

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA OPTIKY



**OPAKOVATELNOSTĚ MERANIA TVAROVÝCH PARAMETROV
ROHOVKY**

Diplomová práca

VYPRACOVALA:

Bc. Antónia Bežillová

Obor N5345 OPTOMETRIE

Študijný rok 2017/2018

VEDÚCI DIPLOMOVEJ PRÁCE:

RNDr. František Pluháček, Ph.D

Čestné prehlásenie:

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracovala samostatne pod vedením RNDr. Františka Pluháčka, Ph.D. za použitia literatúry uvedenej v závere práce.

V Olomouci dňa 25.4.2018

.....
Bc. Antónia Bežillová

Pod'akovanie:

Rada by som touto cestou poďakovala vedúcemu diplomovej práce RNDr. Františkovi Pluháčkovi Ph.D. za vecné pripomienky, cenné rady a za študijné materiály a podklady, ktoré mi pomohli pri písaní práce .

Táto práca vznikla za podpory projektov IGA PrF UP s názvom Optometrie a její aplikace, č. IGA_PrF_2018_007 a č. IGA_PrF_2018_003.

OBSAH

ÚVOD	6
TEORETICKÁ ČASŤ.....	7
1. ROHOVKA.....	7
1.1 Anatomická štruktúra rohovky	7
1.2 Aproximácie tvaru rohovky.....	8
1.3 Optické vlastnosti rohovky.....	14
1.3.1 Index lomu.....	14
1.3.2 Optická mohutnosť rohovky	14
1.3.3 Tvar rohovky	15
1.3.4 Centrálna a necentrálna zakrivenie.....	16
1.3.5 Rohovkový astigmatizmus	18
2. METÓDY MERAJÚCE TVAROVÉ PARAMETRE ROHOVKY	19
2.1 História keratometrie a rohovkovej topografie.....	19
2.2 Keratometria	20
2.2.1 Princíp keratometrie	20
2.2.2 Keratometrický index.....	22
2.2.3 Mechanický keratometer	22
2.2.4 Javal-Schiötzov keratometer	24
2.2.5 Automatický keratometer	26
2.2.6 Limity keratometrie.....	26
2.3 Keratoskopia.....	27
2.4 Rohovková topografia	28
2.4.1 Reflexné metódy	28
2.4.2 Projekčné metódy.....	30
2.4.3 Využitie rohovkovej topografie a keratometrie	34

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	35
3. CIELE PRÁCE.....	35
3.1 Subjekty a metodika	35
3.1.1 Súbor účastníkov	35
3.1.2 Metodika merania.....	35
3.2 Spôsob štatistického vyhodnotenia dát.....	36
4. VÝSLEDKY MERANÍ.....	37
4.1 Opakovateľnosť	37
4.1.1 Opakovateľnosť merania polomerov zakrivenia.....	40
4.1.2 Opakovateľnosť merania uhlu astigmatizmu	41
4.1.3 Opakovateľnosť merania veľkosti astigmatizmu	42
4.2 Porovnanie prístrojov	42
4.3 Porovnanie s topografom.....	43
5. DISKUSIA	46
ZÁVER.....	49
POUŽITÁ LITERATÚRA.....	51
ZOZNAM OBRÁZKOV.....	55

ÚVOD

Meraním rohovky, presnejšie jej zakrivenia, sa ľudia zaoberali už v začiatkoch 17. storočia. S príchodom kontaktných šošoviek a refrakčnej chirurgie sa kládol dôraz na spoľahlivosť a reprodukovateľnosť meraní všetkých potrebných parametrov. V dnešnej dobe je na trhu k dispozícii veľké množstvo prístrojov zameraných na vyhodnocovanie tvarových parametrov rohovky. Každý užívateľ, či už v oftalmologickej alebo optometrickej praxi, si vyberá svoje vybavenie podľa svojich preferencií, finančnej náročnosti, prípadne dostupnosti prístrojov. Preto sa tu vynára otázka, či sa jednotlivé prístroje vo svojich výsledkoch líšia, a či je možné ich navzájom zamieňať.

Cieľom diplomovej práce bolo zistiť, či sú výsledky z jednotlivých použitých prístrojov v tejto práci zameniteľné v klinickej praxi, a ktorý z prístrojov podáva najrelevantnejšie výsledky v rámci opakovateľnosti merania.

Táto práca je rozdelená na teoretickú a experimentálnu časť. V teoretickej časti sú popísané optické vlastnosti rohovky, jej anatomická štruktúra a aproximácie jej tvaru s využitím rôznych parametrov, pričom sú naznačené aj vzťahy medzi nimi. Ďalšou kapitolou je popis metód merajúcich vybrané parametre rohovky s príkladmi jednotlivých prístrojov a ich princípmi. Sú uvedené aj limity techník a ich využitie v praxi. Experimentálna časť sa zaoberá skúmaním opakovateľnosti meraní polomerov zakrivenia, uhlu a veľkosti astigmatizmu na jednotlivých prístrojoch a ich vzájomnom porovnaní.

TEORETICKÁ ČASŤ

1. ROHOVKA

Rohovka je dôležitou očnou štruktúrou, ktorá sa zúčastňuje na sprostredkovaní zrkového vnemu. Keďže je hlavným refrakčným povrchom oka (má približne 2/3 celkovej optickej mohutnosti relaxovaného oka), videnie môže byť významne ovplyvnené relatívne malými zmenami v jej štruktúre, tvare a parametroch. V paraxiálnej aproximácii každá zmena polomeru zakrivenia o 0,04 mm odpovedá zmene optickej mohutnosti o 0,25 D. Meranie parametrov rohovky má veľký význam pri diagnostike a liečbe očných ochorení ako napríklad keratokonus a glaukóm, ale aj pri aplikácii kontaktných šošoviek, refrakčnej chirurgii (napr. LASIK, PRK), či implantácii vnútroočnej šošovky. [3][18]

1.1 Anatomická štruktúra rohovky

Donedávna bolo o rohovke známe, že je zložená z piatich vrstiev, a to od vonkajšieho epitelu, Bowmanovej membrány, stromy, Descementovej membrány, po vnútorný endotel. Šiesta vrstva nazývaná Duova vrstva, leží medzi stromatom a Descementovou membránou a pozostáva prevažne z kolagénových zväzkov typu 1 a jej hrúbka je cca 10-15 μm .

Epitel chráni zvyšok rohovky vytváraním bariéry proti vode zo slzného filmu, veľkým molekulám a toxickým látkam. Táto bariéra obmedzuje vyparovanie a minimalizuje absorpciu tekutín zo slz, čím napomáha udržiavať správnu hydratáciu rohovky. Skladá sa z približne šiestich vrstiev buniek, pričom iba tá najvnútornejšia obsahuje bunky schopné delenia sa. Po vytvorení sa bunky postupne presúvajú smerom k povrchu, kde sú tie povrchové odstránené. Primárnou funkciou spolu so slzným filmom je poskytnutie veľmi hladkej lomivej plochy.

Bowmanova membrána je 8-14 μm hrubá vrstva, ktorá pozostáva predovšetkým z náhodne usporiadaných kolagénových vlákien. V prípade jej porušenia sa hojí jazvou, ktorá svojou lokalizáciou môže zhoršiť videnie.

Stroma predstavuje 90 % z rohovkovej hrúbky a je prevažne zložená z vody a z viac než 200 kolagénových lamiel, ktoré prechádzajú cez celú rohovku. V rámci týchto lamiel sú kolagénové vlákna rovnobežne usporiadané s povrchom rohovky. Toto usporiadanie má za následok priehľadnosť média a tiež zlepšenie mechanickej sily.

Descementova membrána je 6 μm hrubá vrstva a je základnou membránou endoteliálnych buniek, ktorá slúži ako ochranná bariéra pred infekciami a poraneniami. Táto vrstva má regeneračnú schopnosť.

Endotel pozostáva z jednej vrstvy buniek, ktoré majú šesťuholníkový tvar, a tým vytvárajú podobu včelieho platu. Endotel reguluje rovnováhu tekutín rohovky za účelom zachovania hydratácie stromatu na cca 78 %, a teda zachovania priehľadnosti. Taktiež produkuje látky, ktoré sú zodpovedné za produkciu Descementovej membrány. Na rozdiel od nej nemá schopnosť regenerácie a zaniknuté bunky sú nahradené zväčšením pozostalých buniek.

Slzný film zohráva dôležitú úlohu v procese videnia. Skladá sa z troch zložiek (mucínová, vodná a lipidová) a zabezpečuje hladký, lesklý a vyživený povrch rohovky. [1][2][24]

1.2 Aproximácie tvaru rohovky

Veľkosť polomeru zakrivenia narastá so vzdialenosťou od vrcholu rohovky tak, že smerom do periférie sa povrch sploštuje. Povrchy, ktoré nie sú sférické sa v tomto zmysle často označujú ako asférické. Ak je plocha rohovky považovaná za sférickú, rezy a krivky vo všetkých meridiánoch sú rovnaké a takáto plocha má len jedno centrálné zakrivenie r_0 . V skutočnosti je však plocha rohovky odlišná a rezy v rôznych meridiánoch sú rozdielne, čo charakterizuje astigmatickú rohovku. Dva hlavné meridiány vykazujú extrémne tvary a rezy. Centrálné zakrivenie sa mení od $r_{0,\text{max}}$ po $r_{0,\text{min}}$, a tieto hlavné meridiány sú na seba kolmé. [1][15][16]

Najjednoduchším modelom znázornenia rohovky ako asférického povrchu je, že rohovka je rotačne symetrická a môže byť znázornená ako plocha druhého stupňa v trojrozmernom znázornení. Táto plocha môže byť v kartézskej sústave súradníc x, y, z vyjadrená v tvare

$$x^2 + y^2 + (1 + Q)z^2 - 2rz = 0, \quad \text{rov. } \check{c}. 1$$

kde r je vrcholový polomer zakrivenia rohovky a os z je os otáčania plochy druhého stupňa a taktiež optickou osou rohovky. Počiatok sústavy je uvažovaný vo vrchole kvadratickej plochy, ktorý je totožný s vrcholom rohovky. Q predstavuje koeficient (povrchovej) asféricity. Jeho hodnota určuje typ tejto plochy:

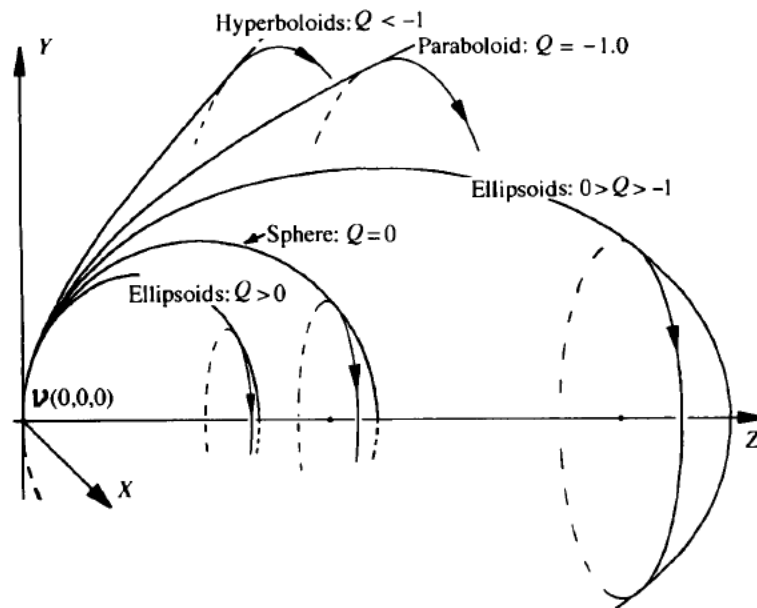
$Q > 0$ elipsoid s hlavnou osou x v rovine xy (sploštený elipsoid)

$Q = 0$ sféra

$-1 < Q < 0$ elipsoid s hlavnou osou v smere osi z (pretiahnutý elipsoid)

$Q = -1$ paraboloid s osou pozdĺž osi z

$Q < -1$ hyperboloid.



Obr. č. 1 Vplyv parametru Q na tvar kvadratickej plochy aproximujúcej rohovku (všetky krivky majú spoločný vrchol)[1]

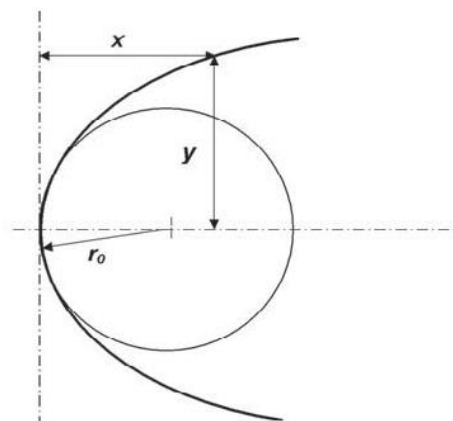
Táto plocha však za využitia rovnice č. 1 nedokáže plne popísať asymetrie rohovky, ako je jej sploštenie na prechode rohovky do skléry. Pre popis týchto javov je treba uvažovať parametre Q a r ako funkcie azimutu, nie ako konštanty. Na druhú stranu táto oblasť nezohráva dôležitú úlohu vo videní, avšak môže byť zaujímavá z hľadiska kontaktológie. Pre potreby tohto textu budú oba parametre uvažované ako konštantné. [1][11]

Osový rez plochou druhého stupňa je kužeľosečka (kruh, elipsa, parabola, hyperbola), ktorá môže byť vyjadrená vzťahom

$$y^2 = 2r_0x - px^2, \quad \text{rov. č. 2}$$

kde y je polotetiva alebo, inak povedané, vzdialenosť bodu na krivke od osi symetrie, optickej osi, r_0 je polomer zakrivenia vo vrchole, x je súradnica v smere osi rotácie a udáva sagitálnu hĺbku a p vyjadruje stupeň splošťovania alebo zostrmovania od vrcholu. [15]

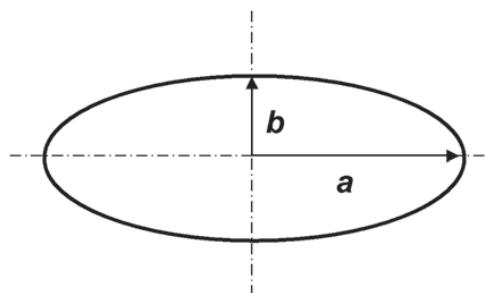
Typickým rohovkovým prierezom je pretiahnutá elipsa s viac zakrivenou centrálnou časťou, vrcholom, a postupným splošťovaním smerom do periférie. [18]



Obr. č. 2 Znárodnenie všeobecnej rovnice pre všetky typy kuželosečiek: $y^2 = 2r_0x - px^2$ [18]

V elipse s hlavnou polosou a a vedľajšou poloosou b (Obr. č. 3) je možné hodnotu p vyjadriť pomerom

$$p = \frac{b^2}{a^2}. \quad \text{rov. č. 3}$$



Obr. č. 3 Elipsa s hlavnou osou a a vedľajšou osou b , hodnota p je definovaná pomerom medzi b^2 a a^2 [18]

Táto rovnica ukazuje, že v prípade kruhu, kde $b = a$, tak $p = 1$. V prípade paraboly, kde a smeruje k nekonečnu, je $p = 0$. Pri pretiahnutej elipse, kde hlavná os sa zhoduje s osou x , $b < a$, p sa nachádza v rozmedzí medzi 0 a 1. Čím viac sa približuje k hodnote 1, tým sa elipsa stáva menej predĺženou. Ak je $p > 1$, elipsa je sploštená a vedľajšia os je v smere osi x , preto sa povrch postupne viac zakrivuje so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od vrcholu. Pri hyperbole je $p < 0$. [18]

Na popis asféricity rohovky sa bežne používajú aj ďalšie parametre, ktoré sú medzi sebou v určitom vzťahu. Vyššie sú spomínané parametre ako Q (koeficient asféricity), p (tvarový faktor), ktoré sú medzi sebou vo vzťahu:

$$Q = p - 1. \quad \text{rov. č. 4}$$

Ďalšou možnou veličinou na opis asféricity je excentricita ε (viď nižšie), ktorá je vo vzťahu s predchádzajúcimi veličinami nasledovne [18]:

s parametrom p

$$p = 1 - \varepsilon^2, \quad \text{rov. č. 5}$$

z čoho vyplýva

$$\varepsilon = \sqrt{1 - p}, \quad \text{rov. č. 6}$$

a s parametrom Q

$$Q = -\varepsilon^2. \quad \text{rov. č. 7}$$

Menej bežné tvarové parametre sú SF a E , ktoré sú vyjadrené:

$$E = SF = \varepsilon^2 \quad \text{rov. č. 8}$$

alebo

$$E = SF = 1 - p. \quad \text{rov. č. 9}$$

Tab. č. 1 Príslušné hodnoty koeficientov asféricity pre rôzne kuželosečky

	$p = (1 - \varepsilon^2)$	$Q = -\varepsilon^2$	ε	ε^2/SF
Hyperbola	< 0	< -1	> 1	> 1
Parabola	0	-1	1	1
Predĺžená elipsa	$0 < p < 1$	$-1 < Q < 0$	$0 < \varepsilon < 1$	$0 < \varepsilon^2 < 1$
Kružnica	1	0	0	0
Sploštená elipsa	> 1	> 0	< 0	< 0
Priemerná hodnota	$0,74$	$-0,26$	$0,50$	$0,26$

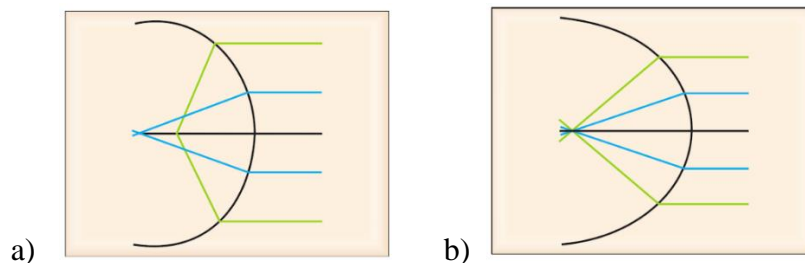
p =tvarový faktor, Q =koeficient asféricity, ε =excentricita, ε^2/SF =index asféricity [18]

Použitie týchto parametrov sa mierne odlišuje od použitej publikácie, avšak môžu byť navzájom zamieňané spomínanými prevodmi. V súčasných optometristických publikáciách sa skôr vyskytuje parameter p , zatiaľ čo v oftalmologických časopisoch sa častejšie vyskytuje

koeficient Q , ktorý môže byť nahradený symbolom K . V publikáciách zameraných na kontaktné šošovky sa bežne používa označenie excentricita ε . [18]

Vzťah Q a sférickej aberácie

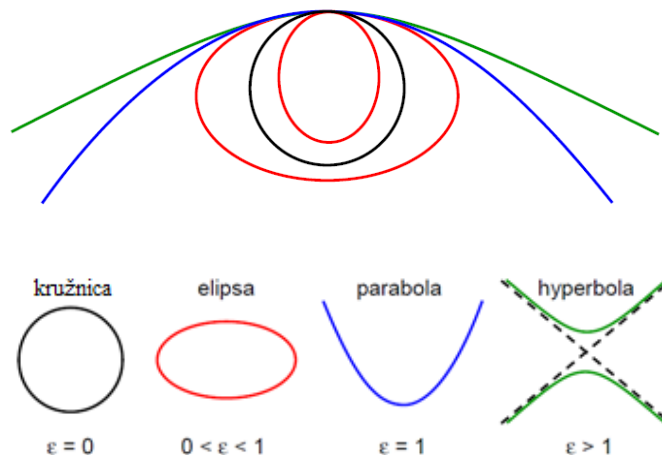
Sférická aberácia (alebo otvorová chyba) je chyba širokého zväzku lúčov pri zobrazení osového predmetového bodu. Je to rotačne symetrická aberácia, pri ktorej sa svetelné lúče prechádzajúce paraxiálnou zónou zrenice lámu inde než lúče prechádzajúce okrajom zrenice (neparaxiálne). Sférická aberácia je pozitívna, keď okrajové lúče majú ohnisko pred paraxiálnymi, negatívna, keď je to naopak. Rozdiel v dioptriách medzi ohniskami paraxiálnych a neparaxiálnych lúčov sa nazýva pozdĺžna sférická aberácia. Tvar povrchu má vplyv na sféricкую aberáciu. Rohovka svojím tvarom pretiahnutej elipsy znižuje pozitívnu sféricкую aberáciu približne o polovicu jej veľkosti na rozdiel od sférického tvaru alebo tvaru sploštenej elipsy. Priemerná hodnota Q u ľudskej rohovky je $-0,26$, avšak potrebná hodnota Q na odstránenie celkovej sférickej aberácie je $-0,52$. Zvyšková sférická aberácia je čiastočne korigovaná vnútroočnou šošovkou (pri akomodácii), ktorá vykazuje aberáciu opačného charakteru (negatívna aberácia). [12][17][18][19]



Obr. č. 4 Sférická aberácia pri a) sférickom povrchu, b) asférickom povrchu [55]

Excentricita rohovky

Excentricita ε je bezrozmerná veličina, ktorá charakterizuje mieru sploštenia rohovky od stredu smerom do periférie zmenou jej zakrivenia. Hodnota excentricity popisuje typ krivky danej plochy.



Obr. č. 5 Typ krivky v závislosti na ε [16]

Excentricitu vieme odvodiť aj z iných parametrov popisujúcich asféricitu plochy. V prípade vzorcov č. 5 a 6 nastáva problém, keď hodnota $p > 1$. V takom prípade musí byť hodnota ε^2 záporná, čím hodnota ε stráca význam, keďže sa rovná odmocnине záporného čísla a jedná sa už o komplexné číslo. Záporné hodnoty ε sú bežné, a preto sa pre vyjadrenie sploštenej elipsy používa nasledujúci vzťah:

$$\text{ak } p > 1, \text{ tak } \varepsilon = -\sqrt{p-1} \quad \text{rov. č. 10}$$

Z toho vyplýva, že ak je $\varepsilon < 0$, krivka sa smerom od vrcholu do periférie zostrmuje a označuje sa ako sploštená (napr. po refrakčných operáciách myopie). [18]

Priemerná hodnota excentricity sa nachádza v intervale medzi 0,35 a 0,55. Približne je ju možné vypočítať

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\bar{r}_s - \bar{r}_0}, \quad \text{rov. č. 11}$$

kde \bar{r}_0 označuje priemerné centrálné zakrivenie, pre ktoré platí $\bar{r}_0 = \frac{r_{0,max} + r_{0,min}}{2}$, a \bar{r}_s predstavuje priemerné sagitálne zakrivenie definované ako $\bar{r}_s = \frac{r_{s,temp} + r_{s,nas} + r_{s,sup} + r_{s,inf}}{4}$, pričom jednotlivé použité polomery $r_{s,temp}$, $r_{s,nas}$, $r_{s,sup}$, $r_{s,inf}$ sú čiastkové sagitálne zakrivenia merané v príslušných kvadrantoch rohovky v uhlovej vzdialenosti 30° od stredu. Oba polomery zakrivenia sú uvažované v mm. Čím je hodnota excentricity vyššia, tým sa rohovka v periférii stáva plochšou. [16]

Význam excentricity

Excentricita zohráva dôležitú úlohu pri výbere kontaktných šošoviek. Rohovky s rovnakými nameranými hodnotami z keratometru sa môžu líšiť v excentricite, a ak sa základná krivka

šošovky vyberá len na základe keratometrických hodnôt, šošovka nemusí dobre sedieť na oku. Ďalším dôležitým významom excentricity je včasná diagnostika keratokonu v jeho primárnych štádiách, keď ešte nie sú viditeľné žiadne zmeny pri vyšetrení na štrbinovej lampe, avšak už je badať nárast v hodnote excentricity. [14]

1.3 Optické vlastnosti rohovky

1.3.1 Index lomu

Každá vrstva rohovky má svoj vlastný index lomu, ale keďže stroma patrí k najhrubšej vrstve, jej index lomu prevláda. Za priemernú hodnotu indexu lomu rohovky sa väčšinou považuje 1,376. V keratometrii sa však namiesto indexu lomu rohovky využíva tzv. keratometrický index (viď kap 2.2.2), ktorý zohľadňuje zápornú hodnotu optickej mohutnosti zadnej plochy rohovky a vníma rohovku ako jednu refrakčnú plochu. [1] **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**

1.3.2 Optická mohutnosť rohovky

Viacere štúdie sa zaoberali meraním predného polomeru rohovky, avšak oveľa menej sa ich zaoberalo meraním zadného povrchu. Predpokladá sa, že medzi predným a zadným polomerom zakrivenia rohovky je vysoká lineárna korelácia a rozumné prispôsobenie tohto vzťahu je

$$r_2 = 0,81r_1. \quad \text{rov. č. 12}$$

Z týchto polomerov zakrivenia môžeme vypočítať optickú mohutnosť rohovky (φ) použitím nasledujúcej rovnice

$$\varphi = \frac{n' - n}{r}, \quad \text{rov. č. 13}$$

kde n a n' sú indexy lomu prostredia pred a za uvažovanou optickou plochou o polomere r . K prednej ploche odpovedá $n = 1$ a $n' = 1,376$ a zadnej ploche $n = 1,376$ a $n' = 1,336$. Celková mohutnosť rohovky sa môže vypočítať z rovnice hrubej šošovky,

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\varphi_1 \varphi_2 d}{n}, \quad \text{rov. č. 14}$$

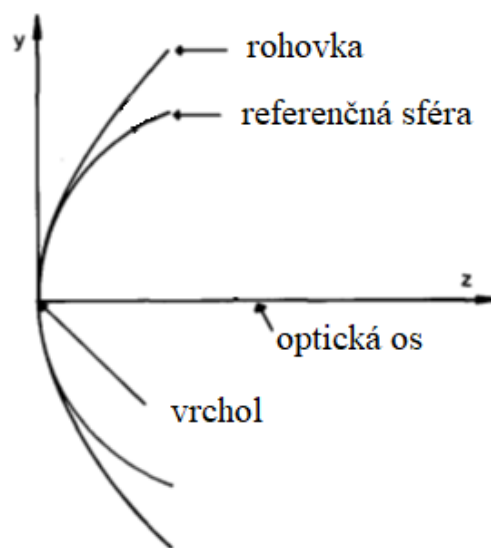
kde φ_1 je sila prednej plochy, φ_2 je sila zadnej plochy, d je vrcholová hrúbka rohovky a n je index lomu rohovky (zvyčajne 1,376). Mohutnosť rohovky môže byť zjednodušené vyjadrená aj súčtom mohutností oboch jej plôch,

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2. \quad \text{rov. č. 15}$$

Pre vyššie uvažované parametre rohovky ($\varphi_1 = +48,83$ D, $\varphi_2 = -5,88$ D) a jej hrúbku $0,5 \mu\text{m}$ sa výsledná optická mohutnosť udaná presným vzorcom ($43,05$ D) mierne líši od približného údaju ($42,95$ D). [1][22]

1.3.3 Tvar rohovky

Rohovka má vypuklý, asférický tvar horizontálne pretiahnutej elipsy. V horizontálnom smere meria rohovka dospelého človeka $11 - 12$ mm, vo vertikálnom smere $9 - 11$ mm. Predná plocha rohovky vykazuje tóricitu, ktorá vytvára tzv. fyziologický astigmatizmus. Tvar rohovky sa mení v priebehu dňa. V roku 2001 prebehla štúdia, ktorá dokázala zmenu tvaru prednej plochy rohovky pri akomodácii oka. [1][10][25]



Obr. č. 6 Odchýlka rohovky od referenčnej sféry, ktorá sa najlepšie primkne k centrálnej časti rohovky. [11]

Povrchové zóny rohovky

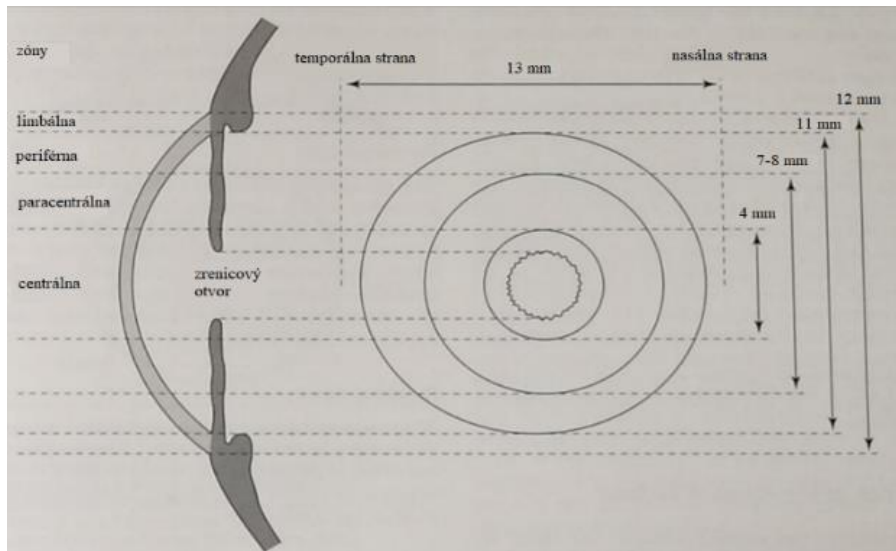
Povrch rohovky je rozdelený do štyroch koncentrických zón, pričom každá zóna sa mieša s tou nasledujúcou.

1. Centrálna optická zóna – nazývaná inak aj sférická zóna, je opticky najdôležitejšia oblasť s priemerom približne 4 mm, ktorá sa podieľa na vzniku obrazu na sietnici. Jej zakrivenie sa nelíši o viac než $0,05$ mm ($0,25$ D).

2. Paracentrálna (stredná) zóna – jej priemer je $4-7$ mm a má plochší polomer zakrivenia než centrálna zóna.

3. Periférna (prechodná) zóna – 7 - 11 mm v priemere, oblasť s maximálnym sploštením rohovky a radiálnou asymetriou. Periférne zakrivenie kontaktných šošoviek by malo byť prispôbené tvaru rohovky v tejto oblasti, kde získa väčšinu svojej podpory.

4. Limbálna zóna – je okraj rohovky široký 0,5 - 1 mm, hraničí so sklérou a je pokrytý spojivkovou vaskulárnou arkádou. V tomto mieste sa rohovka chirurgicky narezáva. [9]

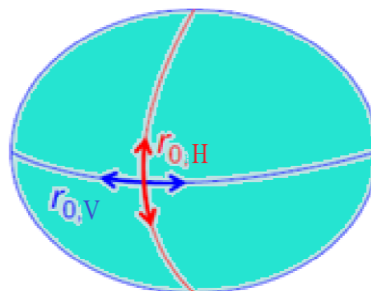


Obr. č. 7 Zóny rohovky [9]

1.3.4 Centrálné a necentrálne zakrivenie

Centrálné zakrivenie

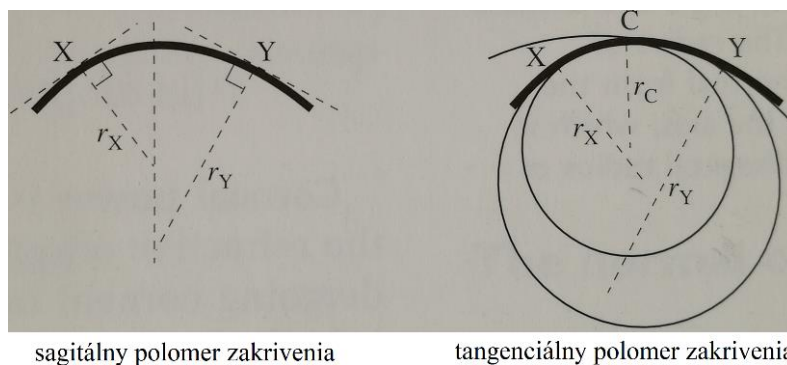
Ako už bolo spomínané v kap. 1.2, rohovka má tvar obecnéj plochy druhého stupňa, pri ktorej v rôznych meridiánoch nadobúdajú zakrivenia odlišné hodnoty, čo charakterizuje astigmatickú rohovku. Centrálné zakrivenie r_0 sa mení od $r_{0,H}$ po $r_{0,V}$. Hlavné meridiány sú zvyčajne orientované horizontálne ($r_{0,H}$) alebo vertikálne ($r_{0,V}$) (resp. ležia bližšie k tejto polohe) a sú na seba kolmé. V prípade, že sa blížia hodnotám 45° a 135° , hovorí sa o šikmých osách. [16]



Obr. č. 8 Horizontálne a vertikálne zakrivenie pri astigmatickej rohovke [16]

Necentrálne zakrivenie

Povrch rohovky sa smerom do periférie splošťuje, čo spôsobuje meniaci sa polomer zakrivenia danej plochy, ktorý závisí nielen na vzdialenosti od vrcholu, ale taktiež aj na meridiáne v danom bode. Polomer zakrivenia môže byť vypočítaný dvomi spôsobmi: sagitálne (axiálne, celkovo) alebo tangenciálne (okamžité, lokálne). Pri sagitálnom (axiálnom) polomere zakrivenia r_s je rohovka nahradená kružnicou, ktorej stred leží na optickej osi, a vypočítava zakrivenie rohovky radiálne v bodoch pozdĺž každého meridiánu. Vyhodnocuje kolmú vzdialenosť od dotyčnice v bode k optickej osi. V periférii sa správnosť a spoľahlivosť týchto meraní znižuje. Tangenciálny polomer zakrivenia r_t sa vzťahuje ku kružnici, ktorá sa ideálne primkne k bodu na povrchu rohovky, a tým najlepšie kopíruje povrch rohovky v danom mieste. Toto zakrivenie vyhodnocuje zakrivenie v každom jednom bode. Vďaka tomu, že sa nevzťahuje k optickej osi ani k celkovému tvaru rohovky, presnosť týchto výsledkov nameraných v periférii je vyššia a lepšie znázorňujú miestne nepravidelnosti na rohovke. [9][23]



Obr. č. 9 Sagitálne (axiálne) zakrivenie, ktoré sa vzťahuje k optickej osi a tangenciálne zakrivenie, ktoré predstavuje skutočné lokálne zakrivenie. [9]

Pre plochu druhého stupňa je možné vypočítať sagitálny r_s a tangenciálny r_t polomer zakrivenia nasledovne:

$$r_s = (r^2 - Qy^2)^{1/2} \quad \text{rov. č. 16}$$

$$r_t = (r^2 - Qy^2)^{3/2} = \frac{r_s^3}{r^2} \quad \text{rov. č. 17}$$

kde r je polomer zakrivenia vo vrchole, Q je koeficient asféricity, y je vzdialenosť od rohovkového vrcholu. [1]

1.3.5 Rohovkový astigmatizmus

Rohovkový astigmatizmus je hlavným zdrojom astigmatizmu v oku. Astigmatizmus je najčastejšie spôsobený tóricitou prednej plochy rohovky. Keďže rozhranie vzduch/slný film predstavuje najväčšiu zmenu v indexe lomu, zmeny polomerov zakrivenia vyvolávajú veľký dioptrický účinok. Na astigmatizme sa podieľajú aj zadná plocha rohovky a očná šošovka (zakrivenie plôch + jej náklon), hoci je jeho hodnota väčšinou malá a je v opačnom smere pôsobenia než rohovkový. Rozdiel indexu lomu medzi zadnou plochou rohovky ($n=1,376$) a komorovým mokom ($n=1,336$) je takmer bezvýznamný. Výpočet pre štandardnú keratometriu ukazuje, že toto rozhranie znižuje mohutnosť rohovky o približne 10 %. V prípade vyššieho astigmatizmu (2,00 - 3,00 D) sa mu pripisuje hodnota cca 0,25 D. [5][20]

Rohovkový astigmatizmus delíme na astigmatizmus podľa a proti pravidlu, popr. šikmých os. Astigmatizmus podľa pravidla je definovaný tak, že meridián s najnižšou refrakčnou silou (najplochší) je bližšie k horizontálnemu meridiánu (okolo 180°). Naopak, ak meridián s najnižšou refrakčnou silou leží vertikálne, hovoríme o astigmatizme proti pravidlu (okolo 90°). Ak hlavné meridiány ležia medzi 30° a 60° alebo medzi 120° a 150° , jedná sa o astigmatizmus šikmých os. [5]

Javalova podmienka

Slúži na odhad celkového astigmatizmu oka z keratometrie. Jej znenie vyzerá nasledovne:

$$\text{celkový Ast} = 1,25 \cdot \text{rohovkový Ast} + 0,50 \text{ D ax } 180^\circ,$$

kde $+0,50 \text{ D ax } 180^\circ$ predstavuje interný astigmatizmus oka (šošovkový). Grosvenor upravil Javalovu podmienku tak, že vyňal zahrnutú koreláciu 1,25 zo vzorca, čím získal trochu presnejšie výsledky. Pri astigmatizme podľa pravidla má celkový astigmatizmus podobnú os ako rohovkový a je o 0,50 D slabší. Pri astigmatizme proti pravidlu má celkový astigmatizmus podobnú os a je o cca 0,50 D silnejší. Ak sa jedná o afakické alebo pseudofakické oči, meranie na keratometri priamo poskytuje hodnotu celkového astigmatizmu, pretože vnútorný astigmatizmus je neprítomný. [20]

2. METÓDY MERAJÚCE TVAROVÉ PARAMETRE ROHOVKY

2.1 História keratometrie a rohovkovej topografie

Prvý nepriamy odhad zakrivenia rohovky vykonal Christopher Scheiner v roku 1619, kedy porovnal odrazený obraz okna na rohovke s odrazeným obrazom sady guľôčok o rôznom priemere. Prvé keratometre boli navrhnuté na výpočet zakrivenia rohovky priamym meraním veľkosti obrazu odrazeného prednou plochou rohovky. Meranie bolo ale narušené aj malými pohybmi oka. Tento problém našiel riešenie so zavedením princípu optického zdvojenia Jessim Ramsdenom v roku 1796. Táto technika eliminovala problém nestabilného obrazu zapríčineného pohybmi oka tým, že opticky vytvorila a zosúladiť dva obrazy objektu. Helmholtz túto techniku zdokonalil zavedením zdvojovacieho zariadenia vytvoreného z dvoch pohyblivých sklenených dosiek. V roku 1881 Javal a Schiötz predstavili keratometer, ktorý bol technicky jednoduchší na používanie než Helmholtzov laboratórny nástroj, a z toho dôvodu sú považovaní za tvorcov a šíriteľov keratometrie v klinickej praxi. Napriek ďalšiemu vývoju a zdokonaľovaniu je väčšina dnešných keratometrov založená na pôvodných princípoch.

Keratometre však uvažujú sférickú rohovku, čo v realite neplatí. Preto bolo potrebné zdokonaľiť vyšetrenie rohovky, nielen pre normálne rohovky, ale aj chirurgicky zmenené či patologické. To viedlo k vývoji keratoskopie a následne komplexnejšej topografie, ktoré vychádzajú z princíпов keratometrie. Ich pôvod je prisudzovaný Davidovi Brewsterovi (1827), ktorý popísal skreslenie obrazu plameňa odrazeného povrchom rohovky. V roku 1880 Antonio Placido zaviedol používanie disku s rovnomerne rozmiestnenými sústrednými bielymi kruhmi na čiernom pozadí, dnes známe ako Placidov disk. Odrazený obraz sa sledoval cez otvor v strede najvnútornejšieho krúžku. Tento vynález umožňoval simultánne pozorovanie väčšej plochy rohovky naraz. V roku 1896 Gullstrand uplatnil fotografiu do keratoskopie. Značky keratoskopu sa odfotili, zmerali a následne sa vypočítala optická lámavosť rohovky vo vertikálnom a horizontálnom meridiáne. S príchodom kontaktných šošoviek a neskôr rohovkovej refrakčnej chirurgie sa význam týchto techník zvýšil. Mandell upravil Bausch and Lomb keratometer pridaním menšej značky pre zvýšenie rozlíšenia nástroja. Vďaka tomu mohol presnejšie zmerať periférne zakrivenie rohovky a určiť polohu jej vrcholu. Soper pridal pohyblivé fixačné zariadenie k mapovaniu centrálnej rohovkovej topografie. Koll vyvinul nové metódy na odvodenie kvantitatívnych dát z prístrojov. Doss v roku 1981 uplatnil matematickú analýzu snímky značiek keratoskopu. Rowsey a Isaac prišli s myšlienkou použiť komparátor na analýzu. Porovnávali oceľové guľôčky o známych polomeroch s výsledným obrazom fotokeratoskopu za účelom určiť silu kruhov v rôznych bodoch. Táto technika nebola bohužiaľ

presná pre asférické povrchy. V roku 1984 Klyce vycibril Dossove algoritmy vďaka čomu bolo na topograf zaznamenaných viac než 8 000 bodov, čím sa odstránili chyby spôsobené ručnou digitalizáciou. Výsledkom tohto procesu bolo trojrozmerné zobrazenie rohovky. Neskôr bola vyvinutá farebná topografická mapa, ktorá mala pomáhať pri klinickej interpretácii údajov. [4]

2.2 Keratometria

Keratometria predstavuje meranie zakrivenia prednej plochy rohovky v centrálnej oblasti o priemere cca 3 - 4 mm. Poskytuje informácie o polomeroch zakrivenia rohovky, orientácii hlavných meridiánov, veľkosti rohovkového astigmatizmu a prípadnej deformácii rohovky. Štandardným prístrojom je keratometer, ktorý môže byť manuálny (mechanický) alebo automatický. Vo svojom princípe využíva rohovku ako konvexné zrkadlo. [27]

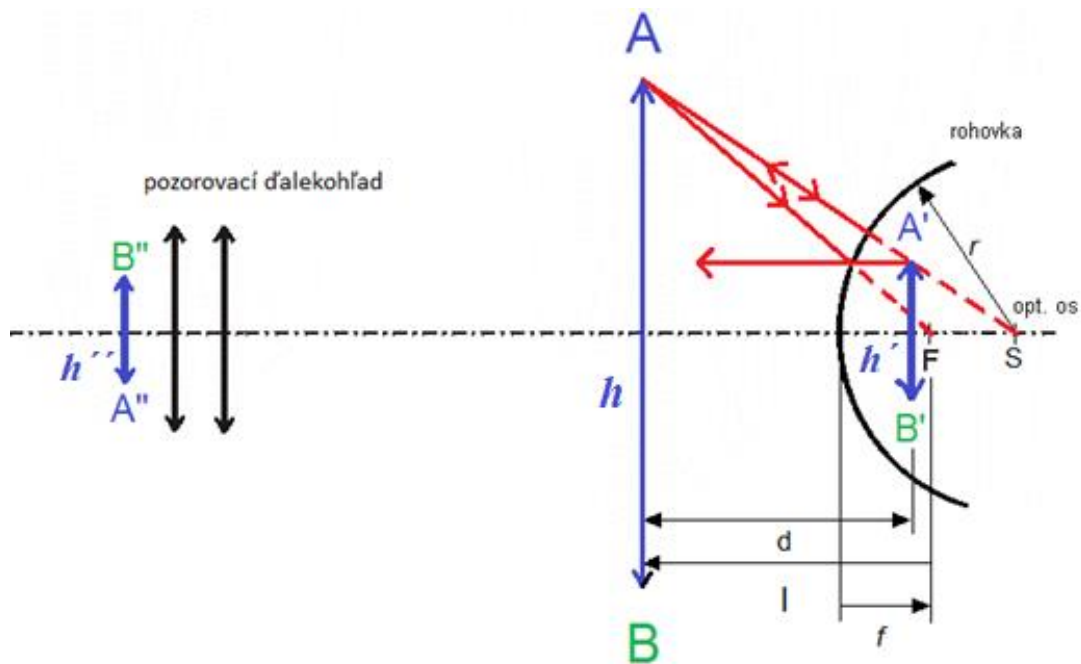
2.2.1 Princíp keratometrie

Funkciou keratometru je zmerať polomer zakrivenia malej plochy centrálnej časti rohovky. Dáta keratometru sú vyjadrené nielen v milimetroch, ale aj v dioptriách, hoci nie sú merané, ale iba vypočítané z hodnôt zakrivenia prednej plochy rohovky (s použitím keratometrického indexu). [5][6]

Princíp keratometrie vychádza z geometrickej optiky sférického zrkadla. Predná plocha rohovky sa správa ako konvexné (vypuklé) zrkadlo a veľkosť vytvoreného obrazu sa líši s jej zakrivením. Čím väčšie zakrivenie rohovky, tým menšia je veľkosť vytvoreného obrazu. Teda je možné z veľkosti obrazu vytvoreného prednou plochou rohovky (1.Purkyňov obraz) vypočítať polomer zakrivenia rohovky. [21]

Z teórie o podobnosti trojuholníkov sa pomer veľkosti predmetu (h) k vzdialenosti značiek od ohniskovej roviny konvexného zrkadla (l) rovná pomeru veľkosti obrazu (h') k ohniskovej vzdialenosti zrkadla ($-f$). Priečne zväčšenie m je vyjadrené tvarom

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{-f}{l}. \quad \text{rov. č. 18}$$



Obr. č. 10 Princíp keratometrie (prevzaté z [23])

Keďže ohnisková vzdialenosť sférického zrkadla (f) je polovicou jeho polomeru zakrivenia, tj. $f = \frac{r}{2}$, rovnica je prepísaná nasledovne:

$$\frac{h'}{h} = \frac{-r}{2l}, \quad \text{rov. č. 19}$$

z čoho vyplýva

$$r = -2 \frac{h'}{h} l. \quad \text{rov. č. 20}$$

Vzdialenosť predmetu AB k ohnisku F označená ako l je záporná a prakticky sa v keratometrii takmer zhoduje so vzdialenosťou predmetu a obrazu d , ktorou je nahradená. K tomuto nahradeniu dochádza preto, lebo vzdialenosť l je veľká, keďže predmetový bod je uložený v nekonečne, preto sa v prípade zrkadla predpokladá, že obraz $A'B'$ je veľmi malý a leží v ohnisku F . Takto upravená rovnica sa nazýva *keratometrickou rovnicou*

$$r = 2 \frac{h'}{h} d \quad \text{rov. č. 21}$$

alebo inak napísané

$$r = 2md. \quad \text{rov. č. 22}$$

Pri nahradení vzdialenosti $-l$ vzdialenosťou d je veľkosť vzniknutej odchýlky menšia než 0,1 %, čo sa prejaví v zmene polomeru o menej než 0,01 mm.

Pri sledovaní predmetu AB pozorovacím ďalekohľadom sa po prechode objektívom veľkosť obrazu h' vytvoreného odrazom na prednej ploche rohovky (ktorý slúži ako predmet pre pozorovací ďalekohľad) zmení na obraz h'' . Ak je predmet (značky keratometru) zabudovaný v pozorovacom ďalekohľade vo vzdialenosti d , môžeme túto vzdialenosť považovať za konštantnú (vďaka veľmi malej hĺbke ostrosti). V prípade, že pozorovací ďalekohľad nie je v správnej vzdialenosti od obrazu predmetu, dôjde k rozmazaniu tohto obrazu. Akonáhle je obraz zaostrený pohybom pozorovacieho ďalekohľadu a keratometer je v správnej vzdialenosti od oka, je možné určiť veľkosť obrazu h'' . Následne je možné zo vzťahu pričného zväčšenia získať veľkosť obrazu h' , ktorá po dosadení do keratometrickej rovnice určí polomer zakrivenia rohovky

$$r \approx \text{konšt} \frac{h''}{h'} \quad \text{rov. č. 23}$$

[21][22][23]

2.2.2 Keratometrický index

Meranie polomeru zakrivenia rohovky je náročné a keratometer dokáže zmerať len prednú plochu rohovky. Preto je dôležité zadný polomer zakrivenia odhadnúť v závislosti na prednom polomere (vid' rov. č. 12).

Pri prepočte polomeru zakrivenia na dioptrickú hodnotu sa bežne používa keratometrický index lomu $n_k = 1,3375$ namiesto indexu lomu rohovky ($n_r = 1,376$). Tento index lomu zahŕňa zápornú hodnotu vytvorenú zadnou plochou rohovky a uvažuje rohovku ako jednu lomivú plochu. Zjednodušený prevod polomeru zakrivenia na dioptrie je daný vzorcom $\varphi = \frac{337,5}{r}$, pričom r je v milimetroch. (napr. $r = 7,5$ mm odpovedá $\varphi = 45$ D). Nie každé zariadenie však využíva štandardný keratometrický index. Napríklad Haag-Streit prístroj používa index 1,336 (ktorý je zhodný s indexom lomu slzného filmu), Hoya keratometer používa index 1,338, keratometre od Zeissu a Topconu zas 1,332. Z toho dôvodu sa výsledky konverzie polomeru na dioptrie môžu kvôli nerovnakého indexu lomu líšiť a poskytovať nesúrodé informácie o rohovke. Preto sa odporúča v praxi na hodnotenie používať polomer zakrivenia. [2]**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**

2.2.3 Mechanický keratometer

Štandardný prístroj slúžiaci k meraniu zakrivenia prednej plochy rohovky je keratometer, niekedy nazývaný aj ako oftalmometer, čo Emsley považuje za nesprávne. Podľa jeho názoru

by sa mali prístroje výslovne určené k meraniu zakrivenia a astigmatizmu rohovky označovať ako keratometre (merače rohovky), a nie ako oftalmometre, ktoré indikujú celkové vyšetrenie refrakčných plôch oka.

Keratometer meria zakrivenie rohovky založené na dioptrických hodnotách získaných zo štyroch bodov asi 3 až 4 mm od seba na povrchu rohovky.

Kvôli fyziologickému trasu oka bolo priam nemožné presne určiť veľkosť sledovaného obrazu h'' na stupnici. Tento problém je riešiteľný dvomi spôsobmi, a to buď statickým záznamom obrazov (fotografiou) alebo zavedením zdvojovacej sústavy, ktorý je dosiahnutý použitím napríklad dvoch pohyblivých sklenených dosiek o známej hrúbke a indexe lomu, Wollastonovým hranolom alebo dvojicou hranolov. Úlohou vyšetrujúceho je uviesť zdvojené obrazy značiek do vzájomnej koincidencie (aby sa tieto obrazy práve dotýkali). Existujú dva druhy keratometrov:

- s konštantným zdvojením a variabilnou veľkosťou značiek (napr. Javal-Schiötz)
- s konštantnou veľkosťou značiek a variabilným zdvojením (napr. Bausch&Lomb).

Následne je zo známej veľkosti predmetu, obrazu a vzdialenosti predmetu od povrchu rohovky vypočítaný polomer zakrivenia prednej plochy rohovky. [4][5][16][21][22]

Ďalej sa keratometre delia na jednopolohové a dvojplohové. Jednopolohový keratometer typu Bausch&Lomb meria hlavné polomery zakrivenia rohovky súčasne, bez nutnosti otáčať nástroj do druhej kolmej polohy. Avšak v prípade vysokého astigmatizmu je nemožné zaostriť oba meridiány naraz a je potrebné pri druhom meraní preosťriť na druhú značku. Dvojplohový keratometer typu Haag-Streit (Javal-Schiötz) meria každý meridián zvlášť. Po tom, ako sa zmeria jeden hlavný meridián, prístroj sa otočí o 90° a meranie sa zopakuje. Nezameniteľnou výhodou tohto typu keratometru je odhalenie nepravidelného astigmatizmu, pri ktorom nie sú hlavné meridiány na seba kolmé. Avšak aj jednopolohový keratometer sa môže správať ako dvojplohový a to v prípade, že sa pri meraní zameriava len na spodné značky, ktoré sa snažia zarovnať a po nájdení jedného meridiánu sa hlavica pootočí o 90° a meranie pokračuje rovnakým spôsobom. Popis jednotlivých mechanických keratometrov je v nasledujúcej kapitole.

Značky použité u keratometrov môžu byť troch typov: kruhové značky (Bausch&Lomb), krížové značky (Zeiss) a obdĺžnikové značky (Javal-Schiötz). Vo všetkých prípadoch existujú deliace línie značiek, pri ktorých musí dôjsť k zarovnaniu, aby sa určili osi hlavných meridiánov.[22][26]



Obr. č. 11 Značky keratometrov a ich koincidencie [26]

2.2.4 Javal-Schiötzov keratometer

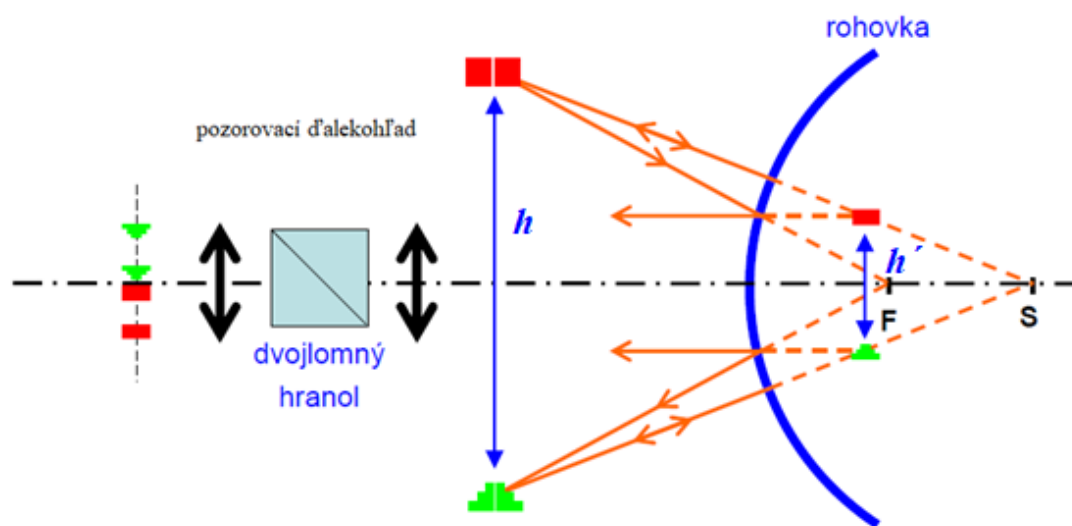
Javal-Schiötzov keratometer je mechanický dvojpohový keratometer s variabilnou veľkosťou značiek, konštantnou veľkosťou obrazu h'' (resp. h') a konštantným zdvojením obrazu. Hlavným prvkom keratometru sú osvetlené značky, pozorovací ďalekohľad zväčšujúci odrazený obraz a zdvojovacie prizma, ktoré umožňuje presné meranie veľkosti neustále pohybujúceho sa obrazu značiek. [4][22]



Obr. č. 12 Javal-Schiötzov keratometer [46]

Testové značky majú tvar červeného obdĺžnika a zelenej stupňovitej pyramídy s deliacimi líniami v polovici ich veľkosti. Pri ich prekrytí sa farba zmení na žltú, čo napomáha vyšetrujúcemu pri správnom nastavení prístroja. Značky sú pohyblivé a sú umiestnené na oblúkovitom otáčacom ramene prístroja, ktoré je približne koncentrické s rohovkou, vo vzdialenosti cca 25 cm od rohovky. Značky predstavujú krajné body predmetu h zobrazeného na rohovke. Vyšetrujúci vidí v pozorovacom ďalekohľade zdvojené značky, ktoré musí uviesť do vzájomnej koincidencie. Zdvojenie obrazov je vytvorené Wollastonovým dvojlomným hranolom. Tento typ hranolu sa používa ako polarizačný hranol, ktorý rozdelí lúče do dvoch zväzkov – riadneho a mimoriadneho, ktoré sú polarizované v navzájom kolmých

rovinách, a ktoré rozdeja obrazy značiek. Pri keratometrii sa však tento polarizačný efekt priamo nevyužíva. Podstatné však je, že oba zväzky spolu zvierajú konštantný uhol cca 1° , čo odpovedá vzdialenosti obrazov. Javal-Schiötzov keratometer je závislý na vzdialenosti prístroja voči meranej rohovke, preto je dôležité, aby počas celého merania boli obrazy značiek zaostrené. Meranie sa uskutočňuje v centrálnej oblasti rohovky o priemere cca 3,6 - 4,2 mm a zahŕňa informácie o polomere zakrivenia rohovky, lámavosti daného meridiánu a uhle meraného smeru. V prípade rohovkového astigmatizmu sa značky môžu prekrývať alebo vzdďaľovať od seba. Každý stupienok pyramídy odpovedá 1 D astigmatizmu, a tak je možné orientačne určiť jeho veľkosť počas merania. Presne sa určuje ako rozdiel optických mohutností oboch meridiánov. [16][21][22][27]



Obr. č. 13 Princíp Javal-Schiötzovho keratometru [16]

Medzi ďalšie *mechanické keratometre* patrí napr. Helmholtzov keratometer, ktorý bol prvým skonštruovaným keratometrom so zdvojovacím systémom. V tomto prípade sa jednalo o použitie dvoch planparalelných pohyblivých dosiek. Krahnov keratometer využíva zdokonalenejší princíp zdvojovania s planparalelnými doštičkami, pričom pracuje s rovnakým typom značiek ako Javal-Schiötzov prístroj s tým rozdielom, že sú pevne umiestnené. Hartingerov keratometer, ako aj tie predošlé, patrí do skupiny keratometrov s konštantnou veľkosťou značiek a variabilnou zdvojovacou sústavou - dvoch diasporametrov (otočný dvojhranol). Suttclifov keratometer je jednoplošný keratometer využívajúci hranoly s bázami v horizontálnom a vertikálnom na seba kolmom smere, čo má za účel rozdvojenie značiek v oboch pozíciách. Littmanov keratometer je považovaný za najdokonalejší keratometer a využíva energetické delenie lúčov za pomoci dvoch hranolových sústav. [27]

2.2.5 Automatický keratometer

Automatické keratometre poskytujú zvyčajne presnejšie výsledky oproti manuálnym keratometrom. Nielenže merajú v menšom priemere centrálnej rohovky (cca 3,0 mm, závisí od prístroja), ale taktiež poskytujú informácie o paracentrálnej oblasti rohovky. Obsahujú LED diódy s vlnovými dĺžkami, ktoré sa blížia k infračervenému žiareniu. Tieto diódy slúžia ako testovacie značky, pričom sú umiestnené okolo osi prístroja a merajú polomer zakrivenia a veľkosť astigmatizmu. Pracujú na princípe keratometrie, ktorý je popísaný v kap. 2.2.1. Vďaka CCD kamere, ktorá zaznamenáva odraz značiek a vyhodnocuje namerané výsledky, sa presnosť merania zvyšuje, keďže z vyhodnocovania merania je vylúčený operátor. Autokeratometry sú dostupné buď ako samostatné prístroje, alebo už častejšie v kombinácii s inými prístrojmi, ako napríklad autorefraktometer, tonometer, aberometer, a i. [29][30]



Obr. č. 14 Automatický keratometer [47]

2.2.6 Limity keratometrie

Keratometria sa stretáva s určitými obmedzeniami a predpokladmi:

- Údaje z keratometru sú získané len z centrálnej časti rohovky (4 body merané na prstenci hrubom 0,1 mm o polomere 3 – 4 mm). Nie sú poskytnuté informácie o charaktere rohovky vo vnútri alebo mimo tohto meraného prstenca.

- Keratometrický vzorec vychádza z geometrickej optiky sférických plôch (považuje rohovku za symetricky sférickú alebo sférocyklindrickú). Rohovka je však definovaná tvarom pretiahnutej elipsy, teda zakrivenie vo vrchole je mierne strmšie než nameraná hodnota, a to o 0,05 mm (0,25 D), pretože sa priamo nemeria polomer zakrivenia vrcholu, ale malej oblasti okolo neho a rohovka sa smerom z centra do periférie splošťuje.

- Keratometria využíva paraxiálnu optiku na výpočet povrchovej sily rohovky. Zatiaľ čo pri kontaktných šošovkách a zhodnotení rohovkového astigmatizmu to stačí, pri posúdení periférneho zakrivenia už nie.

- Keratometre predpokladajú, že vrchol rohovky (bod s najväčším zakrivením), zrková os a os prístroja splývajú. Prístroj však zvyčajne nie je centrován ani na zrkovú os, ani na vrchol rohovky.

- Vzorec nahradzuje vzdialenosť predmetu k ohnisku konvexného zrkadla (l) vzdialenosťou k obrazu (d), čo môže viesť ku chybám spôsobených nekalibrovaným prístrojom alebo zapojenou akomodáciou vyšetrujúceho.

- Index lomu sa u rôznych keratometrov môže líšiť, čo môže mať za následok odlišnosť optických mohutností pri porovnaní. Preto sa odporúča používať na vyhodnocovanie polomer zakrivenia, ktorý zosúladí výsledky meraní.

- Jednopolohové keratometre uvažujú pravidelný astigmatizmus, pri ktorom sú oba meridiány o 90° od seba vzdialené. Preto nemusia odhaliť nepravidelný astigmatizmus.

Napriek týmto odhadom a možným chybám, je keratometer hodnotný klinický prístroj za predpokladu, že sú merania obmedzené na paraxiálny priestor a prístroj je správne nastavený. [5][7]

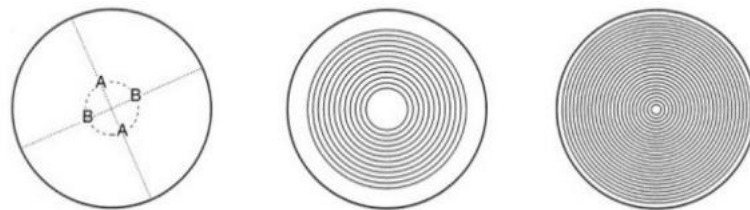
2.3 Keratioskopia

Prvým keratoskopom bol Placidov disk (obr. č. 15). Jeho základom je guľatý terč pozostávajúci z rovnomerne rozmiestnených striedajúcich sa bielych a čiernych kruhov s otvorom uprostred určeným k pozorovaniu rohovky. Najčastejšie je tento otvor doplnený pozorovacou lupou k uľahčeniu merania a eliminácii akomodácie vyšetrujúcej osoby. Tieto kruhy sú premietnuté na rohovku a sleduje sa ich odraz na rohovke. Podľa pravidelnosti obrazu sa vyhodnocuje rohovka a jej prípadné deformácie. Táto metóda však nedokáže poskytnúť podrobné kvantifikovateľné vyšetrenie rohovky. Z toho dôvodu sa ku keratoskopu za účelom zhodnotenia odrazeného obrazu pripojil fotoaparát (fotokeratioskopia) alebo kamera (videokeratioskopia, inak nazývaná rohovková topografia). [9][27]



Obr. č. 15 Placidov disk [48]

Fotokeratostopia poskytuje kvalitatívnu analýzu väčšej plochy rohovky než pri keratometrii (cca 70 % v porovnaní s 6 % plochy u keratometrie) a detekuje povrchové nerovnosti skreslením značiek. Obraz kruhov na rohovke je odfotený a následne zanalyzovaný. Zakrivenie rohovky je dané porovnaním vzdialenosti medzi odrazenými kruhmi na rohovke s tými na prístroji a ich tvarom. V oblasti strmšej rohovky sú obrazy kruhov menšie, čiže kruhy vyzerajú byť užšie a bližšie k sebe. Pri prítomnosti pravidelného astigmatizmu majú značky eliptický tvar s kratšou osou v smere strmšieho meridiánu. Pri nepravidelnom astigmatizme dochádza k neeliptickej deformácii kruhov. Avšak pre vytvorenie skresleného obrazu musí byť rohovka sama skreslená. Ak je deformácia malá, hoci môže mať negatívny vplyv na videnie, je možné, že ju táto metóda neodhalí. Prítomný astigmatizmus, ktorý sa prejaví na skreslení pri keratoskopii, musí mať aspoň 3 D. Výhodou fotokeratostopie je zobjektívnenie merania na rozdiel od keratometrie. Nevýhodou je, že prístroj nemeria v centrálnej časti rohovky a nie je veľmi citlivý na zachytenie určitých odchýlok. [9][27][28][39]



Obr. č. 16 Znáozornenie centrálnej zóny rohovky pokrytej značkami keratometru, keratoskopu a topografu [9]

2.4 Rohovková topografia

Je najdokonalejšou metódou merania parametrov rohovky, využívajúca počítačové zariadenia. Metódy merajúce rohovkovú topografiu sa delia do dvoch kategórií, a to na reflexné (odrazové) a projekčné metódy. [31]

2.4.1 Reflexné metódy

Reflexné metódy rohovkovej topografie sú založené na odraze značky od slzného filmu na povrchu rohovky, ktorý sa správa ako konvexné zrkadlo. Po premietnutí osvetlených Placidových kruhov na povrch rohovky systém zachytí odrazené svetlo video snímkou za pomoci CCD kamery a prostredníctvom jeho digitalizácie a následnej počítačovej analýzy poskytuje podrobné kvantitatívne zhodnotenie tvaru rohovky. Umiestnenie Placidových kruhov na hlavicu prístroja v tvare poglobule vedie k spresneniu merania vďaka zabezpečeniu približne rovnamej vzdialenosti testovacích značiek od rohovky. Väčšina systémov sníma 256 – 360

bodov okolo obvodu každého kruhu (čo teoreticky odpovedá 6 000 dátovým bodom), ale plochu medzi jednotlivými kruhmi vynecháva. Veľkou výhodou týchto prístrojov je ich vyšetovaná oblasť rohovky, ktorá zahŕňa aj centrálnu časť, avšak v úplnom centre (1,8–2 mm) nemerajú, ale túto oblasť dopočítavajú. Neposkytujú žiadne informácie o zadnom polomere zakrivenia a rozsah meraní je limitovaný na 9 mm rohovky. Vyžadujú dobrú kvalitu slzného filmu, preto sa odporúča, aby vyšetovaný tesne pred zachytením snímky žmurkol. Zlá kvalita slzného filmu môže ovplyvniť správnosť výsledkov. Pri veľkom množstve slz pri spodnom menisku majú sklon merať strmšie hodnoty zakrivenia, pri stenčovaní slzného filmu splošťujú povrch.

Topografy používajú dva typy Placidových diskov:

- malý terč (majúci tvaru kužeľu), ktorý je navrhnutý na krátku pracovnú vzdialenosť, premieta na rohovku väčší počet kruhov a má väčšie pokrytie rohovky
- veľký terč (majúci tvar disku), ktorý meria na väčšiu pracovnú vzdialenosť a zobrazuje menej kruhov na rohovke, pričom je závislý na okolitých vplyvoch a z dôsledku interakcie tieňu obočia a nosa pri meraní môže dôjsť k zníženiu dát pri vyhodnocovaní.

Tieto systémy poskytujú opakované merania u zdravých a keratokonických očí, avšak u zjazvených rohoviek iba limitované údaje. Patria sem napríklad Keratograf (Oculus), E300 (Medmont), Atlas (Zeiss). Výstupy merania môžu byť prezentované číselne, graficky alebo vo forme farebných máp. Zachytávajú zakrivenie (tangenciálne a sagitálne) a optickú mohutnosť prednej plochy rohovky, 3D zobrazenie povrchu rohovky, grafické znázornenie Fourierovej a Zernikeho analýzy, simuláciu aplikácie prevažne tvrdých kontaktných šošoviek a i. [23][31][32][33]**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**



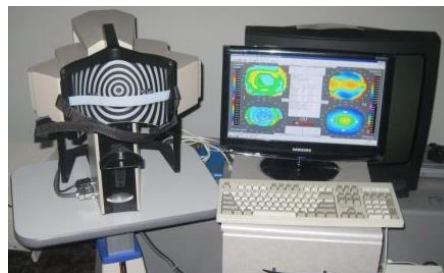
Obr. č. 17 Topograf s malým a veľkým Placidovým terčom [49][50]

2.4.2 Projekčné metódy

Pri projekčných metódach dochádza k vytvoreniu obrazu na rohovke za pomoci snímania svetelnou štrbinou, mriežky premietnutej na rohovku, Moiréových interferenčných prúžkov alebo laserovej interferometrie. Na povrchu slzného filmu je obraz vytvorený rovnakým spôsobom, ako je snímka premietnutá na obrazovku. Veľkou výhodou tohto typu topografie je meranie nielen predného, ale aj zadného zakrivenia rohovky. Na rozdiel od reflexných metód, ktoré merajú sklon povrchu, tieto systémy priamo merajú výšku rohovky, z ktorej je následne priamo určený sklon povrchu a polomer zakrivenia. Vďaka tomu sú tieto merania presnejšie ako pri vyššie spomínanej metóde a udávajú skutočný tvar rohovky. Navyše poskytujú informácie o celej ploche rohovky vrátane úplného stredy a limbusu. Táto metóda sa nespolieha na kvalitu odrazu od rohovky, a preto sú prístroje schopné zmerať aj deformované či nezrkadliace sa povrchy. Celkové meranie je menej závislé na operátorovi a dosahuje vyššie rozlíšenie a presnosť. [9][31]

1) *Snímanie svetelnou štrbinou* kombinuje projekciu svetelnej štrbiny (rovnaký princíp ako štrbinová lampa) s odrazom Placidových kruhov (keratopický princíp) s cieľom zmerať predné a zadné zakrivenie rohovky. S myšlienkou zdokonaľiť meranie aj u zakalených rohoviek (napr. pri opuchoch a jazvách rohoviek), kedy kvalita zobrazovaného svetla môže spôsobiť chybu v analýze, bol k systému pridaný Placidov disk.

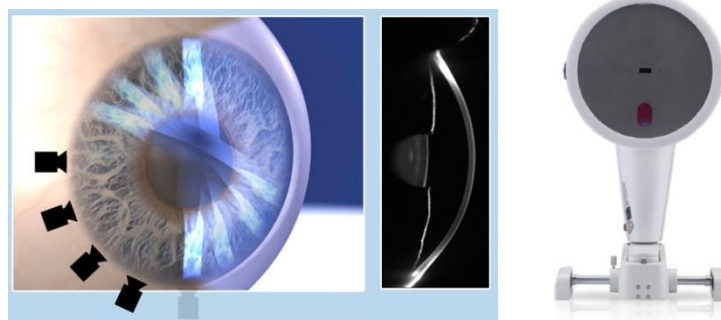
Predstaviteľom tejto techniky je Orbscan II (Bausch&Lomb). Počas snímania obrazu sa na rohovku premietne 40 štrbinových lúčov pod uhlom 45° (20 sprava a 20 zľava). Každý rez sníma 240 bodov, takže celkový počet analyzovaných bodov je 9 600. Meranie trvá menej než 2 s. Na základe porovnania výsledného tvaru s referenčnou sférou prístroj ponúkne výsledky vo forme farebných máp, kde teplé farby (žltá, oranžová, červená) znázorňujú body nad touto vzťažnou sférou, studené farby (modrá, fialová) zase pod. Zelená farba je referenčná. Výsledný 3D obraz poskytuje informácie o zakrivení a elevácii prednej aj zadnej plochy a pachymetriu (meranie hrúbky rohovky) celého povrchu rohovky. [39]



Obr. č. 18 Orbscan II a výsledky merania [51]

2) *Scheimpflugovo zobrazenie* je alternatívna metóda merania rohovkového zakrivenia. Jeho princíp spočíva v tom, že predmetová rovina, rovina optickej šošovky a obrazová rovina nie sú navzájom rovnobežné a zvierajú medzi sebou ostrý uhol. Zaostrý obraz sa dosiahne vtedy, keď sa tieto roviny pretnú v jednom priesečníku. Výhodou tohto zobrazenia je veľká hĺbka ostrosti. Po osvetlení rohovky svetelnou štrbinou, ktorá spôsobí spätný rozptyl svetla, sa po zachytení kamerou vytvorí dokonale ostrý obraz. Na základe ďalších snímaných obrazov sa vytvorí trojrozmerný model celej prednej časti oka, a to od prednej plochy šošovky po prednú plochu rohovky. Zachytené obrazy sú matematicky analyzované, aby poskytli informácie o výške, zakrivení a pachymetrii rohovky. [38]

Jedným z prístrojov, ktoré sú založené na tomto princípe, je Pentacam (Oculus). Je to rotujúca Scheimpflugova kamera, využívajúca LED diódy vyžarujúce modré svetlo o vlnovej dĺžke 475 nm. Celý proces merania, pri ktorom kamera rotuje v rozsahu 180° a zaznamená 50 snímok, trvá 2 s. Následne vytvorí z viac než 138 000 analyzovaných bodov rozlíšenia trojdimenzionálny model predného segmentu oka. Prístroj obsahuje aj druhú (statickú) kameru detekujúcu pohyby oka, ktoré do určitej miery koriguje software. Vyšetrenie nie je závislé na kvalite slzného filmu. Princíp rotačného merania zabraňuje chybám merania, ktoré by vyplynuli z horizontálneho snímania (ako napríklad tieň vytvorené časťami tváre). Vo výsledku Pentacam poskytuje analýzu topografie prednej a zadnej plochy rohovky, eleváciu rohovky, celoplošnú pachymetriu, zhodnotenie hĺbky a tvaru prednej komory, informácie o komorovom uhle, denzitometriu šošovky, realizuje Fourierovu a Zernikeho analýzu a i. vo forme farebných máp, snímok alebo v číselnom vyhodnotení.



Obr. č. 19 Rotujúca kamera okolo oka a prístroj Pentacam [52][53]

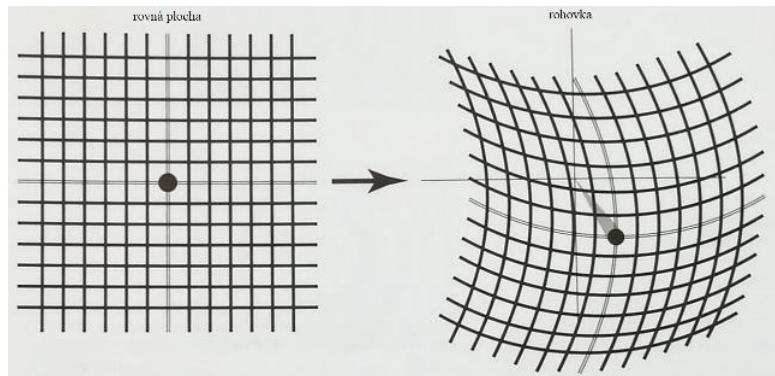
Túto techniku tiež využívajú prístroje Galilei (Ziemer) a TMS-5 (Tomey). Zjednodušenou verziou je Pachycam (Oculus). Je to prenosný, bezkontaktný pachymeter so vstavaným keratometrom, ktorý sa pripevňuje na štrbinovú lampu. Pracuje na princípe Scheimpflugovho zobrazenia, ale na rozdiel od Pentacamu sníma iba v jednom reze, a to v horizontálnom 4 mm

optickom reze. Keratometrické hodnoty meria v centrálnej oblasti rohovky v 30°. [13][39][41][44]



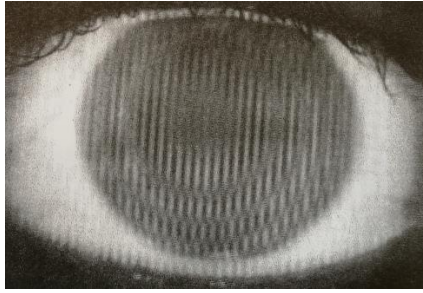
Obr. č. 20 Pachycam [54]

3) Pri *rasterstereografii* (alebo rasterfotogrammetrii) sa premieta mriežka na fluoresceinom zafarbený povrch rohovky (slzný film) pod známym uhlom. Z následného posunu prvkov v rámci obrazu mriežky pri premetnutí na povrch rohovky a porovnaní s ich známymi pozíciami pri premetnutí na rovnú plochu je vypočítaná výška rohovky. [9]



Obr. č. 21 Schematické znázornenie merania výšky rohovky rasterstereografiou [9]

4) Princíp *Moiré interferencie* je založený na premetnutí dvoch paralelných sínusových mriežok na slzný film v rýchlom slede, ktoré sa prekryjú a vytvárajú prstence v tvare kruhu viditeľné na povrchu rohovky. Analýzou intenzity mriežky v takto vytvorenom obraze je skutočný tvar rohovky rekonštruovaný na základe z viac než 200 000 meracích bodov. [9]



Obr. č. 22 Moiré interferencia [9]

5) Pri *laserovej interferometrii* sa interferenciou dvoch koherentných vlnoplôch zaznamenáva interferenčný obrazec na povrchu rohovky. Obe vlnoplochy môžu byť generované buď svetlom zo samostatných osvetľovacích a referenčných laserov, alebo z jedného lasera, pri ktorom je svetlo rozdelené rozdeľovačom lúčov. Výška rohovky je vypočítaná z analýzy interferenčného obrazca, pričom hustota vytvorených dátových bodov je určená vlnovou dĺžkou svetla. [9]



Obr. č. 23 Holografický interferogram rohovky so štyrmi hlbokými radiálnymi rezmi [9]

Posledné tri prístupy sa v klinickej praxi neosvedčili kvôli svojej náročnosti, či už použitia alebo vyhodnocovania výsledkov. [9]

Nespornou výhodou projekčných metód oproti reflexným je, že dokážu zmerať nielen predné, ale aj zadné zakrivenie rohovky, poskytujú vyššie rozlíšenie celej rohovky vrátane jej centrálnej oblasti a pachymetriu po celej jej ploche. Súčasne dokážu zmerať aj nepravidelné rohovky (napr. keratokonické) a v prípade Pentacamu detekovať aberácie vyšších radov. [45]

Štúdia [13] prezentovala, že topografia pracujúca na princípe Scheimpflugovho zobrazenia poskytuje potrebné údaje o elevácii prednej a zadnej plochy rohovky a pachymetrii k rozpoznaniu subklinického (asymptomatického) keratokonu, ktorý topografia založená na premietnutí Placidových kruhov neodhalila. Ďalšia štúdia [39] preukázala, že prístroje založené na princípe Placidových kruhov, snímania svetelnou štrbinou a Scheimpflugovho zobrazenia by sa kvôli odlišnostiam vo výsledkoch v klinickej praxi nemali zamieňať.

2.4.3 Využitie rohovkovej topografie a keratometrie

Keratometria a rohovková topografia sú najpoužívanejšie techniky pri aplikácii kontaktných šošoviek. Najväčší význam majú pri výbere tvrdých šošoviek (pri určení zakrivenia RGP). Napomáhajú pri orientačnom výbere zakrivenia u mäkkých šošoviek, avšak pri nich majú menší význam, keďže neležia len na rohovke, ale pokrývajú celý rohovkový a limbálny povrch, a tým hodnoty z keratometrie majú malý vplyv na výber správneho zakrivenia. Navyše, ak sa nejedná o individuálne mäkké šošovky, výrobcovia ponúkajú obmedzené množstvo polomerov zakrivenia. Taktiež sa tieto metódy môžu použiť pri kontrole prednej plochy kontaktnej šošovky, keď je usadená na oku, kde sa vyhodnocuje jej posadenie a ako sa ohýba. Okrem toho môžu napomôcť pri odhalení povrchových usadenín, nepravidelností alebo nedostatočného zvlhčovania povrchu kontaktnej šošovky. Ďalšie využitie majú pri meraní zakrivenia RGP, i keď lepším prístrojom je hodinkový sférometer (radiuscope). Slúžia k monitorovaniu dlhodobého vplyvu RGP na rohovku, pričom sa sleduje zmena v jej zakrivení a následne sa prehodnocuje použitá šošovka a jej nutná výmena. U ľudí s vysokým astigmatizmom alebo u tých, ktorí sú nároční na zmeranie refrakcie (nie je možné určiť hodnoty pomocou skiaskopie, napríklad pri skalených očných médiách alebo pri veľmi malých zreniciach), sú hodnoty z merania výborným pomocníkom pri subjektívnej refrakcii. Tieto metódy sa taktiež využívajú pri výpočte refrakčnej sily vnútroočnej šošovky pri operácii katarakty. V neposlednej rade slúžia pri zisťovaní nerovností na rohovke a pri diagnostike a monitorovaní chorôb a rohovkových operácií. [2][5][22]

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

3. CIELE PRÁCE

Cieľom diplomovej práce bolo zistiť, či sú výsledky z jednotlivých prístrojov pre meranie tvarových parametrov rohovky v klinickej praxi zameniteľné a spoľahlivé, a ktorý z použitých prístrojov podáva najrelevantnejšie výsledky pri opakovaných meraniach. Pre samotnú potrebu diplomovej práce boli vybrané 4 typy prístrojov a to topograf, Javalov keratometer, Pachycam a autorefrakto-kerato-tonometer. Následne sa dosiahnuté výsledky porovnali s topografom, ktorý bol pre účely tejto práce vybraný ako referenčný prístroj z dôvodu predpokladu najpresnejších výsledkov.

Na základe nižšie popísanej metodiky merania bolo predpokladané, že výsledky z objektívnych prístrojov budú porovnateľné. Ďalším predpokladom bolo, že opakovateľnosť meraní u Javalovho keratometru bude nižšia v porovnaní s ostatnými použitými prístrojmi.

3.1 Subjekty a metodika

3.1.1 Súbor účastníkov

Štúdie sa zúčastnilo 40 figurantov, z toho 31 žien a 9 chlapov. Priemerný vek figurantov bol 27 ± 11 v rozsahu od 19 do 60 rokov. Podmienkou účasti na experimente bola zdravá rohovka bez zranení a operačných zákrokov, slzný film v norme a v prípade nositeľov kontaktných šošoviek bolo vyžadované niekoľko hodinové vysadenie kontaktnej šošovky z oka. Účasť všetkých figurantov bola dobrovoľná, čo potvrdili svojím podpisom v informovanom súhlase.

3.1.2 Metodika merania

Meranie prebiehalo v laboratóriách na katedre optiky Prírodovedeckej fakulty Univerzity Palackého v Olomouci. Dĺžka celého merania bola asi 45 minút. Výskum prebiehal na štyroch prístrojoch, pričom na každom prístroji sa meranie uskutočnilo dvakrát. Jednalo sa o topograf typu Keratograf 3 značky Oculus, Javalov keratometer značky Oculus, Pachycam 70750 značky Oculus a autorefrakto-kerato-tonometer RKT 7700 značky Nidek (ďalej v texte označený ako ARKT). Všetky merania, ktoré boli vykonávané jediným operátorom, sa uskutočnili v jeden deň. U figurantov bolo zmerané buď jedno alebo obe oči. Meranie jedného oka vyplývalo z časových dôvodov a preferencií figurantov. U 10 účastníkov bolo vyhodnotené jedno oko, u zvyšných 30 sa skúmali obe oči. Celkový počet očí, na ktorom je založený tento výskum, je 70. Sledované parametre pre účely tejto práce boli polomery zakrivenia rohovky – horizontálny

r_h (bližšie k 0°) a vertikálny r_v (bližšie k 90°), uhol α príslušný k daným polomerom (ďalej v práci sa pracovalo s uhlom vertikálneho polomeru) a veľkosťou rohovkového astigmatizmu (Ast). Pred každým meraním bol figurant oboznámený s postupom vyšetrenia a bol posadený postupne ku všetkým prístrojom. U každého prístroja nasledovalo nastavenie stoličky a vyšetrovacieho stolu s prístrojom tak, aby sa figurantovi pohodlne, resp. v rámci možností pohodlne sedelo. Stabilitu hlavy zaisťovala hlavová opierka, kde si figurant oprel bradu a čelo. V priebehu celého vyšetrenia na jednotlivých prístrojoch sledoval figurant fixačnú značku (svetelný bod alebo obrázok balónu v prípade ARKT). Počas všetkých meraní mohol figurant voľne žmurkať, v prípade objektívnych prístrojov bol tesne pred spustením merania vyzvaný k tomu, aby otvoril oko a chvíľku nežmurkal. Meranie sa vždy začalo na Javalovom keratometri, a to z dôvodu zachovania objektivity výsledkov, keďže sa jedná o subjektívnu metódu merania optických parametrov rohovky. Vyšetrenie prebiehalo v zatemnenej miestnosti. Princíp prístroja je popísaný v kap. 2.2.4. Pred každým meraním bol okulár Javalovho keratometru nastavený na oko vyšetrujúceho, tj. autora práce, s využitím skúšobnej rohovky o optickej mohutnosti 50 D. Počas celého vyšetrenia sledoval figurant svetelný bod v ďalekohľade keratometru. Po zaznamenaní hodnôt z merania sa figurant presunul k stanovištiu s Pachycamom, ktorý bol pripojený na štrbinovú lampu. Ako prvé boli vyplnené údaje o figurantovi do databázy softwarového systému. Automatické meranie sa spustilo po nacentrovaní prístroja do správnej polohy. Toto meranie taktiež prebiehalo v zatemnenej miestnosti. Následne sa figurant presunul naspäť ku vyšetrovaciemu miestu s Javalovým keratometrom a meranie sa zopakovalo. Po presunutí do druhého laboratória vyšetrenie pokračovalo na topografe a ARKT. Pred začiatkom merania na topografe boli základné údaje figuranta uložené do databázy systému. Po správnej centrácii prístroja sa začalo automatické meranie, ktorého výstupom boli medzi inými základné topografické údaje, kamerový snímok rohovky s premietnutými Placidovými kruhmi, farebná mapa topografie rohovky a i. Požadovaná minimálna percentuálna úspešnosť snímania bola stanovená na 65%. V prípade, že táto stanovená hranica snímania nebola dosiahnutá, meranie bolo opakované. Následne sa figurant presunul k ARKT, kde po správnom nastavení polohy prístroja voči oku došlo k odmeraniu očí a vyšetrenie sa vrátilo naspäť k topografu, kde sa znovu celý proces opakoval.

3.2 Spôsob štatistického vyhodnotenia dát

Opakovateľnosť dát bola hodnotená Bland-Altmanovou (B-A) metódou realizovanou v programe MS Excel. V rámci tejto metódy bola sledovaná závislosť rozdielu dát z opakovaných meraní na ich priemernej hodnote. Pre každý prístroj bolo samostatne

hodnotené meranie horizontálneho i vertikálneho polomeru zakrivenia, uhlu prislúchajúceho k vertikálnemu polomeru a veľkosť astigmatizmu. Zhoda medzi dvomi meraniami bola hodnotená párovým t-testom na hladine významnosti 5 %. Opakovateľnosť bola charakterizovaná pomocou koeficientu opakovateľnosti CoR , určeného ako $1,96 \times SD$, kde SD je smerodajná odchýlka rozdielu údajov z prvého a druhého merania. V grafoch boli vyznačené tiež medze 95% konfidenčného intervalu rozdielov, stanovené ako priemerný rozdiel $\pm 1,96 \times SD$. Ďalej bola sledovaná korelácia medzi priemerom dát a ich rozdielom pomocou Pearsonova korelačného koeficientu r . V prípade uhlu astigmatizmu bola navyše sledovaná závislosť veľkosti jeho rozdielu na veľkosti astigmatizmu.

Pre vzájomné porovnanie prístrojov boli využité iba prvé vykonané merania. Porovnanie bolo vyhodnotené metódou ANOVA pre opakované merania (v programe STATISTICA 12), a to vždy samostatne pre každý sledovaný parameter (oba polomery, uhol vertikálneho polomeru a veľkosť astigmatizmu), na hladine významnosti 5 %. Následne boli Javalov keratometer, Pachycam a ARKT postupne porovnané s topografom metódou B-A analýzy. Každý sledovaný parameter bol opäť hodnotený samostatne. V rámci B-A analýzy bola sledovaná závislosť rozdielu meraní medzi prístrojmi na priemernej hodnote. Výsledky boli prezentované vo forme B-A grafov spolu s 95% konfidenčným intervalom, stanoveným ako priemerný rozdiel $\pm 1,96 \times SD$. Taktiež bola sledovaná korelácia medzi priemerom dát a ich rozdielom pomocou Pearsonova korelačného koeficientu r , ktorého nenulovosť bola hodnotená t-testom (hranične signifikantná hodnota r pre súbor 70 meraní je 0,235).

Pri štatistických testoch rovnosti sledovaných dát je v textu taktiež uvedená medzná hladina významnosti p , pri ktorej by práve došlo k zamietnutiu testovanej hypotézy.

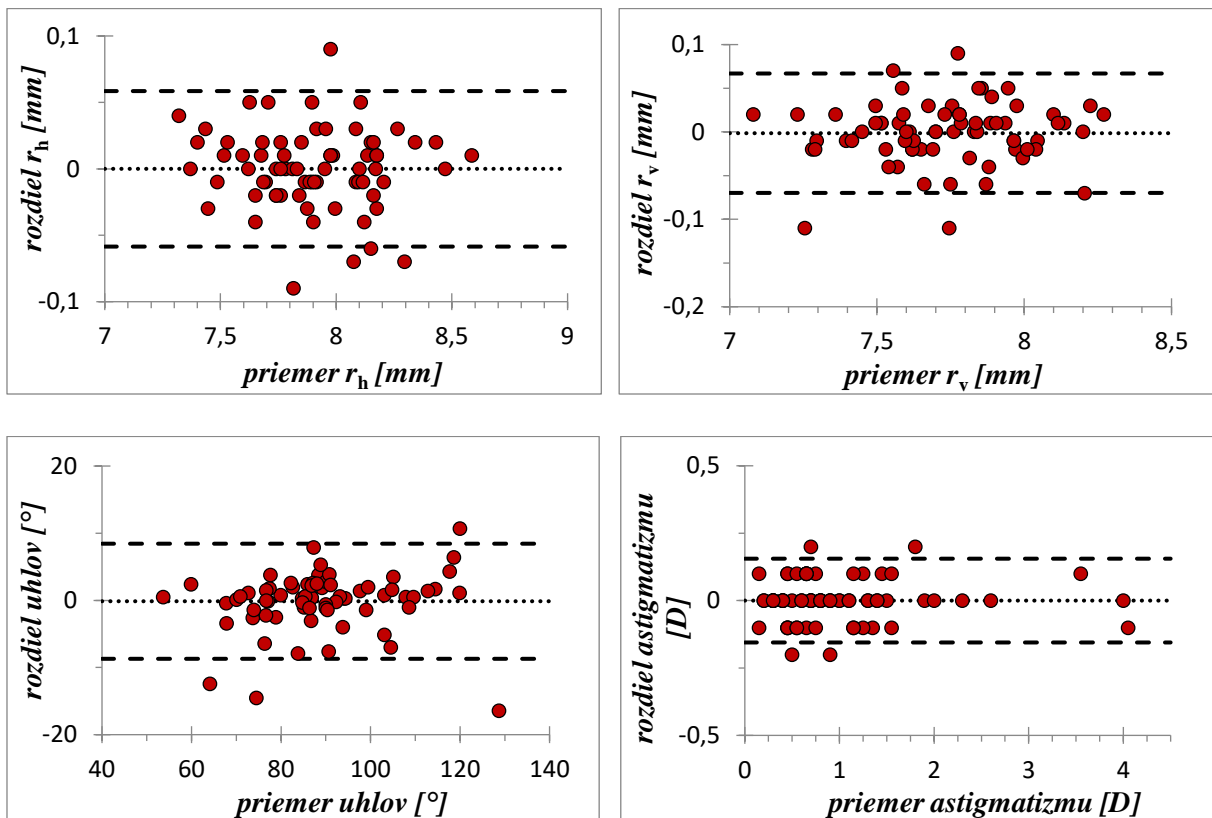
4. VÝSLEDKY MERANÍ

4.1 Opakovateľnosť

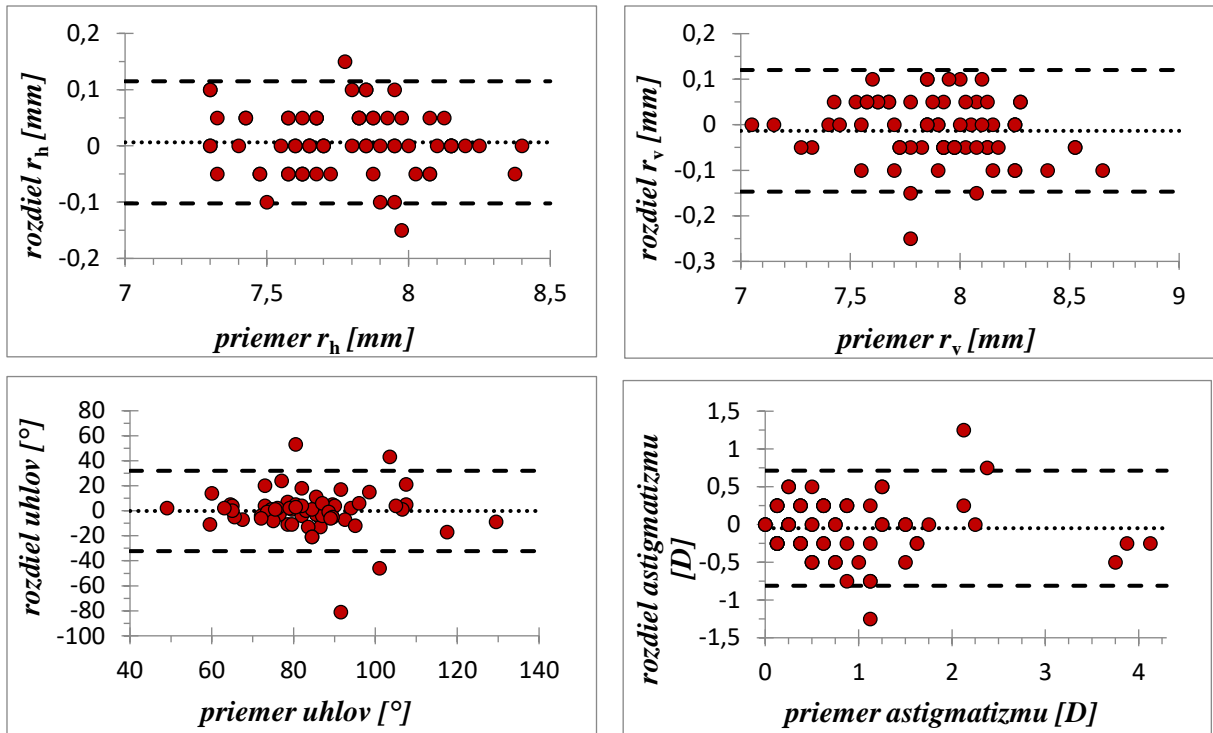
Priemerné hodnoty a smerodajné odchýlky nameraných dát sledovaných parametrov sú pre všetky testované prístroje uvedené v tab. č. 2. Tabuľka tiež zahrňuje rozdiely medzi jednotlivými meraniami, ich smerodajnými odchýlkami a príslušné koeficienty opakovateľnosti CoR . Príslušné výsledky B-A analýzy sú v grafickej podobe prezentované na obr. č. 24 - 27. Každý graf zobrazuje rozdiely medzi čiastkovými meraniami, priemerný rozdiel a hranice 95% konfidenčného intervalu.

Tab. č. 2 Priemerné hodnoty a smerodajné odchýlky prvého a druhého merania sledovaných parametrov a ich rozdielov pre všetky prístroje.

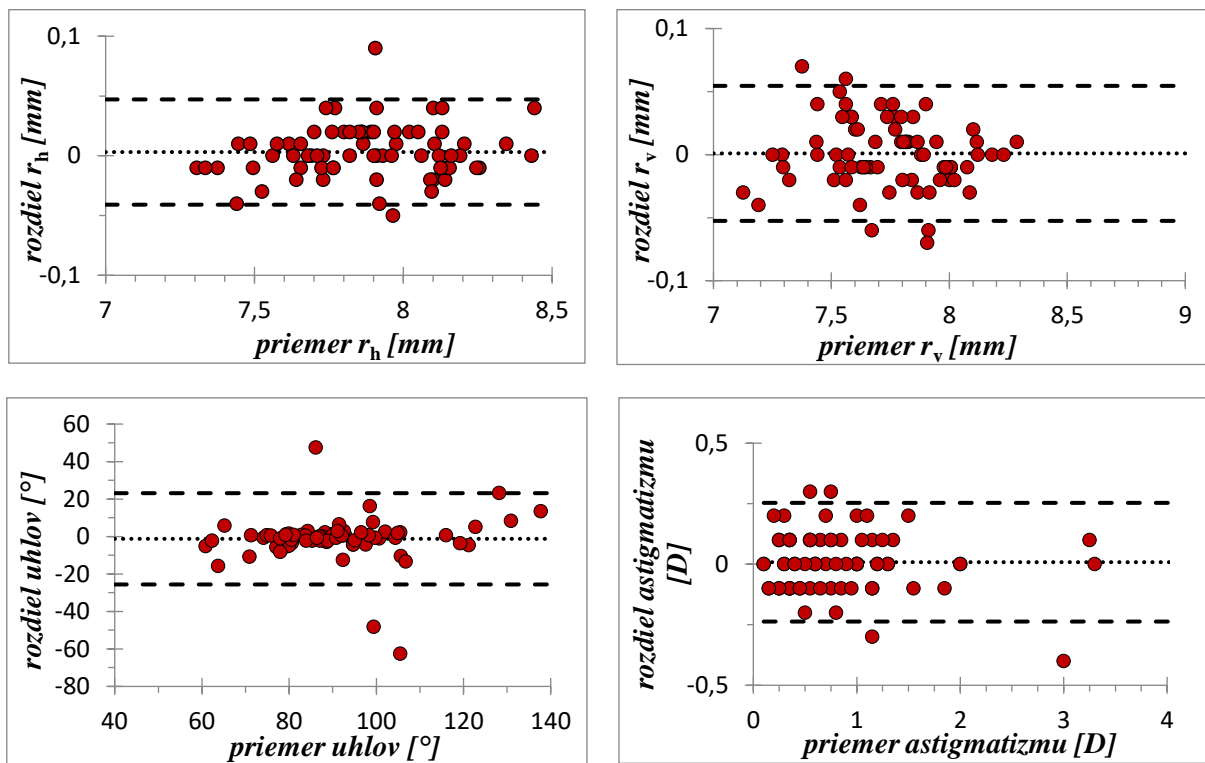
		Javalov keratometer				Pachycam				topograf				ARKT			
		r_h	r_v	α	Ast	r_h	r_v	α	Ast	r_h	r_v	α	Ast	r_h	r_v	α	Ast
1.meranie	priemer	7,78	7,88	84	0,84	7,89	7,74	91	0,86	7,9	7,73	89	0,99	7,92	7,77	91	0,9
	SD	0,27	0,31	15	0,88	0,27	0,25	17	0,66	0,27	0,26	15	0,8	0,27	0,27	21	0,76
2.meranie	priemer	7,77	7,9	84	0,89	7,88	7,73	92	0,85	7,9	7,73	89	0,99	7,91	7,76	87	0,93
	SD	0,27	0,32	16	0,9	0,27	0,26	16	0,67	0,27	0,26	15	0,8	0,27	0,27	20	0,79
obe merania	priem. rozdiel	0,006	-0,01	0	-0,05	0,003	0,001	-1	0,01	0	-0	-0,1	0	0,004	0,005	4	-0,03
	SD rozdielu	0,055	0,068	16	0,39	0,022	0,027	12	0,13	0,03	0,035	4,4	0,079	0,022	0,022	13	0,19
	CoR	0,109	0,134	32	0,76	0,044	0,054	24	0,25	0,059	0,068	8,6	0,155	0,043	0,044	26	0,38



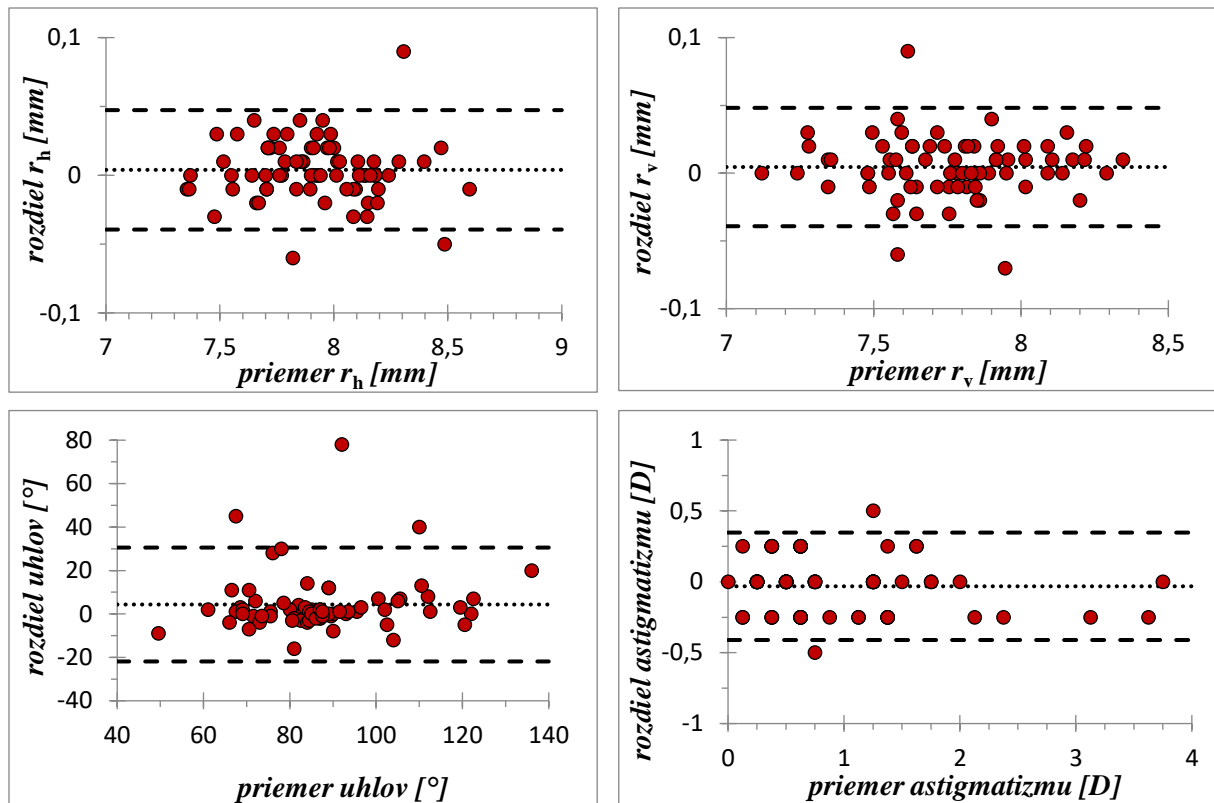
Obr. č. 24 Grafické výsledky B-A analýzy opakovateľnosti merania r_h , r_v , uhlu α a Ast. pomocou topografu. Guličky reprezentujú čiastkové rozdiely, priemerná hodnota je znázornená bodkovanou čiarou, hranice 95% konfidénčného intervalu sú znázornené čiarkovanou čiarou.



Obr. č. 25 Grafické výsledky B-A analýzy opakovateľnosti merania r_h , r_v , α a Ast. pomocou Javalovho keratometru. Guličky reprezentujú čiastkové rozdiely, priemerná hodnota je znázornená bodkovanou čiarou, hranice 95% konfidénčného intervalu sú znázornené čiarkovanou čiarou.



Obr. č. 26 Grafické výsledky B-A analýzy opakovateľnosti merania r_h , r_v , α a Ast. pomocou Pachycamu. Guličky reprezentujú čiastkové rozdiely, priemerná hodnota je znázornená bodkovanou čiarou, hranice 95% konfidénčného intervalu sú znázornené čiarkovanou čiarou.



Obr. č. 27 Grafické výsledky B-A analýzy opakovateľnosti merania r_h , r_v , α a Ast. pomocou ARKT. Guličky reprezentujú čiastkové rozdiely, priemerná hodnota je znázornená bodkovanou čiarou, hranice 95% konfidenčného intervalu sú znázornené čiarkovanou čiarou.

4.1.1 Opakovateľnosť merania polomerov zakrivenia

Pri porovnaní výsledkov prvého a druhého merania dvojvýberovým párovým t-testom na strednú hodnotu bol rozdiel týchto meraní u všetkých prístrojov u horizontálneho aj vertikálneho polomeru zakrivenia štatisticky nevýznamný ($p_{rh} = 0,999$ a $p_{rv} = 0,735$ pre topograf, $p_{rh} = 0,338$ a $p_{rv} = 0,102$ pre Javalov keratometer, $p_{rh} = 0,249$ a $p_{rv} = 0,762$ pre Pachycam a $p_{rh} = 0,138$ a $p_{rv} = 0,093$ pre ARKT). Rozdiel v meraniach nebol štatisticky významne závislý na priemernej hodnote. Z B-A grafov nevyplýva, že by sa rozptyl dát zväčšoval s priemernou hodnotou.

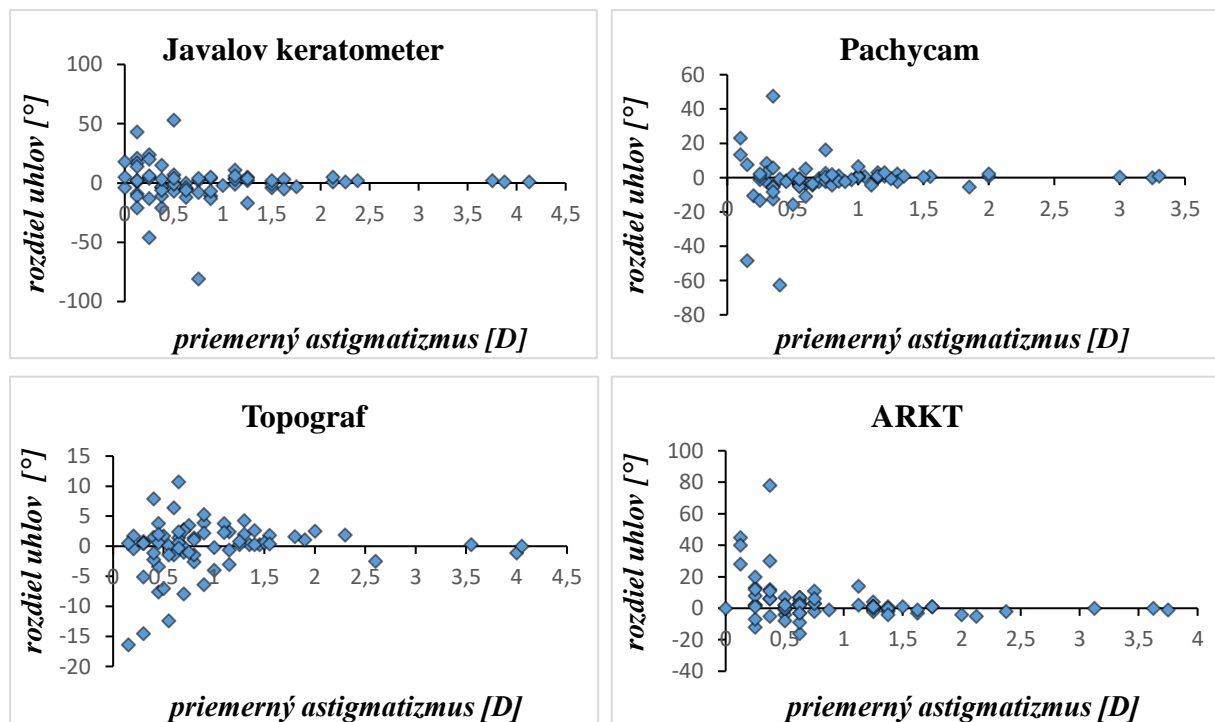
Z tabuliek a grafov vyplýva, že z hľadiska opakovateľnosti merania polomerov zakrivenia najhoršie výsledky vykazuje Javalov keratometer s približne dvojnásobným koeficientom opakovateľnosti oproti ostatným prístrojom. Zvyšné prístroje sa líšia od seba len málo. Najlepším z nich je ARKT, mierne horší je Pachycam a nakoniec topograf. Meranie vertikálneho polomeru má vždy mierne horšiu opakovateľnosť než horizontálny polomer u všetkých prístrojov, pričom u ARKT je táto opakovateľnosť medzi oboma polermi porovnateľná.

4.1.2 Opakovateľnosť merania uhlu astigmatizmu

Pri porovnaní výsledkov prvého a druhého merania uhlu astigmatizmu dvojvýberovým párovým t-testom na strednú hodnotu bol rozdiel u všetkých prístrojov okrem ARKT štatisticky nevýznamný ($p = 0,797$ pre topograf, $p = 0,942$ pre Javalov keratometer, $p = 0,401$ pre Pachycam). Pri ARKT sa prejavil malý štatisticky významný rozdiel o veľkosti 4° ($p = 0,008$). Medzi rozdielmi a priemernou hodnotou meranej veličiny nebola zistená významná korelácia. Z B-A grafov nevyplýva, že by sa rozptyl dát zväčšoval s priemernou hodnotou.

Z tabuliek a grafov vyplýva, že z hľadiska opakovateľnosti merania uhlu astigmatizmu je výrazne najlepším použitým prístrojom topograf. Podstatne horším (cca s trojnásobne vyšším koeficientom opakovateľnosti) je Pachycam a ARKT, ktoré sú navzájom porovnateľné. Najhoršiu opakovateľnosť má Javalov keratometer. Celkovo je však opakovateľnosť merania uhlu horšia, a to z dôvodu veľkého množstva malých hodnôt astigmatizmu. Preto je možné očakávať horšiu opakovateľnosť aj pri porovnaní prístrojov.

Ďalej bola sledovaná závislosť rozdielu uhlu v opakovaných meraniach na priemernej veľkosti astigmatizmu, vid' obr. č. 28. Z grafu je viditeľné, že pre menšie hodnoty astigmatizmu vykazujú prístroje väčšie rozdiely, tj. mierne horšiu opakovateľnosť. Najlepším prístrojom sa ukázal byť topograf, zatiaľ čo najhorším Javalov keratometer.



Obr. č. 28 Závislosť rozdielu uhlov na priemernej veľkosti astigmatizmu pri opakovaných meraniach na všetkých prístrojoch.

4.1.3 Opakovateľnosť merania veľkosti astigmatizmu

Rozdiel medzi prvým a druhým meraním veľkosti astigmatizmu bol u všetkých prístrojov štatisticky nevýznamný (t-test; $p = 0,999$ pre topograf, $p = 0,289$ pre Javalov keratometer, $p = 0,571$ pre Pachycam a $p = 0,172$ pre ARKT). Medzi rozdielmi a priemernou hodnotou meraného parametru nebola odhalená signifikantná závislosť. Z B-A grafov nevyplýva vzťah medzi nárastom rozptylu dát a priemernou hodnotou.

Z tabuliek a grafov je zrejmé, že pre uvedený parameter má výrazne najväčšiu opakovateľnosť topograf. Pachycam sa preukazuje lepšou opakovateľnosťou oproti ARKT a zreteľne najhorším z hľadiska opakovateľnosti je Javalov keratometer.

4.2 Porovnanie prístrojov

Pre porovnanie boli využité iba hodnoty z prvého merania daných parametrov. Odpovedajúce priemerné hodnoty a smerodajné odchýlky prezentuje vyššie uvedená tab. č. 2.

Metódou ANOVA pre opakované merania bolo zistené, že pri meraní horizontálneho polomeru r_h je medzi sledovanými prístrojmi štatisticky významný rozdiel ($p < 2,7 \times 10^{-9}$). Následný post hoc Tukeyov HSD test preukázal, že Javalov keratometer sa významne líši od ostatných prístrojov (vždy $p = 7,7 \times 10^{-6}$), pričom vykazuje v priemere o 0,12 mm nižšiu hodnotu (strmšie). Ostatné prístroje sa od seba významne nelíšia (Pachycam vs topograf $p = 0,715$, Pachycam vs ARKT $p = 0,115$, topograf vs ARKT $p = 0,645$).

Pri meraní vertikálneho polomeru r_v bol taktiež odhalený štatisticky významný rozdiel medzi sledovanými prístrojmi ($p < 1,5 \times 10^{-9}$). Pritom Javalov keratometer sa od ostatných prístrojov významne líši (vždy $p = 7,7 \times 10^{-6}$, post hoc Tukeyov HSD test) a v priemere meria o 0,14 mm vyššie hodnoty. Ostatné prístroje nevykazujú medzi sebou významnú odlišnosť (Pachycam vs topograf $p = 0,953$, Pachycam vs ARKT $p = 0,291$, topograf vs ARKT $p = 0,101$).

Pri meraní uhlu príslušného k vertikálnemu polomeru α sa ukázal štatisticky významný rozdiel medzi sledovanými prístrojmi ($p < 0,011$). Následne vykonaným post hoc Tukeyovým HSD testom sa prejavila odlišnosť Javalovho keratometru od ostatných prístrojov mimo topograf (od Pachycamu $p = 0,008$ a od ARKT $p = 0,005$), pričom nesignifikantný výsledok oproti topografu je pomerne tesný ($p = 0,062$). V priemere sa od prístrojov líši o 6° , pričom meria nižšie hodnoty. Ostatné prístroje sa od seba významne nelíšia (Pachycam vs topograf $p = 0,895$, Pachycam vs ARKT $p = 0,977$, topograf vs ARKT $p = 0,996$).

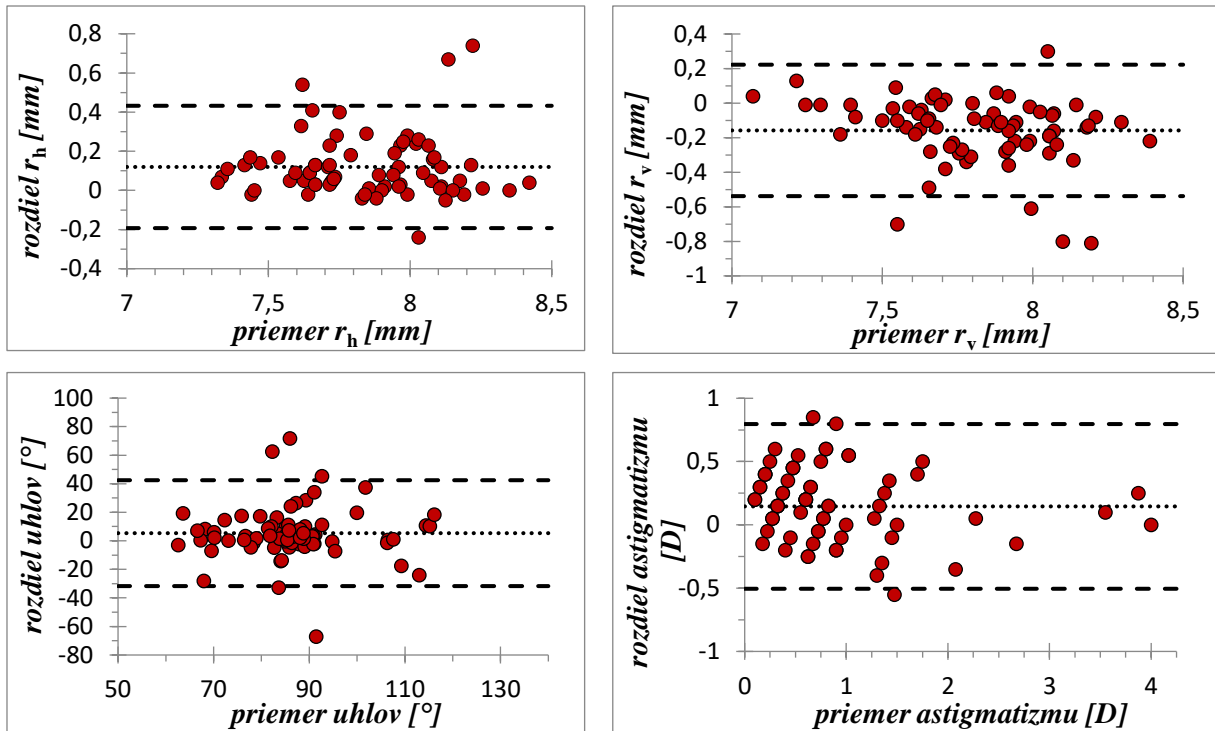
Pri meraní veľkosti astigmatizmu bol zistený štatisticky významný rozdiel medzi sledovanými prístrojmi ($p < 0,002$). Post hoc Tukeyov HSD test ukázal významnú odlišnosť medzi dvomi dvojicami prístrojov, a to medzi Javalovým keratometrom a topografom ($p = 0,0004$) a medzi Pachycamom a topografom ($p = 0,002$). Javalov keratometer vykazuje oproti topografu v priemere o 0,15 D nižšie výsledky, Pachycam o 0,13 D nižšie hodnoty na rozdiel od topografu. Medzi ostatnými prístrojmi sa nepreukázala významná odlišnosť (Javalov keratometer vs Pachycam $p = 0,971$, Javalov keratometer vs ARKT $p = 0,357$, Pachycam vs ARKT $p = 0,630$, topograf vs ARKT $p = 0,087$).

4.3 Porovnanie s topografom

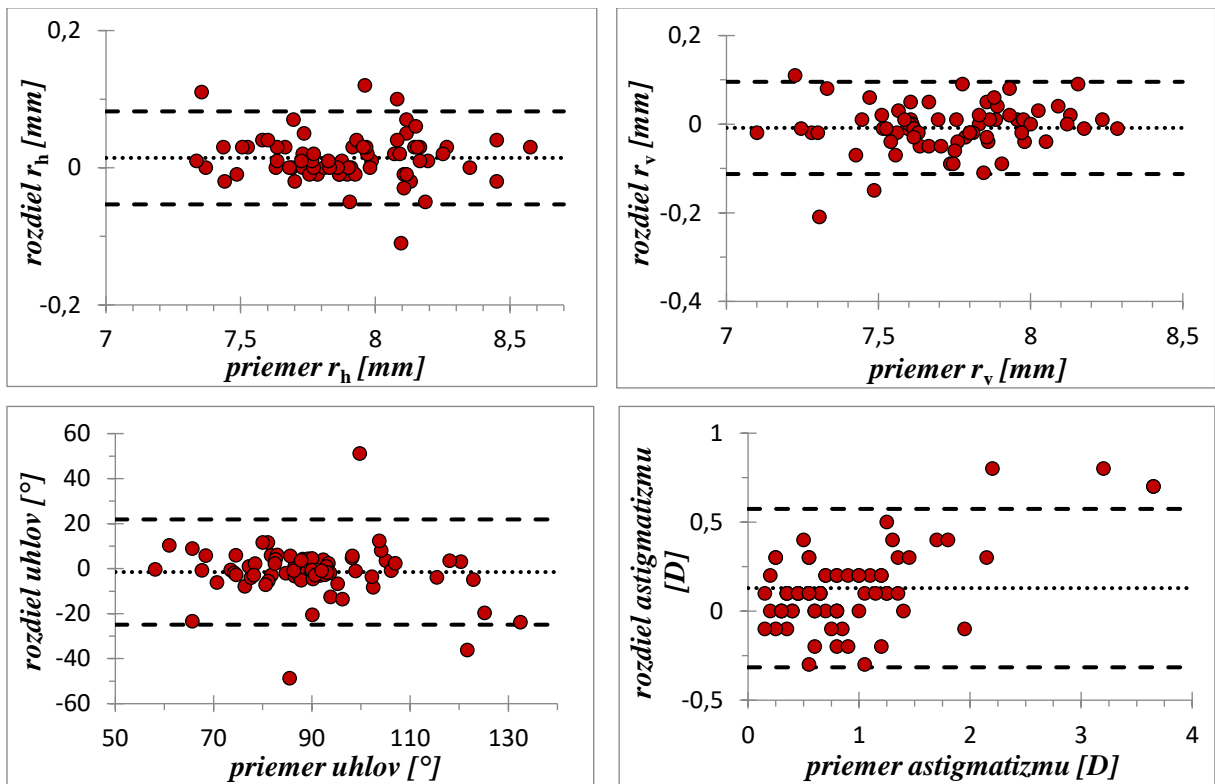
Porovnanie jednotlivých prístrojov s topografom vo forme priemerných rozdielov, príslušných smerodajných odchýlok a pološírky 95% konfidenčného intervalu prezentujú tab. č. 3 a B-A grafy na obr. č. 29 - 31. Vždy je odčítaná hodnota porovnávaného prístroja od hodnoty vykázananej topografom.

Tab. č. 3 Porovnanie Javalovho keratometru, Pachycamu a ARKT s topografom; SD predstavuje smerodajnú odchýlku rozdielov.

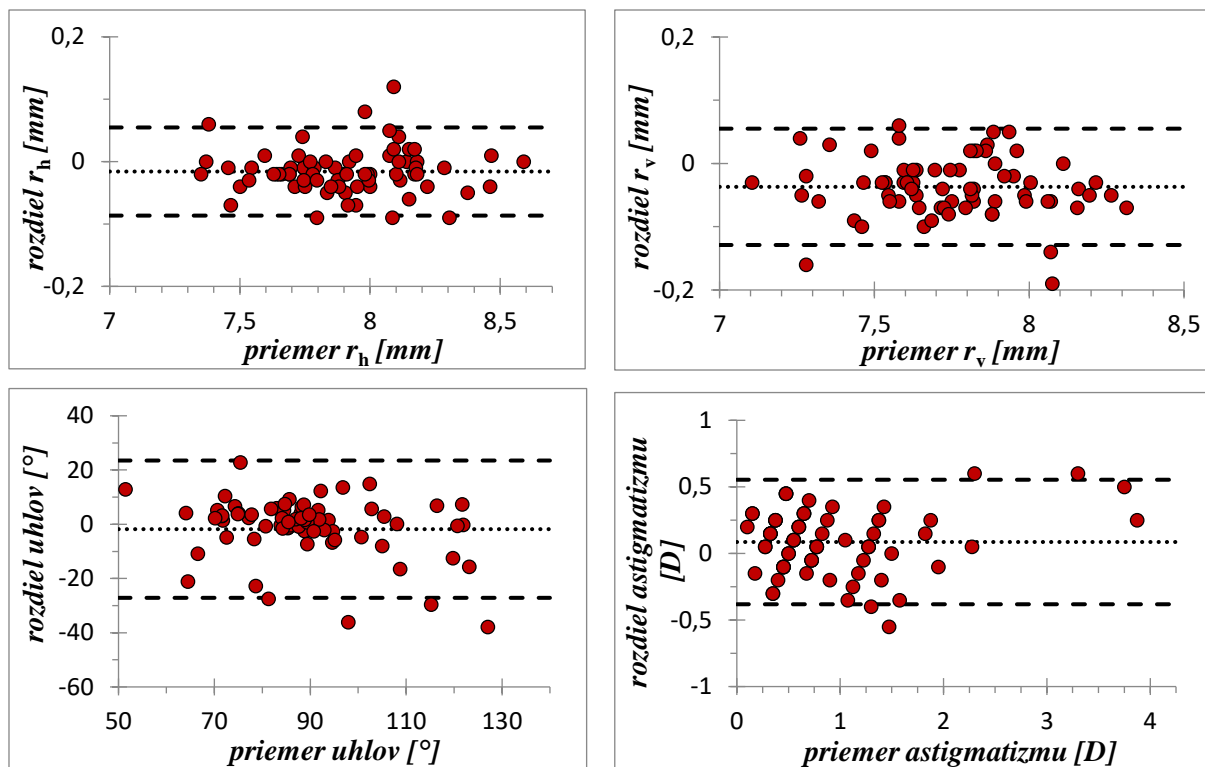
	topograf vs Javalov keratometer				topograf vs Pachycam				topograf vs ARKT			
	r_h	r_v	α	Ast	r_h	r_v	α	Ast	r_h	r_v	α	Ast
priem.rozdiel	0,12	-0,16	5	0,15	0,014	-0,01	-2	0,13	-0,02	-0,04	-2	0,09
SD rozdielu	0,16	0,19	19	0,33	0,035	0,053	12	0,23	0,036	0,047	13	0,24
1,96*SD	0,31	0,38	37	0,65	0,068	0,104	23	0,45	0,071	0,092	25	0,47



Obr. č. 29 Grafické výsledky B-A analýzy porovnania Javalovho keratometru s topografom. Guličky reprezentujú čiastkové rozdiely, priemerná hodnota je znázornená bodkovanou čiarou, hranice 95% konfidénčného intervalu sú znázornené čiarkovanou čiarou.



Obr. č. 30 Grafické výsledky B-A analýzy porovnania Pachycamu s topografom. Guličky reprezentujú čiastkové rozdiely, priemerná hodnota je znázornená bodkovanou čiarou, hranice 95% konfidénčného intervalu sú znázornené čiarkovanou čiarou.



Obr. č. 31 Grafické výsledky B-A analýzy porovnania ARKT s topografom. Guličky reprezentujú čiastkové rozdiely, priemerná hodnota je znázornená bodkovanou čiarou, hranice 95% konfidenčného intervalu sú znázornené čiarkovanou čiarou.

V súlade s vyššie uvedenou štatistickou analýzou vykazuje najväčšie priemerné rozdiely sledovaných parametrov oproti topografu Javalov keratometer. Súčasne tiež vykazuje najširšie konfidenčné intervaly, ktoré sú predovšetkým u polomerov zakrivenia za hranicou klinickej akceptovateľnosti. V meraní polomerov u ostatných prístrojov je vždy dosiahnutá prijateľná medza do 0,1 mm, pričom vertikálny polomer zakrivenia vykazuje vždy širší konfidenčný interval. Najhoršie výsledky sú u všetkých prístrojov dosiahnuté pri meraní uhlu astigmatizmu, pri ktorom je veľký rozptyl dát so smerodajnou odchýlkou dosahujúcou vyššie hodnoty než 12°, čo korešponduje s jeho horšou opakovateľnosťou. Pritom najlepšia zhoda (najužší konfidenčný interval) je u Pachycamu. Pre meranie astigmatizmu je šírka konfidenčného intervalu u Javalovho keratometru na hranici akceptovateľnosti, zatiaľ čo u ostatných prístrojov je pomerne dobrá zhoda do 0,5 D šírky intervalu. Topograf v porovnaní so všetkými prístrojmi meria nižšie hodnoty pri vertikálnom polomere zakrivenia a v prípade ARKT aj pri horizontálnom polomere. Najväčší systematický posun sa prejavil u Javalovho keratometru pri všetkých meraných parametroch. U Pachycamu sa posun prejavil iba pri meraní veľkosti astigmatizmu, a to cca o 0,125 D. ARKT preukázal systematický posun pri oboch polomeroch zakrivenia, a to menej ako 0,03 mm.

5. DISKUSIA

Cieľom diplomovej práce bolo v rámci experimentálnej časti zhodnotenie a porovnanie opakovaných meraní na jednotlivých prístrojoch za účelom zistenia, ktorý z použitých prístrojov podáva najrelevantnejšie výsledky vzhľadom na toto opakovanie. Ďalej sa sledovalo, či sú výsledky z jednotlivých prístrojov pre meranie tvarových parametrov rohovky v klinickej praxi zameniteľné.

Na základe vyššie popísanej metodiky merania bolo predpokladané, že výsledky z objektívnych prístrojov budú porovnateľné. Ďalším predpokladom bolo, že opakovateľnosť merania u Javalovho keratometru bude nižšia v porovnaní s ostatnými použitými prístrojmi. Za referenčný prístroj bol vybraný topograf, pri ktorom sa predpokladalo, že poskytne najrelevantnejšie výsledky pri opakovaných meraniach zo všetkých použitých prístrojov.

Z hľadiska opakovateľnosti meraní na jednotlivých prístrojoch sa porovnávali nasledovné parametre:

- horizontálny polomer zakrivenia
- vertikálny polomer zakrivenia
- uhol príslušný k vertikálnemu polomeru zakrivenia
- veľkosť astigmatizmu

Prístrojom s najnižšou opakovateľnosťou sa ukázal Javalov keratometer, ktorý pri všetkých sledovaných parametroch vykazoval výrazne najhoršie výsledky. Pri polomere zakrivenia dosahoval takmer dvojnásobne vyšší koeficient opakovateľnosti v porovnaní s ostatnými prístrojmi a pri meraní veľkosti astigmatizmu bol tento koeficient dvoj až trojnásobne vyšší. Najvyššiu opakovateľnosť pre meranie polomerov zakrivenia dosiahol ARKT. Pri všetkých prístrojoch bol konfidenčný interval vertikálneho polomeru zakrivenia širší, čo predstavuje jeho zhoršenú opakovateľnosť. Topograf sa ukázal ako prístroj s najvyššou opakovateľnosťou pre vyhodnotenie uhlu astigmatizmu, hoci už bol na hranici akceptovateľnosti. V porovnaní s ostatnými prístrojmi dosiahol trojnásobne nižší koeficient opakovateľnosti. Z hľadiska merania veľkosti astigmatizmu bol topograf vyhodnotený ako najlepší prístroj, keď vykázal dvojnásobne nižší koeficient opakovateľnosti. Z uvedeného vyplýva, že objektívne prístroje dosahujú lepšie výsledky v porovnaní s manuálnymi pri hodnotení opakovateľnosti merania.

Najväčší rozdiel vo výsledkoch opakovaných meraní bol v uhle pri všetkých prístrojoch, a to z dôvodu prítomnosti veľkého množstva malých hodnôt astigmatizmu. Bolo preukázané, že

uhol závisí na veľkosti astigmatizmu a s narastajúcou hodnotou astigmatizmu sa rozdiely v uhloch pri opakovaných meraniach znižovali, čo preukázala aj štúdia Kobashiho [34]. S ohľadom na grafy sa najhoršia opakovateľnosť prejavila u astigmatizmu do 0,5 D, ktorý je v celom súbore zastúpený približne polovicou subjektov. Bolo by vhodné vyhodnocovať opakovateľnosť merania uhlu pre samostatné skupiny astigmatizmu, zvlášť malé a zvlášť vyššie hodnoty a možno by bolo dobré navýšiť počet vysokých astigmatizmov, aby vyhodnotenie v tejto skupine dosahovalo relevantnejších výsledkov. V prezentovanej štúdii toto delenie nebolo podstatné vzhľadom k už spomínanej prevahe nízkych hodnôt astigmatizmu. Taktiež by stálo za úvahu, či by rozdelenie nameraných uhlov astigmatizmu na dve skupiny, a to horizontálne/vertikálne a šikmých os, nemalo za následok spresnenie výsledkov a zmenšenie konfidenčných intervalov.

V práci [35] porovnávali 6 prístrojov, a to Javalov keratometer, IOL Master (automatický keratometer), Pentacam (Scheimpflugovo zobrazenie), OPD scanner (rohovkový topograf), Medmont E300 (rohovkový topograf) a TMS-5 (Scheimpflugový topograf). Dospeli k výsledkom, že v rámci ich porovnania sú najlepšími prístrojmi Pentacam a IOL Master z pohľadu opakovateľnosti aj vzájomného porovnania. Tento výskum použil rozdielne prístroje dostupné na trhu oproti tým použitým v práci, pričom výsledky ukázali, že tieto objektívne prístroje môžu byť zameniteľné a súčasne vykazujú vyššiu opakovateľnosť meraní. Taktiež preukázali, že Javalov keratometer meria strmšie zakrivenie rohovky než objektívne prístroje. Predpoklad, že manuálny keratometer meria strmšie zakrivenie poskytla aj štúdia [36]. Možno konštatovať, že objektívne prístroje vykazujú lepšie výsledky v rámci skúmania opakovateľnosti merania. To potvrdzujú aj dosiahnuté výsledky v diplomovej práci.

Pri vzájomnom porovnaní prístrojov bolo zistené, že Javalov keratometer sa vo svojich výsledkoch výrazne odlišuje od ostatných prístrojov. V prípade polomerov zakrivenia a uhlu astigmatizmu objektívne prístroje medzi sebou neprejavovali štatisticky významnú odlišnosť. Javalov keratometer mal podľa očakávaní dosiahnuť horšie výsledky ako objektívne prístroje, ale v prípade porovnania s topografom výsledky medzi meraniami uhlu astigmatizmu boli na hranici významnosti, t.j. nebol preukázaný signifikantný štatistický rozdiel. Pri meraní veľkosti astigmatizmu výsledky preukázali odlišnosti v rámci porovnania Javalovho keratometra s topografom a Pachycamu s topografom. Ostatné prístroje nepreukázali medzi sebou významné rozdiely v dosiahnutých výsledkoch. Preto nie je možné určiť, ktorý z prístrojov dosiahol najhoršie výsledky.

Pri porovnaní prístrojov s topografom, ktorý bol pre účely tejto práce vybraný ako referenčný, sa Pachycam a ARKT javia ako porovnateľné a spĺňajú hranicu akceptovateľnosti použitia v klinickej praxi. Avšak pri meraní uhlu astigmatizmu dosiahli konfidenčné intervaly pri všetkých prístrojoch široké medze, ktoré prekročovali 20° kvôli vyššie spomínanému veľkému objemu malých astigmatizmov. Táto hodnota už prekračuje hranicu tolerancie v klinickej praxi, obzvlášť pre vyššie astigmatizmy. Z toho dôvodu by malo byť preberanie uhlov z prístrojov čisto orientačné. Meranie však prebehlo na malej vzorke subjektov a súčasne boli vo vyššej miere zastúpené už spomínané nízke hodnoty astigmatizmu, preto by bolo možno vhodné opakovať výskum na väčšom súbore, či sa dané rozdiely nezmenšia. Pachycam má najmenší rozptyl dát a Javalov keratometer vykazoval najväčšie rozdiely v porovnaní meraní, pričom od topografu vykazuje najväčší rozptyl dát, ktorý je spôsobený tým, že Javalov keratometer je subjektívna metóda, ktorá je závislá na skúsenostiach operátora, čo sa môže odrážať na jeho zníženej opakovateľnosti. Môže ísť o zle nastavenie okuláru prístroja, keď sa nedosiahne uvoľnenie akomodácie vyšetrujúceho, alebo o nepresné zarovnanie značiek a os priamo pri meraní, resp. nemeria sa presne v centre rohovky, ale je posunuté na inú časť. Systematický posun sa prejavil pri všetkých parametroch, čo je spôsobené faktom, že Javalov keratometer meria v inej časti centrálnej rohovky než topograf. Navyše predpokladá sférický tvar rohovky a nedokáže stanoviť asférický tvar. Z toho dôvodu by sa jeho výsledky nemali zamieňať s ostatnými prístrojmi. To potvrdzuje aj štúdia Daveho et al. [37], v ktorej preukázali, že výsledky manuálneho keratometru sa nesmú zamieňať s topografom založeným na reflexnej metóde. S týmto záverom prišla aj štúdia [43], ktorá preukázala nezameniteľnosť Javalovho keratometru s topografom na princípe Placidových kruhov (EyeSys) v klinickej praxi.

V prípade účasti viacerých operátorov na meraní je očakávateľné, že u Javalovho keratometru narastie variabilita výsledkov meraní, keďže sa jedná o subjektívnu metódu merania, zatiaľ čo u ostatných prístrojov, ktoré sa radia medzi objektívne pri meraní parametrov rohovky, by mala byť nezmenená, čo dokázala aj štúdia [35].

ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberá problematikou použitia rôznych prístrojov pre meranie tvarových parametrov rohovky a opakovateľnosti merania na nich. V rámci cieľov práce bolo zistiť, či sú výsledky z jednotlivých prístrojov v klinickej praxi zameniteľné, a ktorý z použitých prístrojov podáva najrelevantnejšie výsledky pri opakovaných meraniach.

Pre naplnenie cieľa práce bol vykonaný rešerš dostupnej literatúry, z ktorej bola spracovaná teoretická časť, ktorá poskytla podklad pre zvolenie vhodnej metodiky. Úvod práce sa zaoberal stručným popisom anatomickej štruktúry rohovky a aproximáciami jej tvaru. Boli prezentované rôzne parametre popisujúce tvar rohovky a vysvetlené vzťahy medzi nimi, keďže v odborných publikáciách sa čitateľ môže stretnúť s odlišnými koeficientami, ktoré popisujú viac menej tú istú vec. Následne boli rozobrané optické vlastnosti rohovky. Podstatnou kapitolou teoretickej časti bol popis metód merajúcich tvarové parametre rohovky. V rámci tejto kapitoly boli zahrnuté aj princípy jednotlivých prístrojov, limity týchto techník a ich využitie v praxi. V experimentálnej časti boli vybrané štyri prístroje, a to topograf, Javalov keratometer, Pachycam a autorefrakto-kerato-tonometer. Na týchto prístrojoch sa sledovala opakovateľnosť meraní pre zvolené parametre (polomery zakrivenia, uhol a veľkosť astigmatizmu), následne vzájomné porovnanie prístrojov ako aj ich porovnanie k zvolenému referenčnému prístroju – topografu.

Je možné konštatovať, že meranie ukázali, že objektívne prístroje poskytujú porovnateľné výsledky, zatiaľ čo Javalov keratometer sa svojimi výsledkami výrazne od nich odlišoval. V rámci opakovateľnosti polomerov zakrivenia preukázal najvyššiu opakovateľnosť autorefrakto-kerato-tonometer. Pri hodnotení uhlu a veľkosti astigmatizmu najvyššiu opakovateľnosť dosiahol topograf. Najhoršiu opakovateľnosť merania sledovaných parametrov rohovky vykázal Javalov keratometer, a to z dôvodu, že sa jedná o subjektívnu metódu merania, kde veľkú rolu zohráva operátor so svojimi skúsenosťami. Ďalšou príčinou jeho zhoršenej opakovateľnosti je oblasť rohovky, v ktorej prebieha meranie. Pri Javalovom keratometri je vyšetovaná oblasť iná než tá pri objektívnych prístrojoch.

Z klinického hľadiska sú výsledky z objektívnych prístrojov ako topograf, Pachycam a autorefrakto-kerato-tonometer navzájom zameniteľné a môžu sa nahradzovať pri aplikácii mäkkých kontaktných šošovkách. Avšak z hľadiska uhlov astigmatizmu boli preukázané veľké rozdiely medzi jednotlivými prístrojmi za hranicou akceptovateľnosti, z čoho vyplýva, že tento parameter by sa nemal preberať z prístrojov, resp. by mohol slúžiť iba ako čisto orientačná informácia. Pri aplikácii tvrdých kontaktných šošoviek už môžu aj rozdiely v polomeroch

zakrivenia spôsobovať, že šošovka nebude dobre sedieť na oku. Pri refrakčných operáciách alebo pri výpočte optickej mohutnosti vnútroočnej šošovky je potrebná vyššia presnosť medzi prístrojmi, preto nie je vhodné zamieňanie použitých prístrojov pri týchto aplikáciách.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] ATCHINSON, D.A., SMITH, G. *Optics of the Human Eye*. Butterworth-Heinemann: 1st edition, 2000. ISBN 0-7506-3775-7. 288 str.
- [2] SMOLIN, G., THOFT, R.A. *The Cornea. Scientific Foundations and Clinical Practice*. Little Brown & Co; 2nd edition, 1987. ISBN 0-316-80187-9. 644 str.
- [3] MASHIGE, KP. A review of corneal diameter, curvature and thickness values and influencing factors, *The South African Optometrist*, Vol. 72, 2013, No. 4, str. 185-194. ISSN 0378-9411
- [4] MASTERS, B. *Noninvasive Diagnostic Techniques in Ophthalmology*. Springer-Verlag New York: 1st edition, 1990. ISBN 0-387-96992-6. 649 str.
- [5] BENJAMIN, W. J. *Borish's Clinical Refraction*. 2nd edition. Butterworth-Heinemann, 2006. 1712 s. ISBN 978-0-7506-7524-6
- [6] HLOŽÁNEK, M., BRUNOVÁ, B. *Přístrojová technika v oftalmologii*. Nakladatelství ART et FACT Praha, 2006. ISBN 80-902160-9-9
- [7] GUPTA, A.K. *Clinical Ophthalmology: Contemporary perspectives*. Elsevier India: 9th edition, 2009. ISBN 978-81-312-1680-4. 842 str.
- [8] SCHWIEGERLING, J. *Field guide to visual and ophthalmic optics*. SPIE Press, 2004. ISBN 978-0819456298. 192 str. Dostupné z: https://spie.org/publications/fg04_p42_keratometry?SSO=1
- [9] CORBETT, M.C., ROSEN, E.S., O'Brart, D.P.S. *Corneal Topography: Principles and applications*. BMJ Books, 1999. ISBN 978-0727912268. 230 str.
- [10] PIERŚCONIEK, B.K., POPIOLEK-MASAJADA, A., KASPRZAK, H. *Corneal shape change during accommodation*. Springer Nature, publikácia Eye, Vol. 15, 2001, No. 6, str. 766-69. doi:10.1038/eye.2001.246
- [11] KIELY, P.M., SMITH, G., CARNEY, L.G. *The Mean Shape of the Human Cornea*. Optica Act: International Journal of Optics, Vol. 29, 1982, No. 8, str. 1027-1040. DOI: 10.1080/713820960
- [12] BEIKO, H.H.G. *The Fundamentals of Spherical Aberration*. Dostupné z: <https://crstodayeurope.com/articles/2012-jul/the-fundamentals-of-spherical-aberration/>
- [13] ASENSA, L., ALTINÖRS, D. et al. *Effect of dry eye on Scheimpflug imaging of the cornea and elevation data*. Canadian journal of ophthalmology, Vol. 52, 2017, No. 3, str. 313-17. DOI: 10.1016/j.jcjo.2016.11.005

- [14] HEYDARIAN, S. et al. *The normal distribution of corneal eccentricity and its determinants in two rural areas of north and south of Iran*. Journal of Current Ophthalmology, 2017. DOI: 10.1016/j.joco.2017.11.006
- [15] PETROVÁ, S., MAŠKOVÁ, Z., JUREČKA, T. *Základy aplikace kontaktních čoček*. Brno, NCO NZO, 2008. ISBN 978-80-7013-470-2. 220 str.
- [16] PLUHÁČEK, F. *Měření a analýza parametrů rohovky – výukové materiály k predmetu Oftalmologické a optometr. přístroje II*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2013.
- [17] GATINEL, D., HAOUAT, M., HOANG-XUAN, T. *Étude des paramètres permettant la description mathématique de l'asphéricité cornéenne*. Journal Français d'Ophtalmologie, Vol. 25, 2002, No. 1, str. 81-90
- [18] CALOSI, A. *Corneal asphericity and spherical aberration*. Journal of refractive surgery, Vol. 23, 2007, No. 5, str. 503-514
- [19] VYŠÍN, I., ŘÍHA, J. *Paprsková a vlnová optika*. Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3334-9. 124 str.
- [20] WANG, MING. *Irregular astigmatism: diagnosis and treatment*. Slack Incorporated: 1st edition, 2008. ISBN 978-1-55642-839-5. 320 str.
- [21] KHURANA, A.K. *Theory and practice of optics & refraction*. Elsevier India: 2nd edition, 2008. ISBN 978-8131211328. 460 str.
- [22] TUNNACLIFFE, A.H. *Introduction to visual optics*. London: The Gresham press, 1993. ISBN 978-0-900099-28-1. 642 str.
- [23] GLOGAROVÁ, L. *Porovnání keratometrie Javalovým keratometrem a rohovkovou topografií: diplomová práce*. Brno: Masarykova univerzita, Lékařská fakulta, 2010.
- [24] National eye institute. Dostupné z: <https://nei.nih.gov/health/cornealdisease>
- [25] MANNIS, M.J., HOLLAND, E.J. *Cornea – fundamentals, diagnosis and management*. Elsevier: 4th edition, 2016. ISBN 978-0323357579. 2016 str.
- [26] ROSENFELD, M., LOGAN, N. *Optometry: science, techniques and clinical management*. Butterworth-Heinemann: 2nd edition, 2009. ISBN 978-0750687782. 568 str.
- [27] RUTRLE, M. *Přístrojová optika*. Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví v Brně, 2000. ISBN 80-7013-301-5. 190 str.
- [28] Základy kontaktologické praxe: Vyšetření zakřivení rohovky. The Vision Care Institute. Dostupné z: <http://docplayer.cz/2963212-Vysetreni-zakriveni-rohovky.html>
- [29] YANOFF, M., DUKER, J. *Ophthalmology*. Elsevier Health Science, 2009. ISBN 978-0323043328. 1528 str.

- [30] MIKEŠOVÁ, J. *Metody a přístroje pro měření parametrů rohovky: bakalářská práce*. Praha: ČVUT, Fakulta biomedicínského inženýrství, 2016.
- [31] TEJEDOR, J., GUIRAO, A. *Diagnosis and imaging of corneal astigmatism*. DOI: 10.5772/18173. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/astigmatism-optics-physiology-and-management/diagnosis-and-imaging-of-corneal-astigmatism>
- [32] NEMA, HV., NEMA, N. *Diagnostic procedures in ophthalmology*. JP Medial Ltd, 2014. ISBN 978- 9350908525. 480 str.
- [33] WALKER, M. *Mapping out corneal topography*. Review of optometry, Vol 8, 2017. Dostupné z: <https://www.reviewofoptometry.com/article/ro0817-mapping-out-corneal-topography>
- [34] KOBASHI, H., KAMIYA, K. et al. *Comparison of corneal power, corneal astigmatism, and axis location in normal eyes obtained from an autokeratometer and a corneal topographer*. Journal of cataract and refractive surgery, Vol. 38, 2012, No 4, str. 648-54. DOI: 10.1016/j.jcrs.201
- [35] HAMER, C. BUCKHURST, H. et al. *Comparison of reliability and repeatability of corneal curvature assessment with six keratometers*. Clinical and experimental optometry, Vol. 99, 2016, No. 6, str. 583-89. DOI: 10.1111/cxo.12329
- [36] SUNDERRAJ, P. *Clinical comparison of automated and manual keratometry in pre-operative ocular biometry*. Eye, Vol. 6, 1992, str 60-62. DOI: 10.1038/eye.1992.11
- [37] DAVE, T. RUSTON, D., FOWLER, C. *Evaluation of the EyeSys model II computerized videokeratoscope. Part I: Clinical assessment*. Optom Vis Sci, Vol. 75, 1998, No. 5, str. 647-55
- [38] HISCOX, R. *Corneal topography in optometric practice*. Dostupné z: <https://www.aop.org.uk/ot/CET/2015/10/19/corneal-topography-in-optometric-practice/article>
- [39] MARTIN, R. *Cornea and anterior eye assessment with placido-disc keratometry, slit scanning evaluation topography and scheimpflug imaging tomography*. Indian journal of ophthalmology, Vol. 66, 2018, No. 3, str. 360-66. DOI: 10.4103/ijo.IJO_850_17
- [40] BELIN, M. et al. *Elevation based corneal tomography*. Jaypee- Highlights Medical Publishers: 2nd edition, 2012. ISBN 978-9962-678-53-3. 262 str.
- [41] BRIGHTBILL, F. et al. *Corneal surgery: theory, technique and tissue*. Mosby: 4th edition, 2008. ISBN 978-0323048354. 912 str.
- [42] Touch ophthalmology. Oculus Pachycam. [cit. 2011-03-24]. Dostupné z: <http://www.touchophthalmology.com/supplier-pages/oculus-pachycam>

[43] MEHRAVARAN, S., ASGARI, S. et al. *Keratometry with five different techniques: a study of device repeatability and inter-device agreement*. International ophthalmology, Vol. 34, 2014, No. 4, str. 869-75. DOI: 10.1007/s10792-013-9895-3.

[44] RAJEEV, J. *Pentacam: principle and clinical applications*. Journal of current glaucoma practice, Vol. 3, 2009, No. 2, str. 20-32

[45] eJournal of Ophthalmology. Dostupné z: <http://www.ejournalofophthalmology.com/ejo/ejo27a.html>

INTERNETOVÉ ZDROJE OBRÁZKOV

[46] <http://www.mrcophth.com/mock/mock12/keratometer.jpg>

[47] <https://images.dotmed.com/images/listingpics/2282100.jpg>

[48] <http://www.eyecareandcure.com>

[49] http://www.no7contactlenses.com/media/catalog/product/cache/1/image/600x600/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/e/3/e300_3.png

[50] <http://www.brillen-bentele.de/wp-content/uploads/2017/08/Keratograph2.jpg>

[51] <https://images.dotmed.com/images/listingpics/782799.jpg>

[52] <http://media.148apps.com/screenshots/669540060/us-ipad-3-oculus-pentacam-overview.jpeg>

[53] <https://crstodayeurope.com/wp-content/themes/crste/assets/article-images/2015/07/pentacam.png>

[54] <https://ordinationstechnik.com/wp-content/uploads/2011/05/Oculus-Pachycam-03.jpg>

[55] SINJAB, M. *Corneal Topography in Clinical Practice Pentacam System: Basics and Clinical Interpretation*. Jaypee Brothers Medical Pub: 2nd edition, 2012. ISBN 978-9350255759. 219 str.

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. č. 1 Vplyv parametru Q na tvar kvadratickej plochy aproximujúcej rohovku (všetky krivky majú spoločný vrchol)[1]	9
Obr. č. 2 Znázornenie všeobecnej rovnice pre všetky typy kužeľosečiek: $y^2 = 2r_0x - px^2$ [18]	10
Obr. č. 3 Elipsa s hlavnou osou a a vedľajšou osou b, hodnota p je definovaná pomerom medzi b^2 a a^2 [18]	10
Obr. č. 4 Sférická aberácia pri a) sférickom povrchu, b) asférickom povrchu [55].....	12
Obr. č. 5 Typ krivky v závislosti na ε [16].....	13
Obr. č. 6 Odchýlka rohovky od referenčnej sféry, ktorá sa najlepšie primkne k centrálnej časti rohovky. [11].....	15
Obr. č. 7 Zóny rohovky [9]	16
Obr. č. 8 Horizontálne a vertikálne zakrivenie pri astigmatickej rohovke [16].....	16
Obr. č. 9 Sagitálne (axiálne) a tangenciálne zakrivenie [9].....	17
Obr. č. 10 Princíp keratometrie (prevzaté z [23])	21
Obr. č. 11 Značky keratometrov a ich koincidencie [26].....	24
Obr. č. 12 Javal-Schiötzov keratometer [46].....	24
Obr. č. 13 Princíp Javal-Schiötzovho keratometru [16].....	25
Obr. č. 14 Automatický keratometer [47]	26
Obr. č. 15 Placidov disk [48].....	27
Obr. č. 16 Znázornenie centrálnej zóny rohovky pokrytej značkami keratometru, keratoskopu a topografu [9].....	28
Obr. č. 17 Topograf s malým a veľkým Placidovým terčom [49][50].....	29
Obr. č. 18 Orbscan II a výsledky merania [51]	30
Obr. č. 19 Rotujúca kamera okolo oka a prístroj Pentacam [52][53].....	31
Obr. č. 20 Pachycam [54].....	32
Obr. č. 21 Schematické znázornenie merania výšky rohovky rasterstereografiou [9].....	32
Obr. č. 22 Moiré interferencia [9]	33
Obr. č. 23 Holografický interferogram rohovky so štyrmi hlbokými radiálnymi rezmi [9]	33
Obr. č. 24 Grafické výsledky B-A analýzy opakovateľnosti merania r_h , r_v , uhlu α a Ast. pomocou topografu.	38
Obr. č. 25 Grafické výsledky B-A analýzy opakovateľnosti merania r_h , r_v , α a Ast. pomocou Javalovho keratometru.	39

Obr. č. 26 Grafické výsledky B-A analýzy opakovateľnosti merania r_h , r_v , α a Ast. pomocou Pachycamu.	39
Obr. č. 27 Grafické výsledky B-A analýzy opakovateľnosti merania r_h , r_v , α a Ast. pomocou ARKT.	40
Obr. č. 28 Závislosť rozdielu uhlov na priemernej veľkosti astigmatizmu pri opakovaných meraniach na všetkých prístrojoch.	41
Obr. č.29 Grafické výsledky B-A analýzy porovnania Javalovho keratometru s topografom.	44
Obr. č. 30 Grafické výsledky B-A analýzy porovnania Pachycamu s topografom.	44
Obr. č. 31 Grafické výsledky B-A analýzy porovnania ARKT s topografom.	45