

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI
KATEDRA OPTIKY

VLIV PARAMETRŮ ROHOVKY NA REFRAKCI

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Iva Pokorná

obor: 5345R008 OPTOMETRIE

studijní rok: 2015/2016

VEDOUcí DIPLOMOVÉ PRÁCE:

RNDr. Mgr. František Pluháček, PhD.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Mgr. Františka Pluháčka, PhD. za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne 18. 4. 2016

Bc. Iva Pokorná

Poděkování:

Tímto bych chtěla poděkovat panu RNDr. Mgr. Františku Pluháčkovi, PhD. za udělené rady a vedení mé diplomové práce. Mé díky patří také paní doktorce MUDr. Jitce Vrbové za umožnění realizace praktické části diplomové práce na jejím soukromém pracovišti.

Tato práce byla vytvořena za podpory projektu IGA PřF UP v Olomouci s názvem "Optometrie a její aplikace", č. IGA_PrF_2016_015.

Obsah

Seznam používaných zkratk	6
Úvod	7
1. Optická prostředí lidského oka	8
1.1 Slzný film	8
1.2 Rohovka	9
1.3 Komorový mok	11
1.4 Čočka	12
1.5 Sklivec	13
1.6 Zornice	13
1.7 Hloubka přední komory	14
1.8 Axiální délka oka	14
2. Metrické parametry rohovky	15
2.1 Poloměr zakřivení	15
2.2 Excentricita	16
2.3 Optická mohutnost	17
2.4 Velikost rohovky	18
2.5 Tloušťka rohovky	18
2.5.1 Faktory ovlivňující tloušťku a refrakci rohovky	20
3. Refrakční vady oka	23
3.1 Myopie	24
3.1.1 Myopie dle vlivu konkrétního metrického parametru oka	24
3.1.2 Myopie dle hodnoty axiální refrakce	25
3.2 Hypermetropie	25
3.2.1 Hypermetropie dle vlivu konkrétního metrického parametru oka	26
3.2.2 Hypermetropie dle hodnoty axiální refrakce	26
3.2.3 Hypermetropie dle stupně zapojené akomodace	27
3.3 Astigmatismus	27
3.3.1 Astigmatismus dle polohy hlavních meridiánů	28
3.3.2 Astigmatismus dle vztahu ke sférické refrakci oka	29
3.4 Faktory ovlivňující refrakci oka	29
3.4.1 Faktory s myopizujícím vlivem	30
3.4.2 Faktory s hypermetropizujícím vlivem	30

3.4.3 Faktory indukující astigmatismus	30
3.4.4 Léčiva a refrakce	30
3.4.5 Katarakta	32
3.4.6 Diabetes mellitus	33
4. Optické modely lidského oka	34
4.1 Gullstrandovo schematické oko	34
4.2 Zjednodušené schematické oko	35
4.3 Standardní redukované oko	35
5. Princip optického pachymetru a autorefrakto-keratometru	37
5.1 Optický pachymetr – Pachycam	37
5.2 Autorefrakto-kerato-tonometr Nidek Tonoref II	38
6. Praktická část	40
6.1 Metodika	40
6.1.1 Statistický soubor	40
6.1.2 Získávání dat	40
6.1.3 Statistické vyhodnocení	44
6.2 Výsledky	45
6.2.1 Vliv parametrů rohovky na refrakci	47
6.2.2 Vliv vybraných parametrů na tloušťku rohovky	48
6.2.3 Vliv vybraných parametrů na poloměr zakřivení rohovky	49
6.2.4 Vzájemná souvislost celkového a rohovkového astigmatismu	50
6.3 Diskuze	50
Závěr	53
Seznam použité literatury	54

Seznam používaných zkratek

ADO	axiální délka oka [mm]
a_R	vzdálenost dalekého bodu R od oka [mm]
A_R	axiální refrakce [D]
Ast_C	celkový astigmatismus oka [D]
Ast_R	rohovkový astigmatismus [D]
ATR	apikální tloušťka rohovky [μm]
C	vrcholová lámavost cylindrické čočky korigující celkový astigmatismus [D]
C_R	vrcholová lámavost cylindrické čočky korigující rohovkový astigmatismus [D]
CMTR	centrální minimální tloušťka rohovky [μm]
HPK	hloubka přední komory [mm]
HPR	horizontální průměr rohovky [mm]
K	draslík
KČ	kontaktní čočky
n	index lomu
Na	sodík
p	hladina významnosti
P	blízký bod
r	korelační koeficient
R	daleký bod
R	poloměr zakřivení [mm]
R_A	apikální poloměr zakřivení [mm]
R_s	sagitální poloměr zakřivení [mm]
R_0	centrální poloměr zakřivení [mm]
$R_{0,H}$	horizontální poloměr zakřivení [mm]
$R_{0,V}$	vertikální poloměr zakřivení [mm]
$R_{0,max}$	maximální centrální poloměr zakřivení [mm]
$R_{0,min}$	minimální centrální poloměr zakřivení [mm]
ŘT	řasnaté tělísko
S	vrcholová lámavost sférické čočky [D]
SD	směrodatná odchylka
SE	sférický ekvivalent [D]
ε	excentricita
φ	optická mohutnost [D]
φ_A	apikální optická mohutnost [D]
$\varphi_{\check{c}}$	optická mohutnost čočky [D]
φ_o	optická mohutnost oka [D]
φ_R	optická mohutnost rohovky [D]
$\varphi_{0,H}$	optická mohutnost řezu rohovky ležícího více horizontálně [D]
$\varphi_{0,V}$	optická mohutnost řezu rohovky ležícího více vertikálně [D]

Poznámka: Všechny parametry s pruhem značí průměrnou hodnotu.

Úvod

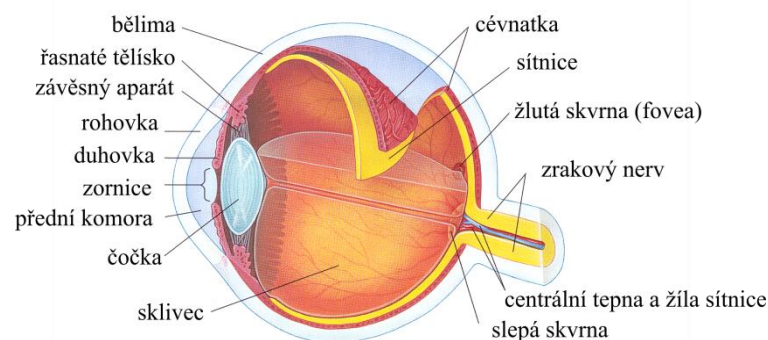
V souvislosti s refrakčními vadami oka je často diskutovaným tématem vliv jednotlivých metrických parametrů, konkrétně axiální délky oka, hloubky přední komory, poloměru zakřivení, případně tloušťky a velikosti horizontálního průměru rohovky na celkovou refrakci oka. Jelikož právě v souvislosti s obvyklými refrakčními vadami, jejichž původ je často v nesprávné délce oka, lze předpokládat např. u myopie ztenčení rohovky při nadměrné délce oka, případně menší poloměr zakřivení přední plochy rohovky, který způsobí její větší lomivost, a tedy zvýšenou výslednou optickou mohutnost celého oka. U hypermetropů by tomu mělo být právě naopak. Tato problematika je aktuální a důležitá zejména ve vztahu k refrakčním operacím a chorobám (např. keratokonus), které ovlivňují vlastnosti (zejména tvar) rohovky a v tom důsledku i refrakci.

Jelikož jsem sama myop s rohovkou, jejíž tloušťka a poloměr zakřivení nabývají podprůměrných hodnot, osobně mě tato problematika velice zajímá a zmíněné předpoklady budou ověřovány v předložené diplomové práci.

Cílem práce je provedení rešerše a shrnutí problematiky vlivu parametrů rohovky na celkovou refrakci oka a jejich následné ověření. Teoretická část nejprve představuje jednotlivá optická prostředí lidského oka. Následuje seznámení s metrickými parametry rohovky a faktory, které mohou ovlivňovat nejen její tloušťku ale také optickou mohutnost. Klasifikace jednotlivých ametropií společně s faktory, které mohou jednotlivé ametropie vyvolávat, jsou předmětem další kapitoly, na kterou navazuje seznámení se základními metrickými parametry optických modelů lidského oka. Principy měřicích oftalmologických přístrojů, které byly užity pro získání potřebných dat pro předloženou diplomovou práci, uzavírají teoretickou část práce. Praktická část je věnována experimentálnímu zkoumání vlivu parametrů rohovky na refrakci, vzájemného vlivu vybraných parametrů rohovky na její tloušťku a poloměr zakřivení. V další části je testována souvislost mezi astigmatismem celkovým a rohovkovým s následným ověřením Javalovy podmínky, viz kapitola 3.3. V závěrečné části práce jsou získané výsledky experimentální části diskutovány s výsledky jiných studií.

1. Optická prostředí lidského oka

Optický systém lidského oka představuje dokonale transparentní a konvergentní systém, jehož funkcí je fokusace paprsků do místa nejostřejšího vidění (fovea) na sítnici a následné zobrazení ostrého obrazu pozorovaného předmětu. Mezi optická prostředí lidského oka patří slzný film, rohovka, komorový mok, oční čočka a sklivec. Funkci clony, která reguluje množství dopadajícího světla na sítnici, zajišťuje zornice a na výslednou hodnotu refrakce oka může mít vliv také hloubka přední komory a axiální délka oka. Na obrázku 1 je zobrazeno schéma lidského oka s popisky jeho jednotlivých částí. [1, 2]



Obr. 1: Schéma lidského oka [3]

1.1 Slzný film

Slzný film je tekutina pokrývající nechráněnou část povrchu oka, která je ohraničena okraji víček, dále vnitřním a vnějším očním koutkem. Zajišťuje transport kyslíku k rohovce, odvod zplodin metabolismu a jiných patogenů z jejího povrchu, podílí se na udržení stabilní povrchové homeostázy a lubrikuje povrch oka pro usnadnění pohybu víček. Z optického hlediska při každém mrknutí, jehož interval je u oka bez známek patologie obvykle 5 s, slzný film vyhlazuje nerovnoměrnosti na povrchu rohovky, které by jinak narušovaly její optickou kvalitu. Slzný film je obecně považován za trilaminární strukturu skládající se ze tří na sebe přiléhajících vrstev, a to z vrstvy zevní lipidové (0,1 μm), střední vodnaté (5–7 μm) a vnitřní mucinové (0,02–0,05 μm).

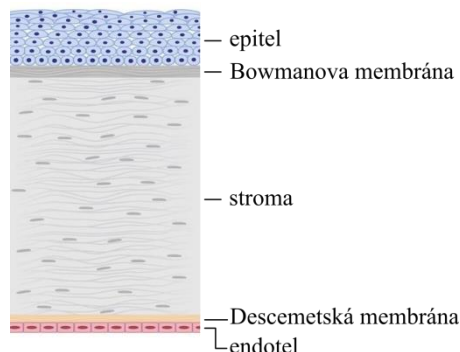
Tloušťka slzného filmu může být ovlivněna užíváním některých typů léčiv zejména antihistaminik, diuretik, psychotropních látek nebo betablokátorů a její hodnota se v případě nepatologického stavu pohybuje v rozmezí 5,12–7,15 μm . Fyzikální vlastnosti slzného filmu jsou uvedeny v tabulce 1. [2, 4, 5]

Tab. 1: Fyzikální vlastnosti slzného filmu [5]

Parametr	Hodnota
index lomu	1,336
pH	7,45
objem	7,0 μl ($\pm 0,2$)
rychlost běžné produkce	1–2 $\mu\text{l}/\text{min}$.
rychlost stimulované produkce	> 100 $\mu\text{l}/\text{min}$.

1.2 Rohovka

Rohovka je transparentní a bezcévná tkáň, která má dvě významné funkce. Společně se spojivkou, bělimou a slzným filmem zajišťuje mechanickou ochranu a nepropustnou bariéru mezi vnitřním a vnějším prostředím oka a druhou neméně důležitou funkcí je podíl na optické mohutnosti celého oka, viz kapitola 2.3. Rohovka spolu s bělimou, ve kterou přechází v místě zvaném limbus, tvoří vazivový obal oka a skládá se z pěti na sebe přilehajících vrstev, a to epitelu, Bowmanovy membrány, stroma, Descemetovy membrány a endotelu. Nákres řezu rohovkou je uveden na obrázku 2.



Obr. 2: Řez rohovkou [6]

Epitel

Epitel je nejzevnější vrstva rohovky, která zaujímá přibližně 10 % její celkové tloušťky, konkrétně 30–50 μm a vyznačuje se výbornou schopností regenerace, přičemž k obměně této vrstvy dochází každých sedm dní. Epitel je tvořen z 6 až 7 vrstev tří typů buněk. Vnější tři vrstvy epitelu obsahují ploché buňky, které jsou na svém povrchu opatřeny mikrokly, které umožňují adhezi mucinové vrstvy slzného filmu. Na tyto buňky navazují dvě až tři vrstvy buněk polygonálních a na ně jedna vrstva buněk cylindrických, která zároveň přiléhá k Bowmanově membráně. Epitel zajišťuje

nepropustnou bariéru pro malé molekuly, ionty a vodu a díky přítomným lymfocytům a makrofágům chrání oko před vnikem patogenů. [1, 2, 4, 5]

Bowmanova membrána

Bowmanova membrána se rozprostírá mezi bazální epitelovou membránou, což je vrstva přiléhající na epitel čítající 0,5–1 μm a mezi stromatem rohovky. Tato vrstva je bezbuněčná, homogenní povahy a skládá se z náhodně orientovaného množství drobných kolagenních vláken. V případě poškození se hojí jizvou, jelikož nemá schopnost regenerace. Celková tloušťka této vrstvy je přibližně 8–14 μm . [2, 4, 5]

Stroma

Stroma je díky pravidelné struktuře umožňující průchod paprsků s minimálním rozptylem a stabilní hydrataci vysoce transparentní tkáň. Zaujímá přibližně 90 % tloušťky rohovky a téměř z 80 % je tvořena vodou, jejíž stabilní objem je zajišťován skrze endotelovou pumpu. Ta umožňuje transport vody a iontů z rohovky směrem do přední komory. Stroma se skládá převážně z kolagenních lamel, jejichž počet je 200 až 250 s tloušťkou 2 μm a šířkou 9–260 μm . Lamely jsou napínány od limbu k limbu a vytvářejí tak lamelární strukturu rohovky, přičemž jejich počet je v jednotlivých částech stromatu různý. Mezi jednotlivými lamelami se volně v prostoru nacházejí proteoglykany, které zajišťují jejich pravidelné rozestupy a keratocyty, jejichž počet je nejvyšší na povrchu a klesá směrem do nitra stromatu. [1, 2, 4]

Descemetová membrána

Descemetová membrána je bazální membrána endotelu, jejíž tloušťka se s věkem zvětšuje a skládá se ze dvou specifických vrstev. První třetina membrány zahrnuje 30 až 40 lamel, má pravidelný pruhovitý vzhled a dosahuje tloušťky 3–4 μm . Zbylé dvě třetiny obsahují homogenní vrstvu kolagenních vláken. Celková tloušťka této membrány v dospělosti dosahuje 10–12 μm . Zabraňuje vniku leukocytů a naopak umožňuje průnik vody a jiných drobných molekul do stromatu. V případě disrupce membrány dochází k reparačním procesům skrze migrující endotelové buňky, jejichž výsledkem je tvorba kolagenu nebo ztlustění původní membrány. [2, 4]

Endotel

Endotel je tvořen jednou vrstvou hexagonálních buněk o průměru 18–20 μm , výškou 5–6 μm a tloušťkou 4–6 μm . Endotelových buněk je dle [2] při narození téměř 350 000

s hustotou přibližně 3000–4000 buněk/mm², jejich počet však s věkem klesá, přičemž v prvním roce věku dojde k úbytku až o 26 % buněk. Ve středním věku je pak hustota přibližně 2500 buněk/mm² a ve stáří 2000 buněk/mm². Jelikož tyto buňky nemají schopnost mitózy (buněčného dělení), jejich úbytek je nahrazen nárůstem velikosti stávajících buněk. Pokles buněk pod hranici 1000 buněk/mm² vede k otoku rohovky, viz kapitola 2.5.1. Buňky endotelu společně s cytoplazmatickými organelami hrají významnou roli v transportu tekutin, v jehož důsledku je zajištěna stabilní hydratace, a tedy konstantní optická mohutnost rohovky.

Pro správnou činnost rohovky je důležitý dostatečný příjem kyslíku a nutričních komponent, zejména aminokyselin a glukózy. Kyslík je k rohovce přiváděn převážně ze slzného filmu a nutriční komponenty cestou aktivního transportu z komorové vody. Společnou cestou je pak difuze z kapilár v oblasti limbu. [2, 4, 5]

1.3 Komorový mok

Komorový mok je bezbuněčná a transparentní tekutina obsahující z 99 % vodu a ionty zejména sodík (143 mmol/l). Tato tekutina je tvořena v řasnatém tělísku a neustále cirkuluje z prostoru zadní oční komory (70 µl) přes zornici do přední oční komory (270 µl), odkud následně odtéká skrze trabekulární trámčinu. Objem komorového moku je neustále obměňován s rychlostí 2–3 µl/min. a díky této obměně je zajištěna jeho dokonalá průhlednost a částečná regulace volných radikálů, které do oka pronikají. Skrze stabilní nitrooční tlak, jehož hodnota (10–20 mmHg) je dána vzájemným poměrem mezi produkcí a vstřebáváním komorového moku, je udržována neměnná integrita a tvar očního bulbu. Množství komorového moku klesá s věkem v závislosti na změně hloubky přední oční komory vlivem zvětšení předozadního průměru čočky. Ze stejných příčin je jeho množství menší také u hypermetropů. Fyzikální parametry komorového moku jsou uvedeny v tabulce 2. [1, 2, 7]

Tab. 2: Fyzikální vlastnosti komorového moku [1, 2, 4]

Parametr	Hodnota
index lomu	1,336
pH	7,21
objem	340 µl
dynamika obměny	2,3 µl/min

1.4 Čočka

Čočka je transparentní útvar bez přímého cévního zásobení, který se nachází v oblasti mezi zadní plochou duhovky a přední sklivcovou membránou. V systému lidského oka se uplatňuje především podílem na lomu světla a hodnotě celkové optické mohutnosti oka. V závislosti na vzdálenosti, ve které se nachází předmět, na který zrakový aparát zaostřuje, čočka dokáže měnit vlastní optickou mohutnost, a to změnou tvaru její přední plochy. Tento proces se nazývá akomodace. Čočku dle [4] tvoří z 65 % voda a zbylých 35 % vyplňují bílkoviny (krystaliny) a ionty, především sodík Na (25 mmol/l) a draslík K (150 mmol/l). Odchytky od uvedených hodnot iontů ovlivňují obsah vody v čočce, a tedy její optické vlastnosti. [7]

Z histologického hlediska se čočka skládá ze čtyř struktur, a to pouzdra, epitelu, kortexu a jádra. Pouzdro vytváří vnější obal čočky, jeho tloušťka je největší v oblasti předního pólu (0,014 mm) a vertikálního obvodu zvaného ekvátor (0,009 mm), kde se na čočku upínají vlákna závěsného aparátu, nejtenčí je pak v oblasti zadního pólu (0,003 mm). Fyziologicky se tloušťka předního pouzdra s věkem zvětšuje, zatímco tloušťka zadního pouzdra se zmenšuje. Na přední pouzdro čočky v jedné vrstvě naléhá vrstva epitelová, která dosahuje pouze k ekvátoru a v zadní části pouzdra se nevyskytuje. Jádro a kortex jsou dvě téměř nerozlišitelné struktury, které se skládají z čočkových vláken vytvářejících trojdimenzionální strukturu, ovšem jejich index lomu je odlišný, a tak se čočka stává refrakčním prostředím stejně tak, jako z důvodu lomu při dopadu paprsků na její povrch. Kyslík a jiné neméně důležité komponenty, zejména glukóza, ionty a aminokyseliny, jsou k čočce přiváděny skrze komorový mok. Fyzikální parametry čočky jsou uvedeny v tabulce 3. [2, 4]

Tab. 3: Fyzikální vlastnosti čočky u dospělého člověka [1, 2]

Parametr	Hodnota
index lomu	1,416
optická mohutnost v závislosti na akomodaci	15–20 D
hmotnost	255 mg
ekvatoriální rozměr	9 mm
tloušťka při akomodaci do blízka	4,4 mm
tloušťka při pohledu na vzdálený objekt	3,7 mm

Čočka paralelně s růstem oka v průběhu života mění svoji velikost. Tyto změny jsou dle [8] patrné v dětství, kdy v období emetropizace dochází k jejímu ztenčení a následné redukci optické mohutnosti oka. Čočka se tedy chová jako kompenzační faktor zajišťující emetropickou stálost oka. V okamžiku, kdy čočka již není schopna změnit svoji tloušťku [9] a tím kompenzovat rozdíl v délce oka oproti emetropickému stavu, obvykle dochází k patrnému projevu myopie. Vlivem zvýšeného množství nerozpustných bílkovin, ke kterému dochází při nárůstu koncentrace sodíku na 40 mmol/l a více, čočka zvětšuje svoji tloušťku přibližně z 3,5 na 5,0 mm, respektive hmotnost z 255 na 270 mg. Současně se změnou tloušťky se mění také její zakřivení. Přední plocha se stává strmější, zvětšují se rozdíly v indexu lomu mezi jádrem a kortexem a oko se stává více myopickým. Tyto změny jsou patrné zejména u pacientů s nukleární kataraktou. [4, 7]

1.5 Sklivec

Sklivec je další světlolomné a dokonale čiré prostředí, které vyplňuje 4/5 nitroočního prostoru o objemu přibližně 4 ml. Jedná se o pojivovou tkáň obklopenou obalem, který v přední části lne k zadnímu pouzdru čočky a v zadní části k vnitřní membráně sítnice. Sklivec je svou konzistencí připodobňován k rosolovité hmotě obsahující z 98,6 % vodu, ionty, aminokyseliny, fosfolipidy a extracelulární síťovinu z nepravidelného pletiva kolagenních vláken. Prostory uvnitř síťoviny jsou vyplněny molekulami kyseliny hyaluronové, která zajišťuje průhlednost sklívce a lomivost paprsků s minimálním rozptylem. Index lomu sklívce je 1,336. [1, 2]

1.6 Zornice

Zornice je kruhový otvor uprostřed duhovky, jehož průměr je regulován v závislosti na aktivitě dvou antagonisticky působících svalů duhovky a nabývá normálních hodnot 2–5 mm. K zúžení zornice tzv. mióze dochází při dostatečném osvětlení nebo pohledu oka do blízka a tento proces zajišťuje sval m. sphincter pupillae, naopak k rozšíření zornice tzv. mydriáze dochází při nedostatečném osvětlení nebo pohledu oka do dálky a tento stav je zajišťován skrze sval m. dilatator pupillae. Zornice tedy v optickém systému oka působí zejména jako clona regulující množství světla dopadajícího na sítnici a její velikost ovlivňuje difrakci světla a optické aberace oka. Velikost zornice může ovlivnit několik dalších faktorů, například miotická zornice o šířce 1–2 mm je častá u starších jedinců, případně pacientů užívajících antiglaukomatika nebo

antihypertenziva, naopak mydriatická zornice o šíři 6–9 mm u myopů nebo pacientů užívajících antidepressiva. Přirozeně šíři zornice ovlivňuje aktuální emocionální stav jedince. [1, 2, 4, 10]

1.7 Hloubka přední komory

Hloubka přední komory, dále jen HPK, se mění paralelně s růstem oka. Na základě studie [11] bylo zjištěno, že v časovém rozmezí od narození do prvního roku života její velikost narůstá o 0,9–1,0 mm, ve věku od 1 do 7 let o 0,3–0,4 mm, téměř o 0,1 mm pak ve věku od 8 do 13 let a své maximální předozadní hloubky (3–4 mm) dosáhne do věku 15 let. Po 30. roku věku dochází ke změnám objemu čočky vlivem narůstajícího množství fibrilárních vláken na její přední ploše, čočka následně vyplňuje větší prostor, a tedy dochází ke zkrácení HPK, které obvykle nepřevyšuje 0,1 mm. Při zohlednění této změny při výpočtu dle schematického oka, blíže o schematickém oku, viz kapitola 4.2, nastane dle [12] změna refrakce přibližně o 0,2 D. Z toho vyplývá, že HPK nepatří mezi hlavní faktory ovlivňující optickou mohutnost oka. Nicméně dle [7] prohloubení přední komory vede ke snížení, zatímco její zkrácení ke zvýšení lomivosti oka. [4, 7]

1.8 Axiální délka oka

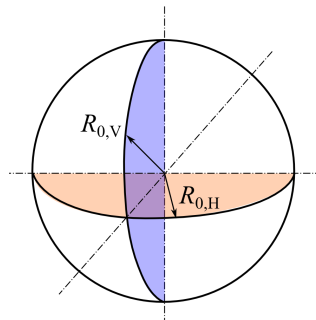
Axiální délka oka, dále jen ADO, představuje spojnici vrcholu rohovky a fovey. Při narození je ADO přibližně 18 mm, do tří let se prodlouží téměř o 5 mm a její růst za normálních okolností končí kolem 13. roku věku s výslednou hodnotou přibližně 24 mm. Dle [4] změna velikosti ADO o 1 mm představuje změnu optické mohutnosti o 2–3 D. Nadměrná nebo naopak nedostatečná ADO, způsobená především anomální délkou hloubky sklivcového prostoru, je dle [13] považována za hlavní parametr ovlivňující výslednou refrakci oka. Nárůst refrakce v závislosti na délce oka potvrzuje studie [14], ve které bylo 175 myopických očí rozděleno do tří skupin podle velikosti refrakce a k nim přiřazena odpovídající průměrná hodnota ADO. U první skupiny s refrakcí od 0 do -6,0 D; ADO = (25,2 ± 1,2) mm, u druhé skupiny od -6,25 do -12,0 D; ADO = (26,6 ± 1,3) mm a u třetí skupiny s hodnotou refrakce > -12,0 D je ADO (29,5 ± 2,6) mm. [4]

2. Metrické parametry rohovky

Metrické parametry číselně charakterizují rohovku. Hodnoty konkrétního parametru se mohou lehce odlišovat a lze tedy předpokládat vliv těchto parametrů na výslednou hodnotu refrakce oka. Předmětem praktické části této diplomové práce bude zkoumání vlivu konkrétních parametrů rohovky, zejména poloměru zakřivení, horizontálního průměru a tloušťky na refrakci a jejich vzájemné vztahy, a proto je na místě se s těmito a jinými parametry rohovky blíže seznámit.

2.1 Poloměr zakřivení

Poloměr zakřivení R rohovky si lze představit jako poloměr kulové plochy, která je totožná s plochou dané rohovky. Obecně lze pro jednotlivé body rohovky pozorovat různé hodnoty poloměrů zakřivení, které lze stanovit např. jako skutečné geometrické zakřivení v každém bodě rohovky, kterému odpovídá poloměr nejlépe se přimykající kružnice a takové zakřivení se nazývá tangenciální (lokální). Druhou možností je stanovení zakřivení vztažené k optické ose, přičemž příslušný střed křivosti se nachází na průsečíku optické osy rohovky a kolmice k tečně řezu rohovkou v konkrétním bodě, takové zakřivení se nazývá sagitální (axiální, celkové). O rotační ploše neboli sférickém tvaru mluvíme tehdy, jestliže poloměr zakřivení rohovky je ve všech jejích řezech totožný a tyto řezy mají tvar kružnic. Za centrální část rohovky je považována oblast o průměru 3–4 mm. Centrální poloměr zakřivení R_0 se ve směru k periférii obvykle plynule mění od $R_{0,max}$ po $R_{0,min}$. Tyto mezní hodnoty odpovídají dvěma navzájem kolmým řezům (hlavní meridiány), přičemž poloměr zakřivení řezu orientovaného více horizontálně se též značí $R_{0,H}$ a řezu orientovaného více vertikálně $R_{0,V}$, viz obrázek 3. Jednotlivé řezy takové rohovky pak nabývají tvaru obecné křivky druhého stupně a lze ji dobře aproximovat plochou druhého stupně, viz kapitola 2.2. [15, 16]



Obr. 3: Poloměry zakřivení u sférické rohovky

Výsledná hodnota poloměru zakřivení rohovky je obvykle dosažena ve věku tří let a po zbytek života zůstává relativně stabilní. V případě myopického oka se dle [16] předpokládá změna ve smyslu oploštění rohovky, které je patrnější v oblasti ploššího meridiánu, čímž se rohovka společně s kompenzačním mechanismem čočky, viz kapitola 1.4, snaží zachovat oko co nejdéle emetropické. Tuto domněnku potvrzují studie [17] a [18], ze které zároveň vyplývá přítomnost menšího poloměru zakřivení u rohovek žen. Naopak ze studie [19] vyplývá, že rohovka je u myopického oka strmější. Hodnoty centrálního zakřivení přední a zadní plochy rohovky jsou uvedeny v tabulce 4. [15, 16, 20]

Tab. 4: Průměrné hodnoty centrálního zakřivení rohovky [16]

Oblast rohovky	Průměrná hodnota	Rozmezí
přední plocha	7,8 mm	7,0-8,6 mm
zadní plocha	6,7 mm	6,5-6,9 mm

2.2 Excentricita

Změnu v poloměru zakřivení, ke které dochází u obecné plochy druhého stupně směrem od středu do periferie rohovky, charakterizuje veličina zvaná excentricita ε . Za normálních podmínek platí: čím větší excentricita, tím je rohovka v periférii plošší. Pokud je rohovka naopak v periférii strmější, je tento abnormální stav odlišen tím, že je excentricitě definatoricky přiřazena záporná hodnota. Dle [20] bylo prokázáno, že hodnota excentricity se u více než 70 % měřených rohovek pohybuje v rozmezí 0,35–0,55 a svým tvarem odpovídají rotačnímu elipsoidu, u 20 % jsou pak naměřené hodnoty nižší a u zbylých 10 % naopak vyšší. Číselně lze dle [21] odhadnout hodnotu průměrné excentricity $\bar{\varepsilon}$ na základě znalosti průměrného centrálního $\overline{R_0}$ a průměrného sagitálního zakřivení $\overline{R_s}$ rohovky podle vztahu

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{|\overline{R_s} - \overline{R_0}|},$$

přičemž $\overline{R_s}$ je průměr dílčích sagitálních zakřivení, měřených v úhlové vzdálenosti 30° od středu rohovky. Hodnota excentricity dále charakterizuje typ křivky, kterou lze rohovku v daném řezu nahradit. Křivky, které mohou charakterizovat daný řez a k nim příslušné rozmezí hodnot excentricity, jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5: Tvar řezu rohovky v závislosti na excentricitě ε [20]

Tvar řezu	Excentricita
hyperbola	$\varepsilon > 1$
parabola	$\varepsilon = 1$
elipsa	$0 < \varepsilon < 1$
kružnice	$\varepsilon = 0$

2.3 Optická mohutnost

Optická mohutnost je veličina, která charakterizuje lomivost daného prostředí. Hodnotu optické mohutnosti φ lze vypočítat pro jednotlivé oční struktury, a to za předpokladu znalosti poloměru zakřivení daného refrakčního povrchu R a indexů lomu před n_1 a za n_2 tímto refrakčním prostředím, přičemž dle [15] platí

$$\varphi = \frac{(n_2 - n_1)}{R}.$$

Jednotkou optické mohutnosti je dioptrie D , která je definovaná jako převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti a její rozměr je m^{-1} . [2]

Optická mohutnost rohovky znamená optickou mohutnost konkrétní kulové plochy, kterou lze danou rohovku nahradit. Při dosazení za $n_2 = 1,3375$, $n_1 = 1$ a $R = 7,76$ je výsledná hodnota optické mohutnosti sférické rohovky rovna 43,5 D. Optická mohutnost rohovky se s věkem nemění, ovšem u myopických očí je její hodnota ve srovnání s emetropickým okem dle [4] vyšší. Přehled průměrných hodnot optických mohutností jednotlivých struktur oka a indexů lomu jednotlivých částí rohovky je uveden v tabulce 6 a 7. [15]

Tab. 6: Optická mohutnost jednotlivých struktur oka [16]

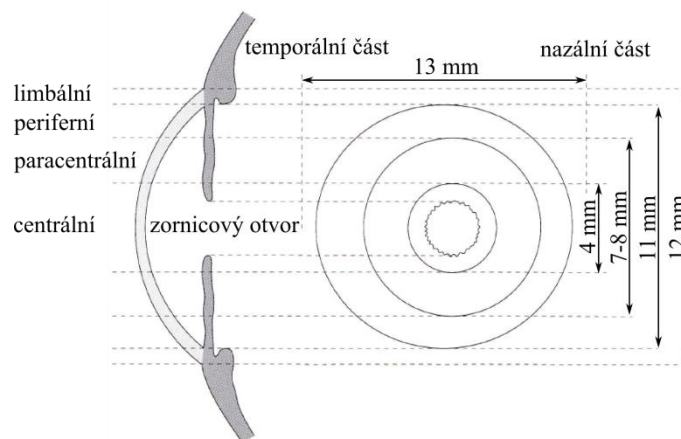
Struktura předního segmentu	Optická mohutnost
přední plocha rohovky	+49,5 D
zadní plocha rohovky	-6,0 D
celková mohutnost rohovky	+43,5 D
celková mohutnost čočky	+20,0 D
celková optická mohutnost oka	+63,5 D

Tab. 7: Index lomu jednotlivých částí rohovky [16]

Struktura rohovky	Index lomu
standardní keratometrický index	1,376
epitel rohovky	1,337
přední plocha stromatu	1,401
zadní plocha stromatu	1,380

2.4 Velikost rohovky

Rohovka zaujímá téměř 20 % povrchu očního bulbu, což odpovídá dle [5] ploše o velikosti 1,1 cm². Hodnota horizontálního průměru se v literatuře uvádí v rozmezí 11,8–12,6 mm a hodnota vertikálního průměru 10,6–11,5 mm. Z obrázku 4 je patrné, že rohovka je obvykle horizontálně oválná, strmější v centru než v periferii a její povrch lze rozčlenit do čtyř zón, konkrétně na jednu zónu centrální a tři zóny tvořící její periferii. Centrální zóna je téměř sférická, přičemž zakřivení se nemění o více než 0,05 mm a její průměr je přibližně 4 mm. Následuje zóna paracentrální, tvořící prsteneček o šíři 4 až 7 mm s poloměrem zakřivení plošším než v zóně předchozí. Periferní zóna je považována za oblast největšího oploštění a asymetrie v poloměru zakřivení. Poslední zóna, která tvoří přechod mezi rohovkou a bělimou, se nazývá limbální a její šířka je přibližně 0,5–1 mm. [2, 5, 16]



Obr. 4: Optické zóny a svislý řez rohovkou [16]

2.5 Tloušťka rohovky

Tloušťku neboli pachymetrii rohovky lze změřit v různém rozsahu a různými metodami. Z výsledků měření jsou obvykle obdrženy hodnoty tloušťky rohovky měřené

v jejím vrcholu (apex), odtud název apikální tloušťka, dále hodnoty minimální a maximální tloušťky. Sofistikovanější přístroje např. Pentacam (Oculus) nebo Orbscan (Bausch & Lomb) navíc poskytují údaje o pachymetrii v periférii rohovky. Jak již z předchozího textu vyplývá, tloušťka rohovky není po celé její ploše konstantní. V centrální oblasti je průměrná tloušťka rohovky dle [2] 560 μm , zatímco v její periférii nabývá hodnot v rozmezí 650–900 μm . Průběh tloušťky rohovky mapovala studie [22], která ke svému měření využívala dva přístroje, a to ultrazvukový pachyometr Tomey SP 3000, jehož výstupem je průměrná hodnota tloušťky rohovky ve středu zornice, která činila (548 \pm 34) μm v rozmezí 442–628 μm a optický pachyometr Pentacam. Pomocí Pentacamu byla měřena centrální (apikální, minimální a ve středu zornice) a periferní tloušťka. Průměrné hodnoty tloušťky rohovky v centrální oblasti z měření na Pentacamu a jejich rozpětí jsou uvedeny v tabulce 8. Z této studie vyplývá, že tloušťka rohovky měřená pomocí ultrazvukového pachymetru je v porovnání s měřením na optickém pachymetru v průměru o 2,11 μm menší.

Tab. 8: Tloušťka rohovky měřená ve třech centrálních bodech pomocí Pentacamu [22]

Tloušťka rohovky	Střed zornice	Nejtenčí místo	Apex rohovky
průměr \pm SD [μm]	550 \pm 34	547 \pm 35	551 \pm 34
rozmezí [μm]	444 až 631	432 až 627	450 až 632

Dále byla měřena periferní tloušťka pomocí Pentacamu, konkrétně ve vzdálenosti 3 a 7 mm od apexu, a to temporálně, nazálně, superiorně a inferiorně. Naměřené hodnoty a procentuální nárůst oproti apikální tloušťce jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9: Tloušťka rohovky měřená ve vzdálenosti 3 a 7 mm od apexu rohovky pomocí Pentacamu [22]

Měřená oblast		Průměr \pm SD [μm]	Rozmezí [μm]	Nárůst periferní tloušťky ve srovnání s tloušťkou apikální (%)
temporálně	3 mm	563 \pm 36	540 až 633	2,3
	7 mm	639 \pm 35	553 až 730	16
nasálně	3 mm	578 \pm 31	496 až 645	4,8
	7 mm	677 \pm 43	582 až 761	22,8
superiorně	3 mm	582 \pm 33	506 až 645	5,5
	7 mm	671 \pm 44	571 až 766	21,8
inferiorně	3 mm	577 \pm 53	452 až 633	4,7
	7 mm	664 \pm 42	586 až 763	20,5

2.5.1 Faktory ovlivňující tloušťku a refrakci rohovky

V oftalmologii existuje několik faktorů, které negativně ovlivňují nejen tloušťku rohovky ale také její optickou mohutnost. Do této skupiny patří bezpochyby edém rohovky, pravidelné nošení kontaktních čoček, přítomnost rohovkové ektázie nebo prodělání operace prováděné na rohovce, ať už s cílem korekce refrakční vady nebo terapie jiné oční patologie.

Edém rohovky

Edém neboli otok může postihovat epitel nebo stroma, případně obě tyto struktury současně. Tloušťka rohovky dle [5] každodenně narůstá přibližně o 3 % její hodnoty v důsledku edematózních změn v průběhu spánku a její původní hodnoty je opět dosaženo přibližně 4 hodiny po probuzení. V případě, že se jedná o samotný edém epitelu, je jeho příčinou obvykle nárůst hodnoty nitroočního tlaku, často při akutním glaukomovém záchvatu. Edém stromatu vzniká v důsledku hypoxie (nedostatek kyslíku) rohovky často v důsledku nošení kontaktních čoček (více viz níže), při poklesu počtu endotelových buněk pod hranici 800 buněk/mm², dystrofie rohovky např. Fuchsovy endotelové dystrofie, traumatu vedoucího k dekompenzaci endotelu, ruptury Descemetové membrány při keratokonu nebo zánětu rohovky. Edém rohovky způsobí zvětšení její tloušťky a negativně ovlivňuje její průhlednost. [2, 5, 20]

Kontaktní čočky

Pravidelné nošení kontaktních čoček, dále jen KČ může mít vliv na tloušťku rohovky především z důvodu zvýšeného rizika vzniku edému epitelu nebo stromatu. Edém epitelu se projevuje zhoršenou kontrastní citlivostí a vzniká v důsledku traumatické ztráty buněk epitelu nebo osmotického stresu rohovky, zatímco edém stromatu vzniká v důsledku hypoxie. Například pevné a hydrogelové čočky způsobí nárůst tloušťky rohovky vlivem edému o 1 až 6 % původní hodnoty a v případě přespání s těmito čočkami uvedená hodnota vzroste na 10 až 15 %, zatímco u silikon-hydrogelových čoček je to méně než 3 %. Ze studie [23] bylo zjištěno, že rohovka potřebuje minimálně 2,5 % kyslíku z 21 % přítomných ve vzduchu k tomu, aby se zamezilo vzniku edému stromatu. Vstřebatelnost edému indukovaného KČ je obvykle rychlá, ovšem závisí na délce jejich nošení (u prvnositele se vstřebá cca po 4 hodinách od vysazení, zatímco u dlouhodobých nositelů to může trvat v řádech dnů) a především vitalitě endotelu.

Ze studie, při které byla KČ nošena pouze na jednom oku, byl zjištěn pokles v tloušťce rohovky v průměru o 5,2 μm za 2,4 let, v jiné studii zase v průměru o 11 μm za 5,2 let, tedy o 2,1 μm za rok. Dlouhodobé nošení KČ však může mít vliv nejen na tloušťku celkovou, nýbrž pouze na epitelovou, přičemž ztenčení této vrstvy je odhadováno na 5,6–18,4 % v závislosti na konkrétní studii. Typickými příznaky jsou deformace povrchu rohovky a změna zrakové ostrosti. [5]

Ektázie rohovky

Keratokonus společně s pelucidní marginální degenerací a keratoglobem patří do skupiny ektatických onemocnění, která postihují rohovku v různém rozsahu. Konkrétně keratokonus představuje kónické vyklenutí rohovky, v jehož důsledku dochází ke změně v poloměru zakřivení, které je dle [20] menší než 7,5 mm a k protažení přední komory. Průměrná apikální optická mohutnost rohovky u oka s keratokonem je dle [24] ($55,8 \pm 7,6$) D v rozmezí 41,3–76,8 D a apikální rohovkový astigmatismus ($5,2 \pm 3,4$) D v rozmezí 0,5–15,9 D. Dalším typickým znakem je protenčení stromatu v paracentrální části s průměrnou tloušťkou dle [24] $457 \pm 0,94 \mu\text{m}$. Z optického hlediska se tedy oko stává myopickým s indukcí pravidelného a v pokročilém stádiu nepravidelného astigmatismu. Projevuje se ztrátou zrakové ostrosti, fotofobií a ve vyšším stádiu monokulární diplopií. [2, 20]

Pelucidní marginální degenerace se projevuje vyklenutím rohovky v dolním kvadrantu, které je ze spodní strany ohraničeno 1–2 mm širokým protenčeným pruhem, který v tomto místě dosahuje pouze 20 % běžné stromální tloušťky. [25]

Keratoglobus je typický svým globulárním vyklenutím po celé ploše rohovky, které je důsledkem ztenčení stromatu na 2/3 běžné tloušťky. [26]

Chirurgie rohovky

Ke změnám optické mohutnosti nebo tloušťky rohovky dochází v důsledku téměř každé operace předního segmentu oka, přičemž v případě rohovkové refrakční chirurgie jsou právě tyto změny hlavním cílem operace. Obecně lze refrakční výkony na rohovce členit na laserové a nelaserové.

Do kategorie nelaserových refrakčních výkonů patří incizní keratotomie a implantace intrastromálního korneálního kroužku nebo segmentů, dále jen ICRS. Incizní radiální keratotomie principiálně spočívá ve změně povrchového zakřivení v důsledku provedených rohovkových nářezů vedených vždy v ose nejstrmějšího meridiánu, čímž

je docíleno oploštění rohovky. ICRS o tloušťce 0,25–0,45 mm se implantují do dvou třetin hloubky periferie rohovky a způsobí tak její oploštění v požadované oblasti. Využití této metody je účelné při korekci myopie přítomné u keratokonu v rozsahu od -1,0 do -6,0 D, ovšem nežádoucím efektem zákroku je indukce nepravidelného astigmatismu.

Do skupiny laserových refrakčních zákroků patří metoda PRK (fotorefraktivní keratektomie), LASIK (laser in situ keratomileusis), LASEK (laser-assisted subepithelial keratectomy) a jejich modifikace. Principem je stejně jako u předchozích metod změna zakřivení v důsledku působení laserové stopy excimerového laseru (193 nm), který provádí fotoablaci tkáně v různé hloubce rohovky v závislosti na typu aplikované metody. Obecně se tyto metody využívají ke korekci myopie, kde je cílem rohovku oplošit, a proto je ablace prováděna v centrální části, dále hypermetropie, kdy je naopak cílem rohovku zestrmit skrze periferní ablaci ve tvaru prstence a také astigmatismu, kdy je ablace prováděna v konkrétním meridiánu.

Dalším typem operací, které výrazně ovlivňují následný refrakční stav rohovky, je její transplantace neboli keratoplastika. V důsledku této intervence dochází k nárůstu refrakční vady oka v oblasti sférické i astigmatické složky. [2, 27]

3. Refrakční vady oka

Obraz, který je vytvářen optickým systémem oka a který nemusí nutně dopadat na sítnici, se nazývá optický obraz, naopak obraz, který je utvářen ostře nebo rozostřeně na sítnici se nazývá sítnicový obraz. V případě, že obrazové ohnisko leží v místě nejostřejšího vidění je optický obraz totožný s obrazem sítnicovým. Takové oko je označováno jako emetropické, tedy oko bez dioptrické vady a jeho nositel se nazývá emetrop. V opačném případě, kdy obrazové ohnisko neleží na sítnici, je takové oko nazýváno ametropické, tedy oko s dioptrickou vadou a jeho nositel je označován jako ametrop. Dle studie [28] prováděné na 378 očích, které byly změřeny pomocí autorefraktometru Essilor AKR 700 byla zjištěna ametropie (myopie, hypermetropie, astigmatismus) u 96 % probandů, zatímco emetropie jen u zbylých 4 %. Oči s čistě sférickou refrakční vadou (myopie, hypermetropie) bylo 33 %, zatímco nesférická vada (astigmatismus) byla zjištěna u 67 % změřených. V [24] je uvedeno, že 95 % refrakčních vad leží v rozmezí $\pm 4,0$ D a etiologie těchto vad je odlišná oproti vadám, jejichž hodnoty jsou $\geq 4,0$ D. V této kapitole budou přehledně uvedeny jednotlivé ametropie, jejich specifikace a faktory, které mohou výslednou refrakci oka ovlivňovat. [29]

Axiální refrakce A_R představuje převrácenou hodnotu vzdálenosti a_R dalekého bodu R (nejvzdálenější bod na optické ose, který se zobrazí ostře na sítnici při minimální akomodaci) od předmětové hlavní roviny oka. Obecně axiální refrakce udává, kolik chybí ametropickému oku k tomu, aby se z něj stalo oko emetropické. Celkovou optickou mohutnost oka φ_o pak lze dle [30] vypočítat z rozdílu dioptrické A'_R a axiální refrakce A_R oka

$$\varphi_o = A'_R - A_R, \text{ tedy}$$

$$\varphi_o = \frac{n}{a'_R} - \frac{1}{a_R},$$

kde n značí index lomu celého oka a a'_R jeho délku. Optickou mohutnost oka φ_o lze též spočítat z Gullstrandovy rovnice [30] uvažující dvě opticky účinné plochy, a to čočku o optické mohutnosti $\varphi_{\check{c}}$ a rohovku o optické mohutnosti φ_R podle vztahu

$$\varphi_o = \varphi_R + \varphi_{\check{c}} - \frac{d}{n} \times \varphi_R \times \varphi_{\check{c}},$$

kde d značí vzdálenost mezi obrazovou hlavní rovinou rohovky X'_{HR} a předmětovou hlavní rovinou čočky $X_{HČ}$ a n index lomu komorového moku. Kombinací výše uvedených vztahů lze získat přímý vztah mezi φ_R a A_R .

Obdobně jako daleký bod R je definován také blízký bod P, přičemž se jedná o nejbližší bod na optické ose, který se při maximální akomodaci zobrazí ostře na sítnici a jeho vzdálenost od předmětové hlavní roviny oka se značí a_p . [2, 30]

3.1 Myopie

Jedná se o sférickou ametropii označující stav, při kterém paralelní paprsky procházející okem, které neakomoduje, nedopadají na sítnici ale před ní, a tedy obrazové ohnisko leží před foveou. Poloha dalekého i blízkého bodu je v konečné vzdálenosti před okem, a proto dotyčný vidí předměty před dalekým bodem rozostřeně, za dalekým a zároveň před blízkým bodem ostře. Hodnota axiální refrakce je záporná ($A_R < 0$), jelikož je zapotřebí redukovat nadměrnou optickou mohutnost daného systému a koriguje se nejslabší rozptylnou čočkou, která posune ohnisko na sítnici a zajistí ostré vidění. Za příčinu myopie lze předpokládat kombinaci běžné ADO a kratší ohniskové vzdálenosti oka, nebo naopak kombinaci delší ADO a běžné ohniskové vzdálenosti oka ve srovnání s okem emetropickým. [2, 29, 30, 31] V návaznosti na uvedených výsledcích ze studie [28] v úvodu této kapitoly byla přítomnost samostatné myopie bez astigmatické složky zjištěna přibližně u 20 % (74) očí. Myopii lze dle [24] klasifikovat podle vlivu konkrétního metrického parametru a hodnoty axiální refrakce.

3.1.1 Myopie dle vlivu konkrétního metrického parametru oka

Členit myopii z hlediska konkrétního metrického parametru je možné do následujících podskupin, a to na axiální, refrakční, indexovou a křivostní. Výsledná hodnota myopie může být ovlivněna také hloubkou přední komory, přičemž čím menší HPK, tím větší lomivost oka se předpokládá. Popis uvedených typů myopie vzhledem k emetropickému oku je následující:

- *Axiální* – oko je celkově delší a příčinou může být změna v délce konkrétní struktury oka např. v tloušťce rohovky, hloubce přední komory, sklivcového prostoru nebo napříč celým okem.
- *Refrakční* – optická mohutnost oka je vzhledem k emetropickému oku větší.
- *Indexová* – index lomu je u jednoho nebo více optických prostředí oka větší.

- *Křivostní* – poloměr zakřivení je u jednoho nebo více refrakčních povrchů oka menší, a tedy výsledná lomivost daného povrchu je větší.

Za častější příčinu myopie se předpokládá anomálie zasahující napříč všemi optickými prostředími oka, než anomální rozměr jedné konkrétní optické struktury oka. [24, 31]

3.1.2 Myopie dle hodnoty axiální refrakce

Myopii lze podle velikosti axiální refrakce A_R dle [2] rozdělit na lehkou, střední, těžkou a progresivní, viz tabulka 10. Hodnoty refrakce se u prvních tří stupňů po ukončení vývoje obvykle již nemění, zatímco u progresivního stupně je její další vývoj obtížně předvídatelný.

Tab. 10: Stupně myopie [2]

Stupeň myopie	Rozmezí refrakce
lehká	-0,25 až -3,0 D
střední	-3,25 až -6,0 D
vysoká	-6,25 až -10,0 D
progresivní	> -10,25 D

Dále je možné myopii členit dle stupně progresu a věku, ve kterém se myopie začne vyskytovat, takto podrobné členění je nad rámec této diplomové práce, stejně tak jako pojem noční myopie a pseudomyopie, a proto zde nebudou více objasněny. Pro doplnění informací viz [24].

Na téma souvislosti jednotlivých optických parametrů lidského oka a hodnotou myopie již v minulosti proběhlo několik studií [24], ze kterých vyplývá reálná souvislost mezi velikostí myopie v závislosti na poloměru zakřivení rohovky a ADO. Dalším zjištěním je významná závislost mezi kombinací ADO a poloměrem zakřivení rohovky v závislosti na refrakci, která je významnější než při posuzování vlivu samotné ADO nebo poloměru zakřivení. Některé z uvedených souvislostí budou předmětem zkoumání v praktické části této diplomové práce. [24, 29]

3.2 Hypermetropie

Jedná se o sférickou ametropii označující stav, při kterém paralelní paprsky procházející okem, které neakomoduje, nedopadají na sítnici, nýbrž za ní, a tedy obrazové ohnisko leží za foveou. Poloha dalekého bodu (imaginární bod) je v konečné vzdálenosti za okem. Hodnota axiální refrakce je kladná ($A_R < 0$), a je tedy zapotřebí

zvýšit nedostatečnou optickou mohutnost daného systému předřazením nejsilnější spojné čočky, se kterou dotyčný ještě vidí ostře. V případě, že vidění není rozostřené, je tato vada trvale kompenzována v rámci amplitudy akomodace. Příčinou může být ve srovnání s okem emetropickým kombinace běžné ADO a delší ohniskové vzdálenosti, nebo naopak kombinace kratší ADO a běžné ohniskové vzdálenosti oka. U hodnot větších než +4,0 D se obvykle jedná o vadu vzniklou v souvislosti s kratší ADO. V návaznosti na uvedených výsledcích ze studie [28] v úvodu této kapitoly byla přítomnost samostatné hypermetropie bez astigmatické složky zjištěna u 13 %, tedy 46 očí z celkového počtu 378. [2, 24, 29, 30, 31]

Hypermetropii lze stejně jako myopii dle [24] klasifikovat podle vlivu konkrétního metrického parametru, hodnoty axiální refrakce a stupně zapojené akomodace.

3.2.1 Hypermetropie dle vlivu konkrétního metrického parametru oka

V závislosti na velikosti konkrétního metrického parametru lze hypermetropii členit na axiální, refrakční, indexovou a křivostní. Výsledná hodnota hypermetropie může být ovlivněna také hloubkou přední komory, přičemž nárůst v HPK způsobí pokles v lomivosti oka. Popis uvedených typů hypermetropie je vzhledem k emetropickému oku následující:

- *Axiální* – ADO je vzhledem k optické mohutnosti oka příliš krátká.
- *Refrakční* – optická mohutnost oka je vzhledem k emetropickému oku menší.
- *Indexová* – index lomu je u jednoho nebo více optických prostředí oka menší.
- *Křivostní* – poloměr zakřivení je u jednoho nebo více refrakčních povrchů oka větší, a tedy výsledná lomivost daného povrchu je menší. [24, 31]

3.2.2 Hypermetropie dle hodnoty axiální refrakce

Podle velikosti axiální refrakce A_R je možné hypermetropii dle [24] rozdělit na nízkou, střední a vysokou, viz tabulka 11.

Tabulka 11: Stupně hypermetropie [24]

Stupeň hypermetropie	Rozmezí refrakce
nízká	0,0 až +3,0 D
střední	+3,25 až +5,0 D
vysoká	> +5,0 D

3.2.3 Hypermetropie dle stupně zapojené akomodace

Hypermetropii lze členit podle zapojení jednotlivých složek akomodace, konkrétně složky totální, latentní, manifestní, fakultativní a absolutní. Při hypermetropii je obvykle patrna krátká ADO, která je příčinou menší optické mohutnosti celého oka ovšem pro dosažení emetropického stavu, je tento fakt do jisté míry kompenzován zvýšeným akomodačním úsilím zrakového aparátu.

- *Totální* – jedná se o celkovou velikost vady, jejíž výsledná hodnota je dána součtem složky latentní a manifestní.
- *Latentní* – jedná se o složku hypermetropie, jejíž velikost lze zjistit pouze při úplném uvolnění akomodace v důsledku aplikace cykloplegik, tato složka je tedy zcela kompenzována zvýšeným úsilím ciliárního svalu.
- *Manifestní* – hodnota manifestní hypermetropie je rovna nejsilnější spojné čočce, se kterou dotýčný ještě vidí ostře.
- *Fakultativní* – hodnotu fakultativní hypermetropie lze vyšetřit standardním postupem stanovení subjektivně plné sférické korekce, přičemž nepůsobí rozostřené vidění. Tuto složku je oko schopno vykorigovat zvýšeným akomodačním úsilím, které se ovšem může projevovat astenopickými obtížemi.
- *Absolutní* – jedná se o složku hypermetropie, kterou oko není schopno korigovat v rámci amplitudy akomodace, působí rozostření obrazu, a tedy musí být korigována předřazením sférické spojné čočky. Například u hypermetropa [24] s totální hodnotou refrakční vady rovnou +8,0 D a amplitudou akomodace +5,0 D je hodnota potřebné korekce rovna +3,0 D. Vyplývá tak z rozdílu uvedených hodnot. [24]

3.3 Astigmatismus

Astigmatismus patří do skupiny refrakčních vad, které se projevují rozmazaným viděním, jelikož optický systém oka není schopen vytvořit ostrý obraz pozorovaného bodu v nekonečno. Příčinou je odlišná optická mohutnost v důsledku rozdílného poloměru zakřivení jednotlivých meridiánů. Výslednou hodnotu celkového astigmatismu Ast_C oka lze vyšetřit pomocí Jacksonových zkřížených cylindrů, případně je možné provést odhad pomocí zjednodušené Javalovy podmínky [32]

$$Ast_C = 1,25 \times Ast_R + 0,5,$$

přičemž se jedná o součet hodnoty pravidelného astigmatismu přední plochy rohovky Ast_R , jehož velikost je dána rozdílem optické mohutnosti (astigmatická diference) řezu ležícího více horizontálně $\varphi_{0,H}$ a řezu ležícího více vertikálně $\varphi_{0,V}$, tedy $Ast_R = \varphi_{0,H} - \varphi_{0,V}$ a astigmatismu „vnitřního“, který je indukovaný čočkou a zadní plochou rohovky. Hodnota vnitřního astigmatismu je obtížně zjistitelná a dle [29] u většiny populace nabývá hodnot od 0 D do +1,5 D, nejčastěji pak +0,5 D. Dle znaménka „+“ lze usuzovat, že se jedná o astigmatismus proti pravidlu, viz níže.

Primárně lze astigmatismus dělit na pravidelný a nepravidelný. Pravidelný astigmatismus je charakteristický stabilní velikostí úhlu mezi hlavními meridiány rohovky, jehož hodnota činí 90° , přičemž optická mohutnost se mezi těmito meridiány mění monotónně. Pravidelný astigmatismus způsobí, že zobrazovaný bod se nezobrazí jako bod, nýbrž jako dvě navzájem kolmé úsečky (fokály), jejichž vzdálenost je určena polohou ohnisek hlavních meridiánů. Korekce pravidelného astigmatismu (vyrušení kroužku nejmenšího rozptylu, který leží uprostřed fokál a dosažení ostrého sítnicového obrazu) lze dosáhnout pomocí cylindrické čočky a v případě kombinace astigmatismu s jinou sférickou ametropií kombinací čočky cylindrické s čočkou sférickou. Pro účely této práce korekci vždy uvažujeme pomocí záporné korekční čočky v ose s maximální hodnotou optické mohutnosti. Nepravidelný astigmatismus je obtížně korigovatelný běžnou brýlovou korekcí a obvykle se jedná o příznak patologického stavu rohovky (akutní keratokonus, jizvení nebo prodělaná operace). Pravidelný astigmatismus lze dále klasifikovat podle polohy hlavních meridiánů a vztahu ke sférické refrakci oka. [2, 24, 29]

3.3.1 Astigmatismus dle polohy hlavních meridiánů

V závislosti na poloze meridiánu ležícího více horizontálně a více vertikálně dělíme dle [24] pravidelný astigmatismus do tří kategorií, a to na astigmatismus podle pravidla, proti pravidlu a šikmých os:

- *Podle pravidla* – meridián s nejmenším poloměrem zakřivení (největší optickou mohutností) leží ve vertikálním směru v rozsahu od 70° do 110° .
- *Proti pravidlu* – meridián s nejmenším poloměrem zakřivení (největší optickou mohutností) leží v horizontálním směru v rozsahu od 160° do 20° .
- *Šikmých os* – meridián s největší lomivostí leží buď v rozmezí os od 20° do 70° nebo v rozmezí od 110° do 160° .

Zda se jedná o astigmatismus podle nebo proti pravidlu lze zjistit z hodnoty astigmatické difference, přičemž znaménko „-“ signalizuje přítomnost astigmatismu podle pravidla a znaménko „+“ naopak astigmatismus proti pravidlu. Průměrný rozdíl mezi optickou mohutností hlavních meridiánů rohovky je dle [16] u většiny populace v rozmezí od -0,5 do -1,0 D a jedná se o astigmatismus podle pravidla, z toho vyplývá, že téměř každá rohovka disponuje jistou hodnotou astigmatismu a záleží jen na hodnotě astigmatismu proti pravidlu, viz výše, jaká bude výsledná hodnota astigmatismu a jeho vliv na vidění. [16, 24]

3.3.2 Astigmatismus dle vztahu ke sférické refrakci oka

S ohledem na pozici optického obrazu dělíme astigmatismus na jednoduchý (simplex), kdy jedna fokála leží na sítnici a druhá fokála buď před sítnicí (jednoduchý myopický) nebo za sítnicí (jednoduchý hypermetropický), dále na složený (compositus), kdy ani jedna fokála neleží na sítnici, ale obě leží před nebo za ní, potom se jedná o astigmatismus složený myopický nebo složený hypermetropický a poslední variantou je astigmatismus smíšený (mixtus), kdy jedna fokála leží před a druhá za sítnicí. V [29] je uvedeno, že v případě astigmatismu hypermetropického jednoduchého nebo složeného bývá hodnota astigmatismu částečně vykompenzována zvýšeným akomodačním úsilím. V případě složeného je vidění relativně ostré, jelikož kroužek nejmenšího rozptylu leží v blízkosti sítnice, ovšem v případě myopického jednoduchého nebo složeného se vidění jeví jako nejvíce rozostřené, jelikož fokály leží před sítnicí a akomodace zde nehraje roli. [2, 24, 29]

V návaznosti na uvedených výsledcích ze studie [28] v úvodu této kapitoly byla zjišťována četnost očí, u kterých se vyskytl astigmatismus jednoduchý, složený a smíšený. Jednoduchý myopický byl zjištěn u 8 %, složený myopický u 52 %, jednoduchý hypermetropický u 10 %, složený hypermetropický pak u 19 % a smíšený u 11 % z 242 očí s astigmatismem.

3.4 Faktory ovlivňující refrakci oka

Refrakce oka může být ovlivněna zevními vlivy například užíváním léčiv, systémovými nebo očními chorobami, proděláním traumatu či chirurgického zákroku na oku. V důsledku přítomnosti těchto faktorů dochází ke změnám refrakce ve smyslu nárůstu myopie, hypermetropie, změnám hodnoty astigmatismu nebo poruchám akomodace. Děje se tak vlivem patologických změn lomivosti a polohy čočky, změny

tloušťky a zakřivení rohovky, hloubky přední komory nebo vzácně předozadní délky oka. Vlivu léčiv na refrakci, oční chorobě kataraktě (šedý zákal) a systémové chorobě diabetes mellitus bude věnována zvýšená pozornost.

3.4.1 Faktory s myopizujícím vlivem

Patologický výskyt myopie může doprovázet prakticky jakýkoli oční zánět, zejména v oblasti uvey (řasnaté tělísko, cévnatka a duhovka), rohovky nebo orbity. Může se jednat také o důsledek poškození bělimy při tuberkulóze nebo malárii. Také při hydroftalmu (zvětšení bulbu) u infantilního glaukomu dochází k nárůstu ADO a oko se stává více myopickým. [27]

3.4.2 Faktory s hypermetropizujícím vlivem

Jistě nejvýznamnější příčinou vzniku patologické hypermetropie je stav, kdy v oku není přítomna čočka (afakie), například při luxaci čočky mimo optickou osu oka při traumatu nebo dávných typech operací šedého zákalu. Další příčinou může být traumatická změna polohy čočky směrem do nitra oka. Také edém v oblasti žluté skvrny posune sítnici směrem dopředu, a tím zkrátí optickou délku oka stejně tak jako v případě odchlípení sítnice nebo při stavech, kdy je na bulbus ze zadní strany nitrolebního prostoru (např. z důvodu přítomného orbitálního tumoru) vynakládán nepřiměřený tlak. [27]

3.4.3 Faktory indukující astigmatismus

Astigmatismus společně se změnou sférické refrakce bývá obvykle indukován při stranové dislokaci čočky následkem očního traumatu. Změna lomivosti rohovky v jednotlivých řezech je způsobena zhojením rohovky a následným tahem jizvy po zánětu, perforačním poraněním, keratoplastice či operaci katarakty, viz níže. Deformace rohovky může být způsobena tlakem víčkového tumoru na bulbus nebo přítomností keratokonu viz kapitola 2.5.1. [27]

3.4.4 Léčiva a refrakce

Přechodné změny refrakce mohou být ovlivněny užíváním určitého typu léčiv, jehož účinek narušuje nepřímo biochemii rohovky a čočky nebo přímo funkci řasnatého tělíska, dále jen ŘT. Příčinou mohou být osmotické změny vedoucí ke změně lomivosti tkáně, neuronální mechanismy ovlivňující parasympatickou inervaci, jejíž poruchy vedou k obrně nebo spasmu akomodace a vzniku otoků ŘT, rohovky a makuly.

Otok rohovky se vyskytne tehdy, jestliže léčiva ovlivňují osmolaritu a obsah vody v rohovce překročí hranici 78 %, přičemž při jeho nárůstu o více než 5 % jsou již patrné změny refrakce ve smyslu myopizace, v důsledku změny tloušťky a lomivosti rohovky.

Otok ŘT je nejčastější příčinou přechodného nárůstu myopie. Děje se tak v důsledku přílišného prokrvení a ukládání tekutin do jeho útroby, signalizující komplikaci při zánětech uvey nebo užívání určitých typů léčiv. Otok ŘT obvykle doprovází zmenšení HPK vlivem posunu čočky i duhovky směrem dopředu. Změna v délce HPK o vzdálenost Δd snižuje dle Gullstrandovy rovnice [33] lomivost oka $\Delta\varphi_o$ podle vzorce

$$\Delta\varphi_o = -\frac{1}{n} \times \varphi_R \times \varphi_C \times \Delta d.$$

Při předpokladu lomivosti rohovky $\varphi_R = 43,5$ D a čočky $\varphi_C = 20$ D, indexu lomu $n = 1,3$ a poklesu HPK o jeden milimetr (-0,001 m) dochází k nárůstu lomivosti oka o 0,65 D.

Mezi léčiva vyvolávající vznik makulárního edému, který vede k hypermetropizaci, viz výše, patří perorální antidiabetika zejména Pioglitazone (až 10 % uživatelů) nebo z očních léčiv prostaglandiny zejména Xalatan (až 5 % případů) nebo atropiny zejména Epinefrin. Vliv vybraných léčiv s nepřímým účinkem na rohovku a čočku, princip působení a jejich vyvolávací efekt je uveden v tabulce 12. Vliv vybraných léčiv s účinkem na řasnaté tělísko je uveden v tabulce 13. [7, 33]

Tab. 12: Vliv vybraných léčiv s nepřímým účinkem na rohovku a čočku [7, 33]

Typ léčiva	Princip	Důsledek
hormonální antikoncepce	↑ Na	myopizace až o 1,0 D
kortikoidy (kortizon)	↑ Na, ↓ K, ↑ glykemie	myopizace
antidiabetika	hypoglykémie	hypermetropizace
antipsychotika	hyperglykémie	myopizace
betablokátory	hypoglykémie	hypermetropizace
hyperbarická terapie O_2	neznámý	myopizace až o 1,6 D
diuretika (thiazid)	↓ Na, ↓ K, ↑ glykemie	myopizace

Tab. 13: Vliv vybraných léčiv s účinkem na řasnaté tělísko [33]

Efekt	Typ léčiva	Konkrétní lék	Důsledek
edém	sulfonamidy	-	myopizace
	diuretika	thiazid	myopizace až o 4,5 D
spasmus	miotika	pilocarpin, carbachol	myopizace až o 5,0 D
útlum účinku parasymptiku	cykloplegika	atropin, tropicamid	vyřazení akomodace
	antidepresiva	imipramine, amitriptyline, ...	poruchy akomodace, syndrom suchého oka, mydriáza
	neuroleptika	haloperidol, ...	vyřazení akomodace
	benzodiazepiny	diazepam, lorazepam ...	poruchy akomodace
	antihistaminika 1. generace	clemastin, dimetinden, fenistil, pheniramin, ...	poruchy akomodace, syndrom suchého oka
	botulotoxiny	-	porucha akomodace, diplopie
	chloroquin	-	omezená akomodace

3.4.5 Katarakta

Kataraktou je nazýváno jakékoli zkalení čočky, které vede ke změnám v průhlednosti a rozptylu procházejícího světla. Primárně katarakta (šedý zákal) vzniká paralelně se stárnutím organismu zejména vlivem ztráty elasticity a přeměny krystalinů na vysokomolekulární proteiny a rozlišujeme čtyři typy „senilní katarakty“, a to nukleární, kortikální, zadní a přední subkapsulární. Sekundárně pak vzniká v důsledku užívání kortikosteroidů nebo poranění ať už tupého, perforujícího nebo chemického. Subjektivně se projevuje snížením kontrastní citlivosti, výjimečně monokulární diplopií z důvodu rozdílného indexu lomu jednotlivých struktur čočky a myopizací oka. Poslední jmenovaný projev je typický zejména u nukleárního typu a často vede k nepříjemné anizometrii, tedy rozdílnému refrakčnímu stavu obou očí. [2]

Při operaci katarakty jsou vlastní zkalené jádro a kortex nahrazeny intraokulárním čočkovým implantátem. V důsledku změny zakřivení rohovky v oblasti hlavní vstupní incize o šířce 1,5–2,7 mm provedené kalibrovaným nožem a dvou pomocných řezů (paracentéz) může dojít ke změně rohovkového, a tedy celkového astigmatismu. Při změně zakřivení o desetinu milimetru je třeba počítat s nárůstem astigmatismu přibližně o 0,5 D. Studie zabývající se indukovaným rohovkovým astigmatismem po operaci katarakty pomocí kalibrovaného nože a za asistence femtosekundového laseru prokázala nižší nárůst indukovaného astigmatismu rohovky u druhé jmenované metody. [34]

3.4.6 Diabetes mellitus

Diabetes mellitus je choroba nesoucí název pro stav, kdy je z důvodu poruchy metabolismu sacharidů trvale zvýšená hladina krevního cukru v krvi (norma 3,5–5,5 mmol/l). Rozlišujeme tři typy diabetu, a to diabetes gestační (provázející těhotenství), prvního (absolutní nedostatek inzulínu) a druhého (relativní nedostatek inzulínu) stupně. Mezi komplikace a zároveň faktory ovlivňující refrakci oka patří hypoglykemické a hyperglykemické stavy. Při hypoglykémii (hladina krevního cukru < 3,3 mmol/l) může dojít ke změně refrakce až o 5,0 D směrem k hypermetropii. Při hyperglykémii (hladina krevního cukru > 7 mmol/l) dochází ke změně indexu lomu čočky z důvodu její zvýšené hydratace a oko se stává více myopické s možnou změnou až o 9,0 D. Uvedené hodnoty jsou však extrémní. Častěji dochází jen ke krátkodobému kolísání refrakce v závislosti na aktuální hladině glykemie např. po požití stravy nebo léčiv antidiabetik. Dle [27] lze přechodné změny refrakce pozorovat přibližně u 6 % diabetiků a změny postihující akomodaci u 20 % diabetiků. [27, 35]

4. Optické modely lidského oka

Pro potřeby teoretických výpočtů zobrazení optickou soustavou oka se předpokládá znalost metrických parametrů oka, zejména poloměru zakřivení rohovky a čočky, hloubky přední komory, tloušťky čočky a ADO. Pro zobecnění jsou zavedeny teoretické optické modely oka, jejichž parametry vychází z průměrných hodnot zjištěných u reálných očí, a tedy vzhledem ke konkrétnímu lidskému oku mohou vykazovat jisté odlišnosti. Mezi nejužívanější modely lidského oka, které se od sebe odlišují zejména počtem předpokládaných optických ploch, patří Gullstrandovo schematické oko, Emsleyova-Graffova modifikace zjednodušeného Gullstrandova schematického oka, dále jen zjednodušené schematické oko a standardní redukované oko. Tyto modely budou následně popsány a jejich hlavní metrické parametry uvedeny v tabulce 14. Obecně pro všechny modely platí: každá plocha je kulová a centrovaná, poloměry zakřivení jsou stanoveny od vrcholu konkrétní lomivé plochy, přičemž kladné znaménko značí zápis ve směru šíření a záporné proti směru šíření paprsků a délkové parametry jsou kótovány od hlavních bodů nebo od vrcholu vztažené optické plochy. [2, 4]

4.1 Gullstrandovo schematické oko

Tento schematický model je pojmenován po švédském oftalmologovi Allvaru Gullstrandovi, který v roce 1911 získal Nobelovu cenu za fyziologii. U toho modelu je předpokládáno šest lomivých ploch, a to přední a zadní plocha rohovky, jádra a kortexu čočky, ADO je 24,00 mm, tloušťka rohovky 500 μm , vzdálenost mezi zadní plochou rohovky a přední plochou čočky 3,1 mm, vzdálenost mezi přední plochou a jádrem čočky 0,546 mm, tloušťka jádra 2,419 mm, vzdálenost zadní plochy jádra a zadní plochy čočky 0,635 mm a celková tloušťka čočky 3,6 mm. Dalším předpokladem je předmětové prostředí o indexu lomu 1, tedy vzduch a shodný index lomu komorové vody a sklivce. Celková lomivost oka závisí na tom, zda oko maximálně akomoduje (+70,57 D) nebo neakomoduje (+58,64 D). Na akomodaci závisí také hodnota předmětové a obrazové ohniskové vzdálenosti, přičemž při uvolněné akomodaci je předmětová a obrazová ohnisková vzdálenost -17,055 mm a +22,785 mm, při maximální akomodaci -14,169 mm a +18,030 mm. Obrazové ohnisko neleží na sítnici, ale ve vzdálenosti 24,387, tudíž předmět v nekonečnu je zobrazen rozostřeně. Parametry tohoto modelu jsou využívány k přesným teoretickým výpočtům. [2, 31]

4.2 Zjednodušené schematické oko

Model zjednodušeného schematického oka předpokládá ADO 23,90 mm a tři lomivé plochy. Dvě lomivé plochy rohovky jsou tedy nahrazeny jednou plochou a čtyři lomivé plochy čočky dvěma plochami a celá optická soustava se nachází v neakomodovaném stavu. Optická mohutnost zjednodušeného oka je +60,48 D s předmětovou (-16,54 mm) a obrazovou (+22,05 mm) ohniskovou vzdáleností od oka. Na rozdíl od Gullstrandova schematického oka obrazové ohnisko leží na sítnici ve vzdálenosti totožné s ADO, a tedy předmět je tímto systémem zobrazován ostře. Parametry tohoto modelu jsou využívány k praktickým výpočtům. [2, 31]

4.3 Standardní redukované oko

Tento model uvažuje ADO rovnu 22,22 mm a jednu lámavou plochu, která má poloměr zakřivení +5,55 mm a index lomu $1,\bar{3}$. Celková optická mohutnost modelu je +60,0 D s předmětovou (-16,67 mm) a obrazovou (+22,22 mm) ohniskovou vzdáleností. Obrazové ohnisko standardního redukovaného oka leží na sítnici, a proto je takové oko považováno za emetropické. Parametry tohoto modelu jsou obvykle využívány pouze k orientačním výpočtům. [2, 31]

Klasifikace myopie ve vztahu ke standardnímu redukovanému oku [31]:

- *Axiální* – ADO > 22,22 mm; $\varphi_o = +60$ D a $n = 1,\bar{3}$.
- *Křivostní* – $R < 5,56$ mm; $\varphi_o > +60,0$ D; ADO = 22,22 mm a $n = 1,\bar{3}$.
- *Indexová* – $n > 1,\bar{3}$; $\varphi_o > +60,0$ D; ADO = 22,22 mm a $R = 5,56$ mm.

Klasifikace hypermetropie ve vztahu ke standardnímu redukovanému oku dle [31]:

- *Axiální* – ADO < 22,22 mm; $\varphi_o = +60$ D a $n = 1,\bar{3}$.
- *Křivostní* – $R > 5,56$ mm; $\varphi_o < +60,0$ D; ADO = 22,22 mm a $n = 1,\bar{3}$.
- *Indexová* – $n < 1,\bar{3}$; $\varphi_o < +60,0$ D; ADO = 22,22 mm a $R = 5,56$ mm.

Tab. 14: Hlavní parametry modelů lidského oka pro oko, které neakomoduje [5, 29]

Parametr	Médium	Gullstrandovo schematické oko	Zjednodušené schematické oko
poloměr zakřivení (mm)	přední plocha rohovky	7,70	7,80
	zadní plocha rohovky	6,80	-
	přední plocha čočky	10,00	10,00
	Přední plocha jádra	7,911	-
	Zadní plocha jádra	-5,76	-
	zadní plocha čočky	-6,00	-6,00
vzdálenost od přední plochy rohovky (mm)	zadní plocha rohovky	0,50	-
	přední plocha čočky	3,60	3,60
	zadní plocha čočky	7,20	7,20
index lomu	rohovka	1,376	-
	komorový mok	1,336	1,333
	čočka – periferie	1,386	1,416
	čočka - jádro	1,406	-
	sklivec	1,336	1,333

5. Princip optického pachymetru a autorefrakto-keratometru

Optický pachymetr Pachycam (Oculus) patří do skupiny bezkontaktních oftalmologických přístrojů, které slouží k vyšetření centrální zóny rohovky, konkrétně ke snímání tloušťky a měření keratometrie. Pro účely této diplomové práce budou z měření na tomto přístroji využity pouze hodnoty tloušťky rohovky. Dalším využívaným přístrojem je autorefrakto-kerato-tonometr Nidek Tonoref II (Oculus). Tento přístroj je konstrukčně koncipován zejména k měření objektivní refrakce (refraktometr) a keratometrie (keratometr), přičemž snímá poloměr zakřivení rohovky, směr nejstrmějšího a nejploššího meridiánu a velikost příslušného astigmatismu. Další funkcí je měření bezkontaktní tonometrie, která vzhledem k náplni práce nebude blíže objasňována. Přídavnou funkcí tohoto přístroje je měření průměru rohovky a zornice. [36, 37]

5.1 Optický pachymetr Pachycam

Součástí optického pachymetru Pachycam jsou dvě CCD (Charge-Coupled Device) kamery. První kamera snímá frontální obraz předního segmentu oka, který slouží k navigaci vyšetřujícího ve snaze nalézt správnou polohu přístroje vzhledem k oku vyšetřovaného a následného zahájení snímání. Druhá CCD kamera reaguje na osvit horizontální plochy pozorované rohovky skrze úzké štěrbinové světlo, která je pomocí této kamery následně snímána a data jsou přetransformována v Scheimpflugův obrázek. Pachycam, který je uveden na obrázku 5 a 6 snímá hodnoty z 600 měřených bodů na pracovní vzdálenost 40 mm v rozsahu měření 200–1200 μm . Tímto způsobem je získán obraz výřezu rohovky, který je následně přes USB port převeden do počítače, kde programový software provede vyhodnocení s následným stanovením konkrétních naměřených hodnot.

Na principu Scheimpflugových obrázků pracuje také dnes mnohem sofistikovanější přístroj Pentacam (Oculus), který umožňuje na rozdíl od Pachycamu zhodnocení celého předního segmentu od přední plochy rohovky po zadní plochu čočky skrze užití rotační Scheimpflugovy kamery. [4, 36]



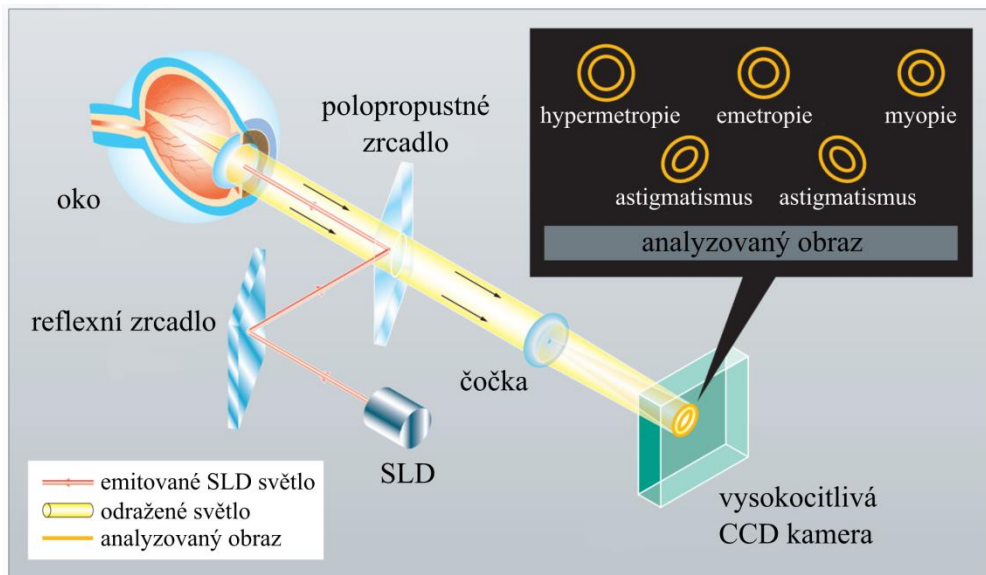
Obr. 5 a 6: Pachycam (Oculus)

5.2 Autorefrakto-kerato-tonometr Nidek Tonoref II

Automatický refrakto-keratometr slouží k měření objektivní refrakce, konkrétně k měření sférické a cylindrické optické mohutnosti oka a měření tvaru rohovky, tedy poloměru zakřivení a hodnoty rohovkového astigmatismu, přičemž naměřená data jsou přehledně zobrazena na integrovaném LCD displeji. Pro dosažení co nejpřesnějšího výsledku měření je součástí snímání pupilární zóny rohovky o velikosti v rozsahu 2–4 mm v závislosti na aktuální velikosti zornice (pupilly) vyšetřovaného. Snímek přístroje Nidek Tonoref II je uveden na obrázku 8.

Při měření objektivní refrakce jsou stejně jako u přístroje Nidek ARK-1, viz obrázek 7, pomocí optického projekčního systému promítnuty šetrně působící měřící paprsky na oční pozadí pacienta, které vytváří obraz v podobě kruhového obrazce. Odražený obraz je snímán a následně proběhne analýza jeho tvaru a velikosti, na základě které je stanovena hodnota sférické a cylindrické refrakce včetně příslušné osy korekčního cylindru. Součástí je superluminiscenční dioda (SLD), která poskytuje ostřejší a jasnější obraz ve srovnání s konvenční LED diodou a vysoce citlivý CCD detektor, který detekuje odražený obraz i v případě slabé reflexe.

Při měření poloměru zakřivení rohovky je detekována oblast, kterou tvoří průmět čtyř světelných paprsků odrážejících se od povrchu rohovky, jejichž kmitočet je v blízkosti infračerveného světla. Z detekovaných signálů je následně vypočtena hodnota příslušného poloměru zakřivení. [37, 38]



Obr. 7: Schéma autorefrakto-keratometru Nidek ARK-1. [38]



Obr. 8: Nidek Tonoref II

6. Praktická část

Primárním cílem této studie bude zjistit, zda existuje vzájemná souvislost mezi metrickými parametry rohovky, konkrétně apikální tloušťkou rohovky \overline{ATR} , poloměrem zakřivení \overline{R} a horizontálním průměrem rohovky HPR a celkovou refrakcí oka, která je reprezentována sférickým ekvivalentem SE subjektivně stanovené korekce. Dále budou testovány vzájemné vztahy mezi jednotlivými parametry rohovky a souvislost mezi celkovým Ast_C a rohovkovým Ast_R astigmatismem s následným ověřením Javalovy podmínky.

6.1 Metodika

6.1.1 Statistický soubor

Měření pro účely této diplomové práce probíhalo v prostorách Očního centra Šternberk s. r. o. Vyšetřovaný vzorek probandů byl vybírán z předem objednaných pacientů k pravidelné kontrole, kteří splňovali podmiňující požadavky, a to: vyšetřovaný proband v minulosti nepodstoupil jakoukoli oční operaci, zejména pak refrakční zákrok na rohovce nebo extrakci katarakty, v jeho oční anamnéze nenalezneme jakékoli traumatické poranění oka nebo jizevnaté změny rohovky, v době měření proband netrpěl akutní nebo chronickou keratitidou, případně konjunktivitidou, na vyšetřovaném oku u něj není diagnostikována katarakta, glaukom, ektázie rohovky, edém v oblasti žluté skvrny nebo endotelová dystrofie, není nositelem kontaktních čoček a pravidelně si neaplikuje jakékoli kapky, typu umělých slz, antiglaukomatik či antibiotik a neužívá jiné farmakologické preparáty, ze systematických chorob u něj není diagnostikován diabetes mellitus 1. nebo 2. stupně. Souhlas se zapojením do výzkumné studie každý vyjádřil podpisem informovaného souhlasu.

Celkově bylo do studie zahrnuto 77 probandů, z toho 48 (61,3 %) žen a 29 (38,7 %) mužů. Průměrný věk všech probandů byl (42 ± 13) let v rozmezí 21–67 let a dle hodnoty sférického ekvivalentu (SE) bylo změřeno 44 (57,1 %) myopů a 33 (42,9 %) hypermetropů, viz tabulky 15, 16 a 17.

6.1.2 Získávání dat

Jak již bylo uvedeno, praktická měření probíhala ve vyšetřovně optometristy, která je součástí očního centra, a to v období od srpna 2015 do března 2016. Nejprve byl každý

proband seznámen s průběhem měření a následně proběhlo vlastní měření, které bylo rozděleno do tří fází v závislosti na způsobu získávání dat.

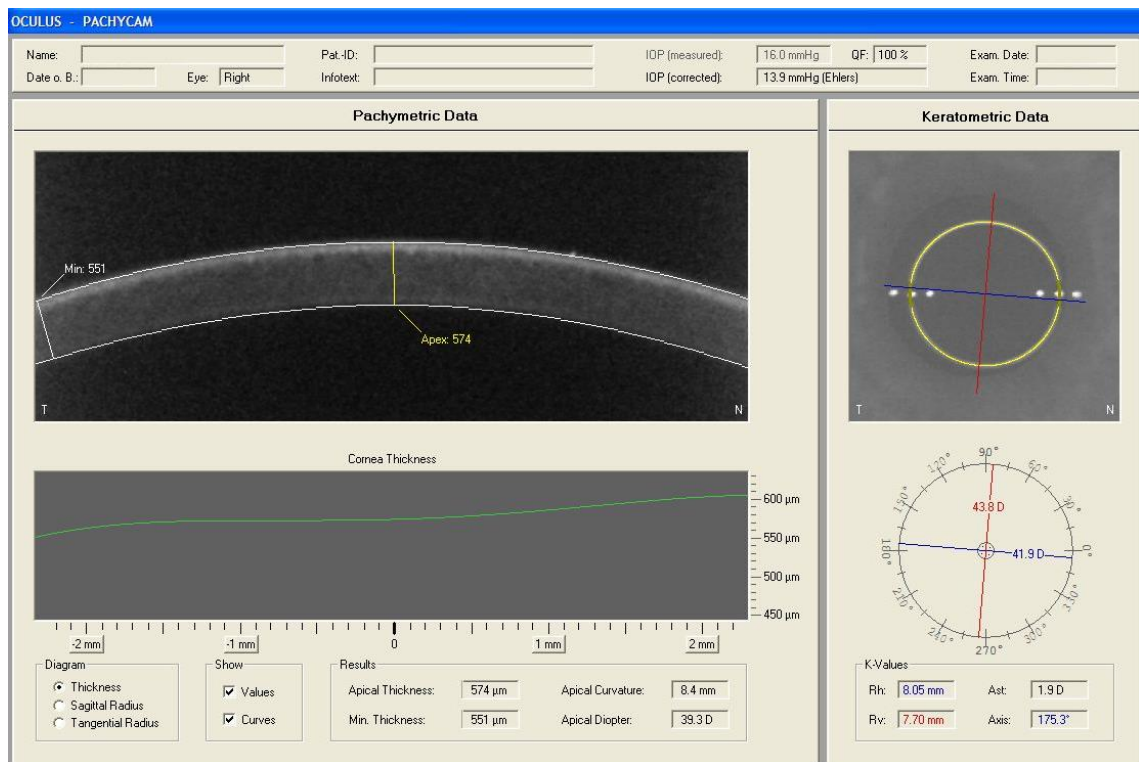
Fáze I: Měření na Nidek Tonoref II

V první fázi byla probandovi změřena objektivní refrakce, keratometrie a průměr rohovky pomocí autorefrakto-kerato-tonometru Nidek Tonoref II. Vyšetřovaný byl pohodlně usazen za tento přístroj, následně byla provedena orientační výšková úprava opěrky brady a vyzván k umístění brady a opření čela na příslušná místa. Následovalo poučení, aby se binokulárně díval před sebe na fixační obrázek (balon), přičemž není žádoucí, aby na něj zaostřoval. V případě správné výškové a polohové centrace probanda vzhledem k přístroji bylo automaticky spuštěno snímání oka a zahájeno měření objektivní refrakce a následně keratometrie rohovky. V rámci měření refrakce přístroj měří sférickou a cylindrickou složku včetně osy, přičemž je vždy uvažován zápis ve tvaru se záporným korekčním cylindrem, $C < 0$. Součástí keratometrického měření je snímání poloměru zakřivení rohovky v nejplošším $R_{0,max}$ a nejstrmějším $R_{0,min}$ meridiánu s následným výpočtem jejich průměrné hodnoty $\bar{R} = \frac{(R_{0,max} + R_{0,min})}{2}$ s přesností na dvě desetinná místa. Dle přepočtového vzorce mezi poloměrem zakřivení a hodnotou optické mohutnosti uvedeného v kapitole 2.3 je vypočtena hodnota optické mohutnosti rohovky $\varphi_{0,max}$ příslušející řezu $R_{0,max}$, $\varphi_{0,min}$ příslušející řezu $R_{0,min}$ a průměrná hodnota $\overline{\varphi_R} = \frac{\varphi_{0,max} + \varphi_{0,min}}{2}$. Rohovkový astigmatismus Ast_R je charakterizován odpovídající hodnotou cylindru $C_R = \varphi_{0,max} - \varphi_{0,min}$, který je opět uvažován jako záporný. Všechny naměřené refrakční hodnoty jsou zaokrouhleny s přesností na 0,25 D. Prostřednictvím tohoto přístroje byl také manuálně změřen horizontální průměr rohovky HPR pomocí funkce CS o měřitelném rozsahu 10,0–14,0 mm s přírůstkem 0,1 mm. Průměr rohovky byl stanoven ze statického snímku předního segmentu oka a následného manuálního vyznačení hranic rohovky s bělimou (od bělma k bělmu) v horizontálním směru. Princip přístroje Nidek Tonoref II je uveden v kapitole 5.2. [37]

Fáze II: Měření na Pachycamu

Ve druhé fázi byla probandovi změřena pachymetrie a keratometrie rohovky na přístroji Pachycam. Bližší specifikace principu optického pachymetru je uvedena v kapitole 5.1. Pachymetrií je myšlena centrální minimální $CMTR$ a apikální neboli

vrcholová ATR tloušťka rohovky, k ní příslušný poloměr zakřivení R_A a hodnota optické mohutnosti φ_A . Keratometrií pak naměřené hodnoty poloměru zakřivení rohovky ve více horizontálním $R_{0,H}$ a více vertikálním řezu $R_{0,V}$. Na obrázku 9, který zobrazuje rozhraní s výsledky měření na Pachycamu pak $R_{0,H}$ odpovídá R_h a $R_{0,V}$ odpovídá R_v . Pachycam byl umístěn jako přídatné zařízení ke štěrbinové lampě, viz obrázek 5 a 6 a snímání probíhalo v zatemněné místnosti. Proband byl za přístroj pohodlně usazen, následovala orientační výšková úprava opěrky brady, na kterou vyšetřovaný následně bradu opřel. Stejně tak opřel i čelo k požadované opěrce a byla doladěna výšková úprava pozice vyšetřovaného vzhledem k přístroji. Po těchto úkonech byl vyzván k tomu, aby záměrně nezadržoval reflex mrkání, díval se před sebe do modrého světélka a vydržel v klidné, statické pozici. Součástí Pachycamu je CCD kamera, která průběžně snímá frontální obraz oka umožňující správné manuální nastavení pozice přístroje pomocí joystiku, které je nezbytné pro zahájení automatického snímání dat. Data jsou následně pomocí software v PC digitálně zpracována a převedena do číselných hodnot. Proces měření byl opakován nejméně třikrát, přičemž před každým měřením byl proband vyzván, aby odklonil hlavu a přirozeně si zamrkal. Požadovaná minimální procentuální úspěšnost snímání byla stanovena na 93 %. V případě, že úspěšnost snímání byla menší než stanovená hranice, měření bylo opakováno. Ze třech měřených regulérních hodnot dle předchozí specifikace, byla vypočítána průměrná hodnota, která je uvažována při statistickém zpracování, tedy průměrná centrální minimální tloušťka rohovky $\overline{CMTR} = \frac{(CMTR_1 + CMTR_2 + CMTR_3)}{3}$ a průměrná apikální tloušťka rohovky $\overline{ATR} = \frac{(ATR_1 + ATR_2 + ATR_3)}{3}$. [36]



Obr. 9: Rozhraní s výsledky z měření na Pachycamu

Fáze III: Měření subjektivní refrakce

Ve třetí fázi byla probandovi změřena subjektivní refrakce při standardním osvětlení pomocí sady zkušebních čoček a obrazů ve formě písmen na LCD optotypu Nidek SC-1600, zobrazovaného skrze nástěnné zrcadlo umístěné ve vzdálenosti 2,75 m od pozice vyšetřovaného. Subjektivní refrakce byla vyšetřena metodou nejlepší sféry, jejímž cílem je posunutí kroužku nejmenšího rozptylu na sítnici a u hypermetropů navíc uvolnění akomodace. Při korekci myopie bylo cílem vadu vykorigovat nejslabší rozptylnou čočkou, se kterou již proband viděl ostře a při korekci hypermetropie, konkrétně její manifestní složky vadu vykorigovat nejsilnější spojnou čočkou, se kterou ještě viděl ostře. Po vyměření nejlepší sféry následovalo vyšetření astigmatismu pomocí Jacksonových zkřížených cylindrů a odpovídajícího optotypu. Cílem bylo stanovení přesné vrcholové lámavosti a osy záporného korekčního cylindru, které vyžaduje refrakční vada každého probanda. Po vyšetření astigmatické složky korekce následovalo jemné sférické dokorigování a na závěr bylo provedeno binokulární vyvážení korekce pomocí Humphrissovy metody. Finální korekce byla ještě překontrolována binokulárním předřazením zkušebních čoček $\pm 0,25$ D. Bližší informace k vyšetřování subjektivní refrakce, viz [4]. Do studie byli zahrnuti probandi, jejichž vízus s plnou

korekcí byl $\geq 1,0$. Z naměřených hodnot sférické a astigmatické složky korekce byl u každého probanda vypočítán sférický ekvivalent SE korekce podle vzorce [20]

$$SE = S + \frac{C}{2},$$

kde S značí vrcholovou lámavost subjektivně předřazené sférické čočky a C vrcholovou lámavost záporného korekčního členu předřazené cylindrické čočky korigující astigmatismus.

Pro účely vyhodnocení vzájemné souvislosti celkového, subjektivně stanoveného a rohovkového, změřeného na Nidek Tonoref II, astigmatismu a ověření Javalovy podmínky byl v souladu s kapitolou 3.4 určen pro každé oko též celkový Ast_C a rohovkový Ast_R astigmatismus včetně příslušného znaménka určujícího, zda se jedná o astigmatismus proti „+“ pravidlu nebo podle „-“ pravidla. Celkem bylo do této části studie zahrnuto 51 subjektů, jelikož subjekty s astigmatismem šikmých os byly z analýzy vyloučeny.

6.1.3 Statistické vyhodnocení

Každému probandovi byly na obou očích změřeny výše uvedené parametry, přičemž do statistického zpracování a následného vyhodnocení byly zahrnuty pouze hodnoty naměřené na pravém oku. Jak již z výše uvedeného textu vyplývá příslušné hodnoty k parametrům $\overline{\varphi_R}$, HPR , C_R , \overline{R} , $R_{0,max}$ a $R_{0,min}$ byly obdrženy z měření na přístroji Nidek Tonoref II, hodnoty \overline{CMTR} a \overline{ATR} z měření na přístroji Pachycam a hodnoty SE a C z dat naměřených při subjektivně stanovené plné monokulární korekci každého probanda.

Zda mezi závisle proměnnou veličinou (parametrem), reprezentovanou množinou dat příslušného testovaného parametru a nezávisle proměnnými veličinami (faktory), jejichž data byla rozdělena mediánem vždy na dvě skupiny, existuje významná souvislost, bylo zjišťováno pomocí vícefaktorové ANOVA s interakcemi v programu STATISTICA na hladině významnosti $p < 5\%$ (0,05). V případě přítomnosti statisticky významné hodnoty byla zjištěná závislost podrobněji studována prostřednictvím korelační analýzy v MS EXCEL. Při změřeném počtu 77 probandů je korelace statisticky významná, jestliže korelační koeficient r nabývá hodnoty $r \geq 0,22417$.

6.2 Výsledky

Přehledné uspořádání průměrných hodnot naměřených na pravém oku, k nim příslušná hodnota směrodatné odchylky SD a rozmezí uvažovaných hodnot pro konkrétní skupiny statistického souboru jsou uvedeny v tabulkách, viz níže. Tabulka 15 zobrazuje naměřená data pro celý statistický soubor, tabulka 16 hodnoty naměřené separátně pro skupinu myopů a hypermetropů a tabulka 17 naměřená data zvlášť u žen a u mužů.

Tab. 15: Naměřená data u celého souboru probandů

Parametr	Celý soubor (n = 77)	
	Průměr ±SD	Rozmezí
SE [D]	-0,5 ±2,3	-5,00 až +6,00
C [D]	-0,40 ±0,38	+0,00 až -1,50
$\overline{\varphi}_R$ [D]	43,6 ±1,4	40,00 až 47,00
C_R [D]	-0,66 ±0,38	+0,00 až -2,00
$R_{0,max}$ [mm]	7,80 ±0,25	7,23 až 8,51
$R_{0,min}$ [mm]	7,69 ±0,25	7,16 až 8,32
\overline{R} [mm]	7,75 ±0,25	7,20 až 8,42
\overline{CMTR} [μm]	548 ±41	462 až 658
\overline{ATR} [μm]	556 ±42	471 až 664
HPR [mm]	11,99 ±0,37	11,2 až 12,7
Věk	42 ±13	21 až 67

Při srovnání průměrných hodnot naměřených u skupiny myopů a hypermetropů je průměrný věk probandů ve skupině myopů o 11 let nižší, hodnota optické mohutnosti rohovky $\overline{\varphi}_R$ je o 0,34 D větší u hypermetropů, hodnota poloměru zakřivení \overline{R} je nižší o 0,06 mm u myopů, stejně tak centrální a apikální tloušťka rohovky je nižší u skupiny myopů, a to pro \overline{CMTR} o 6,0 μm a \overline{ATR} o 10 μm. Hodnota horizontálního průměru rohovky je o 0,2 mm větší u hypermetropů.

Tab. 16: Naměřená data u myopů a hypermetropů

Parametr	Myopové (n = 44)		Hypermetropové (n = 33)	
	Průměr ±SD	Rozmezí	Průměr ±SD	Rozmezí
SE [D]	-2,0 ±1,5	-0,13 až -5,00	+1,4 ±1,6	+0,00 až +6,00
C [D]	-0,51 ±0,41	+0,00 až -1,50	-0,24 ±0,27	+0,00 až -0,75
$\overline{\varphi}_R$ [D]	43,8 ±1,4	40,00 až 47,00	43,4 ±1,3	40,75 až 46,50
C_R [D]	-0,65 ±0,42	+0,00 až -2,00	-0,67 ±0,34	+0,00 až -1,25
$R_{0,max}$ [mm]	7,77 ±0,26	7,23 až 8,51	7,84 ±0,24	7,30 až 8,37
$R_{0,min}$ [mm]	7,66 ±0,25	7,16 až 8,32	7,72 ±0,24	7,17 až 8,21
\overline{R} [mm]	7,72 ±0,25	7,20 až 8,42	7,78 ±0,24	7,24 až 8,27
\overline{CMTR} [μm]	544 ±44	462 až 658	550 ±43	423 až 633
\overline{ATR} [μm]	552 ±45	471 až 664	562 ±37	496 až 648
HPR [mm]	11,90 ±0,38	11,2 až 12,7	12,11 ±0,32	11,4 až 12,6
Věk	37 ±11	21 až 58	48 ±13	21 až 67

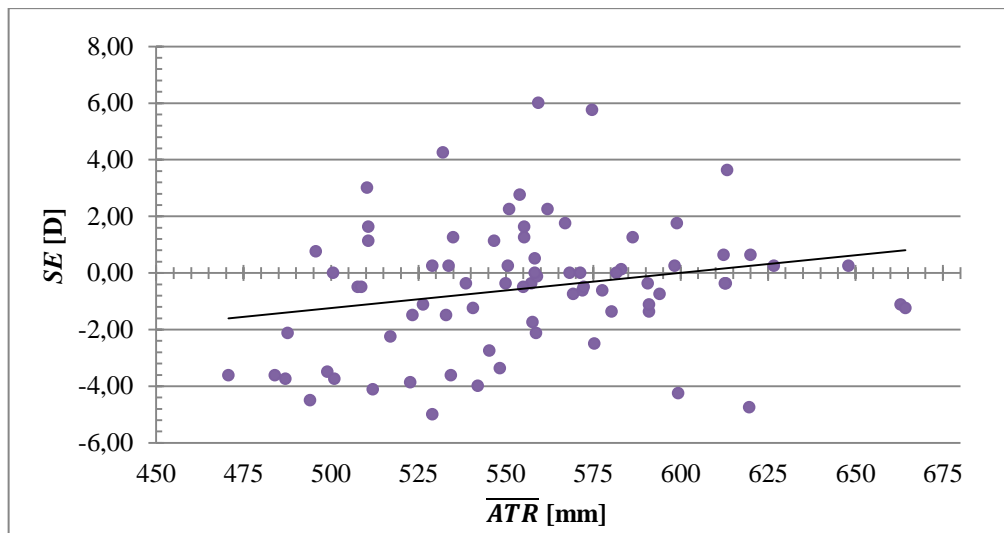
Při srovnání průměrných hodnot naměřených u skupiny žen a mužů je patrné, že průměrný věk u skupiny žen je o 4 roky nižší než u skupiny mužů, hodnota naměřené refrakce o 0,57 D menší u žen a hodnota poloměru zakřivení \overline{R} je o 0,15 mm větší u skupiny mužů. Naměřená hodnota horizontálního průměru rohovky je o 0,22 mm větší u mužů než u žen a hodnota centrální a stejně tak i apikální tloušťky rohovky je o 4 μm větší u mužů.

Tab. 17: Naměřená data u žen a mužů

Parametr	Ženy (n = 48)		Muži (n = 29)	
	Průměr ±SD	Rozmezí	Průměr ±SD	Rozmezí
SE [D]	-0,8 ±2,5	-5,00 až +6,00	-0,2 ±1,9	-4,25 až +4,25
C [D]	-0,33 ±0,33	+0,00 až -1,25	-0,51 ±0,43	+0,00 až -1,50
$\overline{\varphi}_R$ [D]	43,9 ±1,3	41,00 až 47,00	43,1 ±1,4	40,00 až 45,00
C_R [D]	-0,64 ±0,42	+0,00 až -2,00	-0,71 ±0,31	+0,00 až -1,25
$R_{0,max}$ [mm]	7,74 ±0,23	7,23 až 8,26	7,90 ±0,26	7,54 až 8,51
$R_{0,min}$ [mm]	7,64 ±0,24	7,16 až 8,21	7,77 ±0,24	7,39 až 8,32
\overline{R} [mm]	7,69 ±0,23	7,20 až 8,24	7,84 ±0,25	7,49 až 8,42
\overline{CMTR} [μm]	546 ±43	462 až 658	550 ±36	484 až 633
\overline{ATR} [μm]	555 ±45	471 až 664	559 ±38	488 až 648
HPR [mm]	11,91 ±0,34	11,20 až 12,60	12,13 ±0,37	11,40 až 12,70
Věk	40 ±14	21 až 65	44 ±13	21 až 67

6.2.1 Vliv parametrů rohovky na refrakci

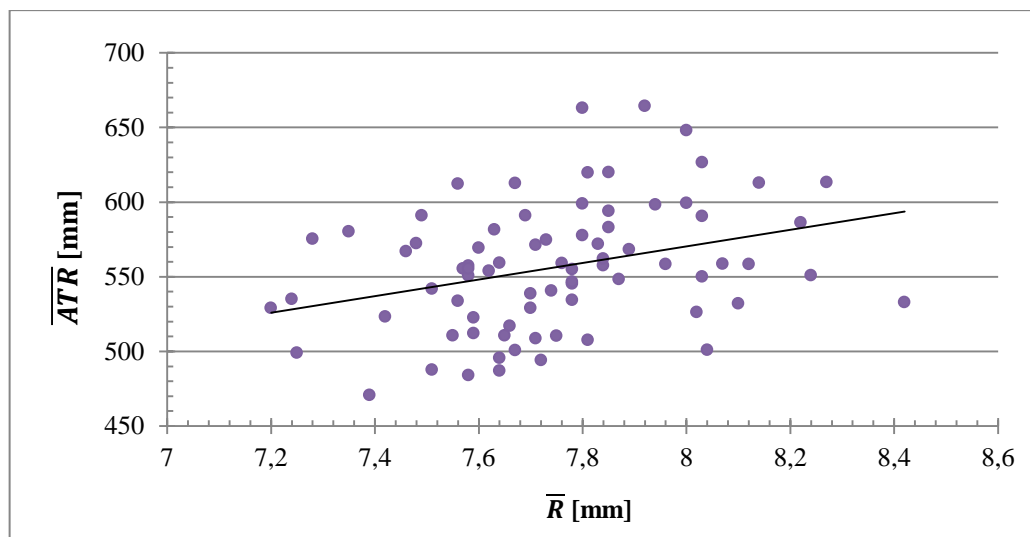
Při testování vzájemné souvislosti mezi celkovou refrakcí oka SE (parametr) a vybranými metrickými parametry rohovky (faktory), konkrétně apikální tloušťkou rohovky \overline{ATR} , poloměrem zakřivení rohovky \overline{R} a horizontálním průměrem rohovky HPR u všech probandů (celkem 77 očí) byl na základě výsledků ANOVA zjištěn pouze jeden statisticky významný efekt, a to vliv faktoru \overline{ATR} ($p = 0,035$). Metodou korelace byl následně zjištěn statisticky významný nárůst SE s \overline{ATR} , $r = 0,228$, viz obrázek 10. Ostatní vlivy a vzájemné interakce faktorů (\overline{R} , HPR , \overline{ATR} a \overline{R} , \overline{ATR} a HPR , \overline{R} a HPR , \overline{ATR} a \overline{R} a HPR) byly nesignifikantní ($p = 0,916$, $p = 0,689$, $p = 0,086$, $p = 0,500$, $p = 0,671$, $p = 0,753$). Vzhledem k tomu, že v některých studiích např. [39] byla testována minimální tloušťka rohovky $CMTR$, byla výše uvedená analýza kontrolně provedena i pro tuto tloušťku. V tomto případě však nebyl prokázán významný vliv \overline{CMTR} na SE ($p = 0,130$).



Obr. 10: Závislost SE na \overline{ATR} . Kolečka reprezentují hodnoty pro jednotlivé měřené oči, daty je proložena regresní přímka.

6.2.2 Vliv vybraných parametrů na tloušťku rohovky

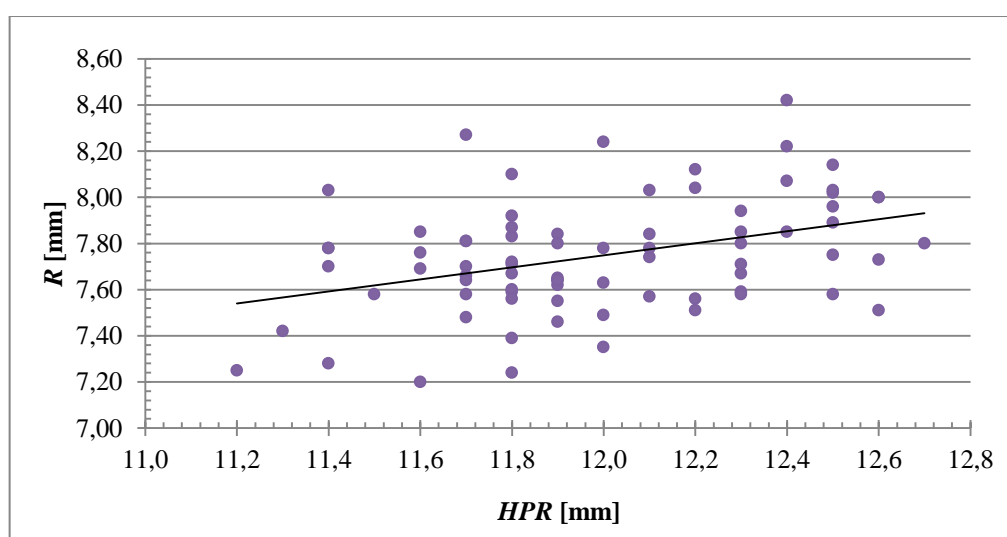
Při testování vzájemné souvislosti mezi apikální tloušťkou rohovky \overline{ATR} (parametr) a vybranými metrickými parametry rohovky (faktory), konkrétně poloměrem zakřivení rohovky \overline{R} , horizontálním průměrem rohovky HPR a pohlavím u všech probandů (celkem 77 očí) byly na základě výsledků ANOVA zjištěny statisticky významné efekty, a to vliv faktoru \overline{R} ($p = 0,005$) a interakce pohlaví a HPR ($p = 0,047$), tj. vliv horizontálního průměru rohovky na tloušťku se mění v závislosti na pohlaví (u mužů tloušťka s horizontálním průměrem roste, u žen klesá). Korelační analýza prokázala statisticky významný nárůst \overline{ATR} s \overline{R} , $r = 0,327$. Závislost obou veličin zachycuje graf na obrázku 11. Ostatní vlivy a vzájemné interakce faktorů (HPR , pohlaví, \overline{R} a HPR , \overline{R} a pohlaví, \overline{R} a HPR a pohlaví) byly nesignifikantní ($p = 0,309$, $p = 0,273$, $p = 0,077$, $p = 0,280$, $p = 0,343$). V provedené kontrolní analýze minimální tloušťky \overline{CMTR} byla zjištěna obdobná závislost jako u apikální tloušťky \overline{ATR} ($p = 0,003$). Dále byla analýza doplněna samostatným testováním vlivu SE na \overline{ATR} , přičemž nebyl zjištěn žádný vliv ($p = 0,274$).



Obr. 11: Závislost mezi \overline{ATR} a \overline{R} . Kolečka reprezentují hodnoty pro jednotlivé měřené oči, daty je proložena regresní přímka.

6.2.3 Vliv vybraných parametrů na poloměr zakřivení rohovky

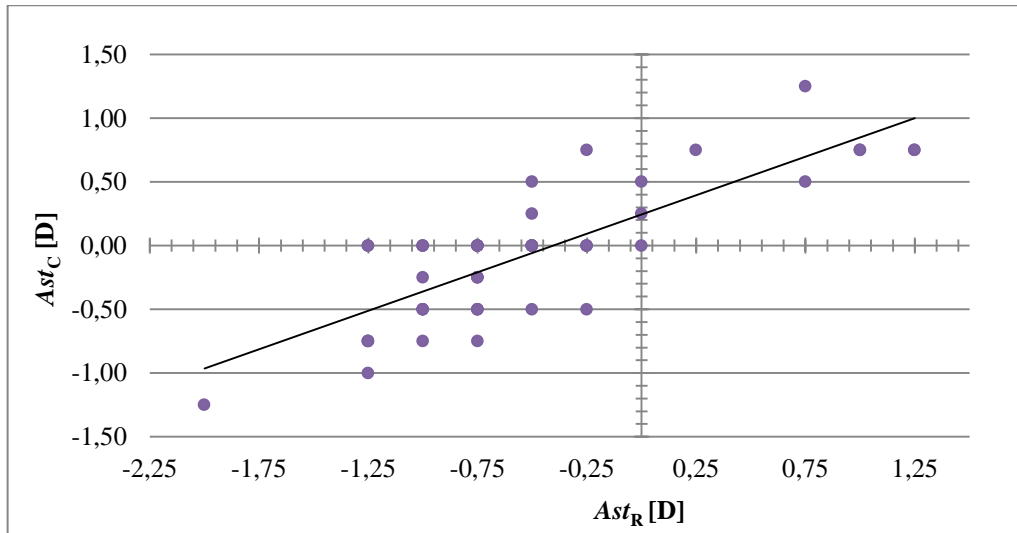
Při testování vzájemné souvislosti mezi poloměrem zakřivení rohovky \overline{R} (parametr) a vybranými metrickými parametry rohovky (faktory), konkrétně horizontálním průměrem rohovky HPR a pohlavím u všech probandů (celkem 77 očí) byl na základě výsledků ANOVA zjištěn pouze jediný statisticky významný vliv, a to vliv faktoru HPR ($p = 0,048$). Metodou korelace byl následně zjištěn statisticky významný nárůst \overline{R} s HPR , $r = 0,388$, viz obrázek 12. Ostatní vlivy a vzájemné interakce faktorů (pohlaví, HPR a pohlaví) byly nesignifikantní ($p = 0,068, 0,280$).



Obr. 12: Závislost mezi \overline{R} a HPR . Kolečka reprezentují hodnoty pro jednotlivé měřené oči, daty je proložena regresní přímka.

6.2.4 Vzájemná souvislost celkového a rohovkového astigmatismu

Metodou korelační analýzy byla zjištěna významná závislost celkového Ast_C a rohovkového astigmatismu Ast_R , $r = 0,809$ pro 51 subjektů. Odpovídající grafická závislost je zachycena na obrázku 13. Metodou nejmenších čtverců byl nalezený vztah aproximován přímkou, $Ast_C = 0,60 \times Ast_R + 0,24$.



Obr. 13: Závislost Ast_C na Ast_R . Kolečka reprezentují hodnoty pro jednotlivé měřené oči, daty je proložena regresní přímka.

6.3 Diskuze

Hlavním záměrem diplomové práce bylo zjistit, zda metrické parametry rohovky ovlivňují hodnotu celkové refrakce oka. K tomuto předmětu zkoumání mě vedl předpoklad možné souvislosti mezi tloušťkou rohovky a hodnotou refrakce zejména u myopických očí, u kterých je známo protenčení očních struktur vlivem nadměrné délky oka, které by mohlo postihovat i rohovku. Uvedený předpoklad byl na základě získaných výsledků potvrzen pro případ testování vlivu apikální tloušťky rohovky na refrakci. Některé studie [39, 40, 41] však tuto souvislost nepotvrzují. Příčinou může být fakt, že uvedené studie využívaly k měření pachymetrie ultrazvukovou metodu místo optické nebo uvažovaly minimální tloušťku nebo tloušťku ve středu zornice místo tloušťky apikální. Naopak studie [42] zahrnující 3395 očí měřených taktéž pomocí ultrazvukového pachymetru dospěla ke stejným výsledkům, jako v předložené diplomové práci. Provedena byla také kontrolní analýza s vyhodnocením tloušťky minimální, přičemž nebyl zjištěn významný vliv na refrakci. Test vlivu celkové refrakce na apikální tloušťku rohovky (ve snaze ověřit souvislost, která vyplynula při testování

vlivu apikální tloušťky rohovky na celkovou refrakci) neprokázal vzájemnou závislost, a tedy zmiňovaný vliv lze považovat za jednostranný.

V dalším kroku byl zjišťován možný vliv poloměru zakřivení rohovky na celkovou refrakci. Opět u myopického oka je předpokládán menší poloměr zakřivení, a tedy větší lomivost rohovky, ovšem vlivem kompenzačních mechanismů reagujících na nárůst v ADO, viz kapitola 2.1, může naopak docházet k oplošťování rohovky. Vzhledem k obdržným výsledkům však nelze ani jeden z těchto předpokladů potvrdit. Avšak studie [41] thajwansko-čínské populace (500 probandů) potvrdila u myopických očí s delší ADO větší poloměr zakřivení přední plochy rohovky (plošší rohovku) a hlubší přední oční komoru. Ke stejnému závěru dospěli autoři studie [18], ve které byly sledovány změny poloměru zakřivení u 469 myopických očí z dlouhodobého hlediska (14 let). Z výsledků předložené práce dále nebyl prokázán vliv horizontálního průměru rohovky na výslednou hodnotu celkové refrakce oka.

Další testování bylo zaměřeno na zjišťování možných vazeb mezi jednotlivými parametry rohovky, konkrétně mezi poloměrem zakřivení, horizontálním průměrem a tloušťkou rohovky s rozšířením o pohlaví probandů. V tomto případě byl prokázán významný vliv poloměru zakřivení na tloušťku rohovky, a to jak na apikální tak i minimální, přičemž v obou případech se zvětšující se hodnotou poloměru zakřivení se zvětšuje také hodnota tloušťky rohovky. Stejný vliv byl testován také ve studii [41], která ovšem nedošla ke stejnému závěru. Dalším překvapivým zjištěním byl vliv kombinace faktorů horizontálního průměru rohovky a pohlaví na apikální tloušťku, přičemž tloušťka rohovky u mužů s horizontálním průměrem roste, zatímco u žen klesá.

Vliv pohlaví a horizontálního průměru rohovky na poloměr zakřivení byl předmětem dalšího testování. Prokázán byl statisticky významný vliv horizontálního průměru rohovky na její poloměr zakřivení, a tedy se vzrůstajícím průměrem rohovky dochází k nárůstu hodnoty poloměru zakřivení.

Doplňkově byla ověřována souvislost mezi astigmatismem celkovým a rohovkovým. Na základě výsledků bylo prokázáno, že s rostoucím rohovkovým astigmatismem roste i astigmatismus celkový, ovšem astigmatismus celkový je oproti rohovkovému posunut směrem k astigmatismu proti pravidlu. Tento fakt koresponduje s Javalovou podmínkou, nicméně konkrétní číselná aproximace se od ní liší. Tato odlišnost může být důsledkem malého vzorku dat a především nízkého počtu hodnot s astigmatismem proti pravidlu.

Při měření horizontálního průměru rohovky byly naměřeny hodnoty ve srovnání s hodnotami uváděnými v literatuře širšího rozpětí, viz kapitola 2.4. Průměrná hodnota poloměru zakřivení byla stejně jako ve studiích [18, 42] změřena nižší u skupiny žen v porovnání se skupinou mužů, u kterých je tak rohovka plošší. Ačkoli byly hodnoty poloměrů zakřivení změřeny jak na přístroji Pachycam, tak na přístroji Nidek Tonoref II, pro vyhodnocení byly použity hodnoty naměřené pomocí druhého zmiňovaného přístroje. Důvodem je horší opakovatelnost měření pro vertikální meridián při měření na přístroji Pachycam, viz studie [43].

Závěr

Předložená diplomová práce shrnuje problematiku vlivu vybraných metrických parametrů rohovky na celkovou refrakci oka a jejich vzájemné souvislosti. V teoretické části jsou sepsány potřebné informace pro usnadnění orientace ve studované problematice. Úvodní kapitola je věnována popisu jednotlivých prostředí a struktur lidského oka, které mají vliv na výslednou refrakci, následuje kapitola zaměřená na podrobný popis metrických parametrů rohovky s důrazem na poloměr zakřivení, její velikost a tloušťku včetně faktorů, které právě tloušťku rohovky a její refrakci mohou ovlivňovat. Potvrzen byl vliv nošení kontaktních čoček, edematózních změn rohovky, ektatických chorob a chirurgických intervencí na tloušťku rohovky. Třetí kapitola rozebírá jednotlivé typy ametropií a pozornost je zaměřena také na další faktory, které mohou aktuální hodnotu ametropie ovlivňovat s důrazem na užívání některých farmak, přítomnost katarakty nebo diabetu mellitu v osobní anamnéze. Pro názornost jsou zde také uvedeny nejčastěji prezentované optické modely lidského oka a je objasněn princip přístrojů využívaných při měření v rámci experimentální části, konkrétně princip optického pachymetru Pachycam a autorefrakto-kerato-tonometru Nidek Tonoref II.

V praktické části byl zjišťován vliv metrických parametrů rohovky na refrakci a jejich vzájemné souvislosti, přičemž vyplynulo následující: tloušťka rohovky ovlivňuje výslednou hodnotu refrakce oka, ovšem tato závislost platí pouze pro tloušťku apikální a nikoli pro tloušťku minimální. Zároveň je tento vztah jednostranný, tj. refrakce neovlivňuje apikální tloušťku. Apikální i minimální tloušťka rohovky závisí na velikosti poloměru zakřivení její přední plochy. Vliv horizontálního průměru rohovky na apikální tloušťku se také mění v závislosti na pohlaví, kde u mužů tloušťka s horizontálním průměrem roste a u žen klesá. Sledována byla i možná souvislost mezi velikostí poloměru zakřivení přední plochy a hodnotou horizontálního průměru rohovky, přičemž se vzrůstajícím horizontálním průměrem vzrůstá také hodnota poloměru zakřivení. Vzájemný vztah mezi celkovým a rohovkovým astigmatismem byl potvrzen a při následném ověření Javalovy podmínky je patrný nárůst celkového v závislosti na rohovkovém astigmatismu, nicméně číselná aproximace se oproti Javalově podmínce značně odlišovala.

Seznam použité literatury

- [1] ČIHÁK, R. *Anatomie 3*. Praha: Grada Publishing, 2004. ISBN 978-80-247-1132-4
- [2] KUČYHNKA, P. a kol. *Oční lékařství*. Praha: Grada Publishing, 2007. ISBN 978-80-247-1163-8.
- [3] CAMPBELL, N. A., REECE, J. B. *Biologie*. Brno: Computer Press, a. s. 2008. ISBN 80-251-1178-4
- [4] ROSENFELD, M., LOGAN, N. *Optometry: Science, Techniques and Clinical Management*. 2ND edition, St. Louis: Elsevier, 2009. ISBN 978-0-7506-8778-2
- [5] EFRON, N. *Contact lens complications*, 2ND edition, St. Louis: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-7506-5534-7
- [6] http://www.visioncarespecialists.com/wp-content/uploads/2013/05/shutterstock_127500686.jpg
- [7] BRŮNOVÁ, B. *Léky a refrakce: Rohovka a čočka 1. část*. Česká oční optika, roč. 53, 2012, č. 4, str. 38-42, ISSN 1211-233X
- [8] BROWN, N. P., KORETZ, J. F., BRON, A. J., 1999: *The development and maintenance of emmetropia*. Eye 13, 1999, pp. 83-92
- [9] GERNET, H. *Oculometric findings in myopia*. Junk Publishers, The Hague 28, 1981, pp. 71-77
- [10] ROZSÍVAL, P. a kol. *Oční lékařství*. Praha: Galén, 2006. ISBN 80-7262-404-0
- [11] LARSEN, J. S., *The sagittal growth of the eye. I. Ultrasonic measurement of the depth of the anterior chamber from birth to puberty*. Acta Ophthalmologica 49, 1971, pp. 239-262
- [12] GOSS, D. A., ERICKSON, P. *Effects of changes in anterior chamber depth on refractive error of the human eye*. Vision Science 5, 1990, pp. 197-201
- [13] MUTTI, D. O. et al. *Refractive error, axial length, and relative peripheral refractive error before and after the onset of myopia*. Investigative Ophthalmology and Visual Science 48, 2007, pp. 2510-2519
- [14] ORTIZ, S. et al. *Relationship between central and peripheral corneal thickness in different degrees of myopia*. Journal of Optometry, Vol. 7, 2014, pp. 44-50
- [15] PLUHÁČEK, F. *Měření a analýza parametrů rohovky – výukové materiály k předmětu Oftalmologické a optometr. přístroje II, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2013*

- [16] CORBETT, M., ROSEN, E., O'BRART, D. *Corneal Topography: Principles and applications*. London: BMJ Publishing Group, 1999. ISBN 0-7279-1068-X
- [17] CHANG, S. W., TSAI, I. L. et al. *The cornea in young myopic adults*. British Journal of Ophthalmology, Vol. 85, 2001, pp. 916-920
- [18] SCHEIMAN, M. et al. *Longitudinal changes in corneal curvature and its relationship to axial length in the correction of myopia evaluation trial (comet) cohort*. Journal of Optometry, Vol. 9, 2016, pp. 13-21
- [19] GOSS, D. A., VANVEEN, H. G., RAINEY, B. B. et al. *Ocular components measured by keratometry, phakometry, and ultrasonography in emmetropic and myopic optometry students*. Optometry and Vision Science, Vol. 74, 1997, pp. 489-495
- [20] PETROVÁ, S., MAŠKOVÁ, Z., JUREČKA, T. *Základy aplikace kontaktních čoček*. Brno: NCO NZO, 2008. ISBN 978-80-7013-470-2
- [21] MÜLLER-TREIBER, A. *Kontaktlinsen Know-how*. Heildeberg: DOZ-Verlag, 2009. ISBN 978-3-922269-92-2
- [22] FARES, U. et al. *Correlation of central and peripheral corneal thickness in healthy corneas*. Contact Lens & Anterior Eye, Vol. 35, 2012, pp. 39-45
- [23] POLSE, K. A., MANDELL, R. B. *Critical oxygen tension at the corneal surface*. Arch. Ophthalmol., Vol. 84, 1970, pp. 505-508
- [24] BENJAMIN, W. J. *Borish's clinical refraction*. St. Louis: Elsevier, 2006. ISBN 978-0-7506-7524-6
- [25] JINABHAI, A. et al. *Pellucid corneal marginal degeneration: A review*. Contact Lens & Anterior Eye, Vol. 34, 2011, pp. 56-63
- [26] KRACHMER, J. H. *Cornea – Corena and External Disease: Clinical Diagnosis and Management*. St. Louis: Mosby-Year Book, 1997. ISBN 0-8151-5249-3
- [27] HAVELKOVÁ, B. *Refrakční stav oka ve vztahu k očním a celkovým chorobám*. Česká oční optika, roč. 57, 2016, č. 1, str. 36-39, ISSN 1211-233X
- [28] ČERNÁ, M. *Výskyt refrakčních vad*. Česká oční optika, roč. 55, 2014, č. 4, str. 22-24, ISSN 1211-233X
- [29] GROSWENOR, T. *Primary care optometry*. 5TH edition, St. Louis: Elsevier, 2007. ISBN 978-0-7506-7575-8
- [30] RUTRLE, M. *Břýlová optika*. Brno, 1993. ISBN 80-7013-145-4

- [31] TUNNACLIFFE, A. H. *Introduction to visual optics*. Canterbury, ABDO Colledge, 1993. ISBN 0-9009-928-3
- [32] RUTRLE, M. *Přístrojová optika*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví v Brně, 2000. ISBN 80-7013-301-5
- [33] BRŮNOVÁ, B. *Léky a refrakce: Ciliární tělísko a sítnice 2. část*. Česká oční optika, roč. 54, 2013, č. 1, str. 38-42, ISSN 1211-233X
- [34] FŮS, M. *Indukovaný rohovkový astigmatismus po operaci katarakty*. Česká oční optika, roč. 56, 2015, č. 4, str. 30-32, ISSN 1211-233X
- [35] https://cs.wikipedia.org/wiki/Diabetes_mellitus
- [36] Návod k použití – PACHYCAM, Oculus s. r. o.
- [37] Návod k použití – NIDEK TONOREF II, Oculus s. r. o.
- [38] Návod k použití – Nidek ARK-1/AR-1, Oculus s.r.o
- [39] PRASAD, A. et al. *Relationship of age and refraction to central corneal thickness*. Clinical Science, Vol. 30, 2011, pp 553-555
- [40] SANCHIS-GIMENO, J. A. et al. *Assessment of central corneal thickness in extreme myopic eyes*. Eur J Anat, Vol 7, 2003, pp. 15-18
- [41] CHEN, J. M. et al. *Relationship between central corneal thickness, refractive error, corneal curvature, anterior chamber depth and axial length*. Chinese Medical Association, Vol 72, 2009, pp 133-137
- [42] ALMAHMOUD, T. et al. *Correlation between refractive error, corneal power, and thickness in a large population with a wide range of ametropia*. Ophthalmology & Visual Science, Vol 52, 2011, pp 1235-1242
- [43] ŠÍMOVÁ, M. *Měření centrální rohovkové tloušťky*, DP, 2016