

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI
KATEDRA OPTIKY

KONTRASTNÍ CITLIVOST A OSLNĚNÍ ZA MEZOPICKÝCH PODMÍNEK

Diplomová práce

VYPRACOVAL:

Bc. Jiří Junker

Obor: 5345T008 - OPTOMETRIE

Studijní rok: 2023/2024

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

doc. RNDr. Mgr. František Pluháček, Ph.D.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Mgr. Františka Pluháčka, Ph.D. za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne 16.04. 2024

.....

Jiří Junker

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval doc. RNDr. Mgr. Františku Pluháčkovi, Ph.D. za konzultace, odborné rady, připomínky a vstřícný přístup při vedení a následné analýze mé diplomové práce.

Tato práce byla vytvořena za podpory projektů IGA PřF UP v Olomouci s názvem "Optometrie a její aplikace", č. IGA_PrF_2023_004 a IGA_PrF_2024_019.

Obsah

Úvod	6
1. Fyziologie primárního zpracování kontrastu	7
1.1. Fototransdukce.....	10
1.2. Receptivní pole	11
2. Kontrastní citlivost	15
2.1. Písmenové testy kontrastní citlivosti	16
2.2. Testy se sinusovou mřížkou.....	17
2.3. Křivka kontrastní citlivosti	19
2.4. Význam měření kontrastní citlivosti.....	20
3. Světelné podmínky, noční myopie a adaptace	23
3.1. Světelné podmínky	23
3.1.1. Skotopické podmínky	23
3.1.2. Fotopické podmínky	24
3.1.3. Mezopické podmínky	24
3.2. Noční myopie.....	26
3.2.1. Korekce noční myopie.....	29
3.3. Adaptace	30
3.3.1. Adaptace na tmu	30
3.3.2. Adaptace na světlo.....	32
4. Oslnění	34
4.1. Vidění zhoršující oslnění	35
4.2. Komfort zhoršující oslnění	37
4.3. Adaptační oslnění	38
5. Kontrastní citlivost a oslnění za mezopických podmínek	40
5.1. Cíle práce	40
5.2. Probandi	40
5.3. Mesotest II	41
5.4. Metodika	43
5.4.1 Postup	43
5.4.2. Měření na mesotestu II	44
5.4.3. Zpracování a analýza dat	44
5.5. Výsledky	45
5.6. Diskuse	50
Závěr	54
Seznam použité literatury	56

Úvod

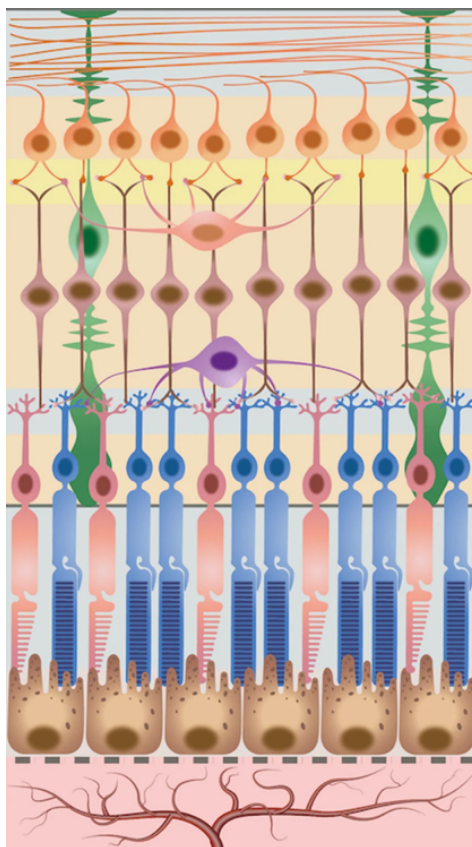
Kontrastní citlivost je v rutinní práci optometristy silně opomíjena. Je tomu tak dokonce i v klinické praxi, kde zhodnocení kontrastní citlivosti stále poměrně zaostává za běžným vyšetřením zrakové ostrosti. Toto tvrzení obzvláště platí o mezopické kontrastní citlivosti, kterou se tato práce primárně zabývá. Vyšetření kontrastní citlivosti sice vnáší spoustu cenných informací do screeningového vyšetření a umožňuje bližší pochopení zrakového stavu klienta, avšak časová náročnost a náročnost na vybavení často převažuje možné benefity, obzvláště pokud se jeví, že tyto informace nebudou mít vliv na výstupu práce optometristy ve volbě nejvhodnějšího řešení klientova zrakového problému. Tato problematika je významná v ohledu na řízení za šera, úplné tmy nebo v mlze. Za takovýchto podmínek průměrná nebo dokonce nadprůměrná zraková ostrost není užitečná do stejné míry, jako je tomu za denních podmínek. Význam detailu pro rozlišování objektů se zdá být méně relevantní s ubývajícím jasem okolí a dominantní schopností zrakového systému je schopnost adaptace na tyto zhoršené pozorovací podmínky a dostatečně dobrá schopnost rozlišit v drobných změnách kontrastu (například kde začíná a končí vozovka, detekce zvěře nebo rozlišení chodce bez reflexního oblečení). Inspirací pro tuto práci byly časté zkušenosti klientů, kteří nedostatky ve své nošené korekci často odhalují při řízení za neoptimálních světelných podmínek.

Jako cíle si tato diplomová práce klade ověřit, jestli lehká myopie může negativně ovlivnit kontrastní citlivost za mezopických podmínek, tedy za šera, a jestli oslnění způsobuje zhoršení kontrastní citlivosti či nikoliv, případně jestli se vliv oslnění liší v závislosti na refrakční vadě. Sekundárním cílem této práce bylo ověřit opakovatelnost přístroje Mesotest II, na kterém byla provedena měření sledovaného parametru kontrastní citlivosti za předem specifikovaných podmínek. Práce se skládá z teoretické a experimentální části. Teoretická část poskytuje čtenáři dostatečné znalostní zázemí pro pochopení studovaného problému. Zaměřuje se na primární zpracování kontrastu lidským zrakovým systémem a vyšetřováním kontrastní citlivosti. Dále se zabývá tématy světelných podmínek, noční myopie a adaptace, a to včetně problematiky vlivu oslnění. Následující praktická část popisuje a vyhodnocuje provedený experiment zkoumající vliv lehké myopie a oslnění na mezopickou kontrastní citlivost a je také zkoumána opakovatelnost měření použitého přístroje Mesotest II.

1. Fyziologie primárního zpracování kontrastu

Ke primárnímu zpracování kontrastu dochází v sítnici. Sítnice neboli retina představuje nejvnitřnější vrstvu oční koule označovanou jako tunica nervosa. Nejvýznamnější oblastí sítnice je makula lutea neboli žlutá skvrna o průměru 5 mm až 5,5 mm. Žlutá skvrna je dále dělena na foveu, foveolu, parafoveu a perifoveu. Fovea je centrální depresí retinálního povrchu o průměru asi 1,5 mm a jedná se o místo nejostřejšího vidění. Foveola o průměru asi 0,35 mm poté představuje místo fixace při pohledu přímo vpřed. Parafovea je pás obklopující foveu o šířce 0,5 mm, kolem parafovey se ještě rozlišuje další pás perifovey o šířce 1,5 mm. [1-5]

Sítnice je typicky dělena na 10 vrstev, kterými jsou směrem od nejzevnější vrstvy k nejvnitřnější vrstvě retinální pigmentový epitel, vrstva fotoreceptorů, zevní hraniční membrána, zevní jaderná vrstva, zevní plexiformní vrstva, vnitřní jaderná vrstva, vnitřní plexiformní vrstva, vrstva gangliových buněk, vrstva nervových vláken a konečně vnitřní hraniční membrána. Dopadající světelné paprsky prochází všemi vnitřními částmi sítnice a až poté dopadají na vrstvu fotoreceptorů, ze kterých je poté signál veden vertikálně proti směru dopadajících světelných paprsků. [1-5]



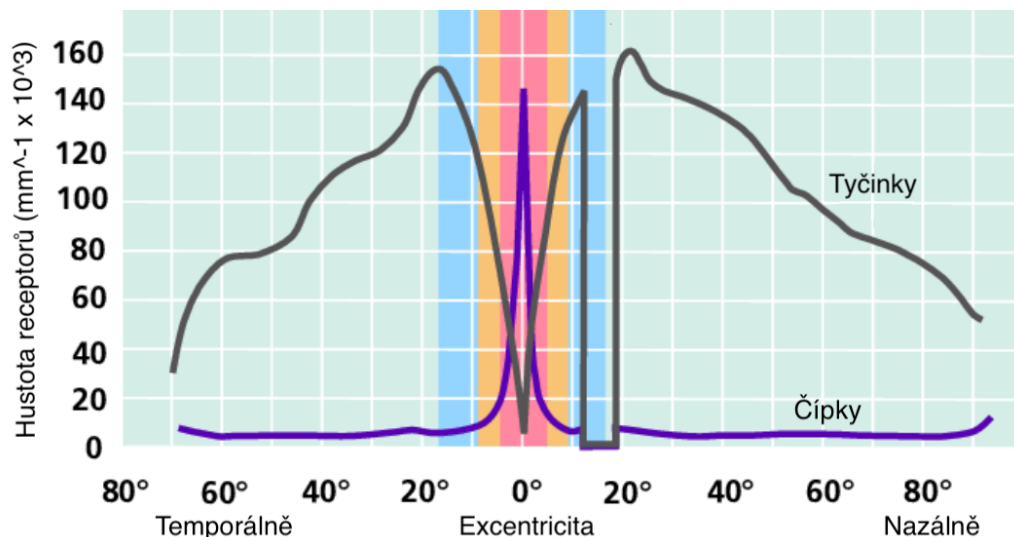
Obr. 1: Schématické znázornění vrstev sítnice: Pigmentový epitel je znázorněn hnědou barvou při spodní části schématu, tyčinky modrou, čípky světle oranžovou, Müllerovy buňky zelenou, horizontální buňka fialovou, bipolární buňky hnědou, amakrynní buňka světle oranžovou a gangliové buňky s jejich axony oranžovou barvou. [6]

Pigmentový epitel je jednovrstevný epitel hexagonálního tvaru. Funkcemi pigmentového epitelu jsou regenerace zrakového pigmentu, odvod metabolitů a přísun živin, regulace objemu tekutiny a absorpce rozptýleného světla po stimulaci fotoreceptorů pomocí pigmentu melaninu, čímž chrání fotoreceptory před poškozením a zlepšuje kvalitu obrazu. Nad pigmentovým epitelem se nachází vrstva fotoreceptorů, které jsou první vertikální nervovou buňkou sítnice. Ve fotoreceptorech dochází k fotochemické reakci zvané fototransdukce (viz kapitola 1.1.), při které se mění energie dopadajícího světelného paprsku na elektrický signál, který je poté vysílán dále směrem k centrálnímu nervovému systému. Fototransdukce je umožněna přítomností pigmentu rhodopsinu a iodopsinu, které se skládají z molekuly retinalu a určitého druhu proteinu opsinu. Jak již bylo zmíněno, rozlišují se dva typy fotoreceptorů, kterými jsou tyčinky a čípky. [1-5]

Tyčinky jsou tenké protáhlé buňky asi 50 μm dlouhé. V pravidelných membránách zadního segmentu obsahují pigment rhodopsin, který umožňuje vidění v odstínech šedé.

Tyčinky jsou uzpůsobené na vidění za šera a v noci při skotopických podmínkách (viz kapitola 3.1.). Jejich nejvyšší citlivost je pro světelné záření o vlnové délce přibližně 500 nm. Čípková buňka má rovněž protáhlý tvar o délce přibližně 60 μm , ale jsou zpravidla větší než tyčinky. V závislosti na druhu čípku jejich zadní segment obsahuje různý typ pigmentu iodopsinu, který určuje průběh citlivosti čípku pro různé vlnové délky. Podle typu iodopsinu, jsou čípky děleny na tři druhy. Čípky pro modrou barvu mají maximální citlivost pro vlnové délky 440-450 nm, čípky pro zelenou 530-540 nm a čípky pro červenou 565-575 nm. Čípky slouží k barevnému vidění za fotopických podmínek (viz kapitola 3.1.). [1,3-5]

Počet a rozložení fotoreceptorů nejsou po celé sítnici dokonale rovnoměrné. V oblasti fovey nejsou přítomny tyčinky, vyskytují se tu pouze čípky. Díky vysoké koncentraci čípků ve fovee je dosažena vysoká rozlišovací schopnost centrálního vidění a jejich hustota v tomto místě představuje limitující faktor centrální zrakové ostrosti. Směrem od centra fovey hustota čípků velice rychle klesá a rapidně přibývá tyčinek. Hustota tyčinek překonává hustotu čípků asi 0,5 mm od fovey v oblasti parafovey. Tyčinky dosahují své maximální hustoty 20 stupňů od bodu fixace v pásu perifovey a dále směrem do periferie jejich hustota pomalu klesá. [1,2,4,5]



Obr. 2: Diagram znázorňující rozložení fotoreceptorů na sítnici: Černá křivka reprezentuje tyčinky, modrá křivka čípky. Část pozadí zvýrazněná červeně představuje oblast fovey, žlutá část oblast parafovey, tmavě modrá část oblast perifovey a světlemodrá část oblast periferní sítnice. Místo odpovídající excentricitě přibližně 15° nazálně reprezentuje papilu očního nervu, kde je absence fotoreceptorů. [7]

Při postupu dále do vnitřnějších částí sítnice následuje zevní hraniční membrána, která je tvořena výběžky Müllerových buněk. Müllerovy buňky prochází přes celou výšku sítnice a mají podpůrnou, metabolickou a regulační funkci. Za zevní hraniční membránou se nachází zevní jaderná vrstva, která je tvořena jádru fotoreceptorů. Synaptické části receptorů poté zasahují do vnější plexiformní vrstvy, kde dochází k synaptickému propojení s bipolárními a horizontálními buňkami. Vnitřní jaderná vrstva obsahuje jádra bipolárních, horizontálních a amakrynních buněk a Müllerových buněk. Horizontální buňky zajišťují laterální komunikaci mezi jednotlivými fotoreceptory a slouží k modulaci signálu z fotoreceptorů. Amakrynní buňky poté zajišťují laterální komunikaci mezi gangliovými buňkami a mají také modulační funkci. Bipolární buňky jsou druhým vertikálním neuronem sítnice a slouží k vertikální komunikaci mezi fotoreceptory a gangliovou buňkou. Podle toho, s kolika tyčinkami nebo čípkami je bipolární buňka spojená, se rozlišují bipolární buňky tyčinkové, které sbírají informace z mnoha tyčinek, difúzní přijímající informace z mnoha čípků a trpasličí napojené pouze na jeden čípek, které jsou typické pro foveální oblast. Ve vnitřní plexiformní vrstvě dochází k synaptickému spojení bipolárních a amakrynních buněk s gangliovými buňkami, které jsou třetím vertikálním neuronem sítnice. Gangliové buňky centrálních čípků jsou trpasličího typu a komunikují s jedním čípkem přes jednu bipolární buňku, směrem do periferie se objevují difúzní gangliové buňky, které sbírají informaci z čím dál tím většího počtu fotoreceptorů (vždy ale pouze z tyčinek nebo pouze z čípků). [1-5]

1.1. Fototransdukce

Při excitaci běžné nervové buňky tedy například neuronu řídicího aktivitu svalu dochází ke změně akčního potenciálu směrem ke kladnějším hodnotám neboli pozitivizaci. Fotoreceptory představují výjimku, jelikož se při jejich aktivaci potenciál posouvá k negativnějším hodnotám a také fungují na principu stupňovaného potenciálu (z anglického *graded potential*), kdy je důležitější spíše frekvence odpovědi než její amplituda. Tento proces probíhající ve fotoreceptorech se nazývá fototransdukce, při němž dochází k přeměně energie dopadajícího světelného paprsku na buňku fotoreceptoru na elektrický signál ve formě změny potenciálu. Proces fototransdukce je

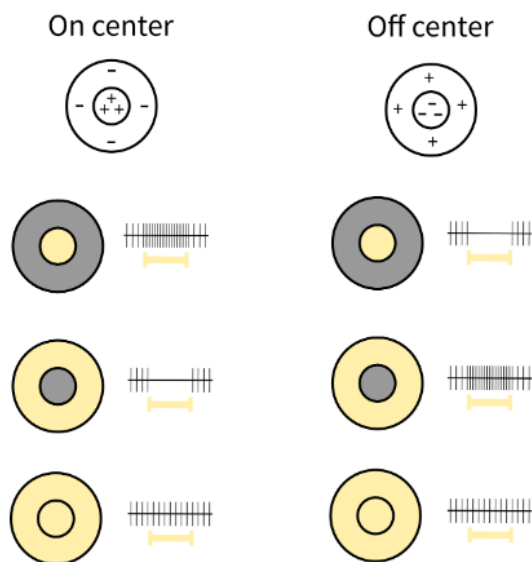
níže přiblížen na příkladu tyčinkové buňky, fototransdukce probíhající v čípcích je principově podobná. [8,9]

Tyčinková buňka má na svém povrchu množství iontových kanálů, jejichž aktivita je regulována přítomností molekuly CGMP (cyklický guanosinmonofosfát). V případě, že na tyčinku nedopadá světlo a je tedy ve tmě, jsou iontové kanály na povrchu buňky otevřené a nimi do tyčinky proudí pozitivní Na^+ ionty. Jelikož kladné K^+ ionty neustále opouští buňku, tento přísun pozitivních Na^+ iontů vyrovnává úbytek K^+ iontů a způsobuje setrvání buňky v depolarizovaném stavu o hodnotě potenciálu přibližně -40 mV. Ve svém depolarizovaném stavu tyčinková buňka nepřetržitě vylučuje neurotransmitter glutamát. V momentě, kdy je buňka vystavena dopadajícímu světlu a molekula retinalu toto světlo absorbuje, dochází k chemické kaskádě na jejímž konci dojde k vyplavení enzymu fosfodiesterázy, který začne rozkládat CGMP. V závislosti na úbytku CGMP dojde k uzavření iontových kanálů a tyčinková buňka se stane hyperpolarizovanou kvůli nedostatku kladných iontů a její potenciál klesne na hodnotu okolo -65 mV. Ve svém hyperpolarizovaném stavu sníží tyčinková buňka množství glutamátu, které vylučuje, a poněkud paradoxně toto snížení vylučovaného glutamátu je znamením pro příslušnou bipolární či horizontální buňku, že na daný fotoreceptor dopadnul světelný paprsek. Tyčinková buňka se poté postupně vrací do svého depolarizovaného stavu, jakmile je její pigment deaktivován a dojde k zastavení celé kaskády a tedy i k obnovení množství CGMP vedoucímu k opětovnému otevření iontových kanálů. Po regeneraci pigmentu je buňka opět připravena přijmout světelný paprsek a být opět hyperpolarizovaná. [8-11]

1.2. Receptivní pole

Jako receptivní pole v rámci zrakového orgánu je chápána oblast sítnice, která při svém podráždění světlem vysílá informace do určité bipolární či gangliové buňky, popř. dalších buněk zrakové dráhy. Receptivní pole bipolárních a gangliových buněk jsou dělena na dva základní typy a to on-center a off-center, receptivní pole dalších buněk jsou z těchto složena. Tento typ rozdělení na on-center a off-center je na bázi toho, jak daný neuron reaguje na světlo v rámci svého receptivního pole. To je dáno glutamátovými

receptory na povrchu daného neuronu, které určují zda bude buňka depolarizována nebo hyperpolarizována v závislosti na množství přijatého glutamátu. Obdržení glutamátu bipolární on-center buňkou způsobí její hyperpolarizaci a obdobně jako u fotoreceptorů toto vede k tomu, že bipolární on-center buňka bude vypouštět nízké množství glutamátu. Off-center bipolární buňky mají opačnou reakci na glutamát. Při jeho obdržení je buňka depolarizovaná a vypouští tedy velké množství glutamátu. Off-center bipolární buňky jsou tedy souhlasné s jejich fotoreceptory ve vypouštění neurotransmiteru, naopak on-center vypouští neurotransmiter inverzně k fotoreceptorům. Fotoreceptory, které se nacházejí v centru receptivního pole dané bipolární buňky, přímo komunikují s bipolární buňkou. Fotoreceptory v periférii receptivního pole dané bipolární buňky s ní zpravidla komunikují nepřímou s pomocí jejich interakce s horizontální buňkou. [8,9,12]



Obr. 3: Princip intenzity odpovědi on center a off-center neuronu. Maximální frekvence odpovědi u on center buňky je dosaženo, pokud je centrum osvětlené a periferie je neosvětlená, opačná situace vyvolá odpověď minimální. U off-center buňky je odpověď inverzní vůči on-center. Při plném osvětlení receptivního pole reaguje on-center i off-center pouze částečnou frekvencí odpovědi. [13]

Pro rozlišování změny jasu a tedy i kontrastu je důležitá interakce fotoreceptorů v centru a v periférii receptivního pole. Periferie receptivního pole totiž ovlivňuje množství glutamátu, které fotoreceptory v centru vypouští. Horizontální buňka dostává informace z periférie receptivního pole a vysílá signál k centru receptivního pole ve formě neurotransmiteru GABA (kyselina gama-aminomáselná), který má inhibiční účinky na centrální fotoreceptory. Pokud jsou centrální fotoreceptory vystaveny světlu a periferní fotoreceptory jsou ve tmě, glutamát který periferie vypouští depolarizuje

horizontální buňku a ta pomocí GABA inhibuje centrální fotoreceptory a přiměje je vypouštět ještě o to menší množství glutamátu. Tento stav odpovídá maximální možné odpovědi on-center bipolární buňky. V inverzním případě, kdy jsou centrální fotoreceptory ve tmě a periferie je osvětlená, periferní hyperpolarizované fotoreceptory vypouští nízké množství glutamátu na horizontální buňku, která poté neposílá inhibiční GABA k centrálním fotoreceptorům a tyto fotoreceptory, jelikož nejsou inhibovány, vypouští glutamát v maximálním množství. V takovémto případě dochází k maximální možné odpovědi off-center bipolární buňky. Každá bipolární buňka poté koresponduje s buňkou gangliovou a gangliová buňka vykazuje obdobný způsob reakce. Podle toho, jak velké množství glutamátu obdrží gangliová buňka od bipolární buňky, je úměrné množství stupňovaného potenciálu (respektive frekvence stupňovaného potenciálu), které bude gangliová buňka vysílat svými axony směrem do zrakového centra. Optimální stav, kdy gangliová buňka vysílá nejvíc signálu je tedy, pokud celé centrum jejího receptivního pole je osvětlené a periferie je ve tmě v případě on-center gangliové buňky. Naopak pokud celé centrum je ve tmě a periferie je osvětlená, vysílá off-center gangliová buňka nejvíc signálu. [8-12]

Vyvstává otázka, jaký je význam takto složitě uspořádání a interakce neuronů na sítnici. On-centra a off-centra umožňují rozpoznávat rozdíl v jasu jednotlivých částí zorného pole a tedy rozpoznat kontrast těchto oblastí. Význam receptivních polí je ve zvýraznění rozdílů, jelikož například malé pole světla obklopené tmavým polem vyvolá silnější odpověď oproti kompletnímu světlému poli. V tomto primárním zpracování zrakového vjemu nervové signály nesou spíše informaci o relativní změně jasu, než že by nesly informaci o absolutním počtu fotonů, které v daný moment dopadají na danou část sítnice. Jde o předání informace, která vystihuje, do jaké míry se liší daná úroveň stimulace od stimulace okolní. Zajímavou demonstrací, jak lidský mozek rozeznává změny v jasu, jsou Chevreul-Machovy proužky. Jedná se o proužky o různém jasu s tím, že každý proužek je celý tvořen pouze jedním odstínem šedé. Na pomezí dvou proužků dochází ke vjemu, že se jeden a ten samý proužek jeví tmavší na pomezí se světlejším proužkem než na pomezí s tmavším proužkem. Tohoto efektu je docíleno právě proto, že receptivní pole na pomezí dvou proužků mají tendenci zvýrazňovat kontrast a vymezit tak přesný přechod. [8,11,12,14]



Obr. 4: Optická iluze Machových proužků. Jednotlivé proužky se jeví světlejší při své levé hraně, která sousedí s relativně tmavším proužkem a naopak tmavší při hranici s relativně světlejším proužkem. [14]

Za krátkou zmínku stojí ještě další typy receptivních polí, ačkoliv tato témata již přesahují problematiku, na kterou je tato práce zaměřena. U zrakových receptivních polí senzitivních na barvu, která jsou složena výhradně z čípků, dochází k obdobnému stimulování a tlumení buněk v závislosti na vlnové délce dopadajícího záření. Existuje několik typů těchto receptivních polí podle jejich on-center nebo off-center povahy a podle toho, která část barevného spektra viditelného světla je stimuluje či utlumuje. V neposlední řadě existují ještě receptivní pole buněk zrakového centra v týlním laloku, která jsou citlivá na orientaci, na délku nebo například na směr pohybu stimulu. [8,9,12]

2. Kontrastní citlivost

Kontrast je veličina popisující přechod mezi tmavším a jasnějším objektem. Kontrast představuje míru rozdílu jasu mezi těmito objekty, částmi jednoho objektu, nebo případně rozdíl jasu mezi objektem a jeho pozadím. Tento poměr je běžně vyjádřený v procentech od 0 % do 100 % a jedná se o bezrozměrnou veličinu. Kontrast o hodnotě 0 % znamená, že není přítomen žádný přechod, hodnoty vyšší než 0 % značí, že mezi objekty je přechod, avšak pro nízké hodnoty ještě nemusí být vnímatelný. V reálném životě nám kontrast umožňuje rozeznat hrany objektů, respektive kde objekt končí a začíná jeho pozadí. V praxi jsou rozlišovány dva typy kontrastu, kterými jsou prostorový kontrast, který popisuje statické objekty o stálé hodnotě jasu, a časový kontrast, který popisuje objekty nebo části objektu s kolísajícím jasnem. Používanějším druhem je prostorový kontrast, který je využit i v rámci této diplomové práce. V závislosti na tom, který test je použit pro vyšetření kontrastní citlivosti (viz níže), se používá buďto Weberův C_W nebo Michelsonův C_M kontrast [15-18]:

$$C_W = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max}),$$
$$C_M = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min}).$$

Weberův kontrast se obvykle používá v případě optotypů, přičemž L_{\min} a L_{\max} představují jas testové značky a jejího pozadí, Michelsonův kontrast většinou charakterizuje optické testy typu mřížka, přičemž L_{\min} a L_{\max} odpovídají minimální a maximální hodnotě jasu.

Podstatnou hodnotou v optometrické a oftalmologické praxi je kontrastní práh. Tato hodnota určuje minimální kontrast, při kterém je oko schopné příslušné jasy od sebe rozeznat. Běžně se však používá převrácená hodnota této veličiny označovaná jako kontrastní citlivost. To znamená, že lidé s nízkou hodnotou kontrastního prahu disponují vysokou kontrastní citlivostí a obráceně. Kontrastní citlivost a kontrastní práh bývají vyjádřeny na logaritmické stupnici podobně jako zraková ostrost. Díky logaritmickému vyjádření je možné jednodušeji vyhodnotit výsledky při velice nízkých nebo velice vysokých hodnotách kontrastu. [15-20]

2.1. Písmenové testy kontrastní citlivosti

Pro testy využívající písmena, která bývají obklopena rozsáhlejším jasným pozadím, je použit Weberův vzorec pro výpočet kontrastu znaku. Rozdílem testů kontrastní citlivosti oproti běžné zrakové ostrosti je fakt, že stěžejní proměnnou je kontrast, a to při dané velikosti znaků. Obvykle je tedy prezentována série znaků (běžně o stejné velikosti) se snižujícím se kontrastem. Je důležité rozlišit testy pro zhodnocení kontrastní citlivosti od nízkokontrastních testů zrakové ostrosti. Příkladem takového testu je Reganova tabule, která je analogická běžnému testu pro zrakovou ostrost. Ačkoliv tento test posuzuje vidění za sníženého kontrastu, nejedná se o test kontrastní citlivosti, jelikož kontrast znaků je stále neměnný. [15,16,19]

Jedním z nejvíce rozšířených písmenových testů pro kontrastní citlivost je Pelli-Robsonova tabule. Skládá se ze 16 trojic písmen, kde mají všechny tři znaky stejný kontrast. Směrem dolů se kontrast trojic znaků logaritmičticky snižuje (od téměř 100% až po asi 1% kontrast), avšak velikost písmen je zachována. Vyšetřovaný je vyzván, aby nahlas jmenoval písmena, dokud je ještě rozezná, přičemž trojice znaků je chápána jako přečtená, pokud jsou z ní rozeznány alespoň dva znaky. Tento test je designovaný pro zhodnocení maximální hodnoty kontrastní citlivosti a je prováděn na vzdálenost 1 metru. [16,21]



Obr. 5: Příklad Pelli-Robsonovy tabule pro vyšetření kontrastní citlivosti. Velikost znaku je v rámci celého testu zachována, avšak s každou čtenou trojicí písmen směrem zleva doprava a směrem dolů klesá kontrast znaků. [22]

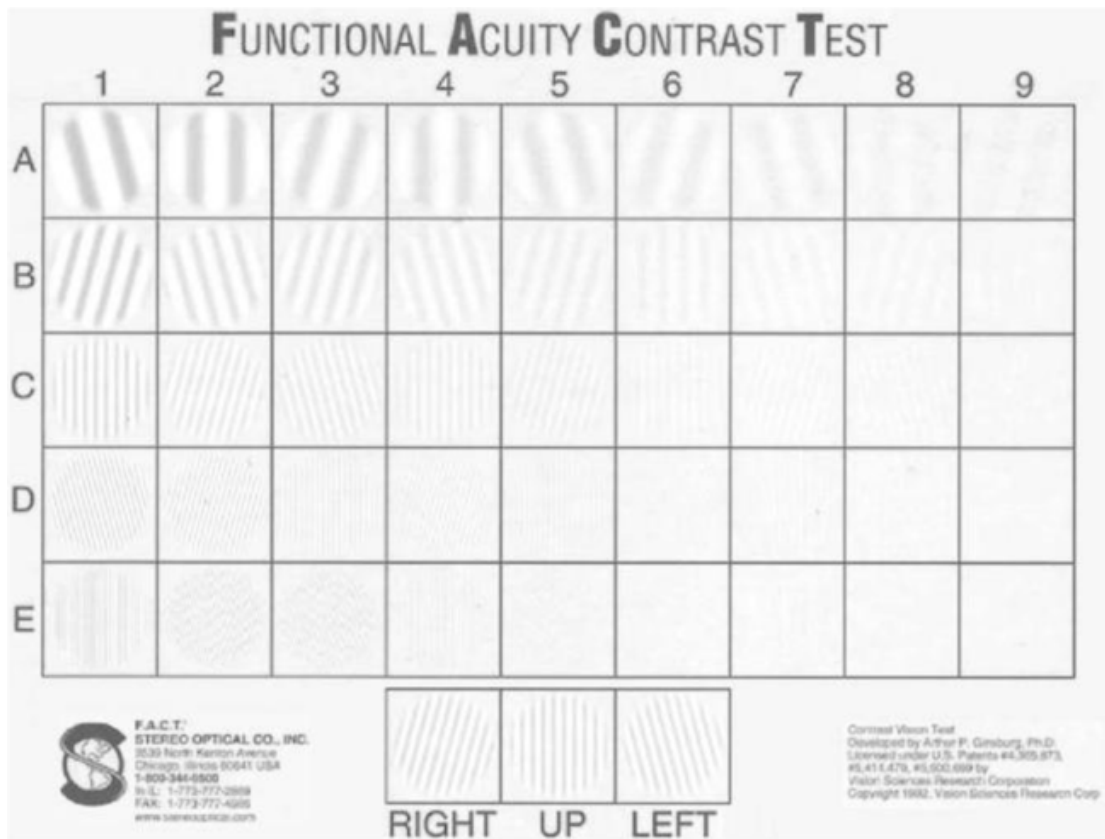
Nezpochybnitelnou výhodou písmenových testů je jednoduché pochopení testu vyšetřovaným, což ve výsledku snižuje dobu testování nezbytnou pro dosažení výsledku. Další výhodou je větší množina možností odpovědi oproti testům se sinusovou mřížkou, které nabízí běžně 3 varianty a falešně pozitivní odpovědi jsou častější. Nevýhodou naopak je, že některá písmena je jednodušší rozeznat oproti ostatním, pokud jsou prezentována za shodného kontrastu. [18,21,23]

2.2. Testy se sinusovou mřížkou

U testů s periodickou sinusovou mřížkou je využíván Michelsonův vzorec pro výpočet kontrastu. Sinusová mřížka je pojem používaný pro testovací znak, ve kterém se střídají světlejší a tmavší proužky. Profil hodnoty jasu tohoto testovacího znaku se mění periodicky a je popsán matematickou funkcí sinus, ze které pramení pojmenování testu. Vzdálenost mezi středy dvou sousedících proužků reprezentující maximální jas (střed světlejšího proužku) a minimální jas znaku (střed tmavšího proužku) představuje jeden cyklus také nazývaný jako prostorová perioda znaku. Její převrácená hodnota je prostorová frekvence, která se obvykle udává v počtu cyklů na 1 stupeň zorného úhlu (cycle/deg). Sinusová mřížka má v popisu přenosu kontrastu optickou soustavou zvláštní význam, jelikož každý obraz lze pomocí tzv. Fourierovy analýzy rozložit na množinu (teoreticky nekonečně mnoha) takovýchto mřížek o různé frekvenci, fázi a amplitudě. [15-19,23]

Jedním z aktuálnějších testů využívajících sinusovou mřížku je Functional Acuity Contrast Test FACT. Tento test obsahuje 5 řádků kruhových znaků s různou prostorovou frekvencí, kde se směrem zleva doprava snižuje kontrast mřížky, ale prostorová frekvence je totožná. Vyšetřovaný je vyzván, aby určoval orientaci proužků v daném řádku, dokud je schopen jejich orientaci ještě rozeznat. Poslední správně rozeznatý znak určuje kontrastní citlivost pro danou prostorovou frekvenci. FACT umožňuje vyšetřujícímu takto zjistit kontrastní citlivost pro pět různých prostorových frekvencí. Množina možností orientace proužků typicky zahrnuje varianty přímo nahoru, diagonálně doleva a diagonálně doprava. FACT a jemu podobné testy se sinusovou mřížkou zaostávají v rozšířenosti za písmenovými testy, protože mají špatnou test-retest opakovatelnost díky

omezenému počtu orientací proužků, který test nabízí. Díky tomu nejsou příliš rozšířené ani v klinických studiích. [17,18,20]

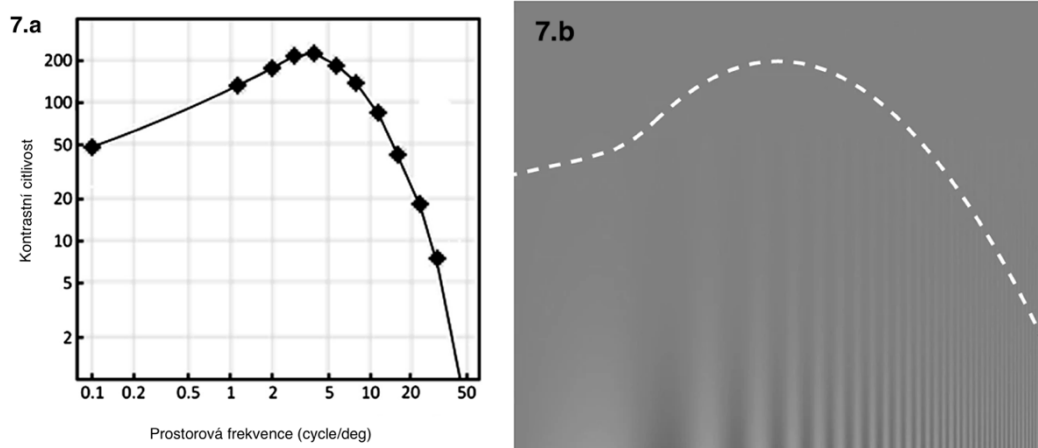


Obr. 6: Příklad Functional Acuity Contrast Testu FACT. Ve spodní části jsou znázorněny možnosti orientace testové značky. Test je rozdělen do řádků o shodné prostorové frekvenci a sloupců o shodném kontrastu. [24]

Původ sinusové mřížky pro testování optického systému oka pramení z modulační přenosové funkce, která taktéž využívá testy s různou hodnotou prostorové frekvence pro zhodnocení kvality zobrazení optickými systémy. Při takovémto testování běžně dochází k nedokonalému přenosu kontrastu optickým systémem z důvodu přítomnosti aberací, avšak periodický profil jasu zůstává sinusoidní. Bylo empiricky zjištěno, že lidské oko vykazuje nejlepší hodnoty kontrastní citlivosti pro testové znaky s orientací proužků v 90 stupních (případně 180 stupních), proto se běžně pro testování kontrastní citlivosti volí znaky s touto orientací proužků. Modulační přenosové funkci odpovídá křivka kontrastní citlivosti oka. [15-17]

2.3. Křivka kontrastní citlivosti

Křivka kontrastní citlivosti (případně označována jako funkce kontrastní citlivosti) vyjadřuje kontrastní citlivost oka (osa y) jako funkci prostorové frekvence (osa x) znaku se sinusovou mřížkou. Pro osu x i osu y je standardně použita logaritmická stupnice. Hodnoty nízké prostorové frekvence se nachází nalevo a jedná se o testové značky s poměrně tlustými proužky, na pravé straně jsou vysoké hodnoty prostorové frekvence charakterizované velice tenkými proužky. Svislým směrem ze spodu nahoru se kontrast testové značky snižuje a tedy roste kontrastní citlivost. Mřížky nacházející se pod křivkou jsou vyšetřovaným rozlišitelné, mřížky nad křivkou již rozlišitelné nejsou. Průsečík křivky s osou x v oblasti vysokých hodnot prostorové frekvence (přibližně 50 cycle/deg) odpovídá nejjemnější mřížce sledované s maximálním kontrastem. Jedná se tedy o hodnotu zrakové ostrosti. [15-18,21,23]



Obr. 7.a a 7.b: Černé body na křivce v 7.a (nalevo) představují jednotlivá měření kontrastní citlivosti v rámci klinické studie. Napravo (7.b) je graficky znázorněno, jak se jeví prostorové frekvence (horizontální osa) od maximálního až po minimální kontrast (vertikální osa). Souvislá křivka v 7.a a přerušovaná křivka v 7.b představují průměrnou křivku kontrastní citlivost u zdravého jedince. [18,25]

Lidský zrakový systém je nejcitlivější pro střední hodnoty prostorové frekvence, pokud je použita logaritmická stupnice, takže se jedná o hodnoty mezi 3 a 6 cycle/deg. Pro objekty charakterizované vyšší nebo nižší prostorovou frekvencí je potřeba vyšší kontrast, aby byly spolehlivě rozlišeny. U zdravých jedinců je pokles kontrastní citlivosti rychlejší směrem k vyšším prostorovým frekvencím a pozvolnější k nižším. [16-18,21]

Maximální hodnota kontrastní citlivosti během stárnutí má tendenci se posouvat k nižším hodnotám prostorové frekvence a je zapotřebí vyššího kontrastu pro spolehlivé rozlišování. Také některé patologie mají vliv na křivku kontrastní citlivosti. V závislosti na dané patologii nebo zrakové potíži může docházet k celkovému poklesu křivky kontrastní citlivosti, nebo pouze k selektivnímu poklesu pro určité rozpětí prostorové frekvence. Běžným příkladem je celkový pokles při kataraktě nebo selektivní pokles kontrastní citlivosti u nízkých hodnot prostorové frekvence při věkem podmíněné makulární degeneraci. Zhoršení kontrastní citlivosti u nízkých hodnot prostorové frekvence je také typické u oslnění, kterému se blíže věnuje kapitola 4. Naopak nedokorigovaná refrakční vada či tupozrakost má vliv na vysoké hodnoty prostorové frekvence, avšak příliš neovlivňuje nízké hodnoty. [15,19]

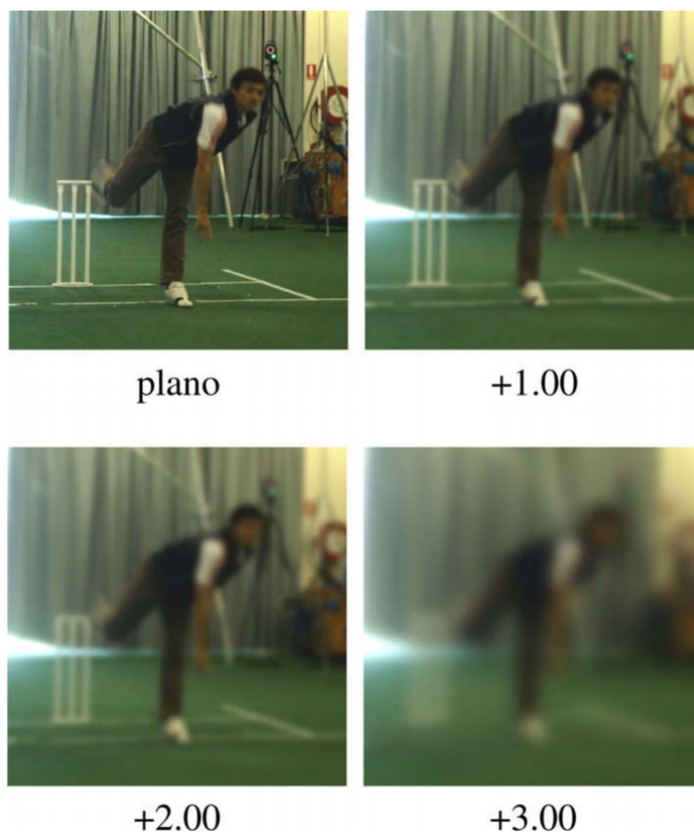
Měření kompletní křivky kontrastní citlivosti by bylo velice časově náročné jak pro vyšetřovaného tak pro vyšetřujícího, protože pro získání kompletního souboru dat by bylo zapotřebí zjistit prahovou hodnotu kontrastu pro všechny prostorové frekvence až po hranici vymezenou zrakovou ostroší. Z tohoto důvodu se volí přístup, který se soustředí pouze na určité prostorové frekvence, typicky se jedná o 5 hodnot v rozpětí 1 cycle/deg až 16 cycle/deg, kde je kontrastní citlivost nejvyšší. Z těchto hodnot je poté celková křivka kontrastní citlivosti odhadována. Další možností je dosažení částečného výsledku z kombinace zrakové ostrosti, která popisuje vysoké prostorové frekvence, a kontrastní citlivosti pro nízké prostorové frekvence. Alternativou je nahrazení vyšetření nízkých prostorových frekvencí vyšetřením středních prostorových frekvencí mezi 3 až 6 cycle/deg (srovnatelné se znaky zrakové ostrosti o vízu 0,1), které přibližně odpovídají rozpětí, pro které má zrakový systém maximální kontrastní citlivost. Tyto hodnoty velice dobře odhadují stav kontrastní citlivost jedince. [18,19,23]

2.4. Význam měření kontrastní citlivosti

Stanovení kontrastní citlivosti je velice přínosným vyšetřením zrakových funkcí, avšak se zdá být kriticky podceňováno ve srovnání s vyšetřením zrakové ostrosti. Lze odhadovat, že jedinec s výbornou kontrastní citlivostí bude mít výbornou zrakovou ostrost, což však nelze tvrdit obráceně. Testy kontrastní citlivosti přináší náhled do

pacientova skutečného vnímání okolního světa. Jedinci s výrazně zhoršenou kontrastní citlivostí stále mohou vykazovat průměrné nebo i nadprůměrné hodnoty zrakové ostrosti, ale budou si stěžovat na špatné vidění při běžných denních činnostech a to zejména při zhoršených světelných podmínkách. Poznávání obličejů, rozeznávání objektů při řízení, čtení nebo manipulace s běžnými objekty mohou být značně ztíženy pro jedince se špatnou kontrastní citlivostí i když mají zrakovou ostrost v normálních hodnotách. Dá se říct, že v některých případech zraková ostrost přeceňuje zrakový stav pacienta i přes jeho stížnosti na zhoršenou kvalitu vidění. Spojitost mezi bezpečností řízení a zrakovou ostrostí se zdá být slabá oproti spojitosti mezi bezpečností řízení a kontrastní citlivostí. I přesto je test zrakové ostrosti díky jeho praktičnosti nejčastějším testem pro zhodnocení způsobilosti k řízení. [16-18,20,21,26]

Zraková ostrost je vyšetřována o vysokém neměnném kontrastu (85 % a více) se snahou dosáhnout nejlepší rozlišovací schopnosti pro co nejmenší znaky, což podává informace pouze o malém zlomku objektů a situací v reálném světě. Kontrastní citlivost umožňuje vyšetřit zrakový systém přes širokou škálu kontrastů a prostorových frekvencí a přináší tedy ucelenější posouzení pacientova vidění světa, jelikož v běžném světě je většina objektů o nižším kontrastu. Při rozeznávání objektů o nízkém kontrastu je hlavním mechanismem rozlišování rozdílů v jasů nikoliv schopnost odlišit od sebe drobné detaily objektu. Mann et al. [27] ve své studii testovali vliv zamlžení spojnou čočkou na výkon hráčů kriketu. Výsledky naznačují, že úspěšnost odpalovačů nebyla značně zhoršená při zamlžení +2 D, ale zhoršila se až s použitím zamlžení +3 D. Zdá se tedy, že i při výrazně zhoršené zrakové ostrosti je možné se spolehnout na rozeznávání rozdílů jasů i při náročných situacích, kdy je potřeba rozlišit velice malý a v tomto případě rychle se pohybující objekt. [16-18,21,23,27]



Obr. 8: Simulace zrakového vjemu odpalovače kriketu před zamlžením kontaktní čočkou (plano) a po jednotlivých stupních zamlžení spojnou kontaktní čočkou ze studie Mann et al. [27]

Velkým přínosem testování kontrastní citlivosti je také možnost časně diagnostiky některých očních a neurologických chorob, které mají mimo jiné i projevy na křivce kontrastní citlivosti. Příkladem může být odhalení neuritidy optiku, roztroušené sklerózy nebo určitých mozkových lézí, které nemusí mít vliv na zrakovou ostrost a jejich odhalení není snadné při rutinním vyšetření zrakové ostrosti. Kontrastní citlivost může také posloužit pro monitorování progresu onemocnění nebo úspěšnosti léčiva či terapie u chorob, které by se na zrakové ostrosti nepodepsali. Odvětví refrakční chirurgie je vhodným kandidátem pro použití testu kontrastní citlivosti jako předoperačního vyšetření a jako doplňkového vyšetření pro monitorování stavu pacienta při následných návštěvách kliniky. [16,17,19,20,26]

3. Světelné podmínky, noční myopie a adaptace

Jednou z významných funkcí lidského zrakového systému je jeho schopnost přizpůsobit se různým světelným podmínkám během dne. Proces, během kterého se oko přizpůsobí určité hodnotě jasu, které může být vystaveno, je nazýván adaptace. Při dostatečné délce adaptace je možné se přizpůsobit až hodnotám tzv. absolutních prahových jasů, což jsou extrémní hodnoty jasu, které jsou ještě vnímatelné. Proces adaptace je podrobněji popsán v kapitole 4.2. Jsme takto schopni rozeznávat objekty nejen během slunného dne, ale i za tmy anebo během zhoršených pozorovacích podmínek, jako je například mlha. Oko je schopno kontinuálně fungovat přes enormní rozsah jasu o velikosti 10 logaritmických jednotek. Schopnost vnímat takto široké rozpětí jasů je umožněna rozložením celkové šíře mezi dva druhy fotoreceptorů, kterými jsou tyčinky a čípky (viz kapitola 1.), jejichž funkce se v části celkového rozsahu překrývá. [28-34]

3.1. Světelné podmínky

Celková šíře světelných podmínek, které je oko ještě schopno vnímat, je dělena na tři části v závislosti na tom, které fotoreceptory se během ní podílí na vidění. Jedná se o světelné podmínky skotopické, fotopické a mezopické. V následujících podkapitolách jsou tyto rozpětí světelných podmínek blíže popsány.

3.1.1. Skotopické podmínky

Skotopické světelné podmínky vystihují vidění za tmy v rozsahu jasů řádově od 10^{-2} do 10^{-6} cd/m². Spodní hranicí skotopického vidění představuje spodní jasový práh tyčinek a vrchní hranicí spodní jasový práh čípků. Vidění za skotopických podmínek je zprostředkováno pouze tyčinkami, jelikož tyčinky mají vyšší citlivost na světlo oproti čípkům, které už takto nízké hladiny jasu nedokáží adekvátně zpracovat. Bylo ověřeno, že během ideálních podmínek po dostatečném setrvání ve tmě jsou tyčinky schopné i

detekce jediného fotonu. Takto vysoká citlivost je umožněna prostorovou sumací v rámci tyčinkových receptivních polí, kde dochází k obětování rozlišení detailu a perfektně přesné lokalizace podnětu za účelem zlepšení vnímání velice slabého jasu. Prostorová sumace se dá chápat jako kombinace všech podnětů v rámci receptivního pole v určitém čase s tím, že výstupem je pouze součet celkového podnětu nikoliv jeho rozložení přes receptivní pole. [9,28,33,34]

Během skotopických podmínek, když nejsou zapojeny čípky, nedochází k barevnému vjemu. Tyčinky sice mají rozdílnou citlivost pro různé vlnové délky světla, avšak citlivost určuje pouze šanci, že jednotlivé fotony budou absorbovány. Maximální citlivost během skotopického vidění odpovídá maximální citlivosti tyčinek tedy asi 507 nm. Odpověď tyčinek na všechny možné vlnové délky viditelného světla je totožná, jediné, co mění odpověď tyčinek, je pouze počet absorbovaných fotonů. [29,31,33]

3.1.2. Fotopické podmínky

Fotopické vidění je vidění za denních podmínek při vysokých jasech řádově nad 10^0 cd/m^2 . Spodní hranice fotopického vidění je vymezena horním jasovým prahem tyčinek. Nad touto hranicí jsou tyčinky saturované a nejsou schopné zaregistrovat rozdíly v jasů. Proces vidění je tedy pouze zprostředkován třemi typy čípků, jejichž spektrální citlivosti se překrývají. Průměrná spektrální citlivost všech typů čípků je přibližně 555 nm. Nízká citlivost čípků zde není překážkou, jelikož dochází k dostatečné stimulaci a je tak umožněno barevné vnímání a zvýšená zraková ostrost. Při náhlé změně jasu také dochází k přechodné saturaci čípků, ale díky jejich rychlému přizpůsobení je možné vnímat jasy i v rámci hodnot poblíž 10^4 cd/m^2 . [28,30,33,34]

3.1.3. Mezopické podmínky

Mezopické podmínky tvoří přechodovou oblast mezi fotopickým a skotopickým viděním a vystihují vidění za šera nebo zhoršených světelných podmínek. Tento přechodový interval je v rozsahu řádově od 10^0 až do 10^{-2} cd/m^2 a dochází zde k vnímání

za pomoci čípků a tyčinek zároveň a k jejich spolupráci. Mezopická oblast je vyhraněna spodním jasovým prahem čípků a horním jasovým prahem tyčinek. Při mezopických jasech fungují jak tyčinky, tak čípky v extrémě jejich rozsahů, na které nejsou specializované. Příkladem může být zvýšení citlivosti čípků v blízkosti jejich jasového prahu, kdy se navýší jejich míra sumace na úkor zrakové ostrosti. Zraková ostrost s ubývajícím jasem během mezopických podmínek může klesnout až na poloviční hodnotu fotopické zrakové ostrosti. Aktivita jako řízení auta v noci, chůze večer po městě nebo pobyt ve slabě osvětlených vnitřních prostorech v dnešní moderní době spadají právě do mezopické oblasti, ačkoliv samotná tvoří pouze malou část celkového rozsahu jasů, které je oko schopno vnímat. Maximální citlivost v této oblasti se nachází mezi 507 nm a 550 nm v závislosti na aktuálním jasu a tedy zda převládá funkce tyčinek či čípků. Tento posun maximální citlivosti optického systému směrem ke kratším vlnovým délkám v závislosti na okolním jasu bývá označován jako Purkyňův posun. [28-30,34]



Obr. 9: Příklad hraničních mezopických podmínek při řízení auta. Míra rozmazání komunikace a protijedoucích aut je pouze ilustrativní. [35]

V rámci mezopického vidění může být u některých jedinců pozorován jev označovaný jako noční myopie, který se umocňuje snižováním okolního jasů směrem ke skotopickým hodnotám. Mechanismům a možnostem řešení noční myopie se věnuje následující kapitola.

3.2. Noční myopie

Noční myopii neboli noční krátkozrakost lze charakterizovat jako přetrvávající stav nadměrné refrakční hodnoty optického systému oka bez zjevné biologické příčiny, který lze pozorovat za zhoršených světelných podmínek. U pacientů trpících noční myopií je při nízkých hladinách okolního jasu (např. za šera nebo v noci) zapotřebí korekce rozptylnou čočkou pro dosažení požadované ostrosti pozorovaných objektů, tak jak by tomu bylo u běžné myopie. Běžné hodnoty noční myopie jsou v řádu 1 D a poměrně stále v čase, avšak míra vady je velice proměnlivá mezi jedinci a může dosahovat až hodnoty 4 D ve výjimečných případech. Podle aktuálního chápání je noční myopie způsobena několika faktory. Hlavními faktory, které ji vyvolávají, jsou Purkyňův posun kombinovaný s chromatickou vadou oka, sférická aberace a změna akomodace optického systému oka. Jednotlivé faktory jsou níže přiblíženy. [15,36-40]

Chromatická aberace oka zapříčiní jev, kdy se ohnisko světelných paprsků o kratší vlnové délce neshoduje s ohniskem paprsků o delší vlnové délce. Světelné paprsky modré barvy budou více lomivé než paprsky barvy červené. V kombinaci s Purkyňovým posunem (viz kapitola 3.1.3.), kdy maximální citlivost optického systému se posouvá od vlnové délky 550 nm k 507 nm v závislosti na ubývajícím jasů okolí, dochází k tomu, že při nízkých skotopických hladinách jasu bude oko nejcitlivější pro paprsky, které podléhají vyšší lomivosti a optický systém oka se celkově bude jevit jako myopický oproti situaci za fotopických podmínek. Ačkoliv celková podélná chromatická aberace oka nabývá hodnoty až 2 D přes celé viditelné spektrum, tato část myopizace dosahuje za běžných podmínek pouze hodnoty asi 0,4 D a nejedná se tedy o jedinou součást celkové noční myopie. [15,36-38]

Sférická aberace je dalším faktorem podílejícím se na myopizaci oka za snížených světelných podmínek. V rámci fotopické oblasti je zornice zúžená a hlavní podíl na lomu světelných paprsků má centrální část rohovky. Za mezopických a skotopických podmínek se zornice rozšiřuje a značně se projeví vliv periferie rohovky, kterou nyní paprsky prochází a podílí se na tvorbě obrazu na sítnici. Sférickou aberaci poté lze chápat jako jev, kdy paprsky procházející periferií mají odlišnou lomivost než centrální paraxiální paprsky. V případě noční myopie, kdy se jedná o pozitivní sférickou aberaci, tyto

periferní paprsky budou mít ohnisko před centrálními paprsky a budou se tedy jevit více myopické. Pokud je periférie naopak více hypermetropická oproti centrální části rohovky, jedná se o negativní sférickou aberaci a tento jev se označuje jako noční hypermetropie, kterou však optický systém oka dokáže jednodušeji kompenzovat akomodací a nepůsobí tak značné potíže. K umocnění vlivu periferní části rohovky také napomáhá utišení Stiles-Crawfordova efektu při skotopických podmínkách, který za podmínek fotopických zajišťuje upřednostnění kolmo dopadajících paprsků na buňky fotoreceptorů, aby bylo dosaženo co nejlepšího možného zobrazení, a odpověď na kolmo dopadající paprsky je značně tlumena. Stiles-Crawfordův efekt zajišťuje ostré vidění za denních podmínek potlačením rušivého rozptýleného světla. Společně se sférickou aberací dochází při rozšíření zornice k umocnění stávající nedokorigované vady jedince, pokud je přítomna. Neostrost pozorovaného objektu díky neúplnosti korekce bude značně více vnímatelná za skotopických podmínek než za podmínek fotopických díky snížení hloubky ostrosti a zvětšení rozptylového kroužku. [36-39]

Změna akomodace se jeví jako stěžejní faktor ovlivňující noční myopii a běžně představuje největší část celkové hodnoty noční myopie. Za mezopických a skotopických podmínek oko nepřechází do uvolněného stavu akomodace při pohledu do dálky, naopak podléhá aktivní akomodaci. V závislosti na úbytku okolního jasu se předmětové ohnisko optického systému oka posouvá při pohledu do dálky z dalekého bodu oka směrem k blízkému bodu a přibližuje se k určitému místu, ve kterém je optický systém v klidovém tonickém stavu. Toto místo bývá v anglické literatuře označováno jako noční ohnisko (z anglického *dark focus*) a jeho průměrná vzdálenost od oka je v populaci asi 1 m od oka, což odpovídá akomodaci 1 D, ale hodnoty vzdálenosti nočního ohniska jsou v populaci velice proměnlivé a mohou dosahovat až 40 cm od oka korespondující akomodaci 2,5 D. Noční ohnisko je tedy takové předmětové ohnisko, na které je oko zaostřeno v absolutní tmě. V takovémto klidovém stavu je akomodace nižší pro blízké předměty než při fotopických podmínkách a naopak vyšší pro vzdálené předměty, což vysvětluje pozorovanou myopizaci oka do dálky a také případnou hypermetropizaci do blízka, která někdy bývá označována jako noční presbyopie. Při jasech v mezopické oblasti se optický systém tomuto nočnímu ohnisku přibližuje, avšak jeho předmětové ohnisko se bude nacházet dále od oka. Akomodace za mezopických podmínek tedy není tak silná (přibližně pouze 1/2 maximální hodnoty) a celková míra noční myopie bude nižší než za skotopických podmínek. Důkazem významnosti akomodace při noční myopii je také fakt,

že při cykloplegii (dočasného ochabnutí akomodace vyvolané léčivý) a afakii (stavu nepřítomnosti čočky v oku) je celková noční myopie snižena a odpovídá přibližně součtu sférické aberace a chromatické vady. S nástupem presbyopie také dochází ke snížení hodnoty noční myopie. [15,36-40]

Modernějším chápáním příčiny nadměrné akomodace při úbytku okolního jasu je nedostatečná kvalita stimulu pro správnou akomodaci, což bývá za snížených světelných podmínek způsobeno zhoršenou ostroostí a kontrastní citlivostí nikoliv samotným okolním jasem. Pro vyvolání adekvátně silné akomodace na požadovanou vzdálenost je zapotřebí vyššího kontrastu pro potlačení posunu k nočnímu ohnisku než takového kontrastu, který je postačující pro pouhé rozpoznání předmětu. Správnost tohoto aktuálního chápání aktivní akomodace za snížených světelných podmínek také podporuje vysoká korelace hodnoty nočního ohniska s ohniskem myopie prázdného pole, kde tyto jevy nabývají podobných hodnot. Myopie prázdného pole vzniká například při pohledu do prostoru, kde není dostatečný podnět pro akomodaci. Právě tato absence podnětu nebo jeho snížená kvalita je spojitostí mezi noční myopií a myopií prázdného pole a vysvětluje podobné hodnoty klidového stavu akomodace, ke kterým u nich dochází. Přístrojová myopie ve svém maximu také nabývá hodnot přibližně korespondujících nočnímu ohnisku, avšak zde se jedná o jiný mechanismus, který tento stav vyvolává. K přístrojové myopii například dochází při pohledu do mikroskopu, kde sice podnět pro akomodaci je dostatečně kvalitní, ale malá výstupní pupila přístroje působí zvětšení akomodační šíře a akomodace samotného optického systému oka není vyžadovaná pro zlepšení kvality obrazu a optický systém tedy opět přechází do svého klidového stavu. Jakákoliv absence nebo degradace kvality stimulu pro akomodaci, nebo absence nutnosti akomodace v případě přístrojové myopie vede optický systém oka k návratu do klidového stavu, který přibližně odpovídá nočnímu ohnisku. [15,36,37,39,40]

Ve své studii López-Gil et al. [38] přináší nový pohled na povahu noční myopie. Zjistili, že pro nejostřejší vnímání bodového zdroje světla na tmavém pozadí za fotopických podmínek bylo zapotřebí vyšší záporné korekce než pro rozlišení klasických černých znaků na bílém pozadí. Jelikož bodové zdroje převládají za nočních podmínek (například při řízení) oproti rozsáhlejším objektům, na které se zaměřujeme během denních podmínek, právě povaha stimulů, které považujeme za důležité, může být součástí vnímané noční myopie. Při značně vyšším retinálním kontrastu během nočního

vidění je také jednodušší odhalit nedokonalosti v zobrazení bodového zdroje světla než při denním vidění. Další zajímavý poznatek přinesli ve své studii Chirre et al. [39]. V rámci jejich experimentu odhalili nižší hodnoty noční myopie při binokulárním vidění oproti monokulárnímu. Možným vysvětlením je, že fúznívergence napomáhá přiblížit se adekvátní akomodaci pro danou vzdálenost a potlačit tak snahu optického systému oka navrátit se do klidového stavu, kdy je akomodován na noční ohnisko. Mezi subjekty byly značné rozdíly v hodnotě noční myopie, avšak subjekty s vysokou monokulární noční myopií stále měly vysokou binokulární myopii a subjekty s nízkou monokulární myopií měly nízké hodnoty binokulární myopie.

3.2.1. Korekce noční myopie

Pokud noční myopie nebo případně myopie prázdného pole působí potíže a mohla by ovlivnit například pacientovy řídicí schopnosti, bylo by vhodné takovou vadu korigovat. Jak již bylo zmíněno, pro korekci noční myopie je volena korekce se zápornější hodnotou oproti běžné korekci. Pro zjištění požadované korekce je možné využít metodu noční skiaskopie. Postup je velice podobný klasické skiaskopii, ale noční skiaskopie by měla být prováděna v absolutní tmě na vzdálenost přibližně 0,5 m s korekcí do dálky. Z noční skiaskopie je možné odvodit hodnotu pacientova nočního myopického přídatku následujícím empirickým vzorcem [36,37]:

$$\varphi = \frac{NS - 0,25 D}{0,64},$$

kde φ je hodnota optické mohutnosti adekvátního myopického přídatku v dioptriích a NS je vrcholová lámavost předložené neutralizační čočky v dioptriích při vyšetření noční skiaskopie. Počítáme-li však s tím, že moderní dopravní komunikace se svým osvětlením spadají do mezopické oblasti, je vhodnější volit poloviční hodnotu tohoto odhadu. [36,37]

Korekce noční myopie sebou přináší spoustu negativ. Dioptrická hodnota pro optimální korekci je proměnná v závislosti na světelných podmínkách a dokonce i počasí. Tedy korekce stanovená pro řízení za šera bude nedostatečná pro řízení na neosvětlené komunikaci za deště. Dále se jeví být přijatelnější korekce u nízkých hodnot noční

myopie, kde korekce poslouží pouze jako výpomoc pro řidiče, ale u vysokých hodnot noční myopie má takováto korekce neuspokojivé výsledky a je nutné volit více hodnot korekce pro různé podmínky. V některých případech korekce noční myopie dokonce subjektivně zhoršuje klientovo vidění za šera. V neposlední řadě, pokud jedinec popisuje symptomy noční myopie, ale není podezření na její výskyt, je na prvním místě vhodná úprava běžné denní korekce, jelikož nedokorigovaná vada bude umocněna za zhoršených světelných podmínek. Za vyšších mezopických podmínek při plné denní korekci by poté běžná noční myopie neměla působit výrazné potíže. [36,37]

3.3. Adaptace

V širším pojetí adaptace oka na dané světelné podmínky popisuje přizpůsobení se vyšším či nižším hodnotám okolního jasu. Je zřejmé, že k adaptaci dochází přímo na sítnici, nikoliv v mozkové kůře. Jednoduchým důkazem je zakrytí jednoho oka vyšetřovaného, který je adaptován na tmou, a vystavení druhého oka vysokému jas. Po odkrytí bude předtím zakryté oko velice citlivé na světlo, protože jeho fotoreceptory neměly možnost se adaptovat, což dokazuje, že adaptace není centrálně řízena. Běžně se adaptace rozlišuje na adaptaci na tmou a adaptaci na světlo. [41-43]

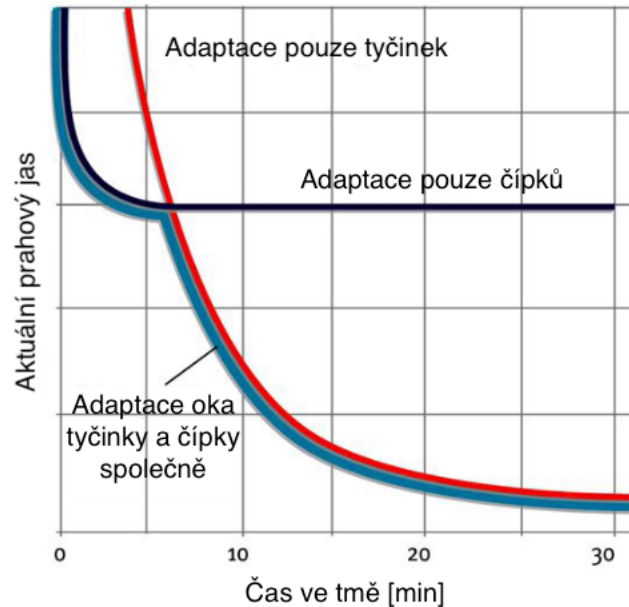
3.3.1. Adaptace na tmou

Adaptace na tmou vystihuje, jak oko, respektive jeho fotoreceptory, jsou schopny obnovit svou citlivost pro noční vidění po vystavení jasnému světlu, které způsobí vybělení dostatečného množství zrakového pigmentu. Adaptace na tmou úzce souvisí s regenerací zrakového pigmentu tyčinkových buněk, jelikož doba trvání obou těchto procesů je přibližně stejná. Dále se také jeví, že existuje logaritmická závislost mezi prahovým jasnem a koncentrací pigmentu rhodopsinu v tyčinkách. Prahový jas je nejnižší hodnota jasu vnímatelná při aktuální adaptaci oka na tmou. Dále se popisuje absolutní prahový jas, což je minimální hodnota jasu testové značky nebo pozorovaného objektu, která je dostatečná pro vyvolání zrakového podnětu při maximální adaptaci na tmou. Pod

touto hodnotou již není možné odlišit signál ze slabého dopadajícího světla od vnitřního šumu fotoreceptorů. [41,42,44,45]

K adaptaci na tmou dochází ve dvou fázích, první fází je fáze čípková, která je značně rychlejší. Trvání čípkové fáze je přibližně 5 až 8 minut. Z počátku citlivost čípků velice rychle vzrůstá a při přiblížení ke spodnímu čípkovému prahovému jasů se zpomaluje, dokud nedojde k ustálení citlivosti zrakového systému na této hranici. Po 10 minutách pobytu ve tmě nastupuje fáze tyčinková. Tyčinky se adaptují postupně od samotného vymizení jasněho stimulu, který je původně saturoval, avšak jejich funkce je obnovena až po přibližně 10 minutách, kdy už jejich citlivost je nižší než citlivost čípků. Na začátku tyčinkové fáze adaptace na tmou se prahový jas opět velice rychle snižuje, avšak s postupem času se jeho snižování podstatně zpomaluje. Pro dosažení maximální adaptace na tmou je nutný pobyt ve tmě po dobu asi 40 až 50 minut. Po takovéto době klesne prahový jas až na hodnotu absolutního prahového jasů. [41,44,46]

Výstupem měření adaptace na tmou je adaptační křivka. Experimentálně je adaptační křivka dosažena tak, že vyšetřovaný sleduje jasné předadaptační světlo po dobu 5 minut, které slouží pro saturaci tyčinek a pozvednutí prahového jasů pro co nejlepší normalizaci výsledků. Následně je stimul odstraněn a proces adaptace vyšetřovaněho je zaznamenáván. Po dostatečné normalizaci je možné sledovat adaptaci na tmou v jejím celém rozsahu a je dosaženo typické dvoufázové křivky (fáze čípková a fáze tyčinková). Čím vyšší je intenzita předadaptačního světla, tím delší bude čípková fáze, dále bude delší zpoždění nástupu tyčinkové fáze a také se prodlouží čas potřebný pro dosažení absolutního prahového jasů. Nízká intenzita nebo krátké trvání předadaptačního světla může způsobit nedostatečné vybělení tyčinkového pigmentu a tedy i úplnou absenci čípkové fáze a rychlý pokles prahového jasů na jeho absolutní prahovou hodnotu. Pro dosažení dvoufázové křivky je také důležitá dostatečná úhlová velikost předadaptačního světla, protože pokud je stimul příliš malý a pokrývá pouze oblast fovey, bude pozorována pouze jedna fáze, kterou je fáze čípková, z důvodu absence tyčinek ve fovee. [44]



Obr. 10: Znárodnění závislosti prahového jasu optického systému oka v závislosti na délce pobytu ve tmě. Červená křivka reprezentuje průběh adaptace tyčinek, která je z části kryta čípkovou fází adaptace. Černá křivka reprezentuje průběh adaptace čípků, jež je následně předstihnuta fází tyčinkovou. Světlemodrá křivka reprezentuje celkovou adaptaci oka v daném momentu. [47]

Z pozorování těchto dvou fází byla vyslovena teorie duplicitního vidění, která objasnila, že existuje určitá hodnota jasu, nad kterou je vidění zabezpečeno jedním typem fotoreceptorů (čípky), a dále hodnota jasu, pod kterou je vidění umožněno jiným typem fotoreceptorů (tyčinkami). Přechod mezi jednotlivými mechanismy však není okamžitý, ale oba mechanismy pracují společně v přechodové oblasti mezopických světelných podmínek (viz kapitola 3.1.3.). [44]

3.3.2. Adaptace na světlo

Adaptace na světlo probíhá výrazně rychleji oproti adaptaci na tmou, díky výrazně rychlejší odpovědi čípkových fotoreceptorů na světlo. Hlavním důvodem je velice rychlá regenerace čípkového pigmentu, které je dosaženo i při jeho přechodném vybělení. [28,41,44,46]

Za denních podmínek je nutné, aby se oko velice rychle přizpůsobilo náhle změně okolního jasu a bylo tak schopno rozeznávat okolní objekty. V rámci fotopického vidění

je díky rychlé adaptaci na světlo zajištěna kontinuální funkce čípků. Ty se průběžně přizpůsobují, aby v každém momentu byly schopné vnímat jas v dynamickém rozpětí 10^4 cd/m² nezávisle na jasu, na který jsou aktuálně adaptovány. Jelikož k adaptaci na světlo dochází průběžně a plynule během celého dne, rozdíly v průměrné hodnotě jasu o velikosti desetinásobku až stonásobku je obtížně subjektivně zaznamenat. [28,43,44,46]

Čípkové fotoreceptory podobně jako tyčinky snižují svoji citlivost úměrně ke vzrůstajícímu okolnímu osvětlení. Po přechodné saturaci při náhlém zvýšení jasu dochází v čípcích k desenzitaci (zncitlivění), kterou si lze představit jako částečné ztlumení fototransdukční biochemické kaskády (viz kapitola 1.1.). Vlivem desenzitace jsou čípky schopné překonat prahový jas, který jejich saturaci vyvolal, a adaptovat se, aby nereagovaly nepřiměřeně na jasy relativně k jejich aktuální adaptaci. Čípkové fotoreceptory jsou schopné se tak přizpůsobit i velice vysokým jasům, dokud nedojde k jejich absolutní saturaci. Jakmile okolní jas opět poklesne pod hodnoty jasů působící saturaci čípků, citlivost čípků se opět obnovuje (viz adaptace na tmu). [41,42,45,48]

Pomocným mechanismem adaptace jak na světlo, tak na tmu je změna velikosti zornice. Při adaptaci na světlo se plocha zornice zmenší přibližně 10krát oproti velikosti zornice při úplné adaptaci na tmu pro zlepšení zobrazovacích vlastností a limitaci nadbytečného světla. Během adaptace na tmu se naopak zvětšuje a zvýší se tak celkové množství dopadajícího světla na sítnici o 1 logaritmickou jednotku, což napomáhá přiblížení se ke spodnímu prahovému jasu. [41,43]

4. Oslnění

V širokém pojetí je možné oslnění chápat jako jev, kdy silné světlo znesnadňuje vidění nebo působí nepříjemný pocit. Oslnění je způsobeno jasy, které jsou příliš intenzivní nebo příliš proměnné v zorném poli pozorovatele. Oslnivé světlo je tedy světlo vstupující do oka, které nenapomáhá vidění, ale naopak vidění zhoršuje nebo negativně ovlivňuje zrakovou pohodu. Zdroje oslnivého světla, respektive zdroje oslnění, mohou být přímé (např. světla protijedoucího auta) nebo nepřímé (např. vodní hladina odrážející světlo). [15,49,50]

Vyšetření zrakové ostrosti za běžných vyšetřovacích podmínek není schopno adekvátně posoudit, jakou kvalitou vidění bude vyšetřovaný disponovat za zhoršených pozorovacích podmínek a v přítomnosti oslnění. Někteří pacienti s vysokou náchylností na oslnění mohou vykazovat velice dobrou zrakovou ostrost, avšak například při řízení v noci, kdy jsou řidiči oslňováni protijedoucími auty, pro ně mohou být projevy oslnění až nebezpečné. Pacient může ale jako oslnění označit i jevy, které jsou běžné a nespádají pod klinickou definici oslnění. Příkladem může být přechod z tmavé místnosti do silně osvětlené místnosti. V těchto případech je nutné získat dostatek informací pro zhodnocení, jestli se jedná o běžný jev nebo o klinicky významný nález. [15,51]



Obr. 11: Příklad vizuálních projevů oslnění světly protijedoucích aut při mezopických či skotopických podmínkách. [52]

Oslnění lze dělit z různých úhlů pohledu. Z klinického hlediska je významné dělení podle vlivu oslnění na zrak, a to na vidění zhoršující oslnění (z anglického *disability glare*), komfort zhoršující oslnění (z anglického *discomfort glare*) a adaptační oslnění (z anglického *adaptation glare*), které jsou popsány níže. [15,49,51,53]

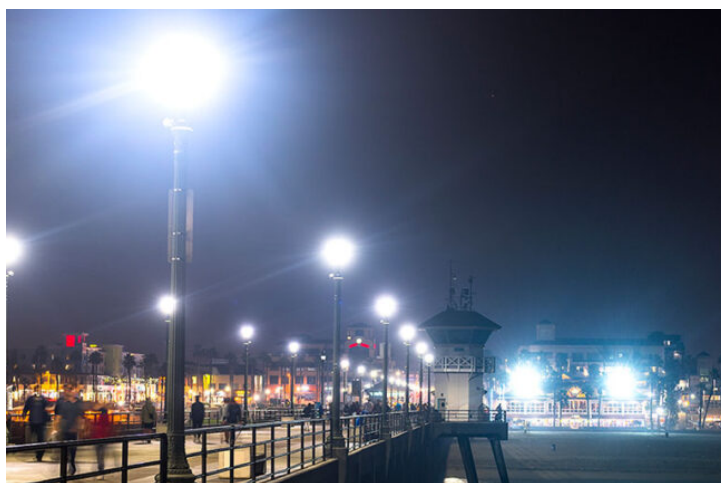
4.1. Vidění zhoršující oslnění

Vidění zhoršující oslnění je nejběžnějším a klinicky nejvýznamnějším druhem oslnění. Projevuje se zhoršením kontrastu sítnicového obrazu a zhoršením zrakové ostrosti. Běžně k němu dochází z důvodu přítomnosti světelného zdroje nacházejícího se v periferii zorného pole. Typickým projevem je závoj světla (z anglického *veiling luminance*), který přesahuje oblast světelného zdroje a zhoršuje tak rozpoznání okolních objektů v zorném poli. V úplné blízkosti zdroje bývá vidění značně negativně ovlivněno, ve vzdálenějších oblastech zorného pole může být pouze částečně ovlivněno nebo ke zhoršení nemusí docházet. Za snížených světelných podmínek se účinek závoje oslnění běžně projeví více. Je to dáno vyššími hodnotami kontrastu, kterých je zapotřebí, aby byly detekovány tyčinkami oproti hodnotám, které jsou postačující u vnímání číčky. [15,49,51,53]

Důvodem vzniku závoje oslnění je rozptýlení světla v oku na jeho optických rozhraních, přesněji řečeno se jedná o rozptyl světla na jejich vláknité struktuře. Hlavní vliv na množství rozptýleného světla mají různé nedokonalosti těchto očních struktur způsobující nerovnoměrný průchod světla přes danou strukturu. Na sítnici poté dochází k destruktivní interferenci jednotlivých světelných paprsků difraktovaného světla, což způsobí vznik hlavního maxima obklopeného několika slabšími maximy. Destruktivní interference způsobí nebodové zobrazení pozorovaného bodu na sítnici. Samotné zobrazení pozorovaného objektu z části podléhá vlivu difrakce, ale přítomnost okolního zdroje světla bodové zobrazení dále znesnadňuje. Ve své studii Yuan et al. [54] odhaduje vliv jednotlivých struktur na množství rozptýleného světla u zdravých jedinců. Rohovka způsobuje asi 30 % rozptylu světla při průchodu světla okem, čočka asi 40 % a k přibližně 20 % rozptylu dochází na vrstvách sítnice. Vliv komorové vody a sklivce se zdá být zanedbatelný. Množství rozptýleného světla je závislé hlavně na jasu oslňujícího zdroje

a úhlu, který zdroj svírá s pohledovou osou. Pro nižší hodnoty tohoto úhlu se oslnění projeví více a s rostoucím jasnem zdroje pochopitelně oslnění také vzrůstá. [15,49-51,54]

Vlivem rozptylu světla dochází ke částečné ztrátě některých zrakových funkcí. Hlavními projevy jsou zejména zhoršená schopnost rozeznávat detaily, zhoršení vnímaného kontrastu a desaturace barev. Podobně jako u úbytku kontrastní citlivosti dochází k většímu projevu vidění zhoršujícího oslnění s přibývajícím věkem, a to hlavně po šedesátém roku života. Kromě závojevého oslnění jsou dalšími běžnými projevy vidění zhoršujícího oslnění kruhové halo efekty a hvězdicovité výběžky, které se objevují kolem bodových zdrojů světla. Jejich výskyt je častější u pacientů po operaci katarakty nebo po laserové refrakční operaci. [15,49,51]



Obr. 12: Příklad vizuálních projevů halo efektů kolem zdrojů světla. [55]

Míra vlivu vidění zhoršujícího oslnění je vyšetřována na testech pro zrakovou ostrost nebo kontrastní citlivost. Měření je provedeno bez přítomnosti oslnujícího světla a za jeho přítomnosti. Efekt oslnění je poté zjištěn z rozdílu jednotlivých měření a vystihuje míru zhoršení měřené zrakové ostrosti nebo kontrastní citlivosti způsobené oslnujícím zdrojem světla. V případě že pacient nemá optimální korekci, může se u něj projevit paradoxní pozitivní oslnění, které může být také označováno jako přínosné oslnění, jež zlepšuje pacientovu zrakovou ostrost. Vysvětlením tohoto jevu se zdá být zúžení zornice za přítomnosti jasného zdroje v jeho zorném poli, což vlivem pinhole efektu částečně sníží jeho nedokorigovanou vadu nebo případnou sférickou aberaci. Dalším možným vysvětlením je, že v rámci adaptace na světlo jsou tyčinky v periferii díky zdroji světla aktivovány, což může přispívat k lepší kontrastní citlivosti. [15,51]

4.2. Komfort zhoršující oslnění

Někteří pacienti mohou pociťovat značný diskomfort za přítomnosti intenzivního zdroje světla v jejich zorném poli nebo v situacích, kdy je okolní hladina jasu příliš vysoká. Při tomto jevu však není podmínkou zhoršené vidění, a proto se označuje jako komfort zhoršující oslnění. Tento druh oslnění může doprovázet vidění zhoršující oslnění, ale může se vyskytnout i nezávisle na něm. Vyznačuje se mhouřením očí, ztrátou soustředění a vnitřní pohody, mrkáním a slzením. Komfort zhoršující oslnění se objevuje, pokud je okolní jas příliš intenzivní pro daného člověka v danou chvíli nebo je příliš proměnlivý napříč zorným polem. Jedná se o normální odpověď na abnormální hladinu jasu. Pojem fotofobie pak vyjadřuje abnormální odpověď na normální hladiny jasu, která se dále zhoršuje s přibývajícím jasem. [49,51,53,54,56]

Prahová hodnota komfort zhoršujícího oslnění, která je někdy označovaná jako fotosenzitivita, je velice proměnlivá mezi jedinci a oproti vidění zhoršujícímu oslnění není komfort zhoršující oslnění příliš závislé na věku. Hlavní faktory, které ovlivňují míru komfort zhoršujícího oslnění jsou jas a velikost zdroje oslnění, úroveň adaptace (chápáno jako jas okolního prostředí) a úhel mezi zdrojem oslnění a pohledovou osou. Rostoucí jas, nízká úroveň adaptace a malý úhel vede k intenzivnějšímu pocitu diskomfortu. [49,50,57]

Tento typ oslnění se zdá být spojený také s prostorovým rozložením zdrojů světla a kontrastem přechodů mezi zdrojem a okolím. Vizuální scénérie odchylovající se od běžných situací se jeví mít vyšší dopad na vnímaný diskomfort než samotný jas zdrojů. Možným vysvětlením je hyperexcitace neuronů sítnice při vnímání neobvyklých obrazců o vysokém kontrastu. Při volbě vhodných vzorů s vhodným rozložením je možné dosáhnout pocitu nepohodlí i při jasech, které jsou běžně spojované s pohodlným pozorováním. Pozoruhodné jsou také výsledky Tuaycharoen a Tregenza [58], kdy ve své studii zjistili, že vyšetřovaný se zdá být více tolerantní na oslnění v případě, že cíl jeho pozorování se mu jeví zajímavý. Ve své studii Kent et al. [57] také odhalili vyšší toleranci na oslnění způsobené umělým světlem v závislosti na denní době. Tolerance byla naměřena vyšší ve večerních hodinách ve srovnání s dopoledními. [56-58]

Komfort zhoršující oslnění je poměrně obtížné objektivně změřit a kvantifikovat. Pro zachycení hladiny nepohodlí vyvolané zdrojem o určitém jasu se dá použít škála typicky o devíti stupních, kde pacient hodnotí vyvolané nepohodlí. Alternativní metodikou experimentu je upravování jasu zdroje vyšetřovaným, dokud nenajde hodnotu jasu na hranici komfortu a diskomfortu. Je zřejmé, že tyto metody jsou velice subjektivní a závislé na vyšetřovaném, kdy sám posoudí, že světelný zdroj už mu přijde nepohodlný pro pozorování. [56]

4.3. Adaptační oslnění

Posledním druhem oslnění je adaptační oslnění, které se chápe jako pokles kvality vidění způsobený následným obrazem intenzivního zdroje, po jehož přímém sledování se vytvoří dočasný centrální skotom. Tento stav spojovaný s centrálním skotomem se někdy označuje jako skotomatické oslnění nebo fotostres. Silné adaptační oslnění je spojované s následnými obrazy, mhouřením očí pro snížení množství dopadajícího světla, slzením, zrakovou nepohodou a averzí vůči zdroji oslnění. Příkladem adaptačního oslnění z běžného života je přechod z tmavé místnosti na denní světlo, kdy dochází k přechodnému období špatného vidění spojeného s následnými obrazy. Oproti vidění zhoršujícímu oslnění se adaptační oslnění liší tím, že přetrvává i po vymizení zdroje ze zorného pole. Běžně zdroje, které působí adaptační oslnění, mají vliv na úzeji lokalizovanou oblast sítnice a vyvolávají značnější vybělení pigmentu fotoreceptorů oproti vidění zhoršujícímu oslnění, které bývá více rozlehlé po sítnici. [15,49,51]

Centrální skotom je způsoben výrazným vybělením fotoreceptorového pigmentu fovey, což způsobuje přechodný stav znecitlivění foveálních čípků, které jsou dočasně neaktivní a nepodílí se na vidění, dokud nedojde k jejich adekvátní adaptaci. Tento stav za obvyklých podmínek vymizí do 15 sekund po odstranění oslňujícího zdroje díky rychlé čípkové adaptaci. V případě déle trvajícího následného obrazu a snížené kvality vidění je tento stav označován jako saturační oslnění. K saturačnímu oslnění dochází při záměrném sledování nepříjemně intenzivního zdroje oslnění, který však ještě nepůsobí fototoxické nebo termické poškození sítnice (např. přímý pohled na slunce nebo intenzivní svítidlo).

Saturační oslnění je klinicky téměř nevýznamné, jelikož lidé běžně nejsou nuceni být vystaveni takto intenzivním zdrojům. [15,49]

5. Kontrastní citlivost a oslnění za mezopických podmínek

Jak bylo uvedeno v předchozím textu, oslnění může významně omezit zrakový výkon jedince, a to zejména za zhoršených světelných podmínek. Současně je známo (viz kapitola 3.2.), že za těchto podmínek (tj. při mezopických a skotopických jasech) může dojít k myopizaci oka. V řadě životních situací může docházet ke společnému působení těchto faktorů. Typickým příkladem je noční jízda automobilem, kde může mít případný pokles zrakového výkonu, navozený souhrou jednotlivých jevů, fatální následky. Mezi parametry, které za takovýchto omezených zrakových podmínek hrají v rozlišování objektů významnou roli, patří zejména kontrastní citlivost.

5.1. Cíle práce

Cílem našeho experimentu bylo posouzení vlivu lehké myopie a oslnění na kontrastní citlivost při mezopických podmínkách. Vyhodnocován bude jak efekt obou jevů samostatně, tak jejich vzájemné působení. Přitom v souladu s informacemi z předchozích kapitol předpokládáme, že každý z jevů sám o sobě sníží kontrastní citlivost. Pro účely studie byl vybrán přístroj Mesotest II (Oculus, Wetsler, Německo), který zajišťuje vyhodnocení kontrastní citlivosti za standardizovaných mezopických podmínek bez a s oslněním. Oslnivé světlo v tomto přístroji je designované tak, aby simulovalo světla protijedoucích vozidel. Dalším cílem studie vyhodnotit opakovatelnost měření na tomto přístroji za jednotlivých studovaných podmínek.

5.2. Probandi

Do studie bylo zařazeno 22 probandů (11 žen a 11 mužů ve věkovém rozsahu 20 až 42 let s průměrným věkem 26,5 let a směrodatnou odchylkou 5,2 let). Kritéria vybraná pro zahrnutí do studie byla normální binokulární vidění a normální monokulární a binokulární zraková ostrost (vívus minimálně 1) naturálně nebo s korekcí. Přítomnost očního onemocnění či operačního zákroku ovlivňujícího zrakovou ostrost nebo kontrastní

citlivost, tedy například katarakty, věkem podmíněné makulární degenerace, akutního zánětu oka nebo přídatných orgánů, laserové refrakční operace nebo implantace nitrooční čočky, byla kritériem pro vyloučení probanda ze studie. Všichni zúčastnění byly předem seznámeni s průběhem studie a jejich účast byla dobrovolná, což potvrdili podepsáním informovaného souhlasu.

5.3. Mesotest II

Přístroj Mesotest II slouží k vyšetření mezopického vidění a kontrastní citlivosti a také k vyšetření citlivosti na oslnění. V zemi vzniku, tedy v Německu, je tento přístroj využíván ke zhodnocení zrakové způsobilosti řidičů. Vyšetření je možno provádět jak v módu pro binokulární podmínky tak monokulární (například při testování pacientů po implantaci nitrooční čočky nebo po refrakčním zákroku). Přístroj promítá virtuální obraz ve vzdálenosti 5 metrů od vyšetřovaného za pomoci soustavy čoček a polopropustného zrcadla, aby byly simulovány přirozené sledovací podmínky. Přístrojová myopie by měla být plně eliminována. Oslnivé světlo působící osvětlení 0,35 luxu na úrovni pupily se nachází 3° nalevo od pozorovaného optotypu a v závislosti na voleném testu je zapnuto automaticky. Při vyšetřování by vyšetřovaný měl být vyzván, aby toto světlo přímo nesledoval a soustředil se pouze na promítané znaky. Pro zajištění normalizace výsledků a shodnosti vyšetřovacích podmínek je přístroj vybaven neprůsvitnou manžetou, která slouží k zamezení vniku okolního světla z vyšetřovací místnosti, které by mohlo výsledky zkreslovat. [59,60]



Obr. 13: Ilustrační foto přístroje Mesotest II (Oculus, Wetsler, Německo). [59]

Mesotest II využívá Landoltových prstenců vždy o velikosti korespondující vízu 0,1. Úkolem vyšetřovaného je správně odhalit pozici mezery tohoto optotypu. Hlavní sledovanou proměnou tedy není velikost znaku ale kontrast znaku oproti jeho světlému pozadí. Před samotným vyšetřením by měla proběhnout fáze adaptace na tmu dlouhá 10 minut pro dosažení věrohodných výsledků. Během vyšetření vyšetřovaný po přiložení hlavy do černé manžety pozoruje série znaků, s tím že každá série jich obsahuje 5 s různou orientací. Celkem takovýchto sérií během kompletního vyšetření je 8 (4 bez oslnivého světla a 4 s oslnivým světlem). První 4 série se mezi sebou liší úrovní kontrastu promítaných znaků. Jednotlivé úrovně od nejvyššího k nejnižšímu kontrastu jsou 1:23 (95,7% kontrast), 1:5 (80% kontrast), 1:2,7 (63% kontrast), and 1:2 (50% kontrast). Následné 4 série opět začínají od nejvyššího kontrastu k nejnižšímu, avšak nyní je přítomno oslnivé světlo. Před první sérií (první bez oslnění) a pátou sérií (první s oslněním) je promítán znak sloužící pro správnou fixaci pohledu vyšetřovaného. Vyhodnocení testování vychází z počtu správně rozlišených znaků, případně z nejnižší ještě dosažené úrovně kontrastu. Jako dosažená úroveň kontrastu je chápáno, že z dané série vyšetřovaný správně určil alespoň 3 z 5 znaků. [59,60]

5.4. Metodika

Všechna měření probíhala v laboratoři katedry optiky Univerzity Palackého v Olomouci. Měření a testy probíhaly s korekcí dioptrické vady tak, aby bylo dosaženo normální monokulární a binokulární zrakové ostrosti. V případě potřeby byla stávající korekce obvyklými subjektivními postupy upravena, popř. nově stanovena. Lehká myopie o velikosti $-0,5$ D a $-1,0$ D byla navozena předsazením spojné (zamlžovací) čočky o hodnotách $+0,5$ D a $+1,0$ D. Hodnoty použitého zamlžení, tj. navozené myopie, byly voleny podle výsledků pilotních experimentů a s ohledem na obvyklé hodnoty noční myopie. Při volbě menšího kroku zamlžení byly výsledky příliš pozvolné a vyšetření zbytečně zdouhavé, vyšší hodnoty zamlžení než $+1,0$ D již znesnadňovali samotné vyšetření. Pro simulaci oslnění bylo využito standardizovaného zdroje oslnění v přístroji Mesotest, který též sloužil k vyhodnocení kontrastní citlivosti.

5.4.1 Postup

Po úvodním vyšetření zrakové ostrosti, popř. stanovení korekce, proběhlo měření binokulární zrakové ostrosti při všech třech uvažovaných hodnotách zamlžení. Následně se vyšetřovaný adaptoval na mezopické podmínky po dobu minimálně 10 minut v laboratoři s vypnutým osvětlením a bez přístupu okolního světla. V rámci adaptace a celého měření byl proband vyzván, aby se vyhýbal pohledu na intenzivní zdroje světla tedy například vlastní mobilní telefon. Během tohoto intervalu adaptace byl účastníkovi blíže objasněn postup následného měření.

Po dostatečné adaptaci proběhlo samotné měření mezopické kontrastní citlivosti za šesti různých podmínek lišících se stupněm zamlžení (0 D, $+0,5$ D a $+1,0$ D) a přítomností oslnění (bez a s oslněním). Měření probíhalo vždy binokulárně. U každého účastníka proběhly celkem dvě série měření (test a retest) s tím, že každá série obsahovala 3 kompletní sady měření na Mesotestu, každá sada byla provedena s jinou mírou zamlžení. Pořadí hodnot navozené vady bylo u každé série randomizované. Mezi testem a retestem byl minimální odstup 5 min, jednotlivé sady měření v dané sérii proběhly těsně za sebou.

5.4.2. Měření na mesotestu II

Měření na Mesotestu probíhalo standardním způsobem a dle doporučení výrobce, viz podkapitola 5.3. Jedna kompletní sada měření na Mesotestu zahrnovala osm dílčích testů na všech čtyřech úrovních kontrastu, nejprve bez oslnění, pak s oslněním. Pořadí úrovní kontrastu bylo vždy sestupné. Při každé úrovni bylo promítnuto pět Landoltových prstenců v různých orientacích. Jako výstup z dílčího testu byl zaznamenán počet správně určených pozic Landoltových prstenců (správných odpovědí). Pro rozlišení pozice prstence měl proband neomezený čas, avšak neměl možnost zpětné opravy.

5.4.3. Zpracování a analýza dat

V každé sérii (test, retest) byla každá kombinace sledovaných jevů (velikost myopie x přítomnost oslnění) reprezentována skórem stanoveným jako součet správných odpovědí pro všechny čtyři úrovně kontrastu. Tj. maximální možné skóre pro jednu kombinaci v dané sérii bylo 20 (4 úrovně kontrastu x 5 pozic prstence). Pro účely vyhodnocení vlivu těchto jevů byly z důvodu minimalizace náhodných odchylek výsledky z testu a retestu zprůměrovány.

Vliv zamlžení na zrakovou ostrost byl hodnocen Friedmanovým neparametrickým testem. Společný vliv myopie a oslnění na skóre byl testován metodou analýzy rozptylu (ANOVA) pro opakovaná měření s vnitroskupinovými faktory zamlžení a oslnění. Případná párová porovnání byla provedena post-hoc Tukeyovým HSD (honestly significant difference) testem. Normalita dat byla ověřena Shapiro-Wilkovým testem, sféricita byla testována Mauchlyho testem. Jelikož data vykazovala značné odchylky od normality, byla před testem ANOVA transformována tak, že u každého probanda bylo skóre pro každou podmínku (kombinaci zamlžení a oslnění) odečteno od průměrné hodnoty skóre tohoto probanda ze všech šesti podmínek. Dále byl vynechán jeden proband, jehož data se výrazně odchylovala od ostatních a i po transformaci narušovala normalitu. Takto upravená data již byla normální ($p > 0,12$) a ani podmínka sféricity nebyla narušena. Všechny statistické testy byly provedeny v programu STATISTICA 13.4 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA) na hladině významnosti 0,05. Zahrnuté jsou

taktéž mezní hodnoty hladiny významnosti p , při kterých by již došlo k zamítnutí rovnosti.

Opakovatelnost měření skóre na mesotestu byla stanovena metodou Bland-Altmanovy analýzy, která vyhodnocuje závislost rozdílů dat z testu a retestu na jejich průměru. Meze opakovatelnosti vymezují hranice 95% konfidenčního intervalu rozdílových dat (test – retest), přičemž jeho horní a dolní mez je určena jako průměrný rozdíl $\pm 1,96 \cdot SD$, kde SD je směrodatná odchylka rozdílových dat. Číselně byla opakovatelnost vyjádřena koeficientem opakovatelnosti CoR rovným pološirce intervalu, tj. $1,96 \cdot SD$. Pro stanovení opakovatelnosti byla využita data všech 22 probandů. Potřebné výpočty byly provedeny v programu MS Excel 365 (Remond, WA, USA).

5.5. Výsledky

Vliv refrakční vady a oslnění na kontrastní citlivost za mezopických podmínek

Binokulární fotopické hodnoty zrakové ostrosti bez zamlžení a při jednotlivých stupních zamlžení byly $-0,196 \pm 0,049$, $-0,036 \pm 0,090$ a $0,10 \pm 0,13$ (uvedeno v hodnotách logaritmu minimálního úhlového rozlišení v minutách ve tvaru průměr \pm směrodatná odchylka). Tyto hodnoty se navzájem statisticky významně lišily ($p < 0,001$).

Statistické charakteristiky hodnot průměrného skóre z testu a retestu v případě jednotlivých hodnot zamlžení uvádí tab. 1 (bez oslnění) a tab. 2 (s oslněním), a to pro všech 22 probandů. Graficky je závislosti společného skóre na zamlžení a oslnění zachycena na obr. 1. Z tabulek i z grafu je zřejmé, že skóre ztlačí s hodnotou zamlžení. Dále je vidět, že vliv oslnění se zřetelně projevuje jen při zamlžení, kdy s rostoucí hodnotou zamlžení klesá skóre při oslnění rychleji. Tyto výsledky byly též potvrzeny statistickou analýzou, kdy test ANOVA pro opakovaná měření, aplikovaný na normalizovaná data (viz odst. 5.4.2), odhalil signifikantní vliv oslnění ($p < 0,001$) i zamlžení ($p < 0,001$) na hodnotu skóre. Párové post-hoc srovnání jednotlivých stupňů zamlžení prokázalo signifikantní rozdíl mezi všemi stupni zamlžení, tedy mezi stavem bez zamlžení a +0,5 D ($p < 0,001$), mezi stavem bez zamlžení a +1 D ($p < 0,001$) a mezi

zamlžením +0,5 D a +1 D ($p < 0,001$). Dále byl zjištěn signifikantní vliv vzájemné interakce obou faktorů ($p < 0,001$). Následné post-hoc párové porovnání všech šesti kombinací zamlžení a oslnění ukázalo, že hodnoty skóre se navzájem liší téměř ve všech případech (vždy $p < 0,01$), jedinou výjimkou je porovnání hodnot bez zamlžení při oslnění a bez oslnění, mezi kterými nebyl nalezen signifikantní rozdíl ($p = 0,95$). Mírné zhoršení vlivem oslnění bylo bez zamlžení pozorováno jen u 8 subjektů (36,4 %). Při zamlžení +0,5 D již došlo ke zhoršení u 14 subjektů (63,6 %) a při zamlžení +1,0 D u 20 subjektů (90,9 %). Naopak ke zlepšení došlo u 4 subjektů bez zamlžení a 7 a 3 subjektů při zamlžení +0,5 D a +1,0 D.

Na základě výsledků statistické analýzy a grafické interpretace dat lze konstatovat, že bez přítomnosti zamlžení (tj. bez dioptrické vady) má oslnění na kontrastní citlivost statisticky nevýznamný vliv. Je-li však přítomno zamlžení (tj. při navozené myopii), je dopad oslnění na kontrastní citlivost signifikantní. Přitom s rostoucím zamlžením se vliv oslnění zvětšuje.

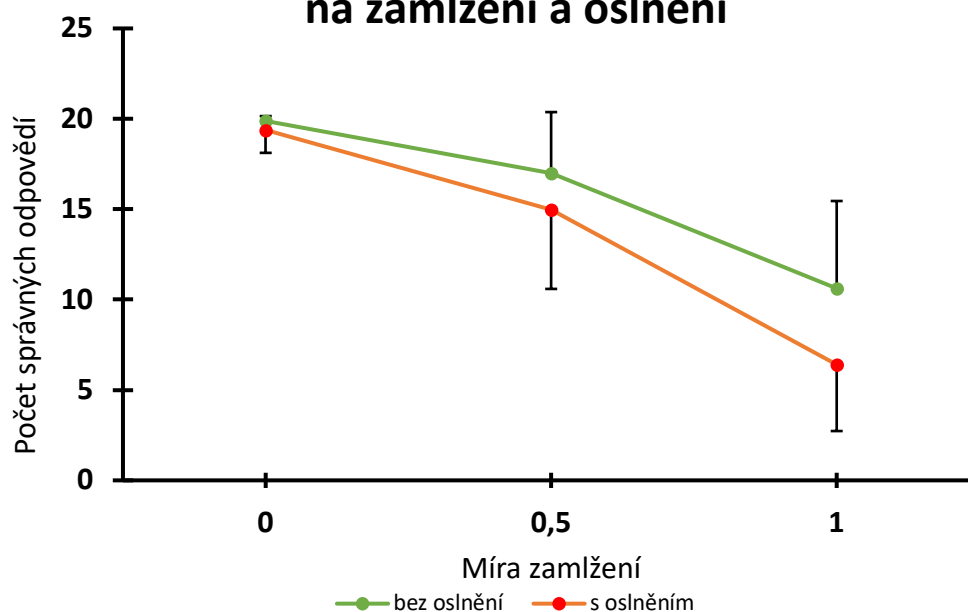
Tab. 1: Průměrné skóre z obou sérií měření při různých hodnotách zamlžení bez oslnění

Hodnota zamlžení	0,0 D	+0,5 D	+1,0 D	souhrn přes všechny hodnoty zamlžení
Průměr	19,89	17,0	10,8	15,9
Směrodatná odchylka	0,26	3,3	4,8	5,1
Medián	20,00	18,0	11,0	18,0

Tab. 2: Průměrné skóre z obou sérií měření při různých hodnotách zamlžení při oslnění

Hodnota zamlžení	0,0 D	+0,5 D	+1,0 D	souhrn přes všechny hodnoty zamlžení
Průměr	19,4	15,2	7,0	13,9
Směrodatná odchylka	1,2	4,4	4,5	6,3
Medián	20,0	16,75	6,25	16,75

Graf počtu správných odpovědí v závislosti na zamlžení a oslnění

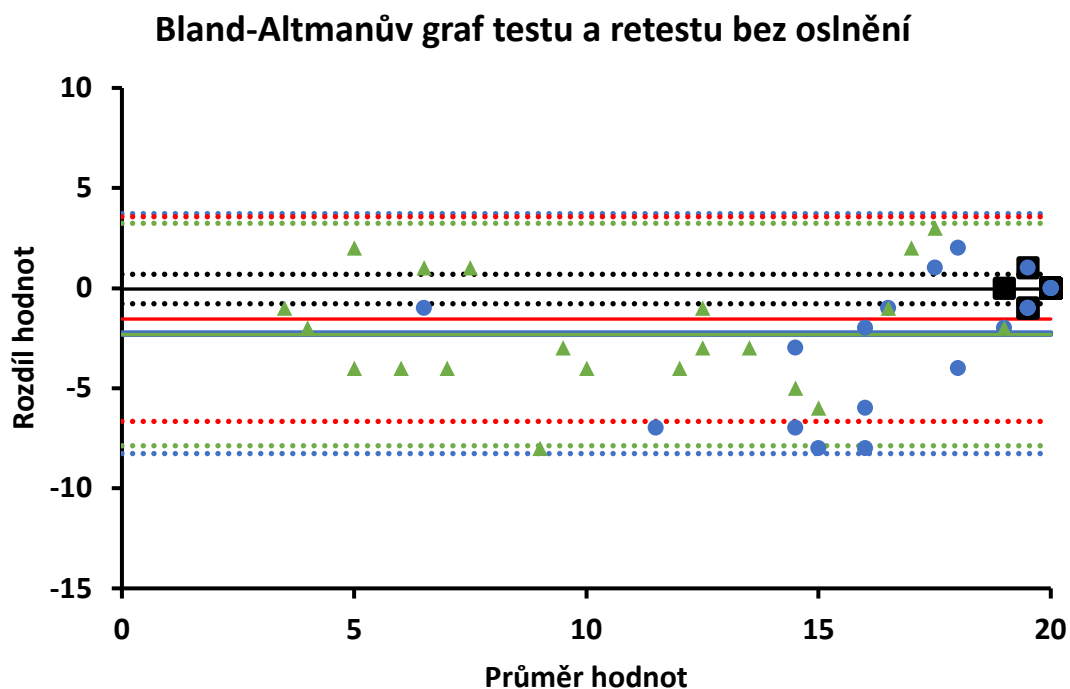


Obr. 14: Závislost hodnoty průměrného skóre z testu a retestu (maximální možná hodnota je 20) v závislosti na míře zamlžení bez oslnění (zelená křivka) a s oslněním (červená křivka). Body reprezentují průměrné hodnoty skóre v celém souboru probandů, chybové úsečky představují jeho směrodatnou odchylku.

Opakovatelnost měření na přístroji Mesotest II

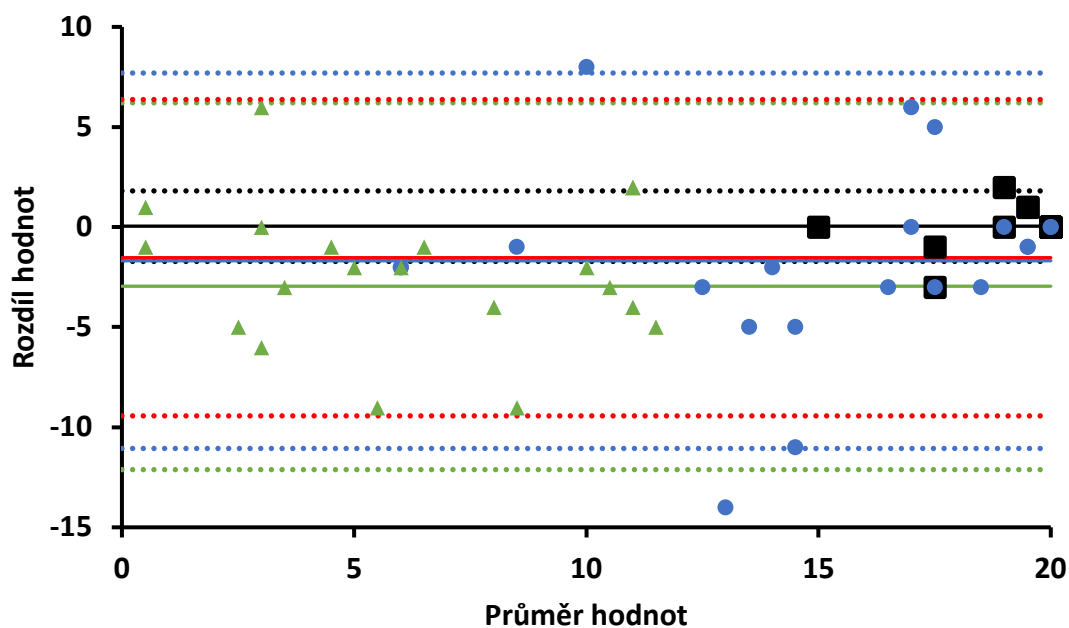
Výsledky Bland-Altmanovy analýzy opakovatelnosti jsou graficky prezentovány na obr. 2 charakterizující měření bez oslnění a obr. 3 charakterizující měření s oslněním. Jednotlivé značky v grafech reprezentují rozdíly ve skóre mezi testem a retestem, plné čáry představují průměrné hodnoty rozdílů, meze konfidenčního interval jsou vyznačeny čárkovanými čarami. Značky jsou barevně i tvarově rozlišeny pro vyznačení jednotlivých úrovní zamlžení. Shodnými barvami jsou taktéž vyznačeny průměrné hodnoty rozdílů a meze konfidenčního intervalu korespondující s danými hladinami zamlžení. Černé čtverce reprezentují stav bez zamlžení, modré body stav zamlžení +0,5 D a zelené trojúhelníky stav zamlžení +1 D. Souhrnná průměrná hodnota rozdílů a souhrnné meze konfidenčního intervalu přes všechny stupně zamlžení jsou vyznačeny červenou barvou. V tab. 3 a 4 jsou uvedené absolutní a relativní (vztažené k průměrné hodnotě skóre) hodnoty koeficientu opakovatelnosti stanovení skóre CoR , dále je uvedena průměrná hodnota skóre a směrodatná odchylka rozdílů testu a retestu. Statistické porovnání hodnot

testu a retestu pomocí párového t-testu nevykázalo signifikantní rozdíl ve třech ze šesti případů, kterými byly stav bez zamlžení bez oslnění ($p = 0,29$), stav bez zamlžení s oslněním ($p = 0,41$) a stav se zamlžením +0,5 D s oslněním ($p = 0,06$). V případech se zamlžením +0,5 D bez oslnění ($p = 0,001$), se zamlžením +1 D bez oslnění ($p < 0,001$) a se zamlžením +1 D s oslněním ($p = 0,003$) byl rozdíl mezi hodnotami testu a retestu signifikantní, přičemž u všech těchto dílčích měření byly hodnoty skóre retestu vyšší oproti testu. Z grafů i tabulky vyplývá, že oslnění zhoršuje opakovatelnost, a to bez zamlžení i při jednotlivých hodnotách zamlžení. V absolutní míře je CoR při oslnění přibližně dvojnásobný. Významný vliv má také míra zamlžení – bez zamlžení je absolutní hodnota CoR v průměru přibližně 7krát menší než se zamlžením v situaci bez oslnění, s oslněním asi 5,5krát. Jelikož s rostoucí hodnotou zamlžení a při oslnění skóre klesá, lze odtud vyhodnotit, že opakovatelnost měření se zmenšuje s klesající hodnotou skóre. V relativním měřítku je tento jev ještě daleko výraznější.



Obr. 15: Bland-Altmanův graf skóre z testu a retestu pro případy bez oslnění. Jednotlivé stupně zamlžení jsou barevně rozlišeny na černou (bez zamlžení), modrou (+0,5 D) a zelenou (+1 D). Souhrnné limity a průměrná hodnota rozdílů jsou znázorněny červenou.

Bland-Altmanův graf testu a retestu s oslněním



Obr. 16: Bland-Altmanův graf skóre z testu a retestu pro případy s oslněním. Jednotlivé stupně zamlžení jsou barevně rozlišeny na černou (bez zamlžení), modrou (+0,5 D) a zelenou (+1 D). Souhrnné limity a průměrná hodnota rozdílů jsou znázorněny červenou.

Tab. 3: Průměrné hodnoty skóre získané v testu a retestu, směrodatné odchytky rozdílů skóre v testu a retestu a absolutní a relativní hodnoty koeficientu opakovatelnosti *CoR* (relativní hodnoty jsou vztaženy oproti průměru) pro jednotlivé hodnoty zamlžení bez oslnění

Hodnota zamlžení	0,0 D	+0,5 D	+1,0 D	souhrn přes všechny hodnoty zamlžení
Průměr testu a retestu	19,89	17,0	10,8	15,9
Směrodatná odchytky rozdílů	0,38	3,1	2,8	2,6
<i>CoR</i>	0,74	6,0	5,6	5,1
<i>CoR</i> (%)	3,70	35,2	51,5	32,1

Tab. 4: Průměrné hodnoty skóre získané v testu a retestu, směrodatné odchylky rozdílů skóre v testu a retestu a absolutní a relativní hodnoty koeficientu opakovatelnosti *CoR* (relativní hodnoty jsou vztaženy oproti průměru) pro jednotlivé hodnoty zamlžení s oslněním

Hodnota zamlžení	0,0 D	+0,5 D	+1,0 D	souhrn přes všechny hodnoty zamlžení
Průměr testu a retestu	19,39	15,2	7,0	13,9
Směrodatná odchylka rozdílů	0,90	4,8	4,7	4,0
<i>CoR</i>	1,76	9,4	9,0	7,9
<i>CoR</i> (%)	9,08	61,7	131,3	57,0

5.6. Diskuse

Navozená lehká myopie měla v souladu s našim úvodním předpokladem znatelný vliv na úspěšnost při testu kontrastní citlivosti za mezopických podmínek, přičemž výsledky se vždy zhoršovaly s nárůstem simulované vady. V případě nárůstu vady o 1,0 D pokleslo skóre kontrastní citlivosti na polovinu původních hodnot. Subjektivní dojem vyšetřovaných, čas vyšetření a jistota odpovědí byly taktéž negativně ovlivněny rostoucí vadou, avšak tyto výstupy nebyly zaznamenávány pro následnou analýzu. K podobnému výsledku došla např. také studie [61], která udává zřetelné zhoršení kontrastní citlivosti při zamlžení +0,5 D, přičemž zamlžení +1,0 D zhoršuje citlivost na polovinu. Možným vysvětlením zhoršení kontrastní citlivosti je větší dopad refrakční vady za mezopických podmínek, kdy dochází ke zvětšení zornice a tím i zvětšení rozptylového kroužku a rozmazání obrazu. Rozmazání obrazu mohlo způsobit změnu jasu zejména okrajových částí testového znaku a tím poklesu jejich kontrastu oproti pozadí.

Náš úvodní předpoklad byl v případě oslnění potvrzen pouze částečně – oslnění mělo na kontrastní citlivost signifikantně negativní vliv pouze v kombinaci se simulovanou refrakční vadou, bez vady nebyl nalezen významný rozdíl. Určitý vliv oslnění na kontrastní citlivost prokázala též studie Puel et al. [62], kde zkoumali vliv věku a oslnění na mezopickou kontrastní citlivost. Kontrastní citlivost má tendenci klesat s věkem, velký

úbytek kontrastní citlivosti se obvykle objevuje mezi 50 až 60 rokem. Když však bylo použito oslnění, značný úbytek byl již pozorován i ve skupině 40 až 50 let.

Lze tvrdit, že přítomnost oslnění umocňuje dopad myopie na kontrastní citlivost. Z tohoto pohledu bylo zajímavým nálezem zlepšení kontrastní citlivosti u 7 osob při zamlžení +0,5 D a 3 při zamlžení +1,0 D. Je možné, že oslnující světlo způsobilo zúžení zornice a tím omezilo negativní dopad simulované myopie. Nicméně zlepšení většinou nepřesahuje velikost koeficientu opakovatelnosti a uvedené tvrzení by bylo nutné ověřit na širším vzorku. Délka vyšetření s přítomností oslnění měla také tendenci se prodlužovat oproti vyšetření bez oslnění. Pro správnou odpověď nebyl stanoven časový limit, ale lze předpokládat, že pokud by nebylo umožněno dostatečné adaptaci při zavedení oslnivého světla, rozdíly v testech by byly ještě značnější.

Z námi naměřených výsledků je očividné, že nedokorigovaná vada má značný vliv na kontrastní citlivost za mezopických podmínek a tento vliv se ještě umocňuje, pokud je vyšetřovaný oslněn. Je zřejmé, že již slabá vada se výrazně projeví při podmínkách, jako je hlavně řízení motorového vozidla v noci, kde je obzvlášť kladen důraz na perfektní vidění. Přitom právě kontrastní citlivost je dominantní vlastností zrakového systému za zhoršených světelných podmínek, jelikož kontrast sehrává značnější roli, jakmile zraková ostrost klesá v závislosti na sníženém osvětlení. Je tedy velice žádoucí, aby lidé účastníci se silničního provozu, zejména za špatných světelných podmínek, byli vybaveni korekční pomůckou, ideálně s plnou subjektivně stanovenou korekcí. Lze též předpokládat, že podobný vliv, jako lehká myopie, bude mít též astigmatismu. Toto poskytuje prostor pro další studii v této oblasti. Pro řízení za šera se též doporučují čočky se žlutým zabarvením [63], které by měly zvyšovat kontrast. Je otázkou a možným námětem pro další studie, jak by tyto čočky mohly působit právě v kombinaci s refrakční vadou a oslněním.

Na kontrastní citlivost za šera může mít vliv také řada další jevů. Největší podíl moderní literatury zahrnující testování kontrastní citlivosti patří studiím zkoumající různé aspekty vidění, mezi které patří i kontrastní citlivost nebo oslnění, v návaznosti na operaci katarakty a použitých filtrech nitroočních čoček [64], vhodnosti sférického či asférického designu nitroočních čoček [65], nebo vhodnosti monofokálního či multifokálního designu [66]. Dále je také kontrastní citlivost zkoumána jako jeden z měřených parametrů v návaznosti na laserovou refrakční chirurgii a případné porovnání jejich různých metod

[67,68], či porovnání modernějšího přístupu wavefront-guided ablace s cílem omezit nežádoucí pooperační vlivy jako jsou například aberace vyšších řádů a další [69-71]. Všechny tyto korekce refrakční vady jsou spojované s nedokonalou kontrastní citlivostí a v kombinaci se zbytkovou nekorigovanou vadou způsobenou refrakčním ústřelem (překorigování nebo podkorigování), který je velice běžný jak při operaci katarakty, tak při laserových operacích očí, může výsledná kontrastní citlivost být značně limitována. Kombinace limitované kontrastní citlivosti a větší nedokorigované vady může mít při řízení v noci až fatální následky. Podle stejného klíče je důležité také klást důraz na vyšší hodnoty noční myopie, která může dosahovat hodnot rovnajících se stupňům zamlžení použitých v tomto experimentu. Pokud noční myopie působí potíže za mezopických podmínek, lze předpokládat, že hodnota kontrastní citlivosti bude značně omezená a bylo by vhodné takovouto noční myopii správně korigovat vzhledem k tomu, že kontrastní citlivost bude jedním z hlavních schopností lidského zrakového systému za špatných světelných podmínek.

Další součástí této diplomové práce bylo ověřit opakovatelnost měření na přístroji Mesotest II, jež byl pro účely experimentu použit. Jak je již zřejmé z tabulek a grafického znázornění uvedených v přechozí kapitole, nejlepší opakovatelnosti bylo dosaženo při optimálních podmínkách testu, to znamená ve stavu bez zamlžení, kdy současně bylo dosahováno nejvyšší kontrastní citlivosti. Koeficient opakovatelnosti se zvyšoval se zvyšující hodnotou použitého zamlžení a u každé hodnoty zamlžení se taktéž zvyšoval, pokud bylo použito oslňující světlo. U třech ze šesti dílčích měření byl nalezen signifikantní rozdíl mezi hodnotami testu a retestu. Hodnoty získané během retestu byly vyšší oproti testu. Těmito dílčími měřeními byly případy se zamlžením +0,5 D bez oslnění, se zamlžením +1 D bez oslnění a se zamlžením +1 D s oslněním. Lepší výsledky během retestu je možné přisoudit znalosti testu a omezenému počtu možností orientace Landoltových prstenců, přičemž z celkového možného počtu 8 orientací test obsahoval pouze 6, a v neposlední řadě shodné posloupnosti prezentovaných znaků v rámci testu, čímž je myšleno, že přístroj Mesotest při základním testování nerandomizuje posloupnost znaků. Lze tedy shrnout, že přístroj Mesotest vykazoval dobrou opakovatelnost při podmínkách, na které je designován, tedy pro vyšetřování kontrastní citlivosti za mezopických podmínek a s plnou subjektivně stanovenou korekcí. Pokud je měření prováděno s neúplnou korekcí, je opakovatelnost přístroje značně ovlivněná. Navýšení zamlžení vždy mělo vyšší negativní efekt na úspěšnost testu než následné oslnění při dané

míře zamlžení. Pro shrnutí je tedy možné říci, že s rostoucí nedokorigovanou vadou se opakovatelnost a tedy i důvěryhodnost měření bude zhoršovat.

Závěr

Tato diplomová práce měla za hlavní cíl zjistit, jestli lehká myopie nebo oslnění má vliv na mezopickou kontrastní citlivost. Druhotným cílem bylo ověřit opakovatelnost přístroje Mesotest II, na kterém probíhala měření pro tuto práci. Pro testování vlivu lehké myopie bylo použito zamlžení bezvadného oka hodnotami +0,5 D a +1,0 D. Takto velká vada je v populaci často nekorigována, popř. může být důsledkem ústřelu refrakčního zákroku.

Teoretická část posloužila pro představení problematiky a přiblížení důležitých mechanismů, na kterých následná praktická část stavěla. Poznatky získané při rešerši také byly podkladem pro volbu vhodné metodiky během praktické části práce. Prvně byla zmíněna sítnice, místo kde dochází k detekci dopadajícího světla a k primárnímu zpracování kontrastu a následovala fyziologie vnímání kontrastu. Dále byla představena kontrastní citlivost a testy, které je možné využít pro její měření. Následující kapitola rozlišila mezi jednotlivými druhy světelných podmínek v závislosti na úrovni jasu, vysvětlila problematiku noční myopie a adaptace na světelné podmínky. Následně poslední kapitola teoretické části posloužila pro klasifikaci jednotlivých druhů oslnění. Praktická část, která na teoretickou navazovala, byla pro přehlednost rozdělena na vytyčení cílů experimentální části práce, představení vzorku účastníků a vyšetřovacího přístroje, metodiku měření a analýzy dat, výsledky a část pro diskusi a interpretaci výsledků.

Při analýze naměřených výsledků byl zjištěn signifikantní vliv myopie na kontrastní citlivost měřenou za mezopických podmínek, přičemž významný vliv měla již slabá vada o velikosti 0,5 D. Tento jev byl podstatně umocněn oslněním. Avšak při perfektní korekci, tj. bez dioptrické vady, nebyl vliv oslnění patrný. Závěrem lze tedy tvrdit, že již nižší hodnoty lehké myopie negativně ovlivní kontrastní citlivost za šera, přičemž oslněním je tento dopad umocněn, a to tím více, čím větší je vada pozorovatele.

Analýza opakovatelnosti ukázala vliv oslnění a refrakční vady na opakovatelnost měření Mesotestem. Výbornou opakovatelnost dosahoval za doporučených podmínek,

tedy s plnou korekcí. V případě přítomnosti refrakční vady opakovatelnost značně slábla. Přítomnost oslnění opakovatelnost ještě dále zhoršovala.

Hlavní přínos práce spočívá v ověření počátečního předpokladu, že existuje spojitost mezi refrakční vadou, oslněním a kontrastní citlivostí za šera. Ačkoliv získané výsledky byly očekávatelné, tato práce posloužila ke kvantifikaci vlivu zmíněných faktorů na testovanou kontrastní citlivost a otevírá možnosti pro budoucí výzkum v této poměrně opomíjené problematice. Podstatným zjištěním je, že již nízké hodnoty myopie mohou za přítomnosti oslnění vést k výraznému poklesu kontrastní citlivosti. Proto by měl být kladen důraz zejména u osob, které často potřebují kvalitní vidění za mezopických podmínek, typicky u profesionálních řidičů, ale nejen těch, na kvalitní a plnou korekci. Nedostatkem této studie byl poměrně homogenní vzorek mladých jedinců. Ukazuje se, že mezopická kontrastní citlivost, stejně jako fotopická, závisí na věku [62]. Studie Ishii et al. [60] navíc vynesla připomínku, že přístroj Mesotest II se jeví poměrně náročný pro starší subjekty, u kterých dochází k fyziologickému snížení kontrastní citlivosti. Podle této studie tito jedinci dosahují lepších výsledků u klasických testů kontrastní citlivosti. Budoucí výzkum by byl přínosný pro porovnání hodnot naměřených v tomto experimentu se vzorkem starších pacientů (60 let a starší).

Seznam použité literatury

- [1] KUCHYNKA, P. a kol. (2007): *Oční lékařství*. Grada Publishing, Praha. ISBN: 978-80-247-1163-8
- [2] ROZSÍVAL, P. (2017): *Oční lékařství, druhé přepracované vydání*. Galén, Praha. ISBN: 978- 80- 7492-316-6
- [3] MESCHER, A. L. (2018): *Junqueirovy základy histologie*. Galén, Praha. ISBN: 978-80-7492-324-1
- [4] SNELL, R. S., LEMP, M. A. (1997): *Clinical anatomy of the eye 2nd edition*. Wiley-Blackwell, New Jersey. ISBN: 978-1-118-69100-7
- [5] BRON, A., TRIPATHI, R., TRIPATHI, B. (1998): *Wolff's Anatomy of the Eye and Orbit, 8Ed*. Taylor & Francis, London. ISBN 978-0412410109
- [6] FERRARA, M., LUGANO, G., SANDINHA, M. T., KEARNS, V. R., GERAGHTY, B., STEEL, D. H. W. *Biomechanical properties of retina and choroid: a comprehensive review of techniques and translational relevance*. Eye (London, England), vol. 35, 2021, no. 7, pp. 1818–1832, DOI: 10.1038/s41433-021-01437-w
- [7] Upraveno podle WEIER, M., STENGEL, M., ROTH, T., DIDYK, P., EISEMANN, E., EISEMANN, M., GROGORICK, S., HINKENJANN, A., KRUIJFF, E., MAGNOR, M., MYSZKOWSKI, K., SLUSALLEK, P. *Perception-driven Accelerated Rendering*. Computer Graphics Forum, vol. 36, 2017, no. 2, DOI: 10.1111/cgf.13150
- [8] PURVES, D., AUGUSTINE, G. J., FRITZPATRICK, D., HALL, W. C., LAMANTIA, A. S., MCNAMARA, J. O., WILLIAMS, S. M. (2004): *Neuroscience 3rd ed*. Sinauer Associates, New York. ISBN: 0-87893-725-0
- [9] KIRSCHKAMP, T. *Physiologische Optik – výukové materiály předmětu Physiologische Optik*. Katedra optiky Univerzity Aalen, Aalen
- [10] PURVES, D., AUGUSTINE, G. J., FITZPATRICK, D., HALL, W. C., LAMANTIA, A. S., MOONEY, R.D., PLATT, M.L., WHITE, L.E. (2018): *Neuroscience 6th ed*. Sinauer Associates, New York. ISBN: 978-1605353807
- [11] MEISTER, M., TESSIER-LAVIGNE, M. (2013) *Principles of Neural Science. 5th ed*. McGraw Hill, New York. ISBN: 978-0071810012
- [12] GOLDSTEIN, E. B. (2009): *Sensation and Perception 8th Edition*. Cengage Learning, Boston. ISBN: 978-0495601494

- [13] Receptive Fields. [online] [navštíveno 19.8.2023] Dostupné z <http://miladh.github.io/lgn-simulator/doc/recepfield.html>
- [14] CARBON, C-C. *Understanding human perception by human-made illusions*. *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 8, 2014, pp. 566, DOI: 10.3389/fnhum.2014.00566
- [15] BENJAMIN, W. (2006): *Borish's clinical refraction*. Butterworth-Heinemann Elsevier, St. Louis. ISBN 978-0750675246
- [16] OWSLEY, C. *Contrast sensitivity*. *Ophthalmology clinics of North America*, vol. 16, 2003, no. 2, pp. 171–177, DOI: 10.1016/s0896-1549(03)00003-8
- [17] KAUR, K., GURNANI, B. (2022). *Contrast Sensitivity*. StatPearls Publishing, Tampa. PMID: 35593849
- [18] RICHMAN, J., SPAETH, G. L., WIROSTKO, B. *Contrast sensitivity basics and critique of currently available tests*. *Journal of cataract and refractive surgery*, vol. 39, 2013, no. 7, pp. 1100–1106, DOI: 10.1016/j.jcrs.2013.05.001
- [19] PELLI, G. D, BEX, P. *Measuring Contrast Sensitivity*. *Vision research*, vol. 10, 2013, pp. 10–14, DOI: 10.1016/j.visres.2013.04.015
- [20] VINGOPOULOS, F., WAI, K. M., KATZ, R., VAVVAS, D. G., KIM, L. A., MILLER, J. B. *Measuring the Contrast Sensitivity Function in Non-Neovascular and Neovascular Age-Related Macular Degeneration: The Quantitative Contrast Sensitivity Function Test*. *Journal of clinical medicine*, vol. 10, 2021, no. 13, 2768, DOI: 10.3390/jcm10132768
- [21] ROARK, M. W., STRINGHAM, J. M. *Visual Performance in the “Real World”:* *Contrast Sensitivity, Visual Acuity, and Effects of Macular Carotenoids*. *Molecular Nutrition and Food Research*, vol. 63, 2019, no. 15, DOI: 10.1002/mnfr.201801053
- [22] Contrast Sensitivity Tests. [online] [navštíveno 19.8.2023] Dostupné z <https://precision-vision.com/products/contrast-sensitivity-tests/peak-contrast-sensitivity/pelli-robson/pelli-robson-contrast-sensitivity-chart/>
- [23] ZIMMERMAN, A. B., LUST, K. L. BULLIMORE, M. A. *Visual Acuity and Contrast Sensitivity Testing for Sports Vision*. *Eye & Contact lens*, vol. 37, 2011, no. 3, pp. 153–159, DOI: 10.1097/ICL.0b013e31820d12f4

- [24] KARETSOS, G., CHANDRINOS, A. *Contrast Sensitivity Measurement Tests and Methods*. Ophthalmology Research An International Journal, 2021, pp. 7–18, DOI: 10.9734/OR/2021/v15i230208
- [25] DORR, M., LESMES, L. A., ELZE, T., WANG, H., LU, Z. L., BEX, P. J. *Evaluation of the precision of contrast sensitivity function assessment on a tablet device*. Scientific Reports, vol. 7, 2017, art. no. 46706, DOI: 10.1038/srep46706
- [26] THAYAPARAN, K., CROSSLAND, M. D., RUBIN, G. S. *Clinical Assessment of two new Contrast Sensitivity Charts*. The British journal of ophthalmology, vol. 91, 2007, no. 6, pp. 749–752, DOI: 10.1136/bjo.2006.109280
- [27] MANN, D. L., ABERNETHY, B. FARROW, D. *The resilience of natural interceptive actions to refractive blur*. Human movement science, vol. 29, 2010, no. 3, pp. 386–400, DOI: 10.1016/j.humov.2010.02.007
- [28] Dartt, D. A. a kol. (2010): *Encyclopedia of the Eye*. Elsevier, Amsterdam. ISBN: 978-0-12-374203-2
- [29] BULLOUGH, J., REA, M. *Visual Performance Under Mesopic Conditions: Consequences for Roadway Lighting*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 1862, 2004, no. 1, pp. 89–94, DOI: 10.3141/1862-11
- [30] ZELE, A. J., CAO, D. *Vision under mesopic and scotopic illumination*. Frontiers in Psychology, vol. 5, 2014, art. 1594, DOI: 10.3389/fpsyg.2014.01594
- [31] SHIN, J.C., YAGUCHI, H., SHIOIRI S. *Change of Color Appearance in Photopic, Mesopic and Scotopic Vision*. Optical review, vol. 11, 2004, no. 4, pp. 265–271, DOI: 10.1007/s10043-004-0265-2
- [32] PETZOLD, A., PLANT, G. T. *Clinical disorders affecting mesopic vision*. Ophthalmic & Physiological Optics, vol. 26, 2006, no. 3, pp. 326–341, DOI: 10.1111/j.1475-1313.2006.00417.x
- [33] STOCKMAN, A., SHARPE, L. T. *Into the twilight zone: the complexities of mesopic vision and luminous efficiency*. Ophthalmic & Physiological Optics, vol. 26, 2006, no. 3, pp. 225–239, DOI: 10.1111/j.1475-1313.2006.00325.x
- [34] GRUBER, N., MOSIMANN, U. P., MÜRI, R. M., NEF, T. *Vision and Night Driving Abilities of Elderly Drivers*. Traffic Injury Prevention, vol. 14, 2013, no. 5, pp. 477–485, DOI: 10.1080/15389588.2012.727510
- [35] 10 Tips for Driving at Night. [online] [navštíveno 19.8.2023] Dostupné z <https://valientemott.com/auto-collisions/why-you-should-drive-slower-at-night/>

- [36] HOPE, G. M., RUBIN, M. L. *Night myopia*. Survey of Ophthalmology, vol. 29, 1984, no. 2, pp. 129–136, DOI: 10.1016/0039-6257(84)90169-3
- [37] CHAARMAN, W. N. *Night myopia and driving*. Ophthalmic and Physiological Optics, vol. 16, 1996, no. 6, pp. 474–485, DOI: 10.1016/0275-5408(96)00024-5
- [38] LÓPEZ-GIL, N., PEIXOTO-DE-MATOS, S. C., THIBOS, L. N., GONZÁLEZ-MÉIJOME, J. M. *Shedding light on night myopia*. Journal of Vision, vol. 12, 2012, no. 5, DOI: 10.1167/12.5.4
- [39] CHIRRE, E., PRIETO, P. M., SCHWARZ, C., ARTAL, P. *Night myopia is reduced in binocular vision*. Journal of Vision, vol. 16, 2016, no. 8, DOI: 10.1167/16.8.16
- [40] LEIBOWITZ, H. W., OWENS, D. A. *Night myopia and the intermediate dark focus of accommodation*. Journal of the Optical Society of America, vol. 65, 1975, no. 10, pp. 1121–1128, DOI: 10.1364/josa.65.001121
- [41] REUTER, T. *Fifty years of dark adaptation 1961–2011*. Vision Research, vol. 51, 2011, no. 21–22, pp. 2243–2262, DOI: 10.1016/j.visres.2011.08.021
- [42] FIRSOV, M. L., KOLESNIKOV, A. V., GOLOBOKOVA, E. Y., GOVARDOVSKII, V. I. *Two realms of dark adaptation*. Vision Research, vol. 45, 2005, no. 2, pp. 147–151, DOI: 10.1016/j.visres.2004.08.005
- [43] JAMESON, D., HURVICH, L. M. (1972): *Visual Psychophysics (Handbook of Sensory Physiology, 7/4)*. Springer Publishing, New York. ISBN: 978-3642886607
- [44] KOLB, H., FERNANDEZ, E., NELSON, R. (2005): *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*. University of Utah Health Sciences Center, Utah. PMID: 21413389
- [45] YANG, G. Q., CHEN, T., TAO, Y., ZHANG, Z. M. *Recent advances in the dark adaptation investigations*. International journal of ophthalmology, vol. 8, 2015, no. 6, pp. 1245–1252, DOI: 10.3980/j.issn.2222-3959.2015.06.31
- [46] LAMB, T. D. *Why rods and cones?*. Eye (London, England), vol. 30, 2016, no. 2, pp. 179–185, DOI: 10.1038/eye.2015.236
- [47] Upraveno podle Dark Adaptation and Limiting Magnitude. [online] [navštíveno 19.8.2023] Dostupné z <https://www.ianmorison.com/dark-adaptation-and-limiting-magnitude/>

- [48] HURLEY, J. B. *Shedding light on adaptation*. The journal of general physiology, vol 119, 2002, no. 2, pp. 125-128, DOI: 10.1085/jgp.119.2.125
- [49] MAINSTER, M. A., TURNER, P. L. *Glare's Causes, Consequences, and Clinical Challenges After a Century of Ophthalmic Study*. American Journal of Ophthalmology, vol. 153, 2012, no. 4, pp. 587–593, DOI: 10.1016/j.ajo.2012.01.008
- [50] PIERSON, C., WIENOLD, J., BODART, M. *Review of Factors Influencing Discomfort Glare Perception from Daylight*. LEUKOS, vol. 14, 2018, no. 5, pp. 1–37, DOI: 10.1080/15502724.2018.1428617
- [51] ASLAM, T. M., HAIDER, D., MURRAY, I. J. *Principles of disability glare measurement: an ophthalmological perspective*. Acta Ophthalmologica Scandinavica, vol.85, 2007, no. 4, pp. 354–360, DOI: 10.1111/j.1600-0420.2006.00860.x
- [52] Head light glare: Are night driving glasses the answer. [online] [navštíveno 19.8.2023] Dostupné z <https://www.startrescue.co.uk/breakdown-cover/motoring-advice/weather-and-seasons/head-light-glare-are-night-driving-glasses-the-answer>
- [53] VOS, J. J. *On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation*. Clinical & Experimental Ophthalmology, vol. 86, 2003, no. 6, pp. 363–370, DOI: 10.1111/j.1444-0938.2003.tb03080.x
- [54] YUAN, R., YAGER, D., GUETHLEIN, M., OLIVER, G., KAPOOR, N., ZHONG, R. *Controlling Unwanted Sources of Threshold Change in Disability Glare Studies*. Optometry and Vision Science, vol. 70, 1993, no. 11, pp. 976–981, DOI: 10.1097/00006324-199311000-00016
- [55] Streetlights Looking Blurry? Why You May Have Halo Vision. [online] [navštíveno 19.8.2023] Dostupné z <https://health.clevelandclinic.org/halo-vision/>
- [56] BARGARY, G., JIA, Y., BARBUR, J. L. *Mechanisms for Discomfort Glare in Central Vision*. Investigative Ophthalmology & Visual Science, vol. 56, 2014, no. 1, pp. 464–471, DOI: 10.1167/iovs.14–15707
- [57] KENT, M., ALTOMONTE, S., TREGENZA, P., WILSON, R. *Discomfort glare and time of day*. Lighting Research and Technology, vol. 47, 2014, no. 6, pp. 641–657, DOI: 10.1177/1477153514547291

- [58] TUAYCHAROEN, N., TREGENZA, P. R. *Discomfort glare from interesting images*. *Lighting Research and Technology*, vol. 37, 2005, no. 4, pp. 329–341, DOI: 10.1191/1365782805li147oa
- [59] Oculus Mesotest II Instruction Manual. [online] [navštíveno 5.2.2024] Dostupné z https://www.birminghamoptical.co.uk/content/uploads/2023/01/OCULUS_MesotestII_Instruction_Manual.pdf
- [60] ISHII, Y., OKAMOTO, C., HIRAOKA, T., OKAMOTO, F., OSHIKA, T. *Mesopic contrast sensitivity and ocular higher-order aberrations in eyes with conventional spherical intraocular lenses*. *American Journal of Ophthalmology*, vol. 148, 2009, no. 2, pp. 298–302, DOI: 10.1016/j.ajo.2009.03.022
- [61] JANSONIUS, N. M., KOOIJMAN, A. C. *The effect of defocus on edge contrast sensitivity*. *Ophthalmic and Physiological Optics*, vol. 17, 1997, no. 2, pp. 128–132, PMID: 9196675
- [62] PUELL, M. C., PALOMO, C., SÁCHEZ-RAMOS, C., VILLENA, C. *Mesopic contrast sensitivity in the presence or absence of glare in a large driver population*. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, vol. 242, 2004, no. 9, pp. 755–761, DOI: 10.1007/s00417-004-0951-6
- [63] LEE, J. E., STEIN, J. J., PREVOR, M. B., SEIPLE, W. H., HOLOPIGIAN, K., GREENSTEIN, V. C., STENSON, S. M. *Effect of variable tinted spectacle lenses on visual performance in control subjects*. *The contact lens association of ophthalmologists*, vol. 28, 2002, no. 2, pp. 80–82, PMID: 12054376
- [64] BANDYOPADHYAY, S., SAHA, M., CHAKRABARTI, A., SINHA, A. *Effect on contrast sensitivity after clear, yellow and orange intraocular lens implantation*. *International Ophthalmology*, vol. 36, 2016, no. 3, pp. 313–318, DOI: 10.1007/s10792-015-0120-4
- [65] TZELIKIS, P. F., AKAISHI, L., TRINDADE, F. C., BOTEON, J. E. *Spherical aberration and contrast sensitivity in eyes implanted with aspheric and spherical intraocular lenses: a comparative study*. *American Journal of Ophthalmology*, vol. 145, 2008, no. 5, pp. 827–833, DOI: 10.1016/j.ajo.2007.12.023
- [66] GIL, M. A., VARÓN, C., CARDONA, G., VEGA, F., BUIL, J. A. *Comparison of far and near contrast sensitivity in patients symmetrically implanted with multifocal and monofocal IOLs*. *European Journal of Ophthalmology*, vol. 24, 2014, no. 1, pp. 44–52, DOI: 10.5301/ejo.5000335

- [67] GANESH, S., BRAR, S., PATEL, U. *Comparison of ReLEx SMILE and PRK in terms of visual and refractive outcomes for the correction of low myopia*. International Ophthalmology, vol. 38, 2018, no. 3, pp. 1147–1154, DOI: 10.1007/s10792-017-0575-6
- [68] BARRETO JR, J., BARBONI, M. T. S., FEITOSA-SANTANA, C., SATO, J. R., BECHARA, S. J., VENTURA, D. F., ALVEZ, M. R. *Intraocular straylight and contrast sensitivity after contralateral wavefront-guided LASIK and wavefront-guided PRK for myopia*. Journal of Refractive Surgery, vol. 26, 2010, no. 8, pp. 588–593, DOI: 10.3928/1081597X-20090930-01
- [69] LEE, H. K., CHOE, C. M., MA, K. T., KIM, E. K. *Measurement of contrast sensitivity and glare under mesopic and photopic conditions following wavefront-guided and conventional LASIK surgery*. Journal of Refractive Surgery, vol. 22, 2006, no. 7, pp. 647–655, DOI: 10.3928/1081-597X-20060901-05
- [70] NASSIRI, N., SHEIBANI, K., AZIMI, A., KHOSRAVI, F. M., HERAVIAN, J., YEKTA, A., MOGHADDAM, H. O., NASSIRI, S., YASSERI, M., NASSIRI, N. *Refractive Outcomes, Contrast Sensitivity, HOAs, and Patient Satisfaction in Moderate Myopia: Wavefront-Optimized Versus Tissue-Saving PRK*. Journal of Refractive Surgery, vol. 31, 2015, no. 10, pp. 683–690, DOI: 10.3928/1081597X-20150831-01
- [71] KEIR, N. J., SIMPSON, T., JONES, L. W., FONN, D. *Wavefront-guided LASIK for myopia: effect on visual acuity, contrast sensitivity, and higher order aberrations*. Journal of Refractive Surgery, vol. 25, 2009, no. 6, pp. 524–533, DOI: 10.3928/1081597X-20090512-06