

Difrakcijske intraokularne leče

Rasto Snoj

Elektrotehniško-računalniška strokovna šola in gimnazija Ljubljana, Vegova

Izvleček

Zaradi različnih vzrokov, predvsem pa zaradi sive mrene, marsikoga čaka operativna odstranitev motne naravne leče in vsaditev umetne intraokularne leče – IOL. Če želimo imeti kar najboljši pooperativni vid, je dobro poznati vsaj nekaj podrobnosti in lastnosti tega trajnega umetnega vsadka. Izbira IOL je marsikdaj prepuščena uporabniku, ki je tudi plačnik. Zaradi velikega števila operacij sive mrene poznavanje IOL spada že k splošni izobrazbi, žal pa na tem pomembnem področju avtentičnosti šolska fizika močno šepa. V članku bomo spoznali nekaj osnovnih optičnih lastnosti očesa in najpogostejših IOL. Podrobneje pa si bomo ogledali multifokalne difrakcijske leče, saj je prav tu razkorak med šolskim znanjem fizike in operativno prakso največji.

Ključne besede: siva mrena, IOL, multifokalne leče, difrakcijske leče, akomodacija

Diffraction Intraocular Lenses

Abstract

Due to various reasons, primarily cataracts, many patients will require the surgical removal of the cloudy natural lens and the implantation of an artificial intraocular lens (IOL). If we want the best postoperative vision, some details and features of this permanent artificial implant may prove beneficial. Ultimately, choosing IOL is often up to the user, who is also the payor. Due to numerous cataract surgeries, the knowledge of IOLs is commonplace. However, school physics is struggling in this crucial area of authenticity. This article examines some basic optical properties of the eye and the most common IOLs. The focus is on multifocal diffraction lenses because this is where the gap between school physics and operational practice is the greatest.

Keywords: cataract, IOL, multifocal lens, diffractive lens, accommodation.

Odprava sive mrene

Pri operaciji katarakte gre za odstranitev motne očesne leče, ki poleg tega, da prepušča čedalje manj vpadne svetlobe, najbolj v kratkovalovnem področju, povzroča še neostro sliko, ki je ne moremo popraviti z navadnimi očali in v končni fazi lahko pripelje do slepote. Prvo uspešno implantacijo IOL je leta 1950 opravil angleški oftalmolog Nicholas Ridley, ki je uporabil lečo iz akrila, ta namreč za razliko od stekla v očesu ne povzroči zavrnitve vsadka [1]. Vreznina v roženico je bila velika kar 8 mm, kar je povzročalo številne zaplete, zato je postopek bolj zaživel šele po letu 1967, ko je Američan Charles Kelman izumil fakoemulzifikacijo. Pri tej metodi najprej z ultrazvočno sondo utekočinijo motno naravno očesno lečo, jo posrkajo in takoj zatem s posebnim injektorjem skozi okoli 2–3 mm veliko odprtino v oko vstavi-jo fleksibilno umetno lečo. Ta pacientu skoraj hipoma omogoči normalen vid, v mnogih primerih celo boljši, kot ga je kdaj imel.

Osnovna fizika leč in sestavljenih sistemov, oko

Preden si pobliže ogledamo IOL, ponovimo nekaj srednješolskih resnic o posameznih lečah in sestavljenih sistemih.

Za razumevanje »delovanja« IOL je potrebno osnovno poznavanje delovanja optičnih elementov, v tem primeru konveksnih leč [2]. Konveksna leča izostri sliko opazovanega predmeta z razdalje a pred lečo na razdalji b za lečo po **enačbi preslikave**

$$1/f = 1/a + 1/b. \quad (1)$$

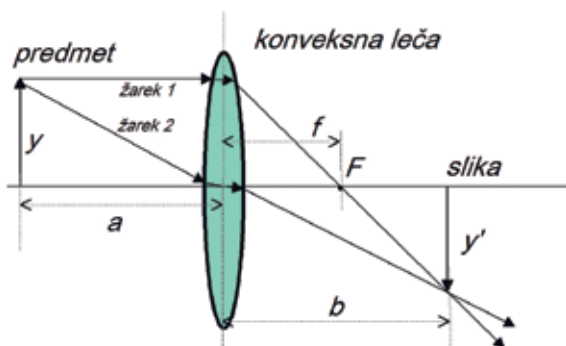
Če je a večji od goriščne razdalje f (se pravi, da je predmet dovolj oddaljen od očesa), je ostra slika realna in nastane na mrežnici.

V optiki pogosto uporabljamo lomnost, ki je definirana kot obratna vrednost goriščne razdalje, njena enota pa

je dioptrija, ki je m^{-1} . Pri dveh zaporedno postavljenih tankih lečah se lomnosti (približno) seštevajo in je

$$1/f = 1/f_1 + 1/f_2 - s/f_1 f_2, \quad (2)$$

kjer sta z indeksi 1 in 2 označeni posamezni leči, s pa je razdalja med lečama in vpliva na pravilnost prej podane izjave. Le pri majhni vrednosti razdalje s smemo zadnji člen zanemariti.

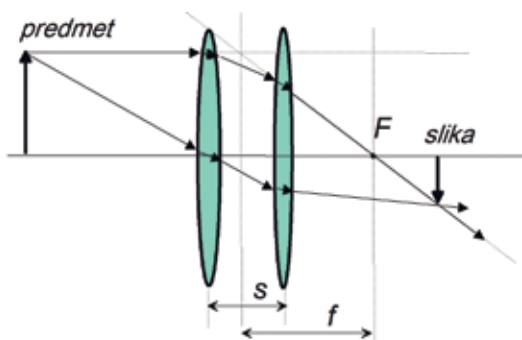


Slika 1: Konveksna leča (kot jo imamo tudi v očesu) preslika predmet v realno sliko. Razdalja b od leče do slike na mrežnici je **pri očesu** fiksna. Skica je smiselna tudi za oko kot celoto, če f razumemo kot skupno goriščno razdaljo vseh refraktivnih delov očesa in ne le leče kot posameznega elementa. (Vir: lastni)

Goriščna razdalja f tanke leče (refrakcijska goriščna razdalja) je določena z **enačbo izdelovalcev leč**

$$1/f = (n - 1)(1/r_1 + 1/r_2), \quad (3)$$

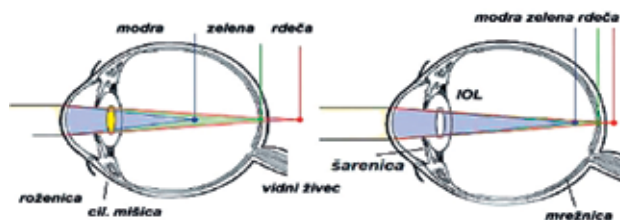
kjer je n lomni količnik leče, f goriščna razdalja, r_1 in r_2 pa sta njena krivinska polmera na obeh ploskvah, okoli leče pa je zrak (lahko vakuum). Ker je na obeh ploskvah očesne leče drugačen material od zraka, se enačba za ta primer malce spremeni. Za osnovno razumevanje očesne leče pa zadostuje že vedenje, da manjši krivinski polmeri leče (na sredini je debelejša) povečajo njeno lomnost.



Slika 2: Dve zaporedno postavljeni leči v razdalji s upodobita predmet podobno, kot če bi uporabili eno samo, ki pa bi imela manjšo goriščno razdaljo f od obeh, kar velja, če je s dovolj majhna. (Vir: lastni)

Oko – poenostavljeno

V optičnem smislu gre za kompleksen optični sistem, v katerem je očesna leča le eden od delov. K lomu svetlobe in nastanku slike pomembno prispeva še trda prozorna roženica na skrajnem zunanjem delu očesa, ki deluje kot leča s fiksno goriščno razdaljo *okoli* 23 mm. Želatinasta steklovina v notranjosti očesa (*vitreous humour*) in očesna tekočina (*aqueous humour*) med roženico in lečo pa sta v glavnem iz vode.



Slika 3: V prerezu očesa so vidni roženica, IOL (namesto odstranjene večje in debelejša naravne leče), šarenica in ciliarna mišica, mrežnica ter vidni živec. Oko, v katero sveti bela svetloba, pokaže barvno napako (levo). V primeru s slike je na mrežnici izostrena le zelena svetloba, rdeča slika nastane za mrežnico (daljnovidnost), modra pa pred njo (kratkovidnost). Pri tistih IOL, ki korigirajo še barvno napako, je hkratna izostritev za vse tri barve boljša. Barvno nekorrigirano oko (levo) ima 1,2 dioptrije barvne napake, korigirano (desno) pa le 0,1. [3]

Očesna leča zdravega očesa je prozorna za vidno svetlobo, z leti pa predvsem v modro vijoličastem delu spektra transmisivnost (prepustnost) močno upade, kar koristi vsaj kot nekakšna naravna zaščita za občutljivo rumeno pego – makulo. Naravna očesna leča je fleksibilna in ji ciliarne mišice v obsegu do 4 dioptrije spreminjajo goriščno razdaljo (t. i. akomodacija), kar omogoča ostrenje na povsem drugačen način od leč v npr. objektivih kamer s fiksno goriščno razdaljo. Tam na različni oddaljene predmete (drugačen a) ostrimo s spremembo razdalje b med objektivom in slikovnim senzorjem (ali okularjem pri teleskopu). Pri očesu pa je b fiksna in pogojena z obliko očesnega zrkla, ki se zaradi rasti (ki je lahko tudi pretirana) nekoliko spreminja le v mladosti. Na manjše lečne krivinske polmere (večjo debelino na sredini) in s tem na manjšo goriščno razdaljo vpliva ciliarna mišica s stiskanjem, a bi tudi njen aksilarni premik s (2) v sistemu roženice in očesne leče imel podoben učinek. Čeprav se opazovanju na različni oddaljene predmete v naravnem očesu prilagaja le leča (spremenljiva f_2), velja enako tudi za efektivno goriščno razdaljo (f) očesa kot celote (ob fiksni goriščni razdalji roženice f_1), zato pri npr. istem b in manjšem a vseeno dobro vidimo tudi na blizu.

V večini tekstov o očalih in napakah očesa avtorji uporabljajo enoto dioptrija kot sinonim za fizikalno količino lomnosti leče. Da bi se izognili besednim zvezam, ki jih nismo vajeni, bo tako tudi v nadaljevanju tega članka, čeprav seveda poznamo razliko.

Pri predolgem zrklu (prevelik **b**) ne moremo izostriti oddaljenih predmetov, saj slika nastane pred mrežnico, gre za kratkovidnost – miopijo. Potrebujemo očala z negativno dioptrijo, ki svetlobo razpršijo že pred očesom. Kratkovidneži imajo vseeno eno pomembno prednost pred tistimi, ki dobro vidijo brez očal. Pri njih je najmanjša razdalja, na kateri lahko dobro vidijo, tudi v starosti manjša od sicer »normalne« zorne razdalje 25 cm (posledica prevelikega **b** je ugodno manjši **a**), kar pomeni, da premorejo nekakšno naravno lupo in na blizu odlično vidijo prav brez očal.

Pri prekratkem zrklu je težava nasprotna, smo daljnovidni in je treba očesu pomagati še z dodatno zbiralno lečo (pozitivna dioptrija). Gre za hiperopijo, tej podobna težava prezbiopija pa se zelo pogosto pojavlja pri mnogih ljudeh že kmalu po 40. letu starosti. Je posledica z leti spremenjene in manj elastične leče, morda tudi opešane ciliarne mišice, kar vpliva na obliko leče, ki se ni zmožna več dovolj »stisniti« kljub sicer normalnemu zrklu. Tako leča ne omogoča več dovolj zmanjšanja efektivne goriščne razdalje (akomodacije) za oster vid na bližino do 25 cm in **a** je zdaj pri istem **b** večji, na blizu pač ne vidimo več dobro. Vendar si lahko za branje kupimo očala, ki nadomestijo lečin naravni primanjkljaj lomnosti.

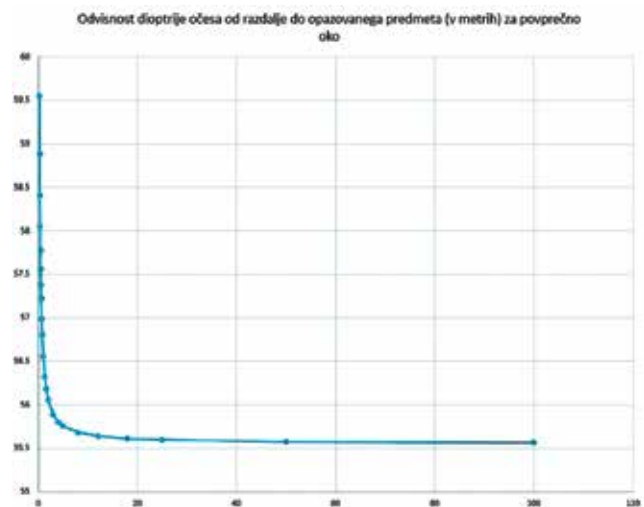
Goriščno razdaljo očesa merimo od tako imenovane glavne ravnine (med lečo in roženico). Pri akomodaciji na neskončno oddaljene predmete je f povprečnega očesa *okoli* 18 mm in ima oko dioptrijo približno 55 ali več. Okoli dve tretjini je prispeva roženica, preostalo (okoli 20 dioptrij) pa očesna leča, saj se lomnosti (približno) seštevajo.



Slika 4: Z znano Snellovo karto ugotavljamo ostrino vida. Ne gre za znamenitega soavtorja matematične formulacije lomnega zakona astronoma Willebrorda Snella, ampak za danskega očesnega zdravnika Hermanna Snella, ki je leta 1860 predlagal tovrstni opis ostrine vida. Podčrtani primer (20/20) se nanaša na popolnoma oster vid (tudi brez astigmatizma), kotna ločljivost očesa pa je eno ločno minuto. Za občutek navedimo, da je navidezni kotni premer Lune v povprečju okoli 30 minut.

V primeru branja (brez očal) pod oznako 20/30 vidimo ostro, če nosimo očala z dioptrijo $-0,5$, ločljivost očesa je 1,5 ločne minute. Oznaka 20/50 pomeni dioptrijo $-1,0$, nekorigirana ločljivost pa dosega 2,5 ločne minute.

Novejša karta za določanje vidne ostrine je karta log-MAR, ki so jo v National Research Vision Institute of Australia razvili pred 40 leti. Kratica pomeni logaritem (desetiški) minimalnega kota ločljivosti (Logarithm of Minimal Angle of Resolution). Za primer zgoraj navedenega popolnoma ostrega vida (Snell 20/20) je $\log(1) = 0$ oziroma je logMAR nič. [4]



Slika 5: Razpon dioptrij očesa pri prilagoditvi od neskončnosti do razdalje 25 cm je 4, večinoma na območju od le nekaj metrov do 25 cm (na ordinati je dioptrija, na abscisi razdalja v metrih). Z običajnimi enožariščnimi (monofokalnimi) IOL bi lahko dobro videli od neskončnosti do največ nekaj metrov, odvisno tudi od svetlobnih razmer. Lahko pa tudi na kakšni drugi razdalji, celo na zelo majhni bližini, a na račun ostrine pri drugih razdaljah. Razpon področja globinske ostrine je namreč s takimi lečami vedno zelo ozek, kar je njihova največja težava. V primeru implantacije običajnih monofokalnih IOL pa lahko eno oko »naravnajo« na ostro sliko neskončno oddaljenih predmetov in drugo na bližino, postopek se imenuje monovision ali mini monovision, odvisno od pooperativne razlike dioptrij med obema očesoma. (Vir: lastni)

Ker imajo vse leče tudi optične napake, velja to tudi za roženico in očesno lečo. Optične napake vplivajo na ostrino slike in dobre IOL jih znajo odpraviti.

Globinska ostrina je pomembna

Iz enačbe preslikave (1) sledi, da bi lahko izostrili samo na eni razdalji **a** od predmeta. Zaradi stalnega vpliva ciliarne mišice na očesno lečo pa ta zlahka ostri (akomodira) tudi na drugih razdaljah. V praksi je to nepotrebno, saj oko ne loči ostre slike od neostre (podobno velja tudi za slikovni senzor v kameri), če je le neostrina manjša

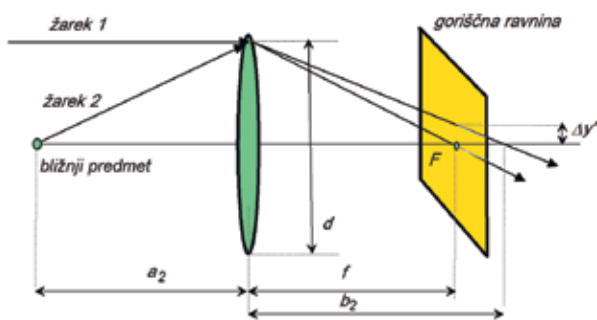
od neke minimalne še dopustne. Ta je pri npr. senzorju pogojena z velikostjo slikovnih elementov (pikselov), pri očesu pa z velikostjo svetlobnih receptorjev na mrežnici, to je paličic in predvsem čepkov, ki so pogosti na rumeni pegi. Če to možganom še nezaznavno neostrično označimo z npr. $2\Delta y'$ (slika), velja poenostavitev

$$a_2 = fd / (2\Delta y'), \quad (4)$$

kjer je d premer zenice očesa, f goriščna razdalja očesa, a_2 pa razdalja, od katere pa do neskončnosti je vse **videti** enako ostro (čeprav v resnici ni).

Oko na zmanjšanje a_2 vpliva z zmanjšanjem goriščne razdalje (ciliarne mišice stisnejo gibljivo očesno lečo, kar pomeni določen napor) ali pa z manjšanjem premera d zenice. Na slednje ne moremo vplivati zavestno, premer namreč neodvisno od naše volje pogojuje predvsem osvetljenost.

Pri večji osvetljenosti se zenica zoži, torej se razširi področje (navidezne) ostrine zaradi sorazmerno manjšega a_2 . Nasprotno temu pa je branje v slabi svetlobi utrujajoče, saj se mora ciliarna mišica stalno prilagajati kar najmanjšim spremembam razdalje do knjige, pri več svetlobe pa se globinska ostrina poveča in napora ni. Tudi to je pomembno za razumevanje delovanja nekaterih tipov IOL.



Slika 6: Če je predmet v neskončnosti (žarek 1) ali pa le na razdalji a_2 pred lečo (žarek 2), se slika premakne za razliko $b_2 - f$, v goriščni ravnini pa nastane neostrično območje velikosti $2\Delta y'$ (žarek 3, ki ni narisano, potuje od bližnjega predmeta v spodnji del leče in ustvari enako neostrično področje kot žarek 2, zato faktor 2 v izrazu). Ker je a_1 neskončen, je razdalja b_1 enaka goriščni razdalji f in se žarek 1 lomi v gorišče, žarek 2 pa na nekoliko večjo razdaljo b_2 . Opomba: a_2 , b_2 in f na skici niso v pravilnem razmerju (glede na enačbo leče). (Vir: lastni)

Osnovna delitev IOL

Vrst IOL je ogromno, zato bomo v članku omenili le pomembnejše. Leče so lahko psevdofakične ali fakične, prve so nadomestek za odstranjeno naravno lečo, v drugem primeru pa očesni kirurg vstavi IOL pred obstoječo lečo in tako spremeni dioptrijo očesa. To lahko koristi nekaterim mlajšim pacientom, ki se tako znebijo odvisnosti od očal, imajo pa še intaktno lastno očesno lečo, ali pa pooperativno popravimo slabo izbrano dioptrijo že

vstavljene IOL. Psevdofakične leče so precej pogostejše in govorili bomo le o teh.

Prve IOL so bile enostavne enožariščne in se množično uporabljajo še danes. Delno zato, ker je z njimi povezanih najmanj zapletov, pa tudi zaradi cene, saj le njihovo implantacijo plačajo zdravstvene zavarovalnice. Tako je teh leč še vedno do 90 %, naprednejšim pa v oftalmologiji pravijo premijske leče, čeprav celoten postopek vsaditve teh IOL večinoma ni dosti dražji. Enožariščne leče omogočajo psevdokomodacijo (npr. zaradi priprte zenice pri dobrih svetlobnih pogojih) manj od 1 dioptrije, kar pa je zagotovo premalo za gledanje na npr. računalnik, sploh pa za branje. Glavna zamera tem lečam gre torej na račun slabe ostrine povsod razen na eni razdalji (kjer pa so odlične), navadno neskončni, saj (odvisno od količine vpadle svetlobe in s tem globinske ostrine) je območje ostrine **bistveno** ožje kot pri premijskih modelih. Seveda pa je zdravje prvo, in čeprav so premijske leče v splošnem boljša izbira od monofokalnih, je treba vedeti, da vendarle niso vsi pacienti primerni kandidati zanje.



Slika 7: Alconove asferične monofokalne leče AcrySof IQ SN60WF z rumenim filtrom so pogosta izbira oftalmologov. [5]

Med premijskimi lečami so najpogostejše multifokalne leče, manj razširjene pa EDOF in akomodacijske leče. Uporabljena tehnologija je difrakcijska, refrakcijska ali kombinacija obeh, lahko gre celo za imitacijo kamere obskure, a se bomo izognili opisu kopice takih nenavadnih in celo futurističnih tipov IOL, ki pa v praksi še niso najboljše zaživel. Difrakcijske IOL so lahko neapodizirane ali apodizirane, bifokalne ali trifokalne. Tudi akomodacijske leče se delijo na več vrst, npr. z enim optičnim elementom (leče Crystalens podjetja Bausch + Lomb, FluidVision, futuristične Elenza) ali dvema elementoma (leče Synchrony podjetja AMO).

Omenimo le, da tudi za bolnike z makularno degeneracijo obstajajo posebne leče.

Akomodacijske IOL

Gre za leče, katerih oblika je spremenljiva zaradi delovanja (še zdrave) ciliarne mišice, delujejo pa *lahko* tudi z aksialnim premikanjem. Ker v prvem primeru oponašajo odstranjeno naravno lečo, so na prvi pogled najboljše izbira. Vsaj po mnenju evropskih oftalmologov pa se akomodacijske leče iz mnogih razlogov v praksi ne obnesejo tako dobro kot denimo difrakcijske.

V ZDA sorazmerno priljubljen predstavnik akomodacijskih leč je Crystalens družbe Bausch + Lomb. Gre za IOL, ki le funkcionalno posnema delovanje naravne leče. Leča ima zelo velike haptike – nekakšne nogice oz. izrastke, s katero se vsaka IOL pritrdi na strukturo ciliarne mišice. Haptiki omogočajo dober stik z mišico in v tem primeru njen izrazitejši vpliv na razdaljo do roženice (s) ter s tem ustrezno spremenjeno goriščno razdaljo očesa in akomodacijo. Za razumevanje delovanja zadoštuje že zapisana enačba za seštevanje dioptrij, v kateri upoštevamo omenjeni razmik med lečama.



Slika 8: Če se IOL oddalji od roženice, se poveča razdalja s (formula!) in dioptrija očesa pade (večja razdalja gledanja), sicer velja obratno. [6]

Med bolj eksotičnimi predstavniki te skupine omenimo še kalifornijsko podjetje PowerVision (zdaj v lasti Alcon), ki ponuja s silikonskim oljem napolnjeno akomodacijsko lečo FluidVision, ki pa ji ciliarna mišica s pomočjo velikih balonastih haptikov dejansko spremeni obliko in s tem omogoča ostrenje v razponu 3,5 dioptrije. Ta od FDA še neodobrena leča neposredno oponaša način delovanja naravne leče in je v bistvu enožariščna, a s spremenljivo goriščno razdaljo, vendar je tudi zaradi večje vreznine pri implantaciji potencialno problematična zaradi morebitnega nastanka postoperativnega astigmatizma. Fizikalno razumevanje delovanja dijakom omogoča že enačba izdelovalcev leč, sprememba krivinskih polmerov pač vpliva na dioptrijo.



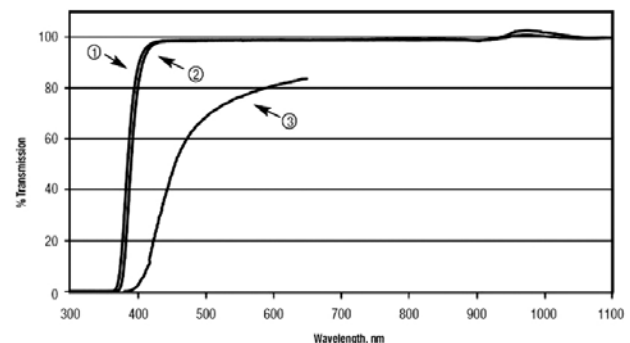
Slika 9: Od strani posneto oko razkriva prisotnost eksperimentalne akomodacijske leče FluidVision. IOL v očesu sicer običajno niso vidne. [7]

A ne pozabimo, za očesne implantate velja, da naj bi bili trajni. So žal večinoma sorazmerno težko odstranljivi, kar pomeni določeno tveganje za morebitne zaplete. Zato je še kako pomembno, da je že prva operacija uspešna »za vedno«. Tudi zato se akomodacijske leče vsaj v Evropi niso kdo ve kako prijele.

Leče s povečano globinsko ostrino EDof (Elongated Depth of Field)

Gre za novejšo generacijo IOL, lahko so difrakcijske ali refrakcijske. Za najznamenitejše difrakcijske EDof-leče Tecnis Symphony ZXR00 je ameriško podjetje AMO (zdaj v lasti družbe Johnson & Johnson) dobilo dovoljenje stroge FDA šele leta 2016. Symphony je le na videz multifokalna difrakcijska leča in zagotovo (ne brez razloga) ena najbolj reklamiranih. V resnici so jo naredili po načelu podaljšanega gorišča (*extended focus*) in je nekakšen asferičen hibrid med klasičnimi enožariščnimi in multifokalnimi lečami, poleg tega pa je njena kromatična aberacija nasprotna tisti, ki jo daje roženica. Tako je končna barvna napaka z difrakcijsko tehniko povsem neopazna, kar pripomore k precej večji globinski ostrini. V primerjavi z običajnimi difrakcijskimi multifokalnimi lečami povzroča le neizrazite haloje (sicer pogost in neprijeten sopojav vseh tovrstnih leč), kar izboljša kontrast, neželene disfotopsije (zatemnitve v vidnem polju), bleščanje ali »žarki« pa se redkeje pojavijo.

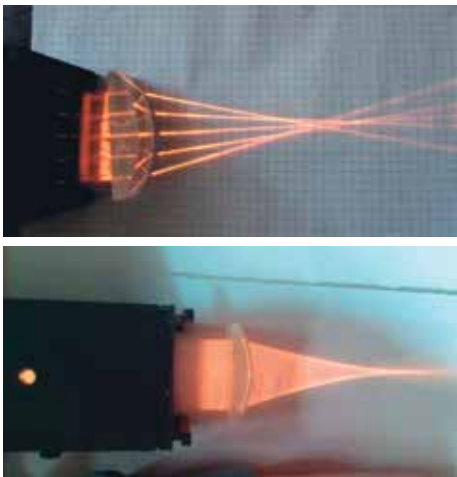
Posebna odlika leč Symphony je gladka »defokusna« krivulja brez izrazitih področij zmanjšane ostrine vida, vse od neskončnosti do razdalje približno 45 cm ali v dobri svetlobi celo malo manj (teoretično sicer nekaj nad 50 cm). Natančne meritve pokažejo, da je leča v rdeči svetlobi precej boljša za opazovanje na daljavo, v modri pa na srednje razdalje in delno bližino, zelena je nekje vmes. V praksi to lahko pomeni, da pri nočni vožnji z avtomobilom ne vidite najboljše na instrumente, če so osvetljeni samo z rdečo svetlobo, če pa so osvetljeni z modro ali zeleno, težav ni. Tecnis Symphony omogoča približno



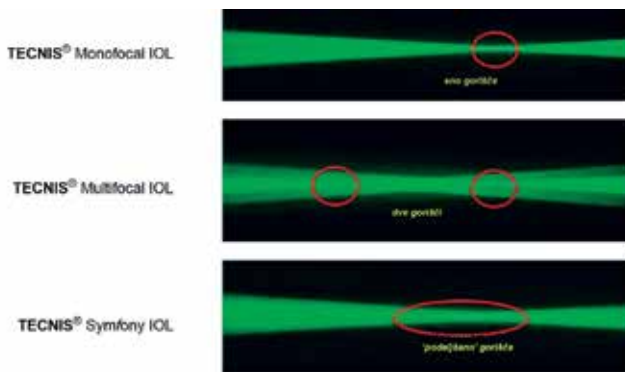
Slika 10: Krivulje svetlobne prepustnosti leč Tecnis Symphony pri različnih dioptrijah v očesu tipičnega 53-letnika. Velika razlika nastane v modrem delu spektra. Edina večja »napaka« te odlične IOL je ta, da pri mnogih pacientih brez dodatnih očal za branje ne omogoča ostrega vida na razdaljah pod 45 cm. [8]

takšen pogled kot oko človeka v poznih štiridesetih letih, ko se že pojavijo prve manjše težave pri branju drobnega tiska, sicer pa je vid še dober. Pred tremi leti je podjetje J & J to lečo nadgradilo s še boljšim trifokalnim EDOF-modelom Synergy, ki je po mnenju nekaterih trenutno najboljša premijska IOL.

V kategorijo leč EDOF spadajo tudi manj razširjene italijanske progresivne leče MiniWell Ready, a so nedifrakcijske s tremi ločenimi conami (zadnja je monofokalna) in ne povzročajo izrazitih (oz. motečih) halojev, za učinek povečane globinske ostrine pa izrabljajo kontrolirano sferno aberacijo (enostavneje rečeno, lomnost zunanjih delov leče je večja kot notranjih). Podobno lastnost spoznajo dijakom že pri izpeljavi enačbe goriščne razdalje sfernega zrcala in pri omembi kavstike.



Slika 11: Pri pouku sferno aberacijo (krogelno napako) pokažejo najprej na modelu leče z virom svetlobe z nekaj vzporednimi žarki in potem še s curkom svetlobe. (Vir: lastni)



Slika 12: Nazorna razlika med enožariščnimi, običajnimi multifokalnimi in EDOF-lečami. [9]

Difrakcijska tehnologija multifokalnih leč

Vse doslej povedano, razen morda načela delovanja leč EDOF, je mogoče dijakom brez večjih težav hitro razlo-

žiti. Najpogostejše premijske difrakcijske leče (popularno imenovane multifokalne leče) pa so že nekaj, kar ne gre več na hitro v glavo povprečnega dijaka/dijakinje. Čeprav gre za najuspešnejše in daleč najpogostejše vrste premijskih leč, je njihovo »delovanje« brez posebne razlage hitro na ravni mistike. Vsakemu srednješolcu je namreč že kaj kmalu po začetnih urah poglavja o geometrijski optiki jasno, da ima lahko leča le eno gorišče, če je leč več, pa enako velja za celoten sistem. Tukaj pa sta istočasno prisotni vsaj dve gorišči, od katerih je eno vedno refrakcijsko (torej tako, kot ga od leče pač pričakujemo), drugo difrakcijsko pa je k temu dodano po principu seštevanja dioptrij. Pri trifokalnih lečah sta dodani celo dve difrakcijski gorišči. Kako je torej to mogoče in kaj sploh je difrakcijsko gorišče?

Za boljše razumevanje delovanja difrakcijskih multifokalnih leč je smiselno odmak od geometrijske optike in spoznavanje Fresnelove conske plošče (ki je posebna krožna uklonska mrežica). Sestavljajo jo izmenični svetlobno neprepustni in prepustni koncentrični kolobarji – cone. S konstruktivno interferenco svetlobe (z ojačitvijo) s prepustnih con lahko svetlobo zberemo v določeno točko na optični osi, razdalje med conami pa morajo zato ustrezati interferenčnim pogojem. Tukaj se uvidoma ni težko navezati na, recimo, interferenco dveh virov valovanja na vodni gladini, kar dijaki seveda že poznajo.

Če si v poenostavljenem modelu zamislimo difrakcijsko gorišče plošče v točki F , potem velja, da tam interferirajo elementarni EM-valovi, ki prihajajo iz posameznih con. Njihov polmer R določimo tako, da se razdalja od npr. sredine sosednjih con do gorišča razlikuje za pol valovne dolžine. Zaradi privzete vrednosti $\lambda/2$ kot razlike razdalj do gorišča med posameznimi (temnimi in svetlimi) conami se prispevki svetlih con z interferenco ojačijo, celotna amplituda pa je enaka polovici tiste iz prve cone. Razdalja r_N N -te cone do gorišča je enaka $f + N\lambda/2$, kjer smo z N označili zaporedno število cone. Po krajšem računu sledi z uporabo Pitagorovega izreka (spodnja skica!)

$$f^2 = r_N^2 - R_N^2 = \left(f + \frac{N\lambda}{2}\right)^2 - R_N^2 = f^2 + fN\lambda + \frac{N^2\lambda^2}{4} - R_N^2. \quad (5)$$

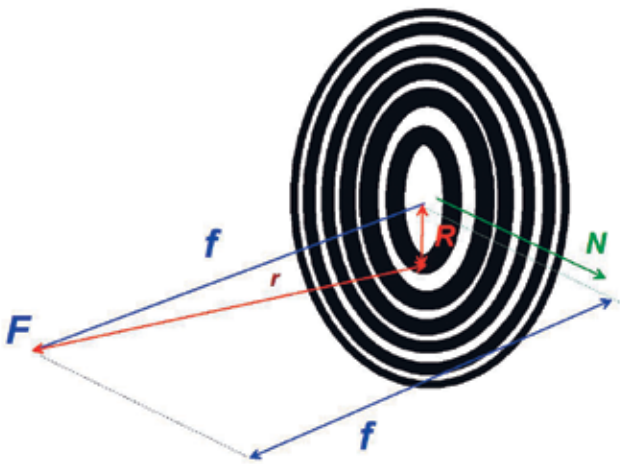
S primerno aproksimacijo (člen s kvadratom valovne dolžine λ je zanemarljiv) in po ureditvi dobimo enačbo za polmer N -te cone

$$R_N = (N\lambda f)^{1/2}. \quad (6)$$

Difrakcijska goriščna razdalja f je potemtakem

$$f = \frac{R_N^2}{N\lambda}. \quad (7)$$

Valovanje, ki prispe v gorišče F lahko razumemo kot seštevke valovanj, ki izhajajo iz posameznih con (iz njih izhajajo elementarni valovi, pač po Huygensovem principu). Prva cona tako »naredi« difrakcijsko gorišče po enačbi $f = \frac{R_1^2}{\lambda}$, kjer je R_1 polmer te cone, enako velja za naslednje, saj s primerno konstrukcijo dosežemo, da je količnik $\frac{R_N^2}{N}$ konstanten. Tako vidimo, da goriščno raz-



Slika 13: Fresnelove cone – k izpeljavi enačbe. (Vir: lastni)

daljo f določajo polmeri R posameznih Fresnelovih con, seveda v povezavi z valovno dolžino svetlobe, nekoliko podobno kot pri navadnem lomu – refrakciji. Podobnost pa je »nasprotna«, saj je pri difrakciji za manjšo goriščno razdaljo potrebna večja valovna dolžina, obratno kot pri refrakciji, kjer ima disperzija nasprotni učinek. Pravimo, da sta refrakcijski in difrakcijski kromatizem nasprotna, kar je seveda ugodno zaradi zmanjšanja barvne napake.

Difrakcijska IOL ima tako (vsaj) dve gorišči, enega določajo refrakcijske lastnosti »nosilne – osnovne« leče, drugega pa difrakcijske, če Fresnelovo strukturo apliciramo na lečo, seveda nekoliko drugače kot v zgornjem teoretičnem premisleku. Za razliko od plošče s posameznimi vmesnimi conami, ki ne prepuščajo svetlobe in s katerimi dosežemo potrebni fazni zamik, IOL zagotovi fazni zamik z različnimi višinami stopnic med vrezanimi kolobarji – obroči, kar omogoča podoben učinek, a z zmanjšano izgubo prepuščene svetlobe. Posamezne cone so tako na leči videti le kot drobne kolobarjaste zareze, kar naredijo z mikrolitografijo. Višina stopnice na leči je zelo majhna in reda velikosti mikrometra. Osnovna leča brez difrakcijske strukture ima pacientovemu vidu primerno visoko dioptrijo D_{ref} , ki omogoča oster pogled v daljavo, aplicirana difrakcijska struktura (obroči) pa zagotovi t. i. dodatni »Add Power« D_{dif} , ki je navadno med +2 in +4 dioptrije, in šele ta omogoči dober vid tudi na srednje ali celo zelo bližnje razdalje.

Dioptrija (za bližino) difrakcijskih multifokalnih leč je vsota refrakcijske in difrakcijske dioptrije, saj se te seštevajo po enačbi

$$D(\lambda) = D_{ref}(\lambda) + D_{dif}(\lambda). \quad (8)$$

Izdelovalci IOL pogosto eksperimentirajo z višino stopnice v posameznih conah, ker to vpliva tudi na porazdelitev energije v posamezna gorišča. Tako npr. z višino stopnice $\lambda/2$ dosežejo v ničtem difrakcijskem redu ($N = 0$) prenos energije v oddaljeni fokus, pri prvem redu ($N = 1$) pa prenos energije v bližnje gorišče [10],

pri čemer sta energiji približno enaki. Manjša višina stopnice favorizira oddaljeno gorišče, večja pa bližnje. To velja za običajnejše bifokalne leče (površno imenovane multifokalne). Višina stopnice pa ni nujno enaka, nekatere IOL uporabljajo t. i. apodizacijo, s katero modulirajo višino stopnice različnih con in količino energije, ki gre v oddaljeni ali bližnji fokus. Navadno višina stopnice na zunanjih kolobarjih pade in s tem se poveča energija svetlobe v oddaljenem gorišču, kar je ugodno za nočni vid na daljavo (pomembno za npr. astronome). Nekatere difrakcijske EDOF-leče uporabljajo večjo fazno razliko in red ojačitve 1 in 2, kar je povezano tudi z odpravo barvne napake in še z nekaterimi specifičnimi lastnostmi takih leč.

Za difrakcijske IOL velja, da njihova f ni odvisna od stopnje odprtosti zenice, kar je prednost pred refrakcijskimi multifokalnimi lečami, ki imajo prav tako vsaj nekaj koncentričnih con, a z različnimi refrakcijskimi gorišči za opazovanje na različne razdalje, in tudi niso podobne navadnim lečam. Gre za aksialno združitev več leč z različnimi dioptrijami (vsaka bi pomenila en kolobar v tako sestavljeni leči). Z radialno spremembo lomnega količnika pa prav tako lahko vplivamo na goriščno razdaljo sosednjih con. Pri refrakcijskih IOL na (ne)ostrino slike oz. na delovanje posameznega kolobarja neugodno vpliva odprtost zenice in se tudi zato ne uporabljajo pogosto.

Refrakcijska dioptrija sferne leče (čeprav so boljše IOL navadno asferične) je

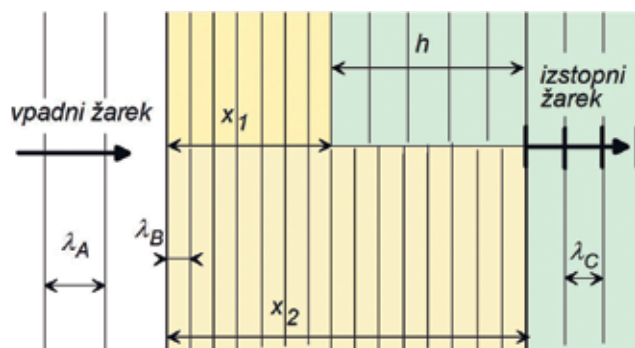
$$D_{ref} = (n_{leče} - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad (9)$$

kjer sta r_1 in r_2 krivinska polmera obeh lečnih ploskev, z n pa smo označili različna lomna količnika leče in očesne tekočine (ot), v katero je IOL potopljena. Seveda pa so zaradi disperzije količniki odvisni še od barve svetlobe.

Ker je optična pot definirana kot produkt lomnega količnika in geometrijske poti, fazni zamik $\Delta\varphi$ pa je določen z razliko optičnih poti, pomnoženo z valovnim vektorjem $k (= \frac{2\pi}{\lambda})$, dobimo na »stopnici« višine h difrakcijskega profila ustrezni fazni zamik

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{leče} - n_{ot}) h. \quad (10)$$

Pri razumevanju te enačbe se je dobro spomniti enačbe sinusnega valovanja $s = s_0 \sin(\omega t - kx)$, kjer zadnji člen v argumentu sinusa pomeni fazni zamik, k pa je valovni vektor $\frac{2\pi}{\lambda}$ in x pot. V enačbi za $\Delta\varphi$ tej ustreza višina stopnice h , upoštevali pa smo še različne optične poti v leči in steklovini očesa, kar storimo tako, da geometrijsko pot množimo z lomnim količnikom (to v šoli počnemo npr. pri razlagi barve odbite svetlobe na tankih plasti zaradi interference). Če bi bili poti enaki, seveda ne bi bilo faze razlike.



Slika 14: K razlagi faznega zamika (Vir: lastni)

Npr. da ravno valovanje (smer določa vpadni žarek, ki je pravokoten na vpadne valovne fronte) vпада iz sredstva A v sredstvo B (leča, C pa je npr. očesna tekočina za lečo), ki je razdeljeno na del 1 (zgoraj) in del 2 (spodaj). Izstopni žarek »čuti« interferenco valovanj v delu 1 in delu 2, o čemer odloča fazna razlika $\Delta\varphi$ od 0 do 2π .

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_A}(n_B x_2 - n_B x_1 - n_C h) = \frac{2\pi}{\lambda_A}(n_B - n_C)h, \quad (11)$$

kar je enako kot v enačbi (10), če le primerno prilagodimo indekse.

S kombinacijo dveh difrakcijskih profilov pri difrakcijskih IOL (+ osnovne refrakcijske dioptrije) pa lahko dosežejo celo trifokalnost. Profila sta po velikosti po navadi usklajena (nista povsem neodvisna), tako se poveča količina svetlobe v gorišču za srednje razdalje.

Povzemimo

Konstrukcija mnogih difrakcijskih multifokalnih leč je približno takšna: leča je konveksna, navadno bikonveksna. Lomni količnik materiala in ukrivljenosti obeh ploskev (r_1 in r_2) določata njeno osnovno refrakcijsko dioptrijo, ki je glede na lastnosti konkretnega očesa navadno od +5 do +30, kar ugotovi oftalmolog s skrbnimi meritvami in izračuni pred operacijo. Ena ali obe ploskvi imata dodane večžariščne difrakcijske elemente. Tako se lahko spreminja višina Fresnelovih con (stopnice) in s tem fazni zamik med optičnimi potmi posameznih žarkov, polmer con pa vpliva na difrakcijsko dioptrijo (t. i. *Add Power*). Difrakcijska dioptrija se prišteje k refrakcijski (za gledanje na blizu ali za srednje razdalje), pri lečah EDOF je globinska ostrina močno povečana.

Multifokalne leče se kljub zavajajočemu imenu tako izkažejo le na dveh daljavah (neskončno in blizu, saj so v bistvu bifokalne), novejša trifokalna pa dosegajo dobro ostrino v treh točkah, v neskončnosti, na srednjih razda-

ljah (red velikosti enega metra ali nekaj manj – gledanje na monitor na npr. 60 do 80 cm) in na bližino – branje drobnega tiska na razdalji okoli 35 cm, vmes pa je ostrina nekoliko slabša. Za tovrstne leče navajajo dve »Add Power« dioptriji, za srednje razdalje okoli +1,5 in za bližnje okoli +3,0, odvisno od modela. Obstajajo tudi modificirane kvadrofokalne leče, pri katerih eno gorišče žrtvujejo za ugodnejšo porazdelitev svetlobe v preostala (primer so Alconove leče IQ PanOptix).

Princip multifokalnosti torej pomeni le razporeditev (seveda tudi tukaj neizprosno velja strogi energijski zakon) vpadle svetlobe na dve do tri goriščne razdalje, kar v določeni meri povzroča polje nejasnosti in bleščanja ter (odvisno od konkretne IOL) opazne haloje ponoči okoli zelo svetlih predmetov. Moteč je lahko pojav črk iz ozadja oziroma nekakšnih senc, s katerimi je včasih obrobjen zelo kontrasten tekst, podoben je pojav nenavadnega »bokeja« pri opazovanju listja v gozdu na svetel dan (izraz iz fotografije, ki pomeni obliko neostre, zabrisane slike, ki jo dajejo predmeti, če slika zaradi npr. odprte zaslonke ni več v področju globinske ostrine in je povezana z obliko zaslonke), kar lahko pripišemo difrakcijskim pojavom. Poleg tega je treba znati odmisлити dve ali tri slike in videti le eno ostro, kar večina pacientov hitro in brez posebnega truda obvlada že v procesu nevroadaptacije, ki sledi operaciji. Ta je nezaveden, a pri redkih posameznikih dolgotrajen ali celo neuspešen, zato multifokalne leče vendarle niso za vsakogar, kar pa najbolje oceni izkušen oftalmolog. Po nekaterih raziskavah vsakemu dvestotemu pacientu (Alcon, ReStor) lečo odstranijo, ker ga ti pojavi enostavno preveč motijo. Preostali se po navadi hitro navadijo na nekaj posebnosti in jih zlahka tolerirajo na račun precejšnjih prednosti takih leč v vsakdanjem življenju.



Slika 15: Oko z implantirano trifokalno lečo FineVision podjetja PhysIOL je posnel Rudy M.M.A. Nuijts s pomočjo špranske svetilke. 45 % prepuščene svetlobe gre v oddaljeno gorišče, 20 % v srednje in 35 % v bližnje gorišče. Vidimo tudi, da je leča manjša od do konca odprte zenice. Celotna svetlobna prepustnost mnogih IOL je okoli 85 %. [11]

Ali kljub izbiri multifokalnih leč potrebujemo očala?

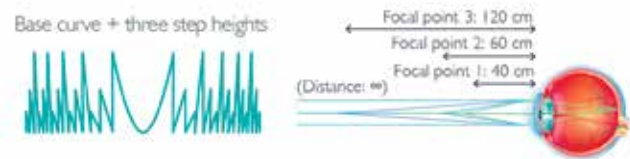
Za na daleč najbrž ne (če je operacija v smislu izbire prave dioptrije IOL **popolnoma** uspela, kar ne drži vedno in česar se pacienti premalo zavedajo), za na blizu ali za vmesne razdalje pa je zadeva lahko drugačna. Recimo, da vidimo z neko IOL dobro od razdalje 40 cm dalje (kar je po navadi zadovoljivo), želeli pa bi brati še z večje bližine, npr. z normalne zorne razdalje s_0 (25 cm). Za majhne otroke je ta vrednost še manjša, vendar že 25 cm povsem zadostuje za udobno branje tudi najdrobnejšega tiska (oznaka J1 ali Jaegers 1 v testih bližinskega vida).

V takem primeru vseeno potrebujemo očala s pozitivno dioptrijo, ki jo določimo z računom (pri izpeljavi uporabimo enačbo preslikave (1))

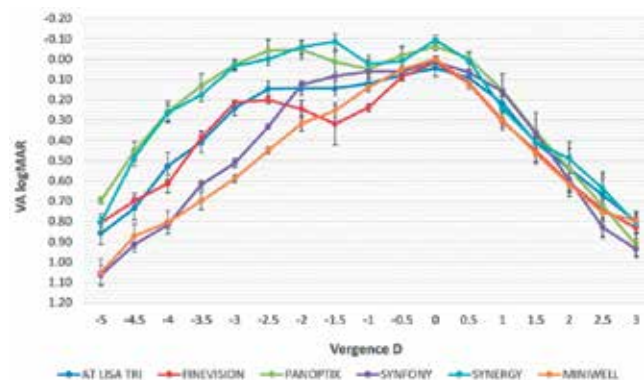
$$1/f = (a - s_0)/(a s_0), \quad (12)$$

kjer je a razdalja, na kateri še lahko beremo, v našem primeru 40 cm, s_0 pa tista bližnja, na kateri bi to želeli početi (npr. 25 cm). Zgornja enačba sicer ni povsem natančna, ker ne upošteva razdalje oči od glavne ravnine v očesu. Pri navedenih podatkih tako izračunamo (vse količine prej pretvorimo v metre!) majhno dioptrijo $+1,5$. Taka očala za na blizu očitno niso posebej »močna«, z nekoliko večjo dioptrijo pa lahko to razdaljo še zmanjšamo.

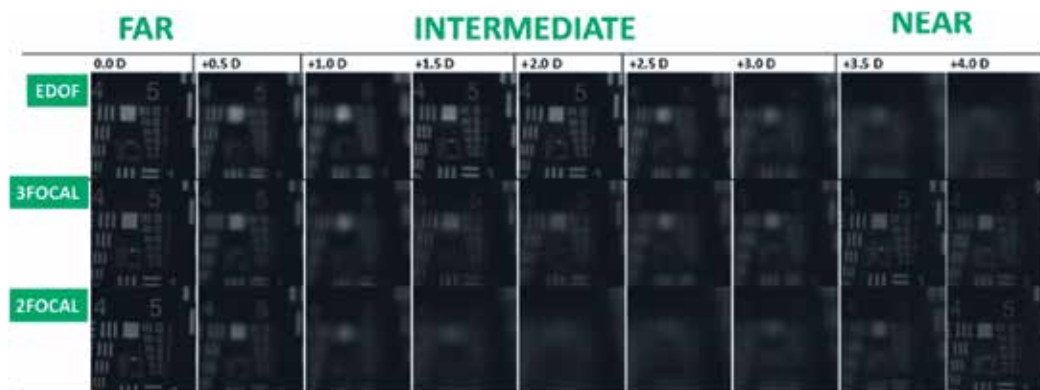
Pri opazovanju z obema očesoma se področje ostrine večinoma dodatno poveča, kar je zagotovo posledica nevroadaptacije. Zanimivo je tudi to, da lahko v primeru kombinacije različnih IOL za levo in desno oko dobimo vtis boljše ostrine v širšem področju, saj možgani dajo »prednost« tisti leči oz. očesu, ki je za določeno razdaljo ostrejša. Tako lahko »zgladimo« defokusno krivuljo in zagotovimo boljši vid.



Slika 17: Difrakcijski profil za znano neapodizirano »kvazikvadrofokalno« Alconovo lečo Panoptix IQ, ki deluje kot trifokalna leča. Tretja stopnica profila je oblikovana tako, da omogoča več svetlobe v oddaljenem gorišču, in nima namena ustvarjati dodatnega četrtega gorišča. [13]



Slika 18: T. i. defokusne krivulje nekaj najbolj znanih IOL. At Lisa Tri (Carl Zeiss), FineVision (PhysIOL), Panoptix (Alcon), Symphony in Synergy (J & J) in Miniwell (SiFi). Krivulje lahko razumemo kot povezavo med neostriino v logMAR (ordinata) in razdaljo, na kateri gledamo predmet, ki je podana kot $-1/D$. Za pravilno vstavljeno lečo je pomemben le del od izhodišča do dioptrije 0. »Najostrejša« imajo logMAR okoli 0, zaželeno je, da v čim širšem razponu dioptrij (tj. na različnih razdaljah), krivulja pa naj nima izrazitih vrhov (npr. Symphony), ki prispevajo k občutku neostrine na vmesnih razdaljah. [14]



Slika 16: Primerjava ostrine vida enožariščnih, bifokalnih in trifokalnih leč podjetja Carl Zeiss na različnih razdaljah s simulacijskim programom ameriškega vojnega letalstva (USAF). [12]

Viri

- [1] Snoj, Rasto (2017). Intraokularne leče – nov pogled na svet. Življenje in tehnika, 68(2), str. 12–21.
- [2] Snoj, Rasto (2018). Intraokularna leča v očesu amaterskega astronoma. Spika, 26(7-8), str. 341–345; (I. del); 26(10), str. 442–444 (II. del); 26(11), str. 491–493 (III. del).
- [3] <https://millenniaeye.com/articles/2017-innovations/the-next-generation-of-iol-technology/> (januar 2023)
- [4] <https://www.template.net/editable/121842/snellen-eye-chart> (januar 2023)
- [5] <https://opticanet.com.br/secao/asnovidades/6000/nova-lente-intraocular-da-alcon-permite-recuperar-a-visao-de-uma-so-vez> (januar 2023)
- [6] <https://www.tristateeye.com/crystalens.html> (januar 2023)
- [7] <https://www.escri.org/eurotimes/accommodative-iol> (januar 2023)
- [8] <https://www.precisionlens.net/wp-content/uploads/JJ-Tecnis-Symfony-Toric-DFU.pdf>
- [9] <https://premiumvisionsc.com/eye-surgery/iol-options/> (januar 2023)
- [10] Biomedical Optics Express, Optica Publishing Group, 2017
- [11] <https://www.ophtalmologytimes.com/view/multifocal-iol-evolution> (januar 2023)
- [12] https://www.researchgate.net/figure/USAF-target-images-of-the-3-IOLs-recorded-at-30-mm-pupil-size-for-far-intermediate-and_fig2_318117261 (marec 2023)
- [13] <https://theophthalmologist.com/fileadmin/top/issues/0816/Alcon.pdf> (januar 2023)
- [14] https://www.researchgate.net/figure/Mean-defocus-curves-obtained-in-each-intraocular-lens-IOL-group_fig2_352221319 (januar 2023)

Iz digitalne bralnice ZRSŠ

www.zrss.si/digitalna-bralnica/

V digitalni bralnici lahko prelistate najrazličnejše strokovne publikacije: monografije in priročnike, ter druge publikacije, ki so izšle na Zavodu RS za šolstvo in so vam BREZPLAČNO dosegljive tudi v PDF obliki.

Prijeto strokovno branje vam želimo.

