepšení vnímání barev například na volnočasové aktivity, neměly by ale být použity při testování zraku u aktivit které vyžadují bezpečnost. [61]

6.2.2 ChromaGen kontaktní čočky

Jedná se o měkkou kontaktní čočku navrženou pro zlepšení barevného vnímání pro pacienty s poruchou barvocitu. Na rozdíl od X-chrome čočky je barvena pouze část zornice, je tedy lepší kosmetický vzhled. ChromaGen je unikátní systém barevných čoček specifické hustoty a odstínu. Fungují jako filtry tak, že mění vlnovou délku, která vstupuje do jednoho nebo obou očí. Vyrábějí se ve více barevných variantách, odstínech a je možná i teoretická individualizace pro optimalizaci dané poruchy. Jsou dostupné jak ve sférické, tak v tórické verzi. [63]



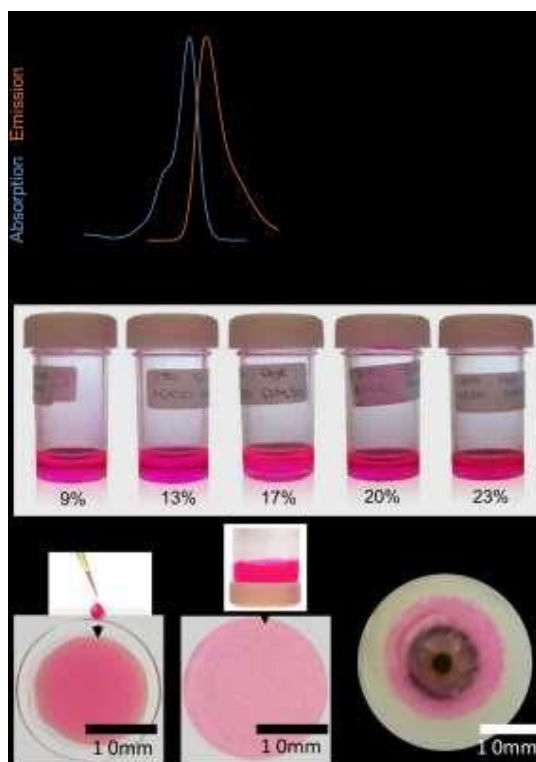
Obrázek 12 Chromagen kontaktní čočky
[65]

Výrobce uvádí výrazné zlepšení barevného vidění a každodenního života u více než 97 % osob. Dle výzkumů bylo zjištěno, že nositelé měly zlepšení u Ishihara tabulkových testech, které lze vysvětlit arteficiálním zlepšením jasu. Výkon testů na Farnsworthově lucerně se však nezlepšil, výsledky testů D-15 byly smíšené. Obecně se zdá, že deuteranopové (subjekty trpící deuteranomálií) pocíťovaly větší efekt než protanopové (trpící protanomálií).

Tato zjištění tedy odpovídají dřívějším zprávám o X-chromě čočkách. Ačkoliv všichni jedinci testování uvádí lepší vnímání barev s čočkami ChromaGen, byly patrné výrazné problémy s viděním při slabém osvětlení. Problémy s posouzením vzdálenosti a pohybu a s řízením byly minimální. Barevné kontaktní čočky tedy neposkytují pacientům „normální“ barevný vjem, zejména nezlepšují schopnost rozpoznávat a pojmenovávat barvy, což může snižovat motivaci u lidí, kteří si chtějí tyto čočky pořídit kvůli povolání, z něhož jsou ze zákona vyloučeni kvůli poruše barvocitu. [54], [63], [64]

6.2.3 Barvené kontaktní čočky Atto barvívem

Ve studii bylo použito barvivo 565 (derivát rhodamínu). Barviva byla zesíťovaná do kontaktních čoček a barvila se po dobu 30 sekund. Bylo zjištěno, že měkké kontaktní čočky mají lepší schopnost absorpce barvy oproti tvrdým kontaktním čočkám, a také mají lepší transmisibilitu. Čočky se uchovávaly ve fyziologickém roztoku, kde byla zjištěna reakce, která po 2 hodinách v roztoku přestala a transmisibilita se ustálila. Kontaktní čočky je možné barvit v různé koncentraci barvy, je tedy možné zajistit vysokou úroveň přizpůsobení procesu. Tyto kontaktní čočky fungují na stejném principu jako již výše zmíněné barevné čočky, tedy jako filtr měnící vlnové délky světla vstupujícího do oka. Barvení a výroba nejsou cenově náročné.



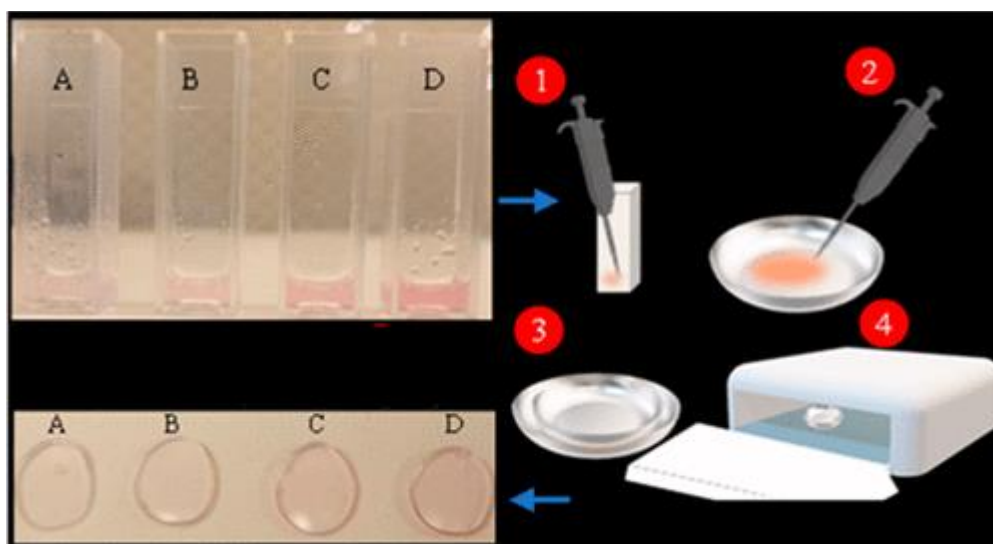
Obrázek 13 Derividát rhodamínu (Atto 565) a barvené kontaktní čočky [66]

Atto barvivo není nijak toxické k lidským fibroblastům a lidským buňkám na rohovce. [49]

Stejně jako Enchroma kontaktní čočky zvýšily schopnost vnímání barev a zvýšily kontrast v exteriéru u osob trpících poruchou barvocitu. Obě čočky však neprošli Ishihara testem, což naznačuje že je potřeba přizpůsobit kontaktní čočku každému pacientovi zvlášť. Barvené čočky Atto barvivem se ukázaly jako lepší v interiéru oproti Enchroma čočkám, která pro většinu subjektů byla naopak pohodlnější venku. Oboje kontaktní čočky tedy nejsou schopné zprostředkovat normální barevné vidění. [49]

6.2.4 Kontaktní čočky se zlatými nanokompozity

Barevné filtrační kontaktní čočky byly syntetizovány s použitím nanočástic zlata s HEMA a EGDMA základním polymerem, resp. síťovadlem. Velikost nanočástic byla stanovena pomocí TEM a byla změřena jejich transmisní spektra. Byly použity tři sady zlatých nanočástic o různých velikostech a to 12, 40 a 80 nm. Z těchto sad byly vybrána optimální nanokompozita. Výzkum ukázal, že přenosová spektra 12 a 40 nm zlatých nanokompozitních čoček byla velmi srovnatelná s čočkami z komerčních a výzkumných čoček pro pacienty s poruchou barvocitu. Dále vlastnosti zadržování vody a smáčivosti vyrobených nanokompozitů, byly lepší než u několika komerčně vyrobených čoček. Byl tedy učiněn závěr, že tyto čočky mohou být použity jako pomůcka pro pacienty s poruchou barvocitu. Výsledky také ukázaly, že tyto čočky jsou biokompatibilní s makrofágy. Propustnost pro kyslík materiálu HEMA je nižší než u hydrogelů, proto po testování byla provedena kopolymerizace HEMA s hydrogelem na bázi silikonu pro zajištění vysoké propustnosti kyslíku kontaktní čočky. [67]

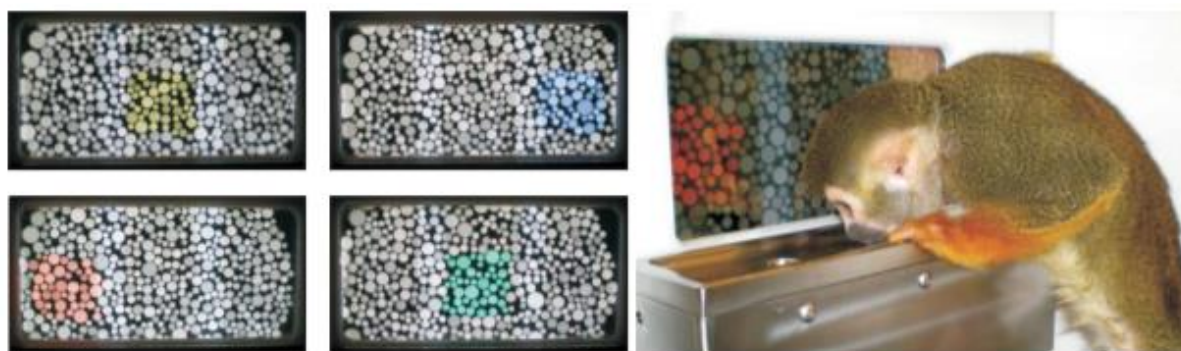


Obrázek 14 polymerizované nanokompozitní čočky v různých koncentracích (měřítko: 10 mm) [68]

6.3 Další varianty korekce

Chytré brýle patří mezi další možnosti, jak pomoci lidem s poruchami barevného vidění. Výhodou chytrých brýlí oproti mobilních zařízení je jejich využívání bez použití rukou. Chytré brýle mají vysoký potenciál pro zlepšení vnímání barev u lidí s poruchami. Aplikaci lze použít k řešení časově nekritických případů jako například rozlišení barev oblečení, či jiné identifikaci barev. Výrobci chytrých brýlí pracují na novějších lepších verzích. [69], [70]

Dále také proběhly studie genové terapie na myších a primátech. Ve studii Mancuso [71] byl dospělá opice, která byla barvoslepá už od narození, přidán třetí typ čípkového pigmentu do dichromatické sítnice, což poskytuje receptorový základ pro trichromatické vidění. Tím se otevřela nová cesta ke zkoumání požadavků pro vytvoření nervových obvodů pro nový rozměr barevného vnímání. Klasické experimenty se zrakovou deprivací vedly k očekávání, že nervová spojení vytvořená nově, ne od narození, nebudou vhodně zpracovávat vstupní příjem. Proto se předpokládalo, že léčba vrozených poruch bude neúčinná. Ukázalo se však, že přidání třetího opsinu u dospělých primátů s červeno-zeleným barevným deficitem bylo dostatečné k vytvoření trichromatického barevného obrazu. Trichromázie tedy může vzniknout přidáním třetího čípků a nevyžaduje raný vývojový proces. Tato studie poskytuje pozitivní výhled pro další možnosti genové terapie na lidech v této oblasti. [71]



Obrázek 15 Příklady barevných podnětů [71]

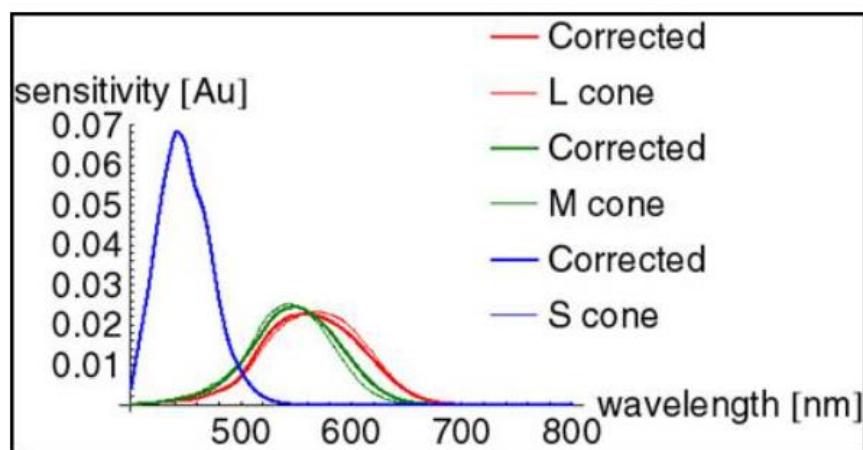
7 Experimentální část

7.1 Úvod

Experimentální část bakalářská práce se zabývá barevnými filtry využívající se ke korekci barvocitu a také se zaměřuje na Farnsworth D 15 panel test. Každá kapitola bude vždy rozdělena na dvě části, kde budou popsány obě problematiky.

První část zabývající se barevnými filtry viz kapitola 6.1.3., byla zvolena na základě snahy ověření propustnosti vlnových délek daných filtrů, tedy jejich účinek pro korekci poruch barvocitu. Korekční filtry slouží pro poruchu červeno-zelené barvy.

Výrobce filtrů uvádí princip filtrů na bázi posunutí anomálního čípku na místo skutečného čípku. Filtr by tedy měl fungovat na principu posunutí vlnové délky nesprávně fungujícího čípku. Barevné filtry byly vyvinuty výlučně pro odstranění poruchy. Povlak je nanesen tak, aby světelné spektrum přecházející přes filtr nebylo změněné, takže člověk trpící poruchou barvocitu dostane stejné vzruchy jako normálně vidící. Povlak je zvolen tak, aby ovlivňoval střední vlnové délky, tam kde je potřeba náprava. Navrstvení by mělo mít co nejmenší dopad na ostatní receptory. Účinek filtru není bezchybný, ale náprava čípků je velmi blízko křivkám znázorňující schopnost vnímání normálně vidícího. Výsledek lze tedy interpretovat tak, že citlivost nesprávného čípku se přibližuje správně fungujícímu viz obr. 16. [72]



Obrázek 16 Působení filtru na čípky citlivé na světlo [72]

Filtry by tedy dle výrobců barevných filtrů měly fungovat na principu posunu spektrální citlivosti anomálního čípku na jeho správnou pozici druhým principem fungování je ovlivnění velkých gangliových buněk zrakového nervu. [73]

U čípků však nedojde k posunu polohy absorpčních maxim, pouze se v závislosti na propustnosti filtrů změní jejich výška absorpce. Neplatí tedy zmiňovaný posun polohy anomálního čípku na místo správného. Normální čípky budou také zasaženy světlem lámajícím se přes filtr. Velké gangliové buňky nemají barevnou citlivost, jelikož nedokáží rozlišovat signály od čípků. Mají ale velkou citlivost na světlo a také velké receptivní plochy. Jejich důležitou vlastností, která se pojí s barevnými filtry je reakce pouze na krátkodobé změny světelných podnětů, trvalé změny jako například změna barvy nejsou těmito buňkami zaznamenány. [73]

Dle Patterson SS [74] má vnitřně fotosenzitivní gangliová buňka sítnice na starosti cirkadiální rytmy a pupilární reakce, tedy tvrzení o ovlivňování velkých gangliových buněk na základě zlepšení poruch barvocitu není správná.

O zlepšení výsledků na základě vyššího kontrastu vzniklého za použitím filtrů se pojednává vzácně. [73]

Druhá experimentální část se zabývá porovnáním fyzického Farnsworth D-15 panel testu viz kapitola 5.2.2., a dostupné počítačové verze testu ve snaze zjistit a porovnat funkčnost jednotlivých testů. Mnoho testů pro zjištění poruchy barvocitu je dostupných online, avšak není úplně jistá jejich funkčnost a přesnost. Barvy zobrazující se na monitorech či displejích zařízení mohou být zkreslené, například kvůli kvalitě, tudíž mohou být ovlivněné i následné výsledky testů.

7.2 Předpoklady – cíle

Cílem první experimentální části bakalářské práce je naměřit propustnost jednotlivých filtrů a pokusit se objasnit jejich funkčnost v porovnání s vlnovými délkami jednotlivých čípků.

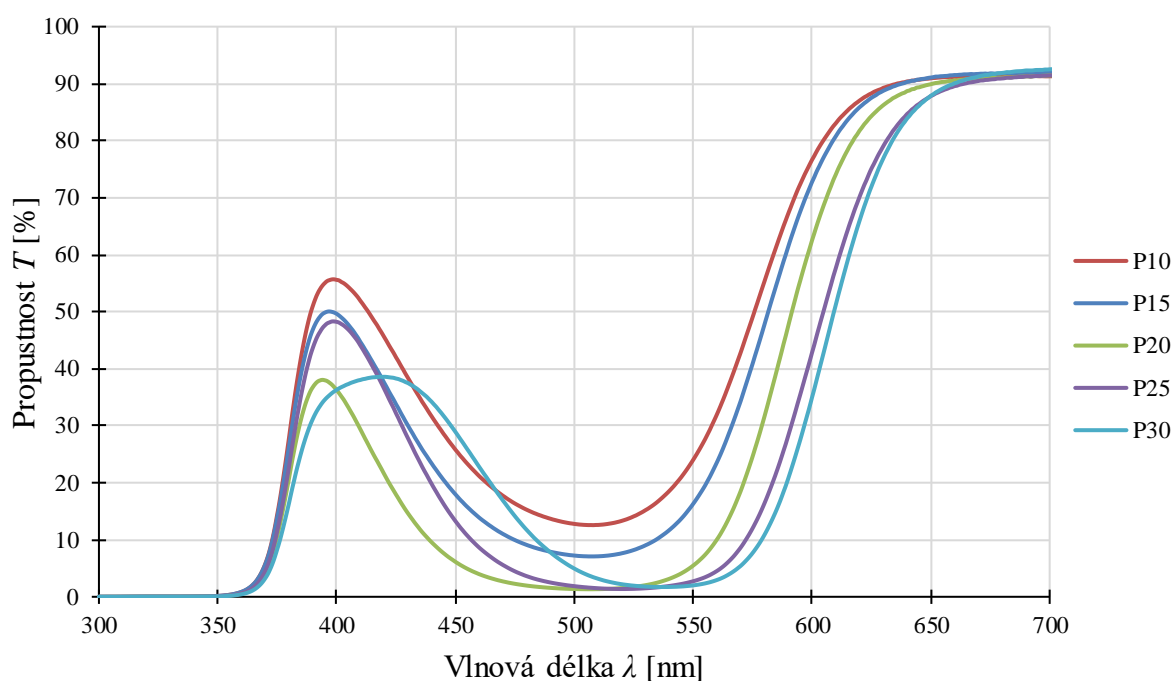
Druhá experimentální část se zabývá Farnsworth D-15 panel testem, kde budou změřeny reflektance a intenzity každého reálného terče i počítačového D-15 testu. Jednotlivé hodnoty budou porovnány. Předpokladem je lepší určení barev na reálných terčích, jelikož jsou barvy promítány širším spektrem barev ze slunečního záření, kdežto zobrazení barev na monitoru je sestaveno pouze ze tří základních barev RGB.

Obě experimentální části byly provedeny a naměřeny ve fyzikálních laboratořích na FBMI ČVUT.

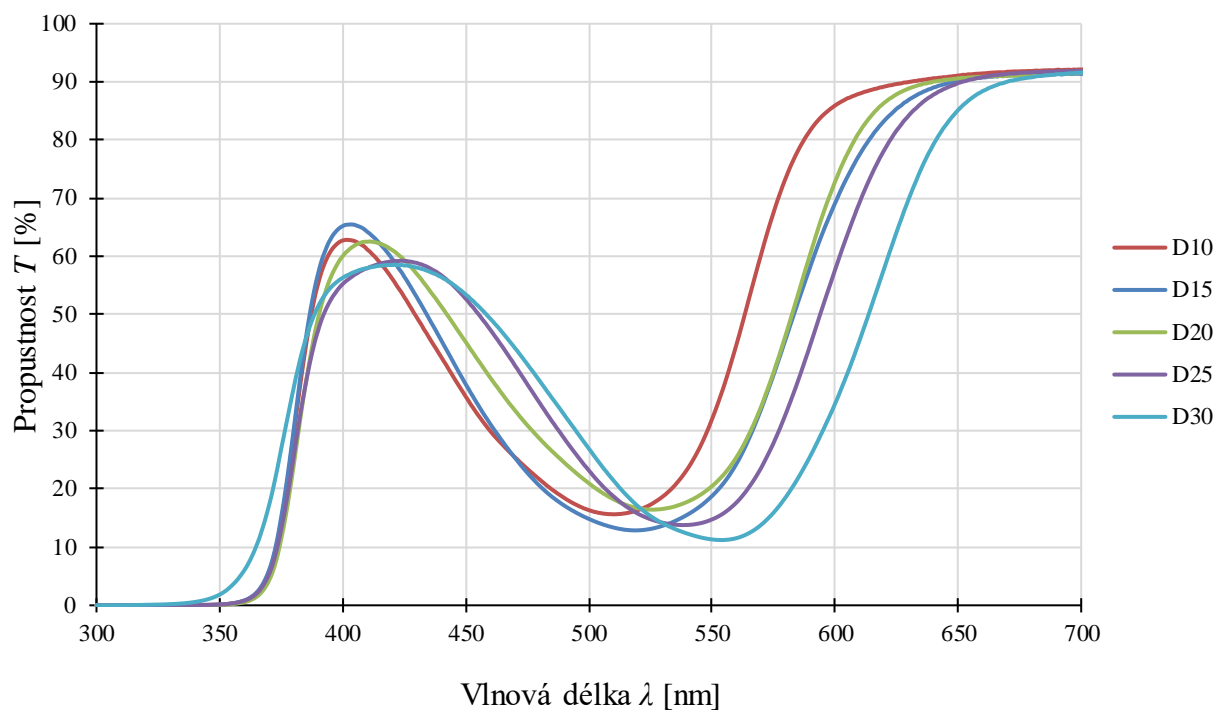
7.3 Měření barevných filtrů

V první části byly změřeny barevné filtry od firmy Colorlite na spektrofotometru UV-2600i od firmy Shimadzu.

Sada filtrů obsahuje 10 párů barevných čoček P 10-30 (protanomálie), D 10-30 (deuteranomálie). Každému filtru byla na spektrometru změřena propustnost v rozmezí 300-800 nm. Hodnoty byly následně přeneseny do excelu, kde byly vytvořeny grafy jednotlivých propustností.



Graf 1 Propustnost T [%] pro filtry P 10-30

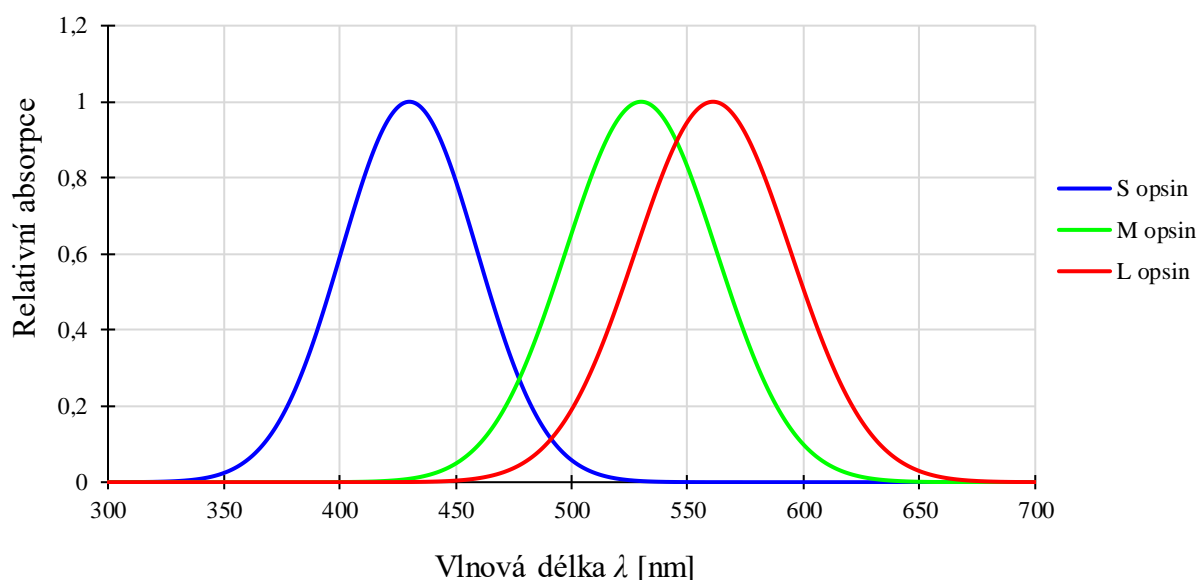
Graf 2 Propustnost T [%] pro filtry D 10-30

Pro lepší porozumění fungování filtrů je třeba se podívat na senzitivitu jednotlivých čípků. Vzhledem k tomu, že nebyly nalezena data senzitivity jednotlivých čípků, ale pouze obrázek grafu, pokusili jsme se o namodelování dat. Pro maxima hodnot čípků byly použity hodnoty 430 nm pro modrá, 530 nm pro zelený a 561 nm pro červený čípek. [75]

Protože tvar senzitivity jednotlivých čípků je podobný tvaru Gaussovy funkce, byla použita funkce pro normální rozdělení pravděpodobnosti (viz vzorec 1) s paramenty μ (střední hodnota) a σ^2 (rozptyl).

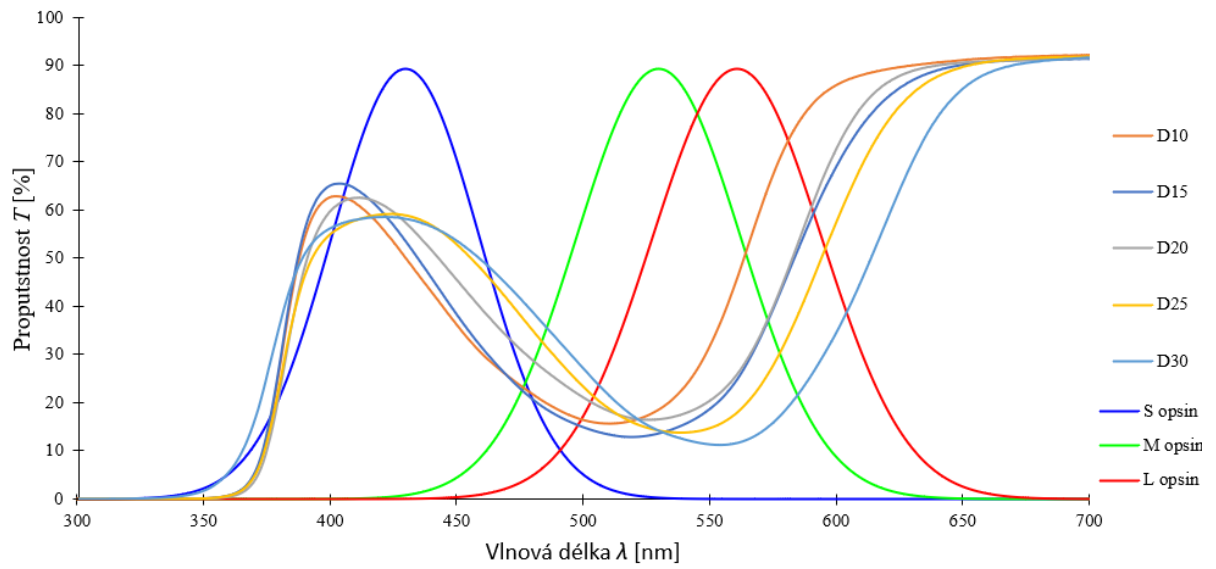
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Pro naše data jsme za střední hodnotu μ dosadili hodnotu maxima jednotlivých opsinů a za rozptyl σ^2 hodnotu 2, která nejvíce kopírovala průběh senzitivity jednotlivých čípků. Senzitivita (relativní absorpce) byla následně normovaná v rozmezí 0-1 jak je vidět v grafu č.3.

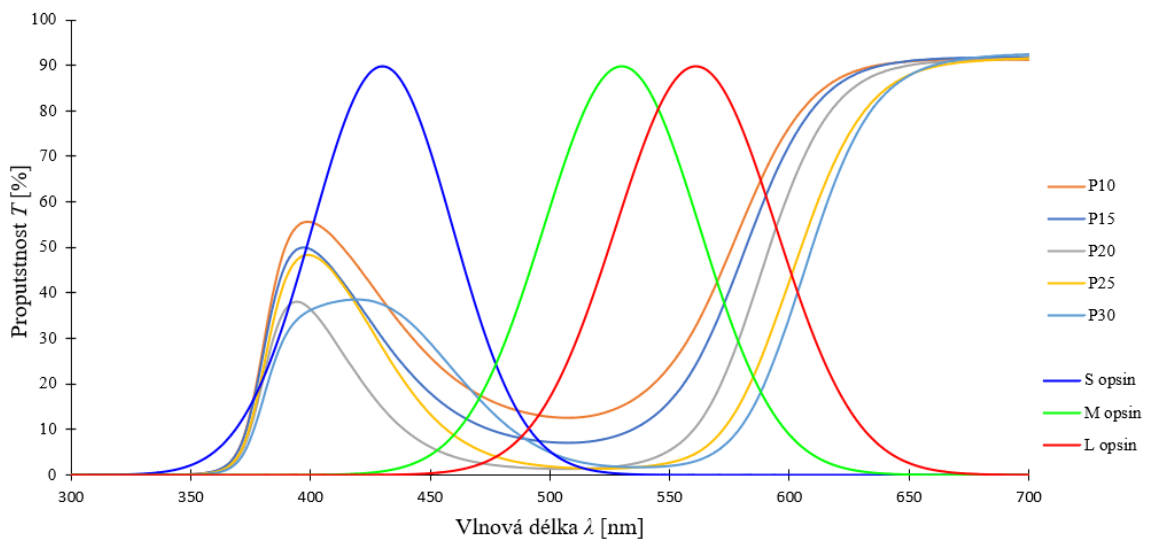


Graf 3 Vlnové délky čípků

Graf č.3 byl proložen do grafu č.1 a č.2 pro porovnání senzitivity jednotlivých čípků se spektrem, které propouštějí filtry.



Graf 4 Čípky s propustností T [%] pro filtry D 10-30



Graf 5 Čípky s propustností T [%] pro filtry P 10-30

Z grafu č. 4 a č.5 lze vidět vztah propustnosti jednotlivých filtrů v závislosti na vlnových délkách jednotlivých opsů.

Pro získání celkové intenzity I dopadajícího světla na jednotlivé čípky v oblasti vlnových délek od 300 do 700 nm byla použita následující funkce

$$I = \sum_{k=300}^{700} f(k) \cdot g(k), \quad (2)$$

kde $f(k)$ je funkce naměřeného spektra jednotlivých filtrů a $g(k)$ je funkce senzitivity jednotlivých čípků.

Celkové intenzity byly následně vloženy do poměru na základě předpokladů:

1) u filtrů sloužících pro Deuteranomálii (D 10-30) bude snižován vjem pro červenou barvu, aby vystupovala barva zelená, tedy bude růst poměr sum M opsů (pro zelenou barvu) a L opsů (pro červenou barvu) – tabulka 1

2) u filtrů určených pro Protanomálii (P 10-30) se naopak očekávalo, že nebudou propouštět zelenou barvu, tedy bude rostoucí poměr L opsů ku M opsům, tedy čípku pro červenou barvu ku čípku pro barvu zelenou – tabulka 2

Vypočtená intenzita určuje vnímání jednotlivých čípků pro vlnové délky daných filtrů.

Tabulka 1 Tabulka poměru M/L opsů pro D 10-30 filtry

Filtr	D 10	D 15	D 20	D 25	D 30
M opsin	2445	1732	2022	1794	1642
L opsin	4107	2871	3065	2440	1768
Poměr M/L	0,595	0,603	0,660	0,735	0,929

Tabulka 2 Tabulka poměru L/M opsů pro P 10-30 filtry

Filtr	P 10	P 15	P 20	P 25	P 30
L opsin	3309	2769	1872	1246	1058
M opsin	1885	1351	625	419	485
Poměr L/M	1,755	2,050	2,995	2,974	2,181

7.4 Měření a porovnání F D-15 panel testů

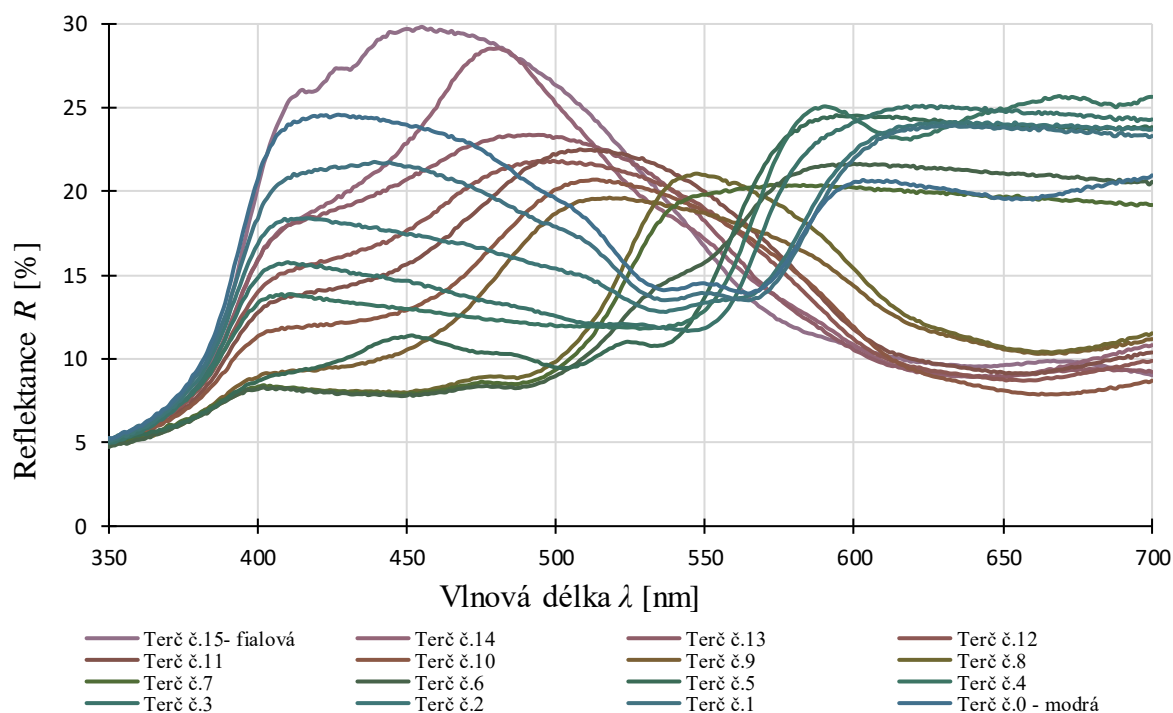
Druhá část se zabývá Farnsworth D-15 panel testem, kde byla naměřena reflektance jednotlivých terčů testu na spektrofotometru UV-2600i od firmy Shimadzu pomocí integrační koule, pro různé vlnové délky (350–700 nm). Měření bylo prováděno v modulu Spectrum, který řídí přístroj a skenuje přes rozmezí vlnových délek a následně měří hodnoty absorpance, transmittance a reflektance.

Pro kalibraci byl použit práškový bárium sulfát, který splňuje podmínky bílé barvy, tedy naší baseline.

Jako první byla změřena reflektance jednotlivých terčů testu Farnsworth D-15 test od firmy Good-Lite. Terče jsou očíslovány čísly od 15-0.



Obrázek 17 Terče č. 15-0



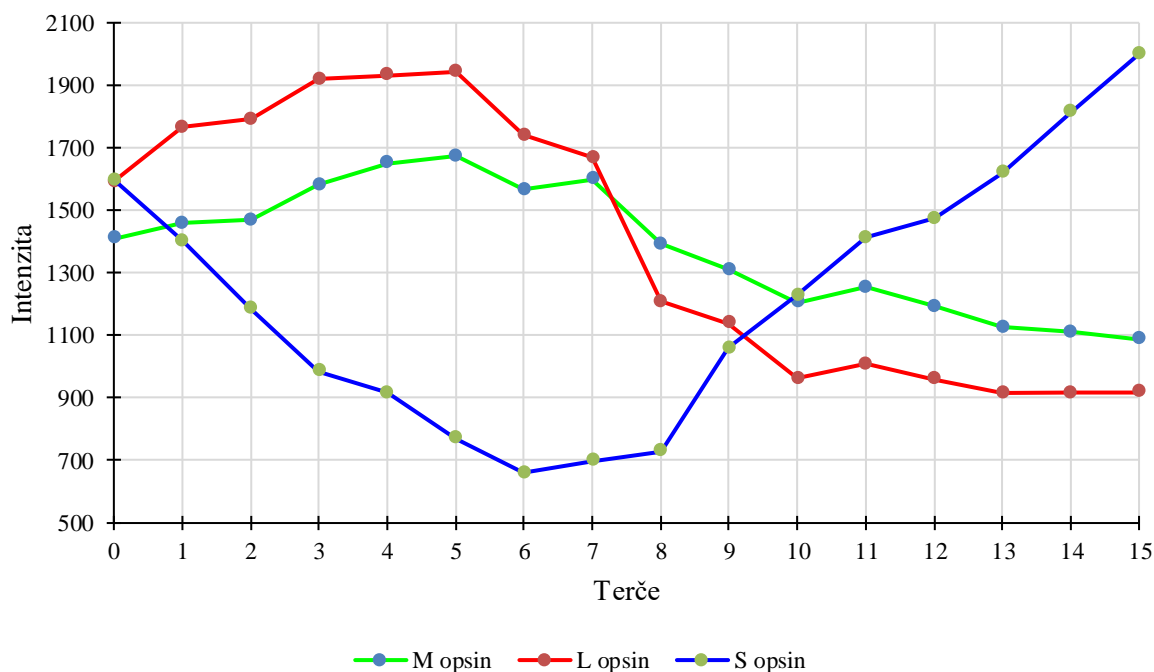
Graf 6 Reflektance R [%] Farnsworth D-15 panel testu

Pro vyhodnocení vnímání barev jednotlivých terčů byly opět vypočítány celkové intenzity dopadající na jednotlivé čípky dle vzorce 2, kde $f(k)$ je tentokrát naměřené spektrum jednotlivých terčů. Hodnoty celkové intenzity pro jednotlivé čípky byly zapsány do tabulky č. 3 a vykresleny do grafu č.7.

Tabulka 3 Sumy intenzit terčů fyzického testu pro jednotlivé čípky

Terč č.	M opsin	L opsin	S opsin
15	1087	918	2000
14	1110	917	1814
13	1127	916	1619
12	1192	959	1473
11	1253	1008	1413
10	1206	962	1229
9	1309	1138	1059
8	1393	1207	730
7	1599	1669	699
6	1567	1739	661
5	1674	1943	769
4	1650	1932	915
3	1582	1919	986
2	1469	1791	1186
1	1459	1766	1403
0	1409	1591	1596

Červeně označené maximální hodnoty a žlutě minimální hodnoty intenzit.



Graf 7 Intenzita čípků pro terče D-15 testu

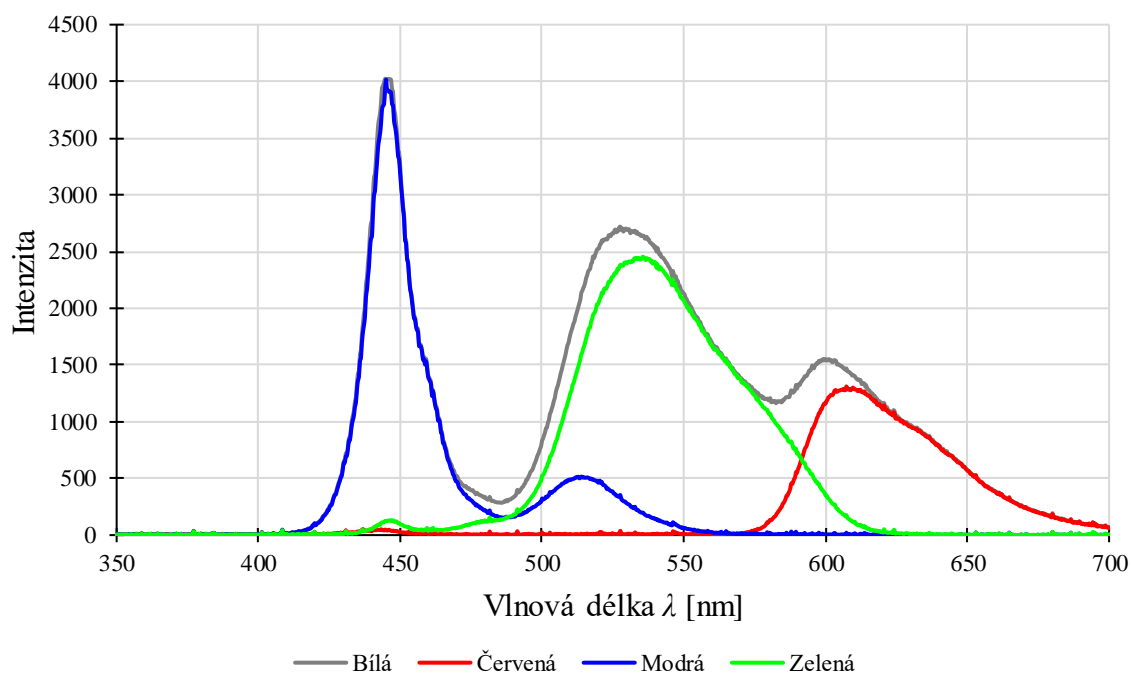
Principem druhým byl měřen test na monitoru, kde byl použit UV – VIS vláknový spektrometr USB2000+ od firmy Ocean optics s rozsahem vlnových délek 200-900 nm. Byla naměřena intenzita v countech (počet detekcí pro danou vlnovou délku) jednotlivých terčíků zobrazených na počítačovém monitoru LS24F350FHUXEN MO SAMSUNG LCD S24F350 24" PLS LED 16:9, o rozlišení 1920x1080 v automatické kalibraci (jas 100 %, kontrast 75 %, ostrost 60 %) a monitoru notebooku HP 250 G6 o rozlišení 1920 x 1080.

Pro počítačovou verzi Farnsworth D-15 panel testu byl zvolen dostupný online test [76], kde byla naměřena intenzita jednotlivých terčů na spektrometru.

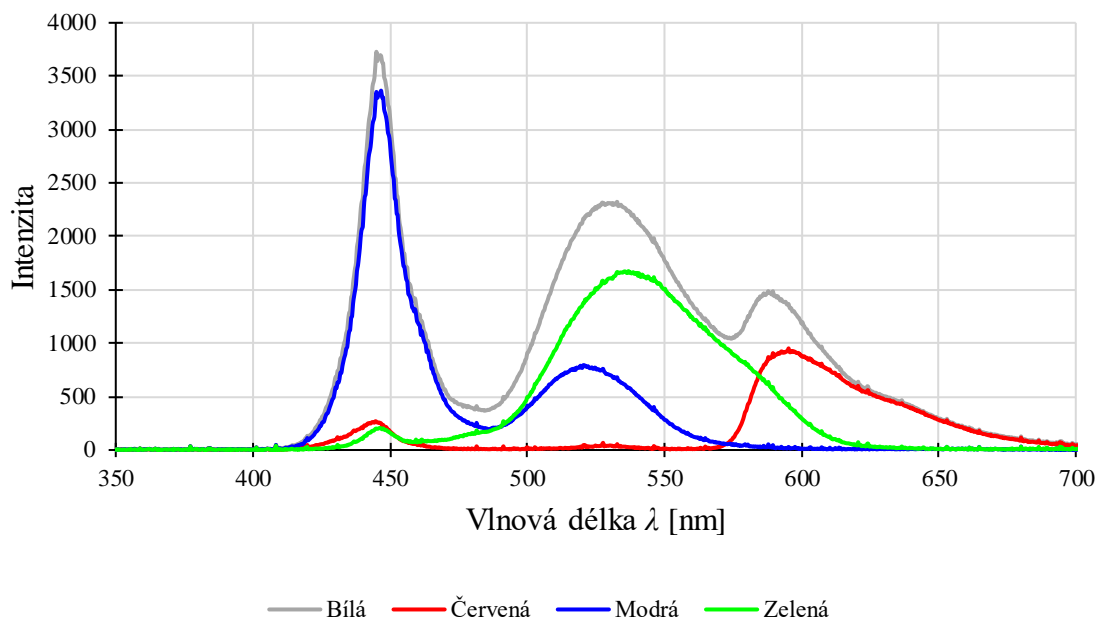


Obrázek 19 Farn. D-15 panel test online terč č.15-0 [76]

Na spektrometru byly nejdříve změřeny vlnové délky základních barev jak na monitoru počítače, tak na monitoru notebooku. Tyto hodnoty sloužily k zjištění maxima bílé barvy a pro znázornění, jak jednotlivé čípkky vnímají barvy na monitorech počítače zobrazující barvy RGB.

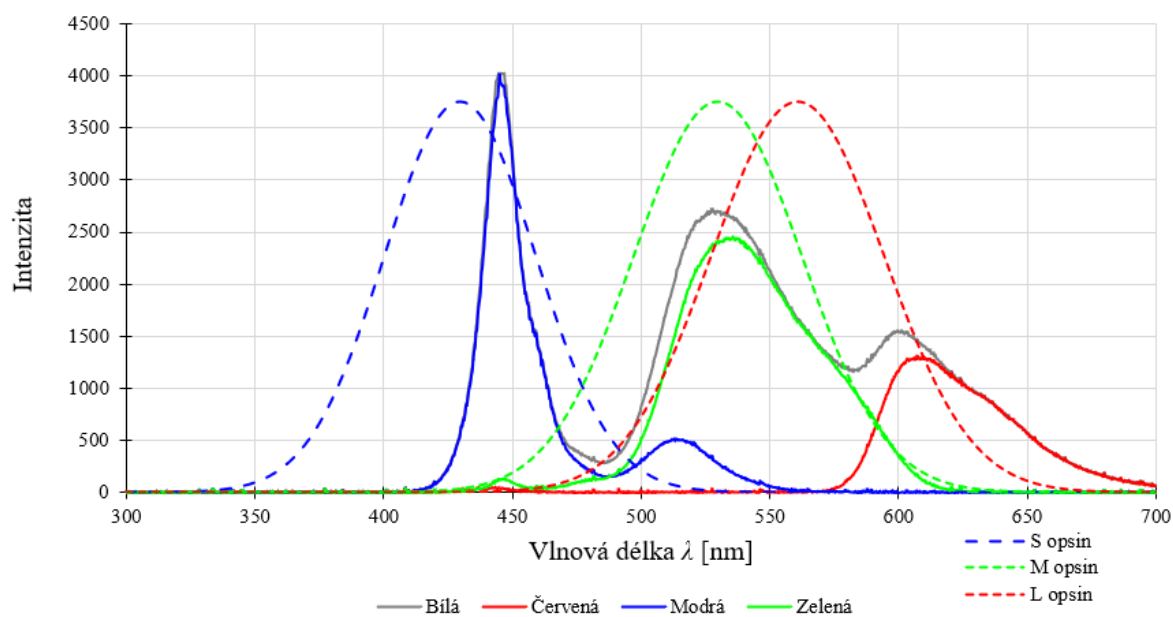


Graf 8 Vlnové délky základních barev na monitoru počítače

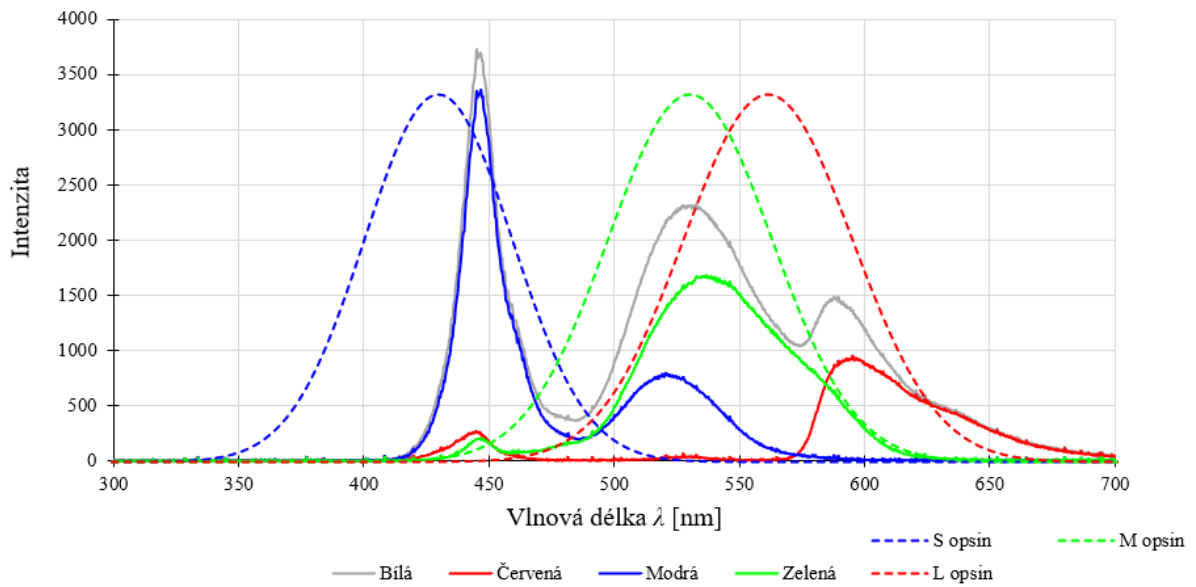


Graf 9 Vlnové délky základních barev na monitoru notebooku

Následně jsme proložili grafy základních barev grafem čípků pro lepší pochopení vnímání barev na monitorech.

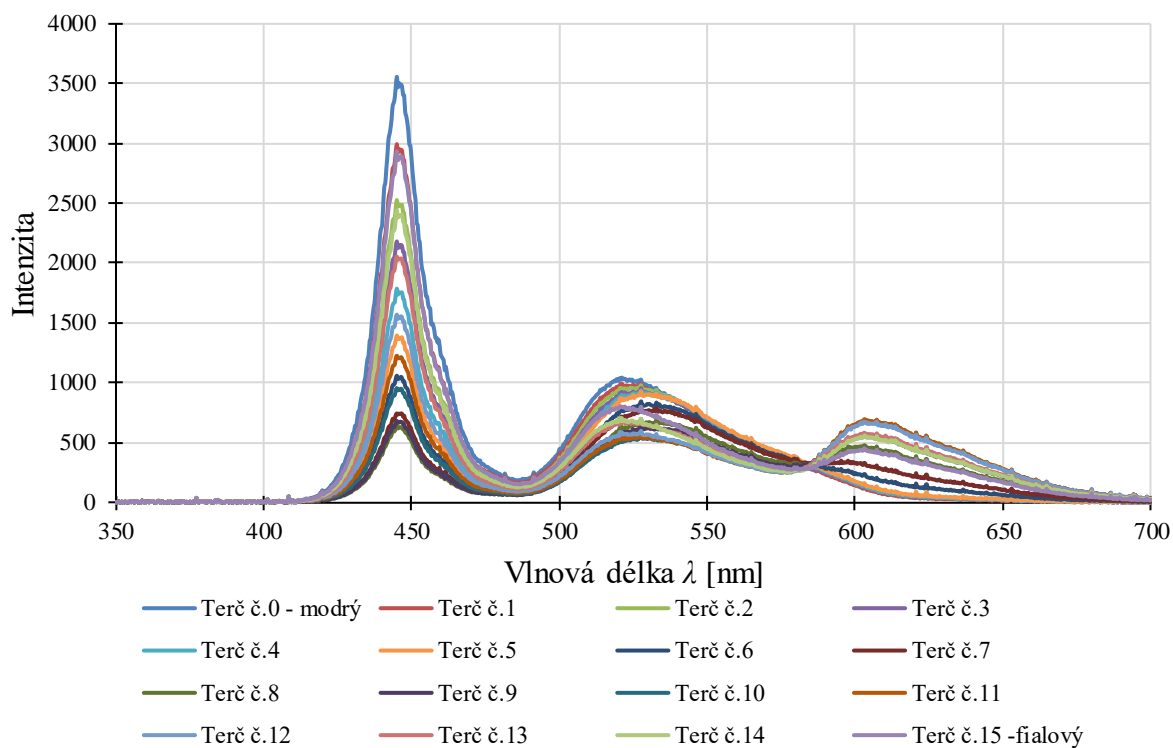


Graf 10 Vlnové délky základních barev na monitoru počítače proloženy vlnovými délkami čípků



Graf 11 Vlnové délky základních barev na monitoru notebooku proloženy vlnovými délkami čípků

Naměřené hodnoty byla přepočteny pomocí poměrné hodnoty 30 (maximum reflektance fyzického D-15 testu) a maximem bílé barvy (4021,029 nm) pro další možné porovnání s reálným testem.



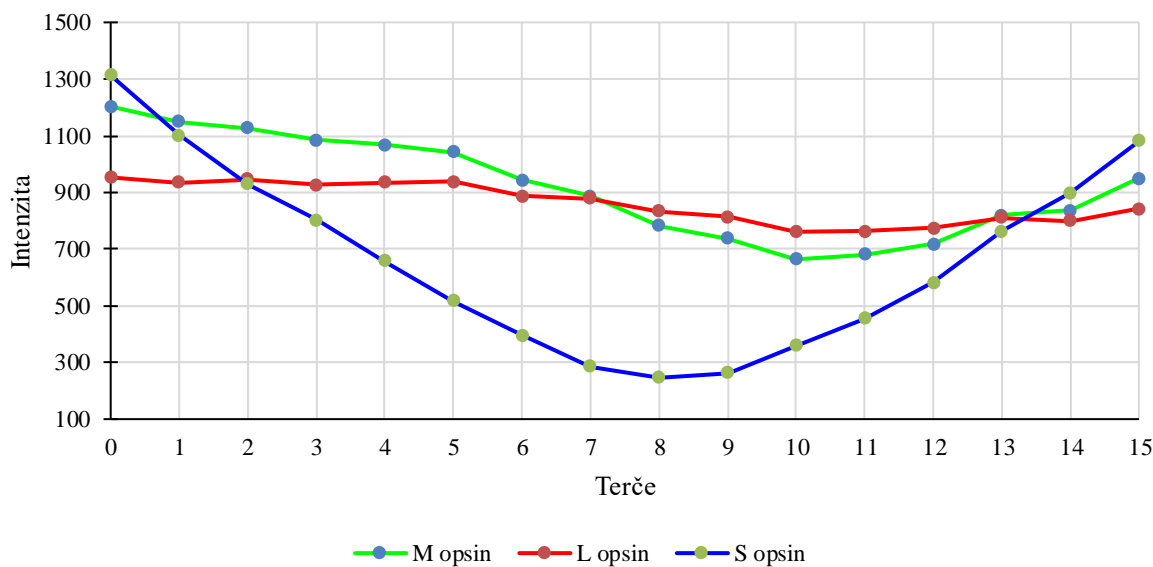
Graf 12 Intenzita Farnsworth D-15 terčů na monitoru

Pro vyhodnocení vnímání barev jednotlivých terčů zobrazených na monitoru počítače byly opět vypočítány celkové intenzity dopadající na jednotlivé čípky dle vzorce 2, kde $f(k)$ je tentokrát naměřené spektrum jednotlivých terčů. Hodnoty celkové intenzity pro jednotlivé čípky byly zapsány do tabulky č. 4 a vykresleny do grafu č.13.

Tabulka 4 Sumy intenzit terčů testu na monitoru počítače pro jednotlivé čípky

Terč č.	M opsin	L opsin	S opsin
15	949	842	1083
14	836	798	897
13	819	812	763
12	719	773	581
11	682	764	455
10	664	761	360
9	738	813	262
8	783	832	246
7	886	879	287
6	944	888	396
5	1042	939	518
4	1067	936	657
3	1084	927	803
2	1127	947	930
1	1150	936	1102
0	1203	953	1313

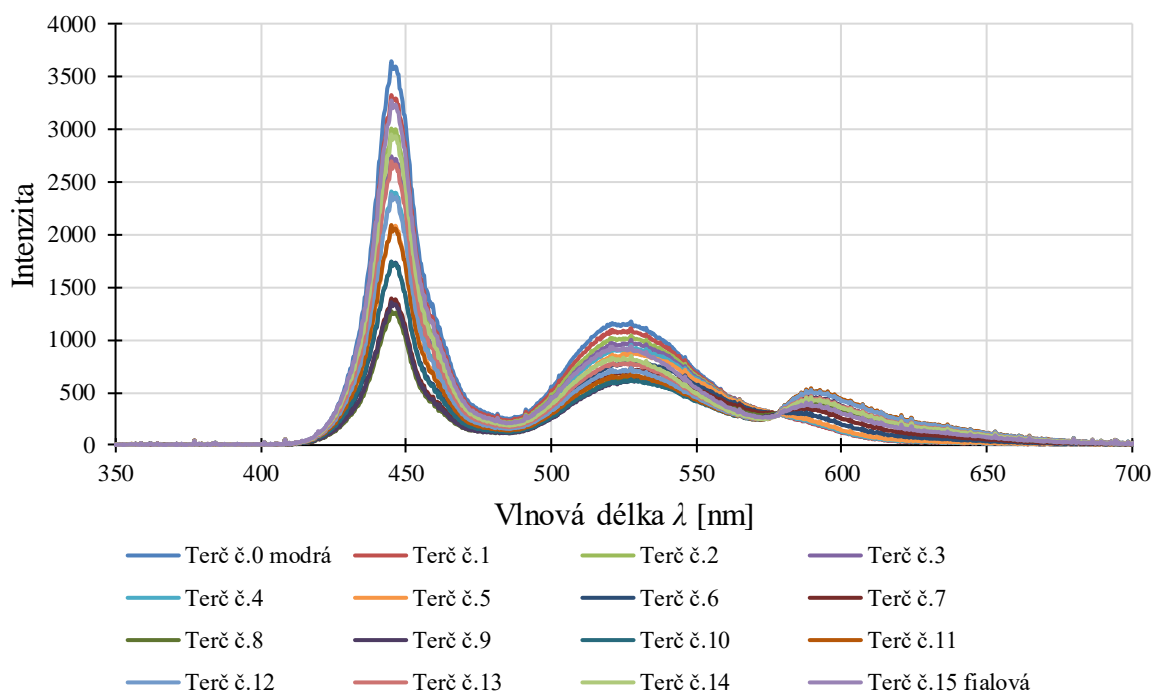
Červeně označené maximální hodnoty a žlutě minimální hodnoty intenzit.



Graf 13 Intenzita čípků pro terče zobrazené na monitoru

Stejný online test byl naměřen i na monitoru notebooku. Pro každý terč počítačového testu byla naměřena intenzita v countech a hodnoty následně vneseny do grafu č. 14.

Hodnoty intenzit byly na základě naměřeného maxima pro bílou barvu na monitoru notebooku (3728,9 nm) a přepočtové hodnoty 30 (maximum propustnosti reálného testu), propočteny pro každý terč pomocí vzorce (1).



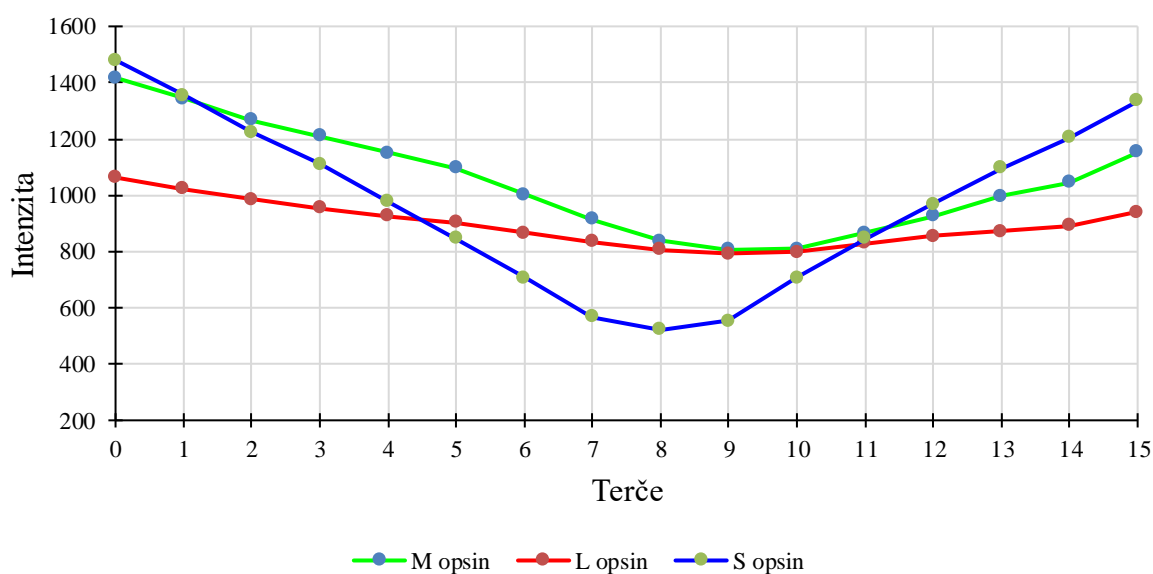
Graf 14 Intenzita terčů Farnsworth D-15 testu na notebooku

Pro následné vyhodnocení vnímání barev jednotlivých terčů zobrazených na monitoru počítače byly opět vypočítány celkové intenzity dopadající na jednotlivé čípky dle vzorce 2, kde $f(k)$ je tentokrát naměřené spektrum jednotlivých terčů na monitoru notebooku. Hodnoty celkové intenzity pro jednotlivé čípky byly zapsány do tabulky č. 5 a vykresleny do grafu č.15.

Tabulka 5 Sumy intenzit terčů testu na monitoru notebooku pro jednotlivé čípky

Terč č.	M opsin	L opsin	S opsin
15	1153	939	1336
14	1046	890	1204
13	997	871	1095
12	927	856	968
11	867	829	846
10	809	797	707
9	806	793	553
8	837	807	521
7	914	836	568
6	1002	866	706
5	1095	903	845
4	1152	925	978
3	1211	954	1110
2	1268	986	1224
1	1343	1022	1354
0	1417	1063	1480

Červeně označené maximální hodnoty a žlutě minimální hodnoty intenzit.



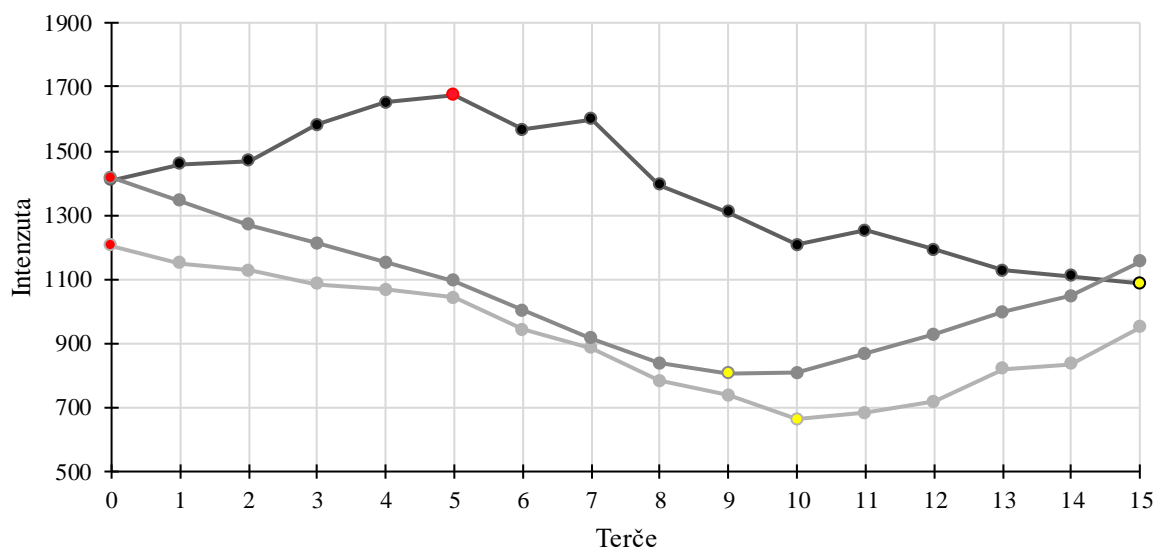
Graf 15 Intenzita čípků pro terče zobrazené na notebooku

Hodnoty maximálních a minimálních intenzit z tabulek č. 3,4,5 byly pro lepší možnost porovnání přeneseny do tabulky č. 6.

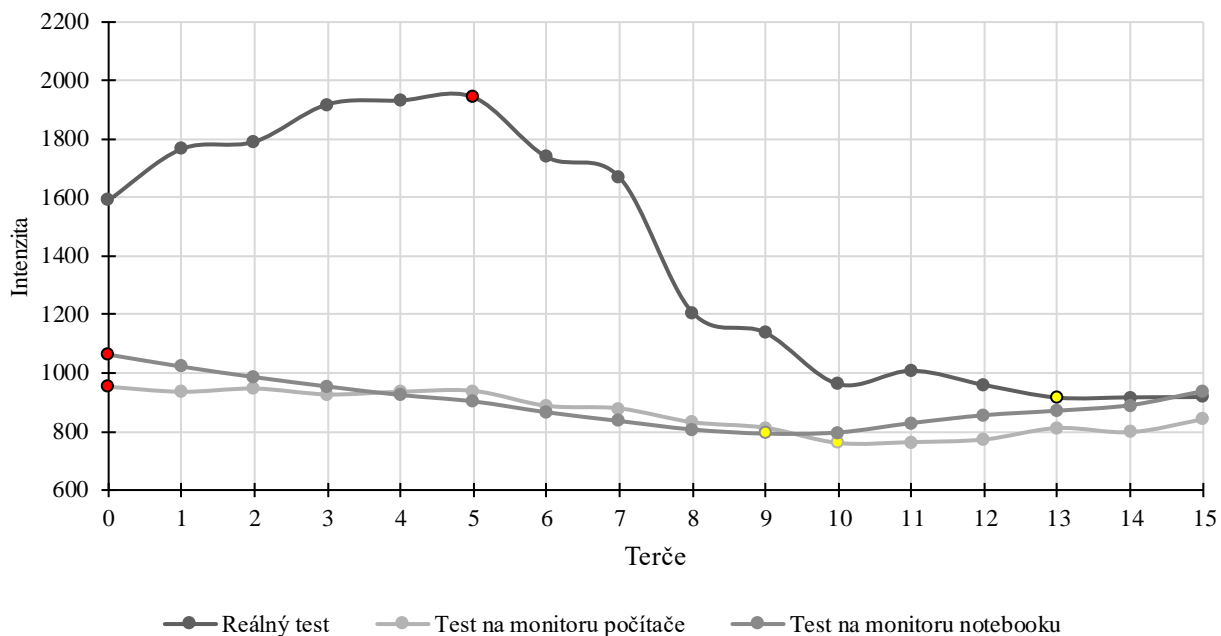
Tabulka 6 Maximální a minimální intenzity

Čípky	Fyzický test		Test na monitoru počítače		Test na monitoru notebooku	
	Maximální intenzita	Minimální intenzita	Maximální intenzita	Minimální intenzita	Maximální intenzita	Minimální intenzita
M opsin	1674 (terč č. 5)	1087 (terč č. 15)	1203 (terč č. 0)	664 (terč č. 10)	1417 (terč č. 0)	806 (terč č. 9)
L opsin	1943 (terč č. 5)	916 (terč č. 13)	953 (terč č. 0)	761 (terč č. 10)	1063 (terč č. 0)	793 (terč č. 9)
S Opsin	2000 (terč č. 15)	661 (terč č. 6)	1313 (terč č. 0)	246 (terč č. 8)	1480 (terč č. 0)	521 (terč č. 8)

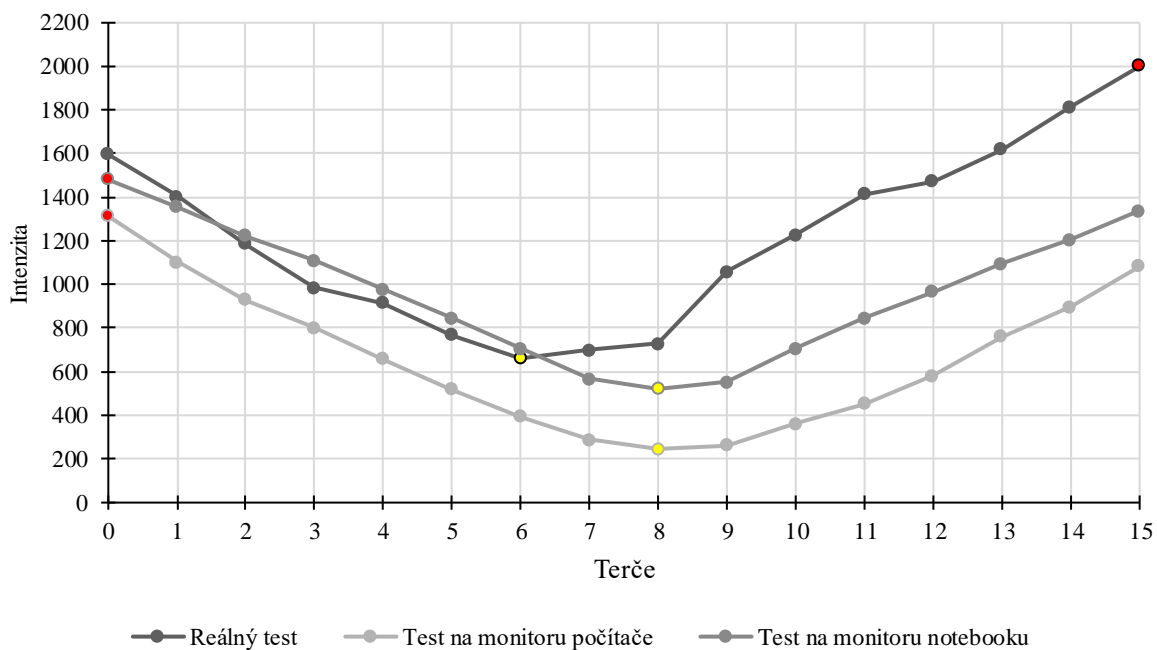
Následně byly vytvořeny grafy pro jednotlivé opsiny na třech naměřených variantách testů pro lepší znázornění maximálních (červená) a minimálních (žlutá) intenzit graf č. 16,17,18.



Graf 16 Intenzity M opsinu pro dané varianty testu



Graf 17 Intenzity L opsinu pro dané varianty testu



Graf 18 Intenzity S opsinu pro dané varianty testu

8 Diskuze

8.1 Barevné filtry

Při měření propustnosti jednotlivých filtrů a následného porovnání s vlnovými délkami jednotlivých čípků jsme se řídili dvěma předpoklady. Z tabulky č.1 vyplývá, že se nám předpoklad pro D 10-30 filtry potvrdil. Roste poměr mezi hodnotami M opsinu a L opsinu, tedy poměr mezi zelenou a červenou barvou. Tím pádem filtry snižují vjem červené barvy, aby subjekt přes filtr mohl lépe pozorovat barvu zelenou.

U tabulky č.2 se předpoklad nepotvrdil. Poměr mezi L opsinem a M opsinem roste a poté u filtrů P 20 a P 25 vyšel téměř nastejno, u filtru P 30 výrazně klesl. Nepotvrdilo se nám tedy zvýšení poměru u filtrů určených pro korekci protanomálie, tedy že filtry P 10-30 snižují vjem pro zelenou barvu, aby byla lépe pozorována barva červená. K objasnění, proč poměr klesá by bylo potřeba podrobnější zkoumání dané problematiky či například získání kvalitnějších dat senzitivit pro dané čípky.

8.2 Porovnání Farnsworth D-15 panel testů

Z grafů základních barev monitorů graf č. 8 a č.9 je patrné, že jednotlivé vlnové délky barvy monitoru nemají pouze jeden peak, ale mají malé peaky i v jiné oblasti spektra. Konkrétně z grafu č. 8 monitoru počítače lze vidět, že vlnová délka červená barvy má malý peak cca v 444 nm tedy v oblasti zelené barvy, její spektrum je od cca 573–708 nm, v porovnání s grafem č. 3 kde je rozsah L opsinu cca 450-673 nm. U grafu č. 9 je červený peak v oblasti zelené barvy podstatnější, a to v rozmezí vlnových délkách cca od 420–465 nm, hlavní peak červené barvy je v intervalech 570–705 nm. Právě tyto vedlejší peaky ve spektrech mohou zapříčiňovat ovlivnění čípků i pro jiné vlnové délky a následné zkreslení testů zobrazovaných na monitorech.

Dále je vidět odlišné vnímání jednotlivých terčů čípkem pro různé zobrazení testů. Velký rozdíl je například na grafu č. 17 kde L opsin vnímá reálný terč č. 5 v intenzitě 1943, kdežto na monitoru notebooku vnímá tento terč v intenzitě 836.

S opsin vnímá na reálném testu nejvíce terč číslo 15 pod intenzitou 2000, oproti tomu na monitoru počítače a notebooku vnímá nejvíce terč č. 0 a to pod intenzitami 1313 a 1480.

Další skutečností je, že každé zařízení zobrazuje barvy trochu jinak. Hraje zde roli kalibrace monitorů, ale i například rozlišení a kvalita, což také může ovlivňovat vnímání jednotlivých terčů, screening a následné hodnocení poruchy.

Rozdíl intenzit jednotlivých monitorů při porovnání LCD monitoru a monitoru notebooku je vidět z grafu č. 13 a 15. Rozsah intenzity S opsinu je na LCD monitoru mnohem širší (1313-246) než na monitoru notebooku (1480-521), naopak rozsah intenzity M opsinu je větší na monitoru notebooku (1417-806) oproti monitoru počítače (1203-664) viz tabulka č. 6, což značí fakt, že každé zařízení zobrazuje barvy jinak.

Maxima a minima jednotlivých intenzit čípků pro dané terče mají odlišný charakter pro terče reálné a pro terče na monitorech viz tabulka 6. S opsin pro krátké vlnové délky, tedy modrou barvu má minimální hodnoty intenzit pro všechny testy.

Z grafu č. 16 lze vidět, že čípek pro střední vlnové délky (M opsin) reaguje nejlépe na intenzity reálného testu, oproti tomu testy na monitorech jsou v mnohem menší intenzitě. Totéž je vidět i na grafu č. 17 kde má čípek pro dlouhé vlnové délky (L opsin) také největší intenzitu vnímání jednotlivých terčů. Na grafu č. 18 vidíme podobný charakter intenzit terčů reálného testu a testu zobrazeného na notebooku, od terčů č. 8 se intenzity liší více.

Při porovnání grafu č.7,13 a 15 a grafů č. 16,17,18 tedy můžeme jasně vidět, že rozsah intenzit jednotlivých čípků, které vnímají jednotlivé terče je u reálného testu mnohem větší v porovnání s testem zobrazeným na počítači. Tímto porovnáním lze říci, že testy na monitorech barvy více zkreslují a umožňují méně přesné testování. Barvy jednotlivých terčů na monitorech více splývají oproti terčům reálným, kde je pomocí slunečního záření možné vnímat homogennější spektrum barev než na monitorech, které zobrazují RGB barevný systém.

9 Závěr

Bakalářská práce se zabývala fyziologií barevného vidění, trichromatickou teorií a principem míchání barev. Byly popsány poruchy barvocitu, které byly dále rozděleny na vrozené a získané.

Hlavním cílem bakalářské práce bylo popsat jednotlivé testy používané při screeningu a určení poruchy barvocitu. Dále byly vytyčeny principy testů a jejich používání. Další kapitoly se převážně zabývaly možnostmi korekce brýlovými filtry a kontaktními čočkami. Také byla popsána účinnost barevných filtrů a ostatních variant korekce na základě dohledaných zahraničních studií, ve snaze rozšířit danou problematiku o zajímavé informace.

Experimentální část bakalářská práce byla rozdělena na dvě části. První část se věnovala barevným filtrům využívajících se k diagnostice dané poruchy a její následné korekci. Tyto filtry pomáhají při deuteranomálii a protanomálii. Cílem bylo zjistit účinnost jednotlivých filtrů a jejich funkčnost. Byl vytyčen předpoklad, jak filtry fungují, tedy že jednu barvu podporují a druhou se naopak snaží utlumit, aby se zvýšil poměr mezi barvami. Tento předpoklad se povedlo potvrdit pouze pro filtry D 10-30 sloužící ke korekci deuteranomálie. Předpoklad u filtrů pro protanomálii se bohužel nepotvrdil, bylo by tedy potřeba rozsáhlejší zkoumání problematiky anebo například přesnější data senzitivit jednotlivých čípků.

Druhá experimentální část se zabývala testem pro poruchy barvocitu konkrétně Farnsworth D-15 panel testem. Tento test byl zvolen jak ve fyzické verzi, tak v počítačové verzi a následně byla kvalita těchto verzí porovnávána. Byly naměřeny jednotlivé terče, které byly dány do vztahu s jednotlivými čípkami a následně byly porovnávány intenzity, pod kterými čípkami vnímají dané terče.

Cílem této části bylo dokázat, že fyzický test je více vypovídající, jelikož jsou barvy zobrazovány širším barevným spektrem oproti barvám na monitorech zobrazujících na principu RGB. Výsledky počítačových testů mohou být zkreslené vlivem špatné kalibrace monitorů a odlišného zobrazování jednotlivých barev. Rozsah intenzit červených a zelených čípků je na monitorech menší a tím je snížena kvalita testu. Po zhodnocení výsledků experimentální části lze říci, že na základě intenzit vnímání jednotlivých čípků, by počítačové verze testů měly sloužit pouze jako orientační, jelikož u testů fyzických bylo dosaženo podstatně lepších výsledků.

Seznam použité literatury

- [1] KAPILÍKOVÁ, Květa. *Anatomie a embryologie oka*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2000. ISBN 80-7013-313-9.
- [2] KUCHYNKA, Pavel. *Oční lékařství. 2.*, přepracované a doplněné vydání. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 9788024750798.
- [3] HILDEBRAND, Göran Darius a Alistair R. FIELDER. Anatomy and Physiology of the Retina. REYNOLDS, James a Scott OLITSKY, ed. *Pediatric Retina* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, 2011-8-19, s. 39-65 [cit. 2022-01-03]. ISBN 978-3-642-12040-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-12041-1_2
- [4] SCHNAPF, Julie L. a Denis A. BAYLOR. How Photoreceptor Cells Respond to Light. *Scientific American* [online]. Scientific American, a division of Nature America, 1987, April 1987, **256**(no.4), 40-47 [cit. 2021-12-26]. ISSN 00368733. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/24979361>
- [5] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění. 2.*, dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.
- [6] VALBERG, Arne. *Light Vision Color. 1.* Wiley, 2005. ISBN 9780470849026.
- [7] EBNER, Marc. *Color constancy*. Chichester: Wiley, c2007. ISBN 978-0-470-05829-9.
- [8] CRONE, Robert A. *A History of Color* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999 [cit. 2021-12-27]. ISBN 978-94-015-3941-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-007-0870-9
- [9] WESTLAND, Stephen. *Complementary colour harmony in different colour spaces: Additive (a) and subtractive (b) colour mixing* [online]. July 2013 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Additive-a-and-subtractive-b-colour-mixing_fig5_263334546
- [10] HUNT, David M., Kanwajit S. DULAI, James K. BOWMAKER a John D. MOLLON. The Chemistry of John Dalton's Color Blindness. *Science* [online]. 1995, **267**(5200), 984-988 [cit. 2021-11-26]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.7863342
- [11] *Colblindor* [online]. 2006 [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.color-blindness.com/>

- [12] GÖGH, Štefan. *Poruchy farbocitu a ich korekcia* [online]. 02 April 2018 [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <http://www.farbocit.sk/index.php/poruchy-farbocitu/teoria-farbocitu-a-jeho-poruchy>
- [13] What is Color Blindness? *Colblindor* [online]. 2006 [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <http://www.color-blindness.com/what-is-color-blindness/>
- [14] The Biology behind Red-Green Color Blindness. *Colblindor* [online]. 2006 [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <http://www.color-blindness.com/2006/03/07/the-biology-behind/>
- [15] VESELÝ, Petr. *Současné metody vyšetřování barvocitu* [online]. 4.1.2011 [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: https://www.4oci.cz/soucasne-metody-vysetrovani-barvocitu_4c441
- [16] OSTEN, Jenny. The known unknowns of anomalous trichromacy. *Current Opinion in Behavioral Sciences* [online]. 2019, **30**, 228-237 [cit. 2021-11-26]. ISSN 23521546. Dostupné z: doi:10.1016/j.cobeha.2019.10.015
- [17] *How do people with colour blindness see the logos of popular brands?: Types of colour blindness* [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.sayu.co.uk/how-do-people-with-colour-blindness-see-the-logos-of-popular-brands.html>
- [18] FRISTRÖM, Björn a Björn L. LUNDH. Colour contrast sensitivity in cataract and pseudophakia. *Acta Ophthalmologica Scandinavica* [online]. 2000, **78**(5), 506-511 [cit. 2021-12-27]. ISSN 13953907. Dostupné z: doi:10.1034/j.1600-0420.2000.078005506.x
- [19] Color vision deficiency. *American optometric association* [online]. 2020 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://www.aoa.org/healthy-eyes/eye-and-vision-conditions/color-vision-deficiency?sso=y>
- [20] MARRÉ, Marion, Ernst MARRÉ a Dorothea FÜLLE. Colour Vision in Aphakia and Pseudophakia. VERRIEST, G., ed. *Colour Vision Deficiencies VIII* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1986, 1987, s. 349-355 [cit. 2021-12-18]. Documenta Ophthalmologica Proceedings Series. ISBN 978-94-010-8399-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-009-4275-2_51
- [21] WK, Kaimbo, Bifuko ZA, Longo MB, Dralands L a Missotten L. *Color vision in 42 Congolese patients with tuberculosis receiving ethambutol treatment* [online]. BULL SOC BELGE OPHTALMOL. 2002, , 57-61 [cit. 2021-12-18]. 12161991.

- [22] POLAK, B.C.P., M. LEYS a G.H.M. VAN LITH. Blue-Yellow Colour Vision Changes as Early Symptoms of Ethambutol Oculotoxicity. *Ophthalmologica* [online]. 1985, **191**(4), 223-226 [cit. 2021-12-18]. ISSN 1423-0267. Dostupné z: doi:10.1159/000309592
- [23] *MedlinePlus: Color vision deficiency* [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://medlineplus.gov/genetics/condition/color-vision-deficiency/#resources>
- [24] *IRIS: Statistics and How many people are Color blind* [online]. Daniel Georgiev [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://iristech.co/statistics/>
- [25] MELAMUD, Alex, Stephanie HAGSTROM a Elias TRABOULSI. Color vision testing. *Ophthalmic Genetics* [online]. 2009, **25**(3), 159-187 [cit. 2021-11-26]. ISSN 1381-6810. Dostupné z: doi:10.1080/13816810490498341
- [26] BENEŠ, Pavel. *Přístroje pro optometrii a oftalmologii*. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2015. ISBN 978-80-7013-577-8.
- [27] COLE, Barry L, Ka-ye LIAN a Carol LAKKIS. The new Richmond HRR pseudoisochromatic test for colour vision is better than the Ishihara test. *Clinical and Experimental Optometry* [online]. 2006, **89**(2), 73-80 [cit. 2021-11-26]. ISSN 0816-4622. Dostupné z: doi:10.1111/j.1444-0938.2006.00015.x
- [28] SLOAN, LOUISE L. Tests for Color Deficiency Based the Pseudoisochromatic Principle. *A.M.A. Archives of Ophthalmology* [online]. 1956, **55**(2) [cit. 2021-12-03]. ISSN 0096-6339. Dostupné z: doi:10.1001/archoph.1956.00930030233009
- [29] RODRIGUEZ-CARMONA, Marisa. Minimum Color Vision Requirements for Professional Flight Crew,: Part 3: Recommendations for New Color Vision Standards. *ResearchGate* [online]. June 2009 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Ishihara-pseudoisochromatic-plates-left-transformation-design-middle-vanishing_fig3_235099031/actions#embed
- [30] FARNSWORTH MUNSELL 100 HUE TEST. *Pantone* [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.pantone.com/eu/en/farnsworth-munsell-100-hue-test>
- [31] DAIN, Stephen J. Clinical colour vision tests. *Clinical and Experimental Optometry* [online]. 2004, **87**(4-5), 276-293 [cit. 2021-12-03]. ISSN 0816-4622. Dostupné z: doi:10.1111/j.1444-0938.2004.tb05057.x
- [32] AIK KAH, Tan. Farnsworth Panel D-15 hue test equipment. *ResearchGate* [online]. August 2008 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/figure/Farnsworth->

Panel-D-15-hue-test-equipment-Different-colour-caps-put-in-the-black-square_fig1_26610206

[33] MOLLON, J. D., Joel POKORNY a K. KNOBLAUCH. *Normal and defective colour vision*. New York: Oxford University Press, 2003. ISBN 9780198525301.

[34] QUIRE, Theresa J, Marisa RODRIGUEZ-CARMONA, Anthony D B EVANS a John L BARBUR. Color vision tests for aviation: Comparison of the anomaloscope and three lantern types. *Aviation Space and Environmental Medicine* [online]. 2005, (76(5):421-9) [cit. 2021-12-26]. ISSN 0095-6562. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15892538/>

[35] RODRIGUEZ-CARMONA, Marisa. Minimum Color Vision Requirements for Professional Flight Crew, Part 3: Recommendations for New Color Vision Standards. *ResearchGate* [online]. June 2009 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Photograph-of-the-Nagel-anomaloscope-Model-I-Schmidt-and-Haensch-Germany-and_fig5_235099031

[36] ALOTAIBI, Abdullah Z., Emmanuel A. IKPOTOKIN a O. Matthew ORIOWO. Assessment of the Medmont C100 test for colour vision screening of male Saudi Arabians. *African Vision and Eye Health* [online]. 2011, **70**(1), 14-20 [cit. 2021-11-30]. ISSN 2410-1516. Dostupné z: doi:10.4102/aveh.v70i1.94

[37] OLIPHANT, David a Jeffery K HOVIS. Comparison of the D-15 and City University (second) color vision tests. *Vision Research* [online]. 1998, **38**(21), 3461-3465 [cit. 2021-12-02]. ISSN 00426989. Dostupné z: doi:10.1016/S0042-6989(98)00117-5

[38] PARVIZI, S. a P. FRITH. Examination of Colour Vision. *Semantic scholar* [online]. 2008 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Examination-of-Colour-Vision-Parvizi-Frith/2adccd6587ed067a94b7696fd5b4b377603f2f3d/figure/3>

[39] LAXAR, K., Sandra L. WAGNER a Timothy C. COTTON. *Evaluation of the Stereo Optical Co. Farnsworth Lantern (FALANT) Color Perception Test: A Specification and Performance Comparison with the Original FALANT* [online]. 1998 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-the-Stereo-Optical-Co.-Farnsworth-A-Laxar-Wagner/fad1c9518cbd3ffbb0508aa49a3ee0bd2284681b>

[40] PARK, Jong-Ho. Color Vision. LEE, Jong-Soo, ed. *Primary Eye Examination* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2019, 2019-04-02, s. 37-45 [cit. 2022-01-03]. ISBN 978-981-10-6939-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-10-6940-6_4

- [41] COLE, BARRY L. a ALGIS J. VINGRYS. A Survey and Evaluation of Lantern Tests of Color Vision. *Optometry and Vision Science* [online]. 1982, **59**(4) [cit. 2021-12-03]. ISSN 1040-5488. Dostupné z: doi:10.1097/00006324-198204000-00009
- [42] HOVIS, Jeffery K. Repeatability of the Holmes-Wright Type A Lantern Color Vision Test. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* [online]. 2008, **79**(11), 1028-1033 [cit. 2021-12-03]. ISSN 00956562. Dostupné z: doi:10.3357/ASEM.2339.2008
- [43] VESELÝ, Petr. Současné metody vyšetřování barvocitu. *Česká oční optika*. Praha: Společenstvo českých optiků a optometristů, 2010, č. 4, s. 54 – 66. ISSN 1211-233X.
- [44] AWAD, Z., R.S. NATT a D.D. POTHIER. Ishihara plates on your handheld computer. *Clinical Otolaryngology* [online]. 2007, **32**(1), 58-59 [cit. 2022-01-04]. ISSN 0307-7772. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2273.2007.01327.x
- [45] MAREY, Hatem, Noura SEMARY a Sameh MANDOUR. Ishihara Electronic Color Blindness Test: An Evaluation Study. *Ophthalmology Research: An International Journal* [online]. 2015, **3**(3), 67-75 [cit. 2022-01-04]. ISSN 23217227. Dostupné z: doi:10.9734/OR/2015/13618
- [46] GHOSE, Supriyo, Twinkle PARMAR, Tanuj DADA, Murugesan VANATHI a Sourabh SHARMA. A new computer-based Farnsworth Munsell 100-hue test for evaluation of color vision. *International Ophthalmology* [online]. 2014, **34**(4), 747-751 [cit. 2022-01-04]. ISSN 0165-5701. Dostupné z: doi:10.1007/s10792-013-9865-9
- [47] Badawy, A.-R., Hassan, M. U., Elsherif, M., Ahmed, Z., Yetisen, A. K., & Butt, H. (2018). Contact Lenses for Color Blindness. In *Advanced Healthcare Materials* (Roč. 7, Issue 12, s. 1800152). Wiley. <https://doi.org/10.1002/adhm.201800152>
- [48] MAXWELL, James Clerk. XVIII.— Experiments on Colour, as perceived by the Eye, with Remarks on Colour-Blindness. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* [online]. 1857, **21**(2), 275-298 [cit. 2021-11-26]. ISSN 0080-4568. Dostupné z: doi:10.1017/S0080456800032117
- [49] ELSHERIF, Mohamed, Ahmed E. SALIH, Ali K. YETISEN a Haider BUTT. Contact Lenses for Color Vision Deficiency. *Advanced Materials Technologies* [online]. 2021, **6**(1) [cit. 2021-11-26]. ISSN 2365-709X. Dostupné z: doi:10.1002/admt.202000797
- [50] How EnChroma Glasses Work. *Enchroma* [online]. 2020 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: <https://enchroma.com/pages/how-enchroma-glasses-work>

- [51] GÓMEZ-ROBLEDO, L., E. M. VALERO, R. HUERTAS, M. A. MARTÍNEZ-DOMINGO a J. HERNÁNDEZ-ANDRÉS. Do EnChroma glasses improve color vision for colorblind subjects? *Optics Express* [online]. 2018, 2018, **26**(pp. 28693-28703) [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: doi: 10.1364/OE.26.028693
- [52] ALMUTAIRI, Nawaf, James KUNDART, Naganathan MUTHURAMALINGAM a John HAYES. *Assessment of Enchroma Filter for Correcting Color Vision Deficiency* [online]. Pacific University, 2017 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/323829979_Assessment_of_Enchroma_Filter_for_Correcting_Color_Vision_Deficiency. Thesis. College of Optometry.
- [53] INDOOR COLOUR BLIND GLASSES. *EnChroma* [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://eu.enchroma.com/collections/colour-blind-glasses/products/grant-black-cx1indoor-plano?variant=37515067064507>
- [54] *ChromaGen* [online]. Chromagen Europe BV, The Netherlands, 1989 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: <https://www.chromagen.us/>
- [55] ChromaGen Lenses. *Rogers Regional Eye Center* [online]. Greenwell Springs & Magnolia Bridge in Central LA., 2020 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: <https://www.rogersregionaleyecenter.com/eyeglasses-contacts/chromagen-lenses/>
- [56] Color Blindness Glasses. *Colorlite* [online]. 2020 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: https://www.colorlitelens.com/color-blindness-correction.html#Need_know
- [57] GÓMEZ-ROBLEDO, Luis, Javier HERNÁNDEZ-ANDRÉS, Rafael HUERTAS a E. M. VALERO. *Effect of Colorlite filters on colorblind observers* [online]. University of Granada, Spain, November 2020 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/349088628_Effect_of_Colorlite_filters_on_colorblind_observers
- [58] Colorlite's Color vision diagnostic and correction system for eye care professionals. *Colorlite* [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.colorlitelens.com/colorlite-color-blindness-diagnostic-and-correction-system.html>
- [59] PAULSON, Helen M. *The X-Chrom Lens for Correction of Color Deficiency* [online]. Naval Medical Research and Development Command Research Work Unit M0100-PN. 001-

- 1005: R. A. Margulies, CDR, MC, USN, August 1980 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA093031>
- [60] X-Chrome Contact Lenses. *Ezekiel eyes: Optometrist Perth* [online]. Australia [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://ezekeleeyes.com/x-chrome-contact-lens/>
- [61] KASSAR, Barry S. MD, Steven C. MD DRESNER, James G. PhD MAY, Marcy S. PhD MARX a Aran MD SAFIR. Evaluation of the X-Chrom Lens and Color Deficiency. *CLAO journal* [online]. The Contact Lens Association of Ophthalmologists, **1984**, 100-104 [cit. 2021-12-20].
- [62] X-Chrom Contact Lens for Color “Blindness”. *ReVision optometry* [online]. 2020 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://revisionoptometry.com/blog/x-chrom-contact-lens-for-color-blindness/>
- [63] SWARBRICK, Helen A., Phuong NGUYEN, Tuyen NGUYEN a Phuong PHAM. The ChromaGen contact lens system: colour vision test results and subjective responses. *Ophthalmic and Physiological Optics* [online]. 2001, **21**(3), 182-196 [cit. 2021-12-20]. ISSN 0275-5408. Dostupné z: doi:10.1046/j.1475-1313.2001.00583.x
- [64] ILHAN, Cagri, Mehmet A SEKEROGLU, Sibel DOGUIZI a Pelin YILMAZBAS. The effect of the ChromaGen contact lens system on visual performance. *Clinical and Experimental Optometry* [online]. 2020, **103**(4), 507-512 [cit. 2021-12-12]. ISSN 0816-4622. Dostupné z: doi:10.1111/cxo.13011
- [65] Chromagen™ Contact Lenses. *ChromaGen* [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: https://www.chromagen.us/images/Chromagen_Lenses_1_in_bottle_Ishihara_Test_Magenta.JPG
- [66] BUTT, Haider. Contact Lenses for Color Blindness: Rhodamine derivative (Atto 565) and its incorporation into contact lenses. (a) The. *ResearchGate* [online]. 2018 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Rhodamine-derivative-Atto-565-and-its-incorporation-into-contact-lenses-a-The_fig2_324778987
- [67] SALIH, Ahmed E., Mohamed ELSHERIF, Fahad ALAM, Ali K. YETISEN a Haider BUTT. Gold Nanocomposite Contact Lenses for Color Blindness Management. *ACS Nano* [online]. 2021, **15**(3), 4870-4880 [cit. 2021-12-27]. ISSN 1936-0851. Dostupné z: doi:10.1021/acsnano.0c09657

- [68] Gold Nanocomposite Contact Lenses for Color Blindness Management. *ACS Publications* [online]. 2021 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.0c09657#>
- [69] LAUSEGGER, Georg, Michael SPITZER a Martin EBNER. OmniColor – A Smart Glasses App to Support Colorblind People. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)* [online]. 2017, **11**(5), 161-177 [cit. 2022-01-04]. ISSN 1865-7923. Dostupné z: doi:10.3991/ijim.v11i5.6922
- [70] POPLETEEV, Andrei, Nicolas LOUVETON a Roderick MCCALL. Colorizer. In: *Proceedings of the 2015 workshop on Wearable Systems and Applications* [online]. New York, NY, USA: ACM, 2015, 2015-05-18, s. 7-8 [cit. 2022-01-04]. ISBN 9781450335003. Dostupné z: doi:10.1145/2753509.2753516
- [71] MANCUSO, Katherine, William W. HAUSWIRTH, Qiuhong LI, Thomas B. CONNOR, James A. KUCHENBECKER, Matthew C. MAUCK, Jay NEITZ a Maureen NEITZ. Gene therapy for red–green colour blindness in adult primates. *Nature* [online]. 2009, **461**(7265), 784-787 [cit. 2022-01-04]. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/nature08401
- [72] GÖGH, Štefan. Korekcia farebného videnia [online]. 02 April 2018 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <http://www.farbocit.sk/index.php/poruchy-farbocitu/teoria-korekcia-farebneho-videnia>
- [73] HABERLAND, Tomáš. Korigovat vrozené poruchy barvocitu pomocí barevných brýlových skel a kontaktních čoček?. *Česká oční optika*. Praha: Společenstvo českých optiků a optometristů, duben 2010, **51**(2/2010), 20-24. ISSN 1211–233X.
- [74] Patterson SS, Mazzaferri MA, Bordt AS, Chang J, Neitz M, Neitz J Another Blue-ON ganglion cell in the primate retina. *Curr Biol*. 2020 Dec 7; **30**(23):R1409-R1410.
- [75] J L Schnapf , T W Kraft, B J Nunn, D A Baylor. Spectral sensitivity of primate photoreceptors. *Vis. Neurosci*. 1988; **1**(3):255-61. doi: 10.1017/s0952523800001917
- [76] Colorlite lens: D15 color blindness test [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.colorlitelens.com/images/test/D15/D15.html>

Seznam zkratek a symbolů

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
CTU	City University test
HEMA	2-hydroxyethyl-methakrylát
EGDMA	Ethylen glykol dimethakrylát
TEM	Transmisní elektronový mikroskop

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
T	%	Propustnost
R	%	Reflektance
λ	nm	Vlnová jednotka
σ^2		Rozptyl
I		Celková intenzita
μ		Střední hodnota

Seznam obrázků

Obrázek 1 Aditivní (a) a subtraktivní (b) míšení [9]	11
Obrázek 2 Vidění s vrozenými poruchami barvocitu [17]	13
Obrázek 3 Ishihara testy ukázka [29]	18
Obrázek 4 Farnsworth Munsell 100 Hue Test [30]	19
Obrázek 5 Farnsworth Panel D-15 test [32]	20
Obrázek 6 Nagelův anomaloskop [35]	21
Obrázek 7 Screeningová demonstrační deska vlevo, testová demonstrační deska vpravo [38]	22
Obrázek 8 FaLant test [40]	23
Obrázek 9 EnChroma brýle pro protanopii [53].....	27
Obrázek 10 Colorlite brýle [58].....	28
Obrázek 11 X-Chrome kontaktní čočka [62]	29
Obrázek 12 Chromagen kontaktní čočky [65].....	30
Obrázek 13 Dervidát rhodamínu (Atto 565) a barvené kontaktní čočky [66].....	31
Obrázek 14 polymerizované nanokompozitní čočky v různých koncentracích (měřítko: 10 mm) [68].....	32
Obrázek 15 Příklady barevných podnětů [71]	33
Obrázek 16 Působení filtru na čípky citlivé na světlo [72]	34
Obrázek 17 Terče č. 15-0	41
Obrázek 18 Terče č. 15-0	41
Obrázek 19 Farn. D-15 panel test online terč č.15-0 [76]	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 Tabulka poměru M/L opsinu pro D 10-30 filtry	40
Tabulka 2 Tabulka poměru L/M opsinu pro P 10-30 filtry	40
Tabulka 3 Sumy intenzit terčů fyzického testu pro jednotlivé čípky	42
Tabulka 4 Sumy intenzit terčů testu na monitoru počítače pro jednotlivé čípky	47
Tabulka 5 Sumy intenzit terčů testu na monitoru notebooku pro jednotlivé čípky.....	49
Tabulka 6 Maximální a minimální intenzity	50

Seznam grafů

Graf 1 Propustnost T [%] pro filtry P 10-30.....	36
Graf 2 Propustnost T [%] pro filtry D 10-30.....	37
Graf 3 Vlnové délky čípků	38
Graf 4 Čípky s propustností T [%] pro filtry D 10-30.....	39
Graf 5 Čípky s propustností T [%] pro filtry P 10-30.....	39
Graf 6 Reflektance R [%] Farnsworth D-15 panel testu.....	41
Graf 7 Intenzita čípků pro terče D-15 testu	42
Graf 8 Vlnové délky základních barev na monitoru počítačeObrázek 20 Farn. D-15 panel test online terč č.15-0 [76]	43
Graf 9 Vlnové délky základních barev na monitoru notebooku.....	44
Graf 10 Vlnové délky základních barev na monitoru počítače proloženy vlnovými délkami čípků	44
Graf 11 Vlnové délky základních barev na monitoru notebooku proloženy vlnovými délkami čípků	45
Graf 12 Intenzita Farnsworth D-15 terčů na monitoru.....	46
Graf 13 Intenzita čípků pro terče zobrazené na monitoru	47
Graf 14 Intenzita terčů Farnsworth D-15 testu na notebooku	48
Graf 15 Intenzita čípků pro terče zobrazené na notebooku.....	49
Graf 16 Intenzity M opsinu pro dané varianty testu.....	50
Graf 17 Intenzity L opsinu pro dané varianty testu.....	51
Graf 18 Intenzity S opsinu pro dané varianty testu	51