

LATVIJAS UNIVERSITĀTE  
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE  
OPTOMETRIJAS UN REDZES ZINĀTNES NODAĻA

**DAŽĀDU ACS MODEĻU OPTISKO PARAMETRU  
IZPĒTE**

BAKALaura DARBS

Autors: **Kornēlija Brigzna**

Studenta apliecības Nr. kb16064

Darba vadītājs: fiziķis, Dr.phys. Varis Karitāns

Rīga 2019

## ANOTĀCIJA

Bakalaura darbs ir uzrakstīts latviešu valodā uz 32 lappusēm, satur 15 attēlus, 7 tabulas un 28 atsauces uz literatūras avotiem.

**Mērķis:** novērtēt, kurš literatūrā aprakstītais acs modelis vislabāk atbilst lielas cilvēku populācijas vidējiem acs optiskajām parametriem.

### **Secinājumi:**

1. Modulācijas pārnese funkcijas pamatā esošais salīdzinājums piecu teorētisko modeļu gadījumā, kas zināmi no literatūras, atklāj, ka Liu un Brenana modelis uzrāda vislabāko modulācijas pārnese funkciju. Pēc korelācijas analīzes un vismazāko kvadrātu metodes Gulstranda acs modelis uzrādīja vistuvākos rezultātus cilvēka acs modulācijas pārnese funkcijai.

2. Liu un Brenana modelis uzrādīja visaugstāko robežfrekvenci modulācijas pārnese funkcijai, tādējādi iegūstot redzes asumu  $V=4,00$  dec. v., savukārt pēc modeļa punkta izkliedes funkcijas pilna platuma pusē maksimuma metodes uzrādot redzes asumu  $V=2,80$  dec. v., atšķiroties no cilvēka populācijas vidējā redzes asuma, kas ir  $0,98 \pm 0,68$  dec. v.. Emsleja, Gulstranda, Helmholca un Šviegerlinga modeļu rezultāti ietilpst lielas cilvēku populācijas vidējās redzes asuma robežās.

3. Liu un Brenana modelis polihromatiskā gaismā uzrāda vismazāko hromatiskās aberācijas dioptrisko nobīdi  $0,35$  D. Gulstranda, Helmholca, Šviegerlinga, Liu un Brenana acs modeļi labāk raksturo cilvēka vidējo hromatiskās aberācijas nobīdi, ietilpstot abu cilvēku hromatisko aberāciju pētījumu rezultātu robežās.

**Atslēgas vārdi:** acs modelis, acs modeļu simulēšana, modulācijas pārnese funkcija, aberācijas.

## **ABSTRACT**

Bachelor's paper has been written in latvian and consists of 32 pages, contains 15 figures, 7 tables and 28 bibliographic sources.

**Purpose:** assess which eye model described in the literature best corresponds to the average eye optical properties of a large human population.

### **Conclusions:**

1. The underlying comparison of the modulation transfer function for the five theoretical models known from the literature reveals that the Liou and Brennan model shows the best modulation transfer function. After correlation analysis and least squares method, the Gullstrand eye model showed the closest results to a modulation transfer function of a human eye.

2. The Liou and Brennan model showed the highest cut-off frequency for the modulation transfer function, thus obtaining visual acuity of  $V = 4,00$  dec. u., however, after the model point spread function with full width half maximum method visual acuity is  $V = 2,80$  dec. u., differing from the mean of a human population which is  $0,98 \pm 0,68$  dec. u. The results of the Emsleys, Gullstrand, Helmholtz and Schwiegerling models fall within the limits of the mean visual acuity of a large human population.

3. The Liou and Brennan model exhibits the least chromatic aberration dioptric shift in polychromatic light 0,35 D. Gullstrand, Helmholtz, Schwiegerling, Liou and Brennans eye models better describe human chromatic aberration offset, within the results of both studies of chromatic aberrations in humans.

**Key words:** eye schematic model, simulation of an schematic eye model, modulation transfer function, aberrations.

# SATURS

IEVADS .....	1
1. LITERATŪRAS PĀRSKATS .....	2
1.1. Acs anatomija un optiskā sistēma .....	2
1.2. Acs optisko kvalitāti ietekmējošie apstākļi.....	5
1.2.1. Difrakcija.....	5
1.2.1. Aberācijas.....	6
1.2.2. Acs aberācijas.....	8
1.3. Modulācijas pārnese funkcija.....	10
1.4. Acs modeļi .....	11
1.4.1. Emsleja acs modelis .....	11
1.4.2. Gulstranda acs modelis .....	12
1.4.3. Helmholca acs modelis .....	12
1.4.4. Šviegerlinga acs modelis.....	12
1.4.5. Liu un Brenana acs modelis .....	13
2.PĒTĪJUMA DAĻA.....	14
2.1. Pētījuma metode .....	14
2.1.1. Acs modeļu simulēšana programmā Zemax .....	14
2.1.2. Modulācijas pārnese funkciju novērtēšana.....	15
2.1.3. Redzes asuma aprēķins .....	15
2.1.3. Hromatisko aberāciju izvērtēšana .....	17
2.2. Pētījuma rezultāti un analīze.....	17
2.2.1. Simulēto acs modeļu MPF un to salīdzinājums ar cilvēka MPF .....	17
2.2.2. Acs modeļu redzes asuma prognozējums .....	19
2.2.3. Acs modeļu hromatiskās aberācijas .....	20
SECINĀJUMI .....	24
NOBEIGUMS .....	25
PATEICĪBA .....	26
IZMANTOTĀ LITERĀTŪRA .....	27

## IEVADS

Acs modeļi palīdz saprast un izziņāt redzes sistēmas īpašības un galu galā tie atklāj optiskā dizaina principus, kas saistīti ar acs optiskās sistēmas struktūru un darbību. Acs modeļu simulēšana ir veids kā pētīt un radīt savus modeļus ar pavadošām hipotēzēm. Tas ir aktuāli, jo bieži ir nepieciešams simulēt ar redzes optiku saistītu optisko elementu un ierīču darbību. Šādu optisko elementu un ierīču piemēri ir redzes korekcijas līdzekļi, proti, briļļu lēcas, kontaktlēcas, refraktīvo defektu ķirurģija.

Lai ierīču simulācijas rezultāti atbilstu patiesajiem rezultātiem, acs modeļa un dzīvas acs optiskajiem un ģeometriskajiem parametriem jābūt līdzīgiem. Mūsdienās simulācijas un analīzi var veikt jebkuram acs modelim datorizētās programmās. Pastāv vairāki praktiski acs shematiskie modeļi, tajos ņemti vērā visu optisko vižu laušanas koeficienti un liekumi, tīklene atveidota ļoti līdzīgi cilvēka acs tīklenei un citos acs modeļos iekļautas arī patoloģijas. Praktiskos acs modeļus pielieto mācību praksē, lai izmeklētu redzes refraktīvos defektus, ir izveidots acs modelis, lai pētītu kataraktu, kā arī acs modelis asaru plēvītes īpašību mērījumiem.

Darba mērķis ir novērtēt, kurš literatūrā aprakstītais acs modelis vislabāk atbilst lielas cilvēku populācijas vidējiem acs optiskajiem parametriem.

Hipotēze: Dažādu acs optisko parametru aprakstam vislabāk piemēroti dažādi acs modeļi.

Darba uzdevumi:

1. Simulēt un novērtēt acs modeļu modulācijas pārneses funkciju un salīdzināt ar literatūrā aprakstītu īsta cilvēka modulācijas pārneses funkciju.
2. Novērtēt acs modeļu redzes asumu un salīdzināt ar cilvēku populācijas redzes asumu.
3. Raksturot acs modeļu hromatiskās aberācijas un salīdzināt ar lielas cilvēku populācijas hromatiskajām aberācijām.

# 1. LITERATŪRAS PĀRSKATS

## 1.1. Acs anatomija un optiskā sistēma

Acs ir orgāns, ar kura palīdzību uztveram līdz pat 80 % mūsu apkārtējo pasauli. Cilvēka redzes process sākas ar primāru gaismas avotu, elektromagnētisko vilni, līdz ar to redzes sensorā sistēma uztver izstaroto vai atstaroto gaismu, radot priekšstatu par objektu vai telpu, tādējādi redze palīdz orientēties dažādos ārējās vides apstākļos.

Cilvēka redzes orgānu veido lodveida acs ābols un tā papildaparāti. Acs ābols atrodas acs dobumā un tā diametrs vidēji ir 2,5 cm, masa 7,5 gr. Optiskais stiprums no +58,00 D līdz +70,00 D (Eglīte, 2010). Acs ābola sienai var izdalīt trīs apvalkus ar dažādu savstarpējo novietojumu priekšējās daļās. Pirmais ir ārējais jeb šķiedrainais apvalks, kuru veido radzene un sklēra, dēvēta arī par cīpsleni. Vienu piekto daļu no acs ārējā apvalka aizņem spīdīga, spoguļojoša, gluda, dzidra, sfēriska radzene, kurā nav asinsvadu. Radzenes biezums centrā ir 0,5 mm, taču perifērijā līdz 1,00 mm (Kalbergs, 1973). Radzene ir viena no acs struktūrām, kas pilda aizsargfunkciju, pasargājot aci no putekļiem, baktērijām un citām kaitīgām vielām, tajā piedalās radzenes pieci slāņi – epitēlijs, priekšējais limitējošais slānis jeb Boumena slānis, stroma, iekšējais limitējošais slānis jeb descemē slānis. Galvenā funkcija radzenei ir lauzt vai liekt gaismas starus un fokusēt lielāko daļu gaismas, kas nonāk acī. Gaismas laušanas koeficients radzenei ir 1,376, optiskais stiprums 42,00 D (Oyster, 1999).

Sklēra savukārt aizņem četras piektdaļas no acs ārējā fibrozā apvalka. Sklēra pretēji radzenei ir necaurspīdīga, tā ir balta pateicoties kolagēna šķiedrām, kuras ir novietotas nesakārtoti un atšķirīgi dažādās vietās. Sklēras izliekuma rādius ir no 11,5 mm līdz 12,00 mm, biezums no 0,3 mm līdz vidēji 1,2 mm (Kalbergs, 1973). Sklēra sastāv no trīs slāņiem – episklēra, stroma un iekšējais slānis jeb lamina. Cauri sklērai iet redzes nerva šķiedras, redzes nerva apvalka šķiedras. Dažādās vietās pie sklēras piestiprinās visi seši acs ābola kustību muskuļi.

Otrais ir vidējais jeb asinsvadu apvalks, šis apvalks ir necaurspīdīgs. Satur asinsvadus, pigmenta šūnas un nervus. Asinsvadu apvalku iedala trīs daļās – dzīslene, starene un varavīksnene. Dzīslene ir lielākā, mugurējā daļa, kas cieši pieguļ sklērai. Dzīslene priekšpusē sabiezinās un pāriet starenē, kas savukārt fiksē lēcu un piedalās akomodācijā (Oyster, 1999). Dzīslenes galvenā funkcija ir nodrošināt nepieciešamo tīklenes fotoreceptoriem.

Starene jeb ciliārais ķermenis ir acs daļa, kas ietver ciliāru muskuļi, kas kontrolē lēcas formu, un ciliāru epitēliju. Ciliāra ķermenis lielākoties sastāv no gludajām muskuļšūnām. Ciliārā ķermeņa pamatu veido akomodācijas muskulis *m.ciliaris*. Ciliārajam ķermenim ir trīs

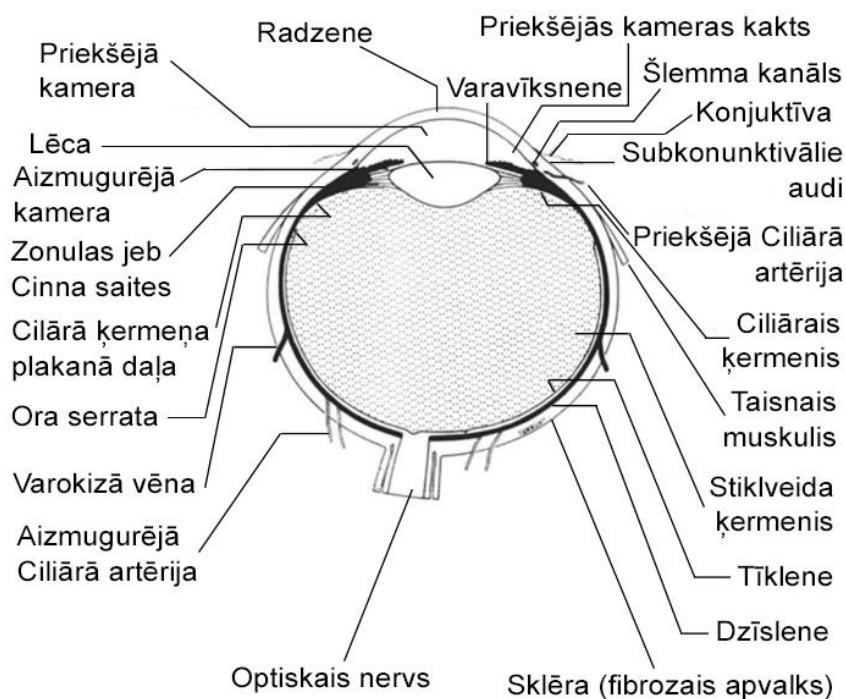
galvenās funkcijas – šķidrums sekrēcija, akomodācija un fotoreceptoru apgāde. Ja ciliārais ķermenis saraujas, saites atslābst, lēca kļūst izliektāka un tās gaismas staru laušanas spēja palielinās.

Varavīksnene ir pati priekšējā struktūra uveālajā traktā. Varavīksnenes centrā ir caurums ar apļveida atvērumu, ko sauc par zīlīti, tā ir atbildīga par gaismas daudzuma regulēšanu zīlītē, kas caur to nonāk acī. Varavīksnenē ir daudz asinsvadu, gludo muskuļšūnu un pigmenta, tā daudzums nosaka acu krāsu. Starp varavīksneni un radzeni ir caurspīdīgs šķidrums (aqueous humor), ar to ir pildīta 2,3 mm dziļā priekšējā acs kamera (Eglīte, 2010). Toties starp varavīksneni un lēcu mugurējā kamera. Abas kameras savieno zīlīte.

Trešais ir iekšējais apvalks jeb tīklene. Tīklene ir sarežģīta struktūra, kas sastāv no vairākiem slāņiem, no kuriem tikai vienā ir gaismas jutīgas fotoreceptoru šūnas. Tīklenes biezums mainās tādās vietās, kā pie redzes nerva 0,4 mm, taču centrālajā daļā 0,2 mm (Kalbergs, 1973). Gaismai ir jānokļūst cauri slāņiem, lai sasniegtu fotoreceptoru šūnas, kas ir divu veidu, proti, nūjiņas un vālītes, kas strukturāli ir diferencēti pēc to atšķirīgajām formām un funkcionāli atkarīgi no jutīguma pret dažāda veida gaismu. Pateicoties fotoreceptoriem tīklene uztver gaismu un ir sācies attēla veidošanas process, pārveidojot gaismas enerģiju fotoķīmiskā formā, radot nervu impulsus. Simtiem miljonu receptori veido lielu daudzumu informācijas, kura jāpārstrādā. Lielākā izšķirtspēja fotoreceptoriem notiek pigmentētā laukumā makulā ar centrālo bedrīti fovea. Makula ir atbildīga par augstu izšķirtspēju un krāsu redzi. Tīklenē makula nodrošina vislabāko redzes asumu. Makula vidēji ir 5,0 mm liela diametrā, bet fovea 1,5 mm liela diametrā (Kalbergs, 1973).

Tīklēni iedala desmit slāņos – tīklēnes pigmentepitēlijs, nūjiņu un vālīšu slānis, ārējā limitējošā membrāna, ārējais graudainais slānis, ārējais tīklainais slānis, iekšējais graudainais slānis, iekšējais tīklainais slānis, ganglionāro šūnu slānis, tīklēnes nervu šķiedru slānis, iekšējā limitējošā membrāna. Tīklenē vēl ir amorfā starpšūnu viela un asinsvadi. Caur tīklēnes pigmentepitēliju virsējie slāņi saņem barības vielas. Pigmentepitēlijs piedalās fotoreceptoru atjaunošanā un A vitamīna vielu maiņā. Pigmentepitēlija pigments kalpo kā gaismas absorbētājs. Tīklēnes otro slāni veido no 110 līdz 125 miljoniem nūjiņas un no 4,5 līdz 6,5 miljoniem vālītes (Oyster, 1999). Nūjiņas nodrošina skotopisko redzi un reaģē uz gaismas intensitāti, toties vālītes atbild par fotopisko redzi. Tas ir pateicoties atšķirīgajiem fotopigmentiem. Nūjiņām rodopsīns, kas ir piecas reizes jutīgāks par vālīšu fotopigmentu jodopsīnu. Tātad tumsā aktivizējas un labāk strādās nūjiņas, bet gaišā dienas laikā vālītes piešķirot krāsu attēlam. Jo tālāk tīklenē uz perifēriju, jo vairāk nūjiņu, mazāk vālītes. Centrālajā bedrītē atrodas blīvi novietotas tikai vālītes. Kopumā nūjiņas un vālītes uztver elektromagnētisko starojumu ar viļņu garumu 380 nm – 750 nm (Levin, u.c., 2011). Svarīgi

elementi acs ābolā ir kodols, kuru veido lēca un stiklveida ķermenis. Lēca ir abpusēji izliekta, blīvi elastīga, caurspīdīga, nesatur asinsvadus, novietota acī starp varavīksneni un stiklveida ķermeni. Lēcu noteiktā pozīcijā notur cinna saites un hialoīdokapsulārās saites. Pieaugušam cilvēkam lēcas izliekuma rādiuss priekšējā virsmā ir 10,0 – 11,0 mm, mugurējā virsmā ar 4,4 -5,0 mm (Eglīte, 2010). Priekšējā virsma ir plakanāka, bet aizmugurējā izliektāka. Lēcas izliekuma izmaiņas procesu sauc par akomodāciju. Akomodācija ir būtiska redzes funkcija, tā palīdz aplūkot fokusētus priekšmetus dažādos attālumos, mainot acs optiskā stiprumu dioptrijās. Lēcas biezums ir no 3,5 mm līdz 5,0 mm, bet diametrs aptuveni 10,0 mm (Kalbergs, 1973). Cilvēka mūžu nepārtraukti atjaunojas lēcas priekšējās un mugurējās daļas šūnas. Tā kļūst blīvāka. Lielāko daļu acs ābola kodolu veido stiklveida ķermenis. Stiklveida ķermenī nepārtraukti notiek šķidruma plūsma, kuru sekretē ciliārais ķermenis. Stiklveida ķermenis ir balstelements, pilda arī tādas funkcijas kā vada gaismu uz tīkleni, uztur acs ābola formu un tonusu, piedalās lēcas un tīklenes vielu apmaiņā. Vides laušanas koeficients stiklveida ķermenī ir 1,336 (Oyster, 1999). Acs anatomiskās struktūras skatīt 1.1. attēlā.



1.1.attēls. Acs anatomiskās struktūras (Tandon, 2011)

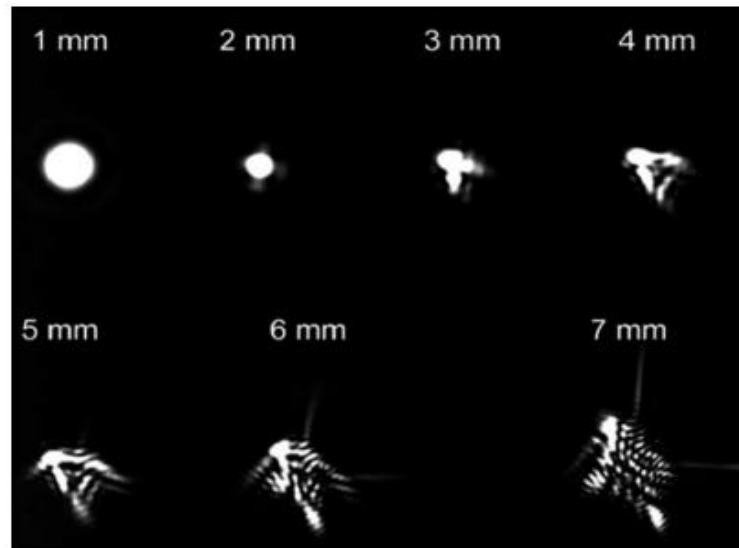
## 1.2. Acs optisko kvalitāti ietekmējošie apstākļi

Acs ir optisks, gaismas informāciju uztverošs orgāns, kas projicē gaismu uz tīklenes, kurā rodas elektriskie impulsi, kas tālāk pa nervu šķiedrām tiek aizvadīti uz smadzenēm. Pastāv vairāki apstākļi, kuri ietekmē cilvēka redzes kvalitāti. Tie ir redzes refraktīvie defekti kā piemēram, miopija, hipermetropija un astigmatisms, telpas apgaismojums, kontrasts. Būtiska nozīme ir fotoreceptoru anatomiskajām īpatnībām, proti, vālītes nodrošina fotopisko redzi, bet nūjiņas skotopisko redzi. Vālītes visvairāk lokalizējas foveolā. Foveolā atbild par centrālo redzi. Pēc fotoreceptoru teorijas cilvēka redzes kvalitāti ietekmē tas, kā telpiski un koncentrēti fotoreceptori izvietoti foveolā, kas ir atbildīga par telpisko izšķirtspēju (Packer & Williams, 2003). Ja divi gaismas punkti uz divām vālītēm savstarpējā novietojumā atrodas viena otrai blakus, tad šie punkti uzskatīti par vienu saplūdušu gaismas punktu (Levin, u.c., 2011). Lai redzētu divus gaismas punktus, starp divām vālītēm jāatrodas vienai vālītei, kas nesaņem stimulu. Toties vājā apgaismojumā aktivizējas nūjiņas, līdz ar to redzes asums ir labāks tīklenes perifērijā.

Svarīgs parametrs redzes kvalitātē ir arī zīlītes diametrs. Lielāks zīlītes diametrs sekmē redzes kvalitātes pazemināšanos. Pat pareizi fokusētā sistēmā notiek attēla degradācija. Iemesls tam ir acs aberācijas, gaismas izkliede un difrakcija, kad objekts punkta veidā netiek uztverts kā objekts punkta veidā un elektromagnētisko viļņu spēja liekties ap šķērslī difrakcijas gadījumā vai gaismas izkliedes gadījumā fotonam mainot virzienu (Keating, 2002).

### 1.2.1. Difrakcija

Viļņu apliekšanos ap šķērslī, mainot savu izplatīšanās virzienu, sauc par difrakciju. Tas ir viens no galvenajiem iemesliem kāpēc rodas nekvalitatīvs attēls uz tīklenes šauras zīlītes gadījumā (Sheppard, 2011). Difrakcijas daudzums atkarīgs no gaismas viļņa garuma un šķēršļa izmēra. Cilvēka acī difrakciju ietekmē un rada zīlīte, mainoties tās diametram. Kad zīlītei ir mazs diametrs, proti, no 1 līdz 2 mm dominē un ir novērojama difrakcija, taču pie paplašinātas zīlītes novēro aberācijas, piemēru skatīt 1.2. attēlā (Sheppard, 2011). Par optimumu tiek uzskatīta zīlīte ar 3-4 mm lielu diametru. Šaura zīlīte samazina ienākošo gaismu un uzlabo attēla kvalitāti uz tīklenes, bet pieaugošās difrakcijas dēļ tas izkropļo attēlu. Gaismas difrakcija ierobežo optisko izšķiršanas spēju, jo difrakcijas dēļ izplūst attēla kontūras, tuvi punkti nav atsevišķi saskatāmi, ap attēlu veidojas interferences joslas. Pēc Heigensa-Frenela principa visi gaismas viļņa frontes punkti ir koherentu sekundāru viļņu avoti un sekundārie viļņi savstarpēji interferē (Students, 1971).



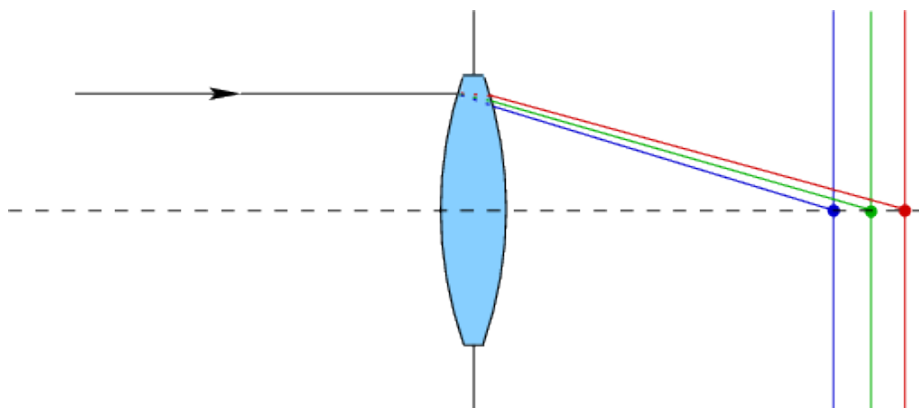
**1.2.attēls.** Zīlītes diametra izmaiņas ietekme uz redzes sistēmu (Espinosa, Mas, & Kasprzak, 2009)

Difrakcija ierobežo augstākās telpiskās frekvences, ko var uztvert cilvēka acs. Ja tiek paaugstināta telpiskā frekvence, tad attiecīgi pazeminās kontrasts. Difrakcija ietekmē stimula attēla veidošanos uz tīklenes (Zajac, 2003).

### 1.2.1. Aberācijas

Aberācijas ir optiskās sistēmas attēla veidošanās nepilnības, kad netiek nodots reālais attēls redzes sistēmā. Ar refraktīvo ķirurģiju ir iespējams koriģēt gan zemākās kārtas aberācijas, gan augstākās kārtas aberācijas. Zemākās kārtas aberācijas koriģē arī ar brillēm vai kontaktlēcām. Tās būs miopija, hipermetropija un astigmātisms.

Aberācijas iedala hromatiskajās aberācijās un monohromatiskajās aberācijās, kuras tiek sauktas par trešās kārtas aberācijām. Hromatiskās aberācijas rodas tādēļ, ka materiāla refraktīvais indekss mazliet izmainās mainoties viļņa garumam (Kelly, Mihashi, & Howland, 2004). Tādā veidā materiāla refrakcijas spēks arī mainās mainoties viļņa garumam, un tātad viena lēca nenofokusē visus viļņa garumus precīzi vienā pozīcijā. Balts objekts neradīs baltu attēlu. Tas būs kropļots ar varavīksnes krāsu malām, piemēru skatīt 1.3. attēlā.



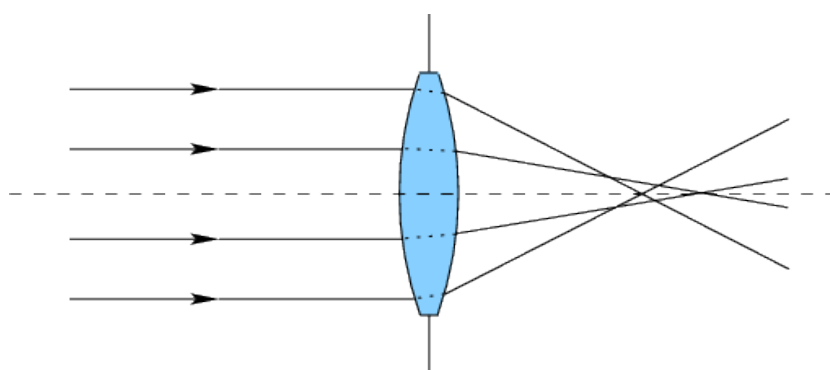
**1.3.attēls.** Hromatiskā aberācija <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pieejams: <http://msl.cs.uiuc.edu/vr/node114.html>

Monohromatisko aberāciju teorētiskais iemesls sfēriskās sistēmās ir tas, ka paraksiālie vienādojumi vairāk nedarbojas. Tādējādi, neparaksiālā reģionā gaismas ceļš rada viļņa frontes, kuras nav gluži sfēriskas. Tas nozīmē, ka netiek veidoti perfekti punktu attēli un attēlam tiek degradēta kvalitāte (Keating, 2002).

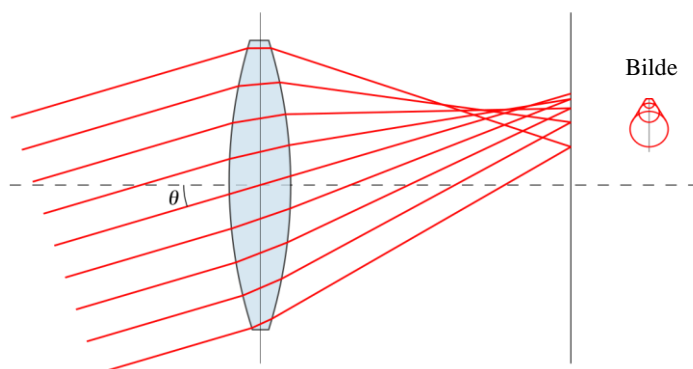
Pastāv piecas monohromatiskās aberācijas. Tādas kas veicina neskaidru, izplūdušu attēlu t.i. sfēriskā aberācija, koma un astigmatisms, bet pie attēla deformēšanas pieder lauka izliekums un distorsija jeb kropļojumi (Artal, u.c., 2004).

Lielas ietekmes kropļojumi, kuri rodas no daudzām stiprām optiskajām acs komponentēm, piemēram, kā radzene vai lēca tiek saukti par sfēriskajām aberācijām (skat. 1.4. att.). Tā ir saistīta ar stariem, kas rada lielus leņķus attiecībā pret sistēmas optisko asi.



**1.4. attēls.** Staru gaita sfēriskās aberācijas gadījumā<sup>2</sup>

Kad gaismas stari uz optisko sistēmu krīt slīpi veidojas koma (skat. 1.5. att.). Iemesls šajai aberācijai ir acs optisko elementu asimetriskums. Šī aberācija veido komētas formas attēlu (Keating, 2002)



**1.5. attēls.** Komas aberācija<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Pieejams: <http://msl.cs.uiuc.edu/vr/node115.html>

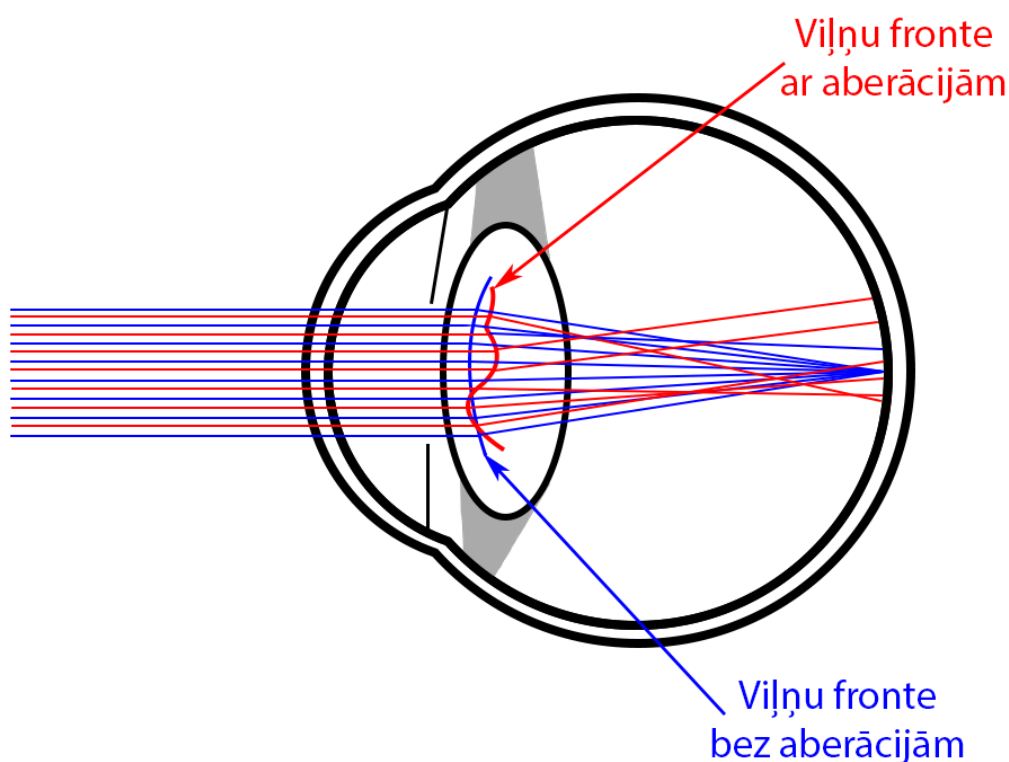
<sup>3</sup> Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Coma\\_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Coma_(optics))

Cits asimetrijas efekts ir, ka eksistējošai viļņu fronteī ir toriska tipa komponente, kas rezultējas Seidela aberācijā, kura nosaukta par astigmatismu (Williams, Berrio, Guirau, & Artal, 2001). Kad tiek novērots lauka izliekums, attēls uz plakana ekrāna tiek progresīvi izpludināts kā funkcija no attāluma līdz optiskai asij.

Distorsija no citām aberācijām atšķiras ar to, ka tas neizraisa izplūdušu attēlu vai rezolūcijas zudumu. Distorsija rodas no tā, ka sānu palielinājums ne-asu punktos ir atkarīgs no attēla un objekto attāluma pa galvenajiem stariem (Balashevich, 2003). Distorsija rezultējas tajā, ka taisnas līnijas objekta plaknē ir redzamas kā taisnas līnijas tikai tad, kad objekta līnija iet caur optisko asi. Visas pārējās līnijas ir liektas.

### 1.2.2. Acs aberācijas

Aberācijas var uzrādīties dažādās acs struktūrās vai redzes sistēmā kopumā, līdz ar to cilvēka acī aberācijas var summēties, pastiprināties vai samazināties. Redzes sistēmai acī bez aberācijām ir plakana viļņu fronte, kura dod labākas kvalitātes attēlu uz tīklenes, taču patiesībā acs optiskie defekti izkropļo staru gaitu un formē nepareizo viļņu fronti, un kā rezultātā attēls uz tīklenes ir izkropļots (skat. 1.6. attēlā).



1.6. attēls. Viļņu fronte ar un bez aberācijām

Izmantojot polinomu sērijas var aprakstīt viļņu frontes aberācijas, piemēram, Zernike polinomus. Zernikes polinomus ir nodefinējis Frits Zernike. Matemātiskais paskaidrojums, kas tiek piedāvāts ar Zernika polinomiem, ir noderīgs definējot apjomu un īpašības starp attēlu, kas

veidojas no optiskas sistēmas un oriģinālo objektu. Šīs optiskās aberācijas var būt rezultāts no neprecīziem optiskajiem elementiem vai arī visas sistēmas neprecizitātes (Fleck & Lakshminarayanan, 2011). Zernike polinomi ir pieņemti kā matemātiskais apraksts viļņu frontei, Zernikes polinomu diagrammu skatīt 1.7. attēlā. Zernikes polinomu apzīmē ar dubulto simbolu  $Z_n^m$ , kur n tiek apzīmēts kā aberācijas kārtas numurs, bet m ir leņķiskā frekvence, kas raksturo viļņu fronti. Viļņu frontes aberācijas var pierakstīt kā summu no pamataberācijām polārā koordinātu sistēmā ar formulu:

$$W(\rho, \theta) = \sum_{nm} C_n^m Z_n^m(\rho, \theta) \quad (1.1.)$$

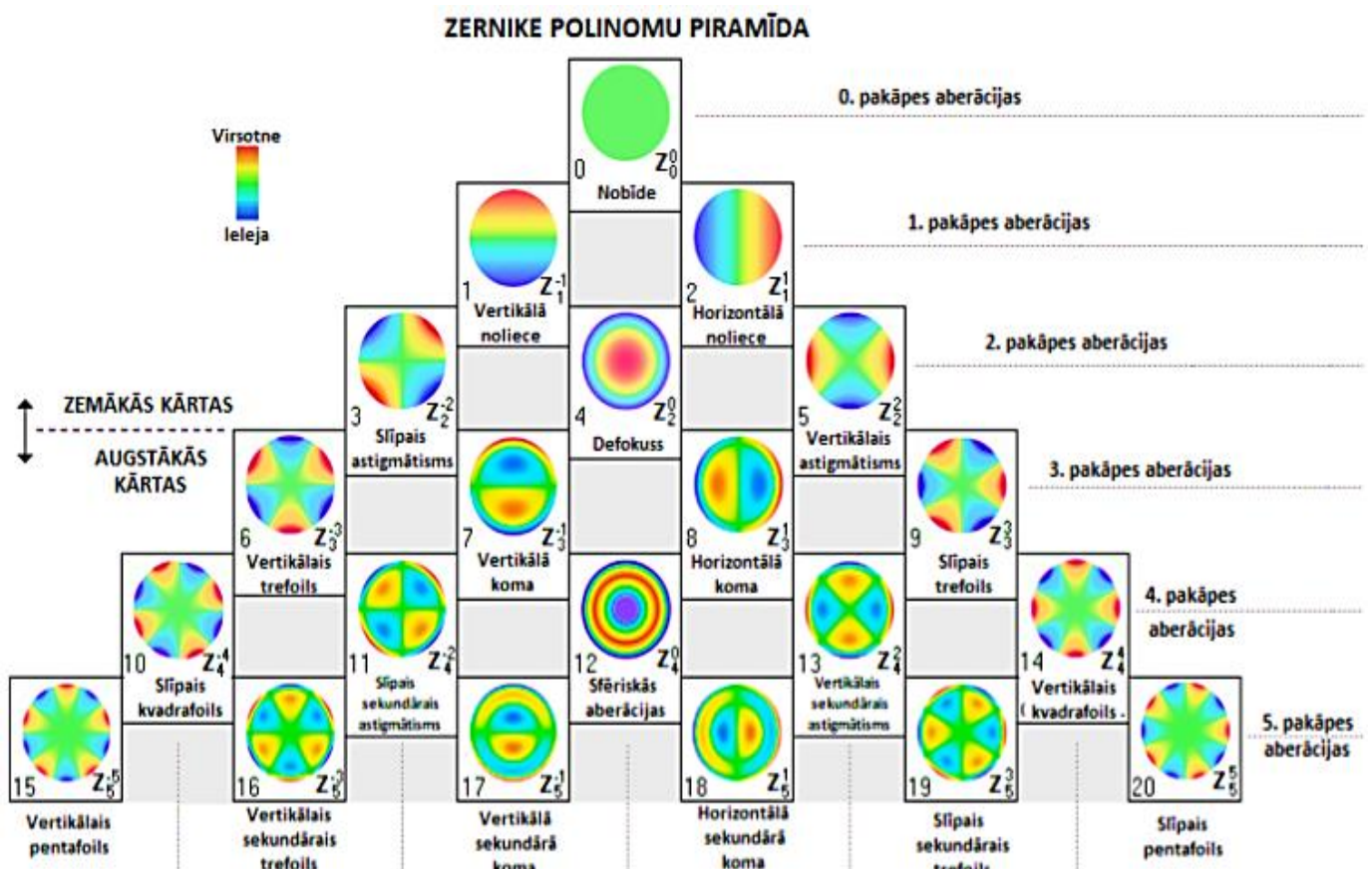
kur:

W-viļņu frontes aberācija;

$(\rho, \theta)$ -polārās koordinātes

Z-Zernike polinoms

C-Zernike koeficients

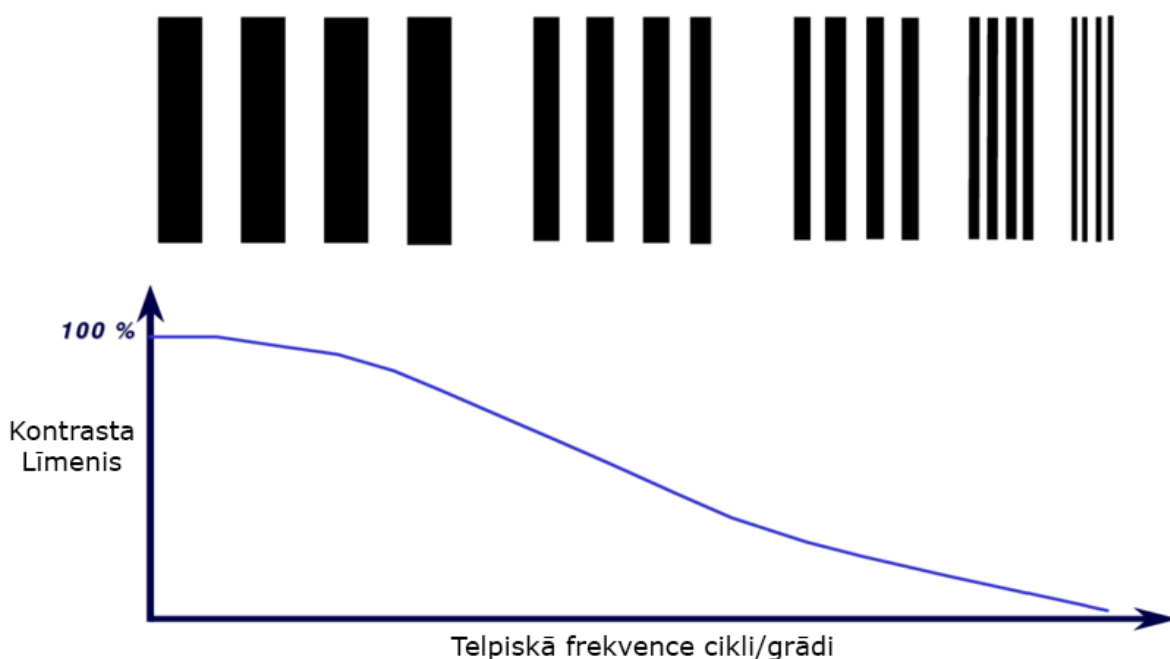


1.7.attēls. Zernikes polinomu diagramma līdz aberāciju piektajai kārtai un to nosaukumi<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Pieejams: [https://www.telescope-optics.net/monochromatic\\_eye\\_aberrations.htm](https://www.telescope-optics.net/monochromatic_eye_aberrations.htm)

### 1.3. Modulācijas pārnese funkcija

Liela nozīme acs modeļu pētīšanā ir modulācijas pārnese funkcijai. Tas ir nozīmīgs optiskās kvalitātes kritērijs un optiskās sistēmas parametrs. Modulācijas pārnese funkcija ir attiecības attēla kontrasta pret objekta kontrastu atkarība no stimula telpiskās frekvences, tas ir, modulācijas pārnese funkcija ir attēla kontrasta attiecība pret objekta telpisko frekvenci (Sturzu & Luca-Motoc, 2011). Modulācijas pārnese funkciju apzīmē grafikā, kur uz x ass ir telpiskā frekvence un uz y ass ir kontrasta līmenis izteikts procentos. Pieaugot telpiskajai frekvencei, modulācijas pārnese funkcija krītas (skat. 1.8. attēlā). Telpiskā frekvence parasti tiek mērīta kā ciklu daudzums uz grādu, kur viens cikls ir melnas un baltas līnijas pāris (Diaz, 2009).



1.8. attēls. Modulācijas pārnese funkcija<sup>5</sup>

Situācijā, kad optiskajai sistēmai nebūs viļņu frontes aberācijas, modulācijas pārnese funkciju ietekmēs tikai difrakcija. Modulācijas pārnese funkcija tiek uzskatīta par uzticamu rādītāju viļņu frontes aberāciju ietekmei uz attēla kvalitāti. Jo lielāks būs aberāciju apjoms optiskajā sistēmā, jo sliktāka būs radītā attēla kvalitāte, un līdz ar to attēla modulācijas pārnese būs tuvinātāka nullei.

<sup>5</sup> [https://www.researchgate.net/figure/The-Modulation-Transfer-Function-MTF-for-an-imaging-system-is-defined-as-the\\_fig3\\_265873967](https://www.researchgate.net/figure/The-Modulation-Transfer-Function-MTF-for-an-imaging-system-is-defined-as-the_fig3_265873967)

## 1.4. Acs modeļi

Shematiska acs ir matemātisks vai fizisks modelis, kas attēlo pamatiespējas kā reālā acī. Shematiskos acu modeļus var izmantot, lai modelētu normālu un patoloģisku acu optiskās īpašības, kā arī izstrādātu un novērtētu optiskās korekcijas, kas paredzētas tīklenes attēla kvalitātes uzlabošanai. Šādas korekcijas ietver briļļu, kontaktlēcas, intraokulārās lēcas un refrakcijas ķirurģiju. Acs modeļu analīze palīdz salīdzināt tos, lai novērtētu īpašības un galu galā atklātu optiskā dizaina principus, kas saistīti ar acs optiskās sistēmas struktūru un darbību. Acs modeļi palīdz attīstīt fizioloģisko optiku, lai izprastu vairāk cilvēka redzes aspektus. Ir labi zināms, ka acs ir komplicēta optiskā sistēma ar tādām optiskām vidēm kā diviem refrakcijas elementiem, radzeni un lēcu, diafragmu varavīksneni, zīlīti, acs kameras šķidrumu, stiklveida ķermeni un detektoru, kas ir tīklene (Bakaraju, Ehrmann, Papas, & Ho, 2008).

Cilvēka acs prasa specifiskas modelēšanas un atveidošanas metodes. Mūsdienās ir vairākas datorizētas programmas, ar kuru palīdzību var pārbaudīt teorētiskos acs modeļus, to īpašības un tuvumu realitātei simulācijas veidā. To var veikt ar tādām programmām kā Code-V, OSLO, Zemax, Comsol (Sturzu & Luca-Motoc, 2011) (Diaz, 2009). Tās galvenokārt izmanto lēcu simulēšanā, lai noteiktu optisko sistēmu sastāvdaļu optimālos izmērus un formas. Programmās ir iespējams modelēt plašu refrakcijas un difrakcijas komponentu klāstu. Turklāt, lai modelētu un analizētu optisko sistēmu veiktspēju.

Pastāv dažādi acs modeļi. Kopumā ir trīs shematisko acu modeļu kategorijas t.i. reducēto, vienkāršoto un pilnveidoto. Reducētajos un vienkāršotajos acs modeļos pieņem, ka refrakcijas rādītāji ir konstanti katrā optiskajā vidē un, ka refrakcijas virsmas ir sfēriskas un centrētas uz kopējas optiskās ass, taču pilnveidotajos acs modeļi atveido optiskos parametrus un īpašības pēc iespējas vairāk kā īstā acī ietverot tādas lietas kā lēcas gradienta indeksu, izliektu tīklieni, vairākas asis u.c.

### 1.4.1. Emsleja acs modelis

Emsleja modelis ir viens no vienkāršākajiem acu modeļiem, jo tas satur tikai vienu galveno refrakcijas virsmu, kas ir definēta kā radzene (Esteve-Taboada, Montés-Micó, & Ferrer-Blasco, 2018). Tā ir reducēta +60,00 D modelēta acs. Modeļa parametrus skatīt 1.1. tabulā.

#### 1.1. tabula

Emsleja modeļa parametri (Sturzu & Luca-Motoc, 2011)

Virsmas	Rādiuss (mm)	Biezums (mm)	Laušanas koeficients
1.	5,5	22,22	1,3333

#### 1.4.2. Gulstranda acs modelis

Agrīnos acu modeļus ar zināmu optisko un anatomisko precizitāti izstrādāja gandrīz pirms gadsimta oftalmologs, optiķis Alvars Gulstrands iegūstot 1911. gadā nobela prēmiju par acs modeļa izveidi un izpēti, izmantojot datus no klīniskajiem mērījumiem un izvēloties sfērisku virsmu, lai aprakstītu radzeni un lēcu, lai pētītu un prognozētu acs optiskās īpašības (Kelly, Mihashi, & Howland, 2004). Salīdzinājumā ar Emsleja acs modeli šim modelim ir papildus divas komponentes t.i. acs lēca un stiklveida ķermenis, kas modeli rada sarežģītāku, ņemot vērā, ka tie ir pieskaitāmi pie vienkāršotiem acs modeļiem. Parametrus skatīt 1.2. tabulā.

1.2. tabula

Gulstranda modeļa parametri (Sturzu & Luca-Motoc, 2011)

Virsmā	Rādiuss (mm)	Biezums (mm)	Laušanas koeficients
1.	7,8	3,6	1,336
2.	10,0	3,6	1,413
3.	-6,0	16,97	1,336

#### 1.4.3. Helmholca acs modelis

Fiziķis Hermans von Helmholcs izveidoja acs modeli ar trīs virsmām. Skatoties modeļa parametrus, redzam, ka Helmholca un Gulstranda modeļi ir līdzīgi, bet pastāv nelielas atšķirības radzenes izliekuma rādiusā un refrakcijas indeksos. Gulstranda modelis ir neliels Helmholca acu modeļa uzlabojums. Modeļa parametrus skatīt 1.3. tabulā.

1.3. tabula

Helmholca modeļa parametri (Sturzu & Luca-Motoc, 2011)

Virsmā	Rādiuss (mm)	Biezums (mm)	Laušanas koeficients
1.	8,0	3,6	1,333
2.	10,0	3,6	1,45
3.	-6,0	15,18	1,333

#### 1.4.4. Šviegerlinga acs modelis

Šviegerlinga shematiskais modelis pieder pie pilnveidoto acs modeļu kategorijas. Salīdzinājumā ar iepriekšējiem acs modeļiem šajā modelī jau tiek papildināts virsmu skaits, līdz ar to var redzēt atšķirību starp vienkāršotiem un pilnveidotiem acs modeļiem (Jose J. Esteve-Taboada, 2018). Šis modelis salīdzinot iepriekšējos atšķiras ar katras virsmas asfēriskuma aprēķinu. Optiskas virsmas tiek sauktas par asfēriskām, kad tās neatdarina sfēras formu (meridiānu profili atšķiras no apļa meridiānu profiliem) tā liekums nav konstants visos punktos, kā tas ir sfērai (Gatinel, Haouat, & Hoang-Xuan, 2002). Parametrus skatīt 1.4. tabulā.

Šviegerlinga acs modeļa parametri (Diaz, 2009)

Virsmā	Rādiuss (mm)	Asfēriskums	Biezums (mm)	Laušanas koeficients
1.	7,8	0,75	0,55	1,3771
2.	6,5	0,75	3,05	1,3374
3.	11,03	-3,30	4,00	1,42
4.	-5,72	-1,17	16,60	1,336

#### 1.4.5. Liu un Brenana acs modelis

Liu-Brenana modelis ir pazīstams ar to, ka autori Hvei-Lan Liou (Hwey-Lan Liou) un Noels Brenans (Noel Brennan) vēlējās sasniegt shematisku acs modeli, kas ļoti līdzinās reālai fizioloģiskai acij (Sturzu & Luca-Motoc, 2011). Jo vairāk optisko elementu kā cilvēka acī, jo labāk tas raksturo optisko sistēmu. Šajā acs modelī salīdzinājumā ar citiem modeļiem pastāv vairākas optiskās vides, ir ņemts vērā asfēriskums un pārādās gradienta indeksi, kurus var aprēķināt pielietojot dažādas formulas. Acs modeļa parametrus skatīt 1.5. tabulā.

Liu-Brennana modeļa parametri (Diaz, 2009)

Virsmā	Rādiuss (mm)	Asfēriskums	Biezums (mm)	Laušanas koeficients
1.	7,7	-0,18	0,5	1,376
2.	6,4	-0,6	3,16	1,336
3.	12,4	-0,94	1,59	Grad A
4.	$\infty$		2,43	Grad P
5.	-8,1	0,96	16,27	1,336

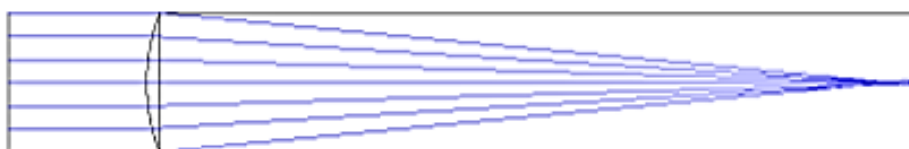
## 2.PĒTĪJUMA DAĻA

### 2.1. Pētījuma metode

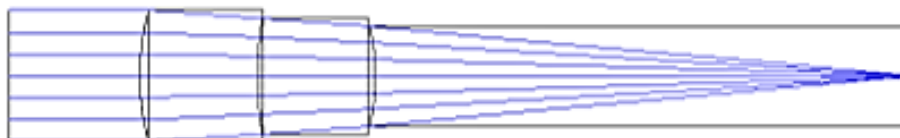
#### 2.1.1. Acs modeļu simulēšana programmā Zemax

Pētījumā tika izvēlēti pieci acs modeļi – Emsleja reducētais acs modelis, Gulstranda acs modelis, Helmholca acs modelis, Šviegerlinga acs modelis, Liu un Brenana acs modelis. Emsleja reducētajam acs modelim ir tikai viena virsma, padarot to par vienkāršāko starp pārējiem, taču sarežģītāki ir Šviegerlinga, Liu un Brenana acs modeļi, kuri sastāv no vairākām virsmām un parādās arī asfēriskums un gradienta indeksi. Pētījumā visi izvēlētie acs modeļi tika simulēti programmā Zemax 13 Premium (skat. 2.1. attēlā), visu acs modeļu parametri ir apskatāmi literatūras pārskata daļā. Modeļi tika simulēti monohromatiskā gaismā, ar viļņa garumu 550 nm.

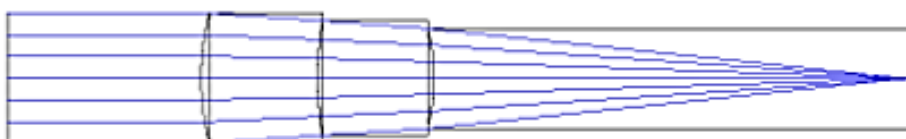
**Emsleja acs modelis:**



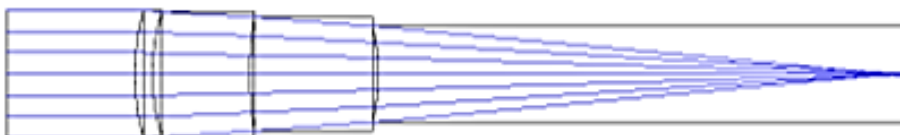
**Gulstranda acs modelis:**



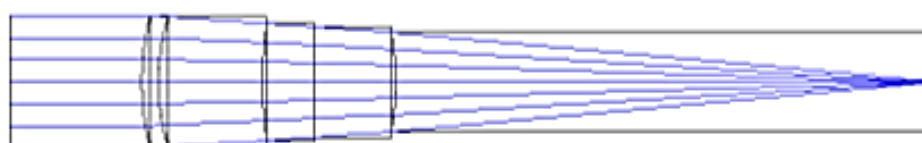
**Helmholca acs modelis:**



**Šviegerlinga acs modelis:**



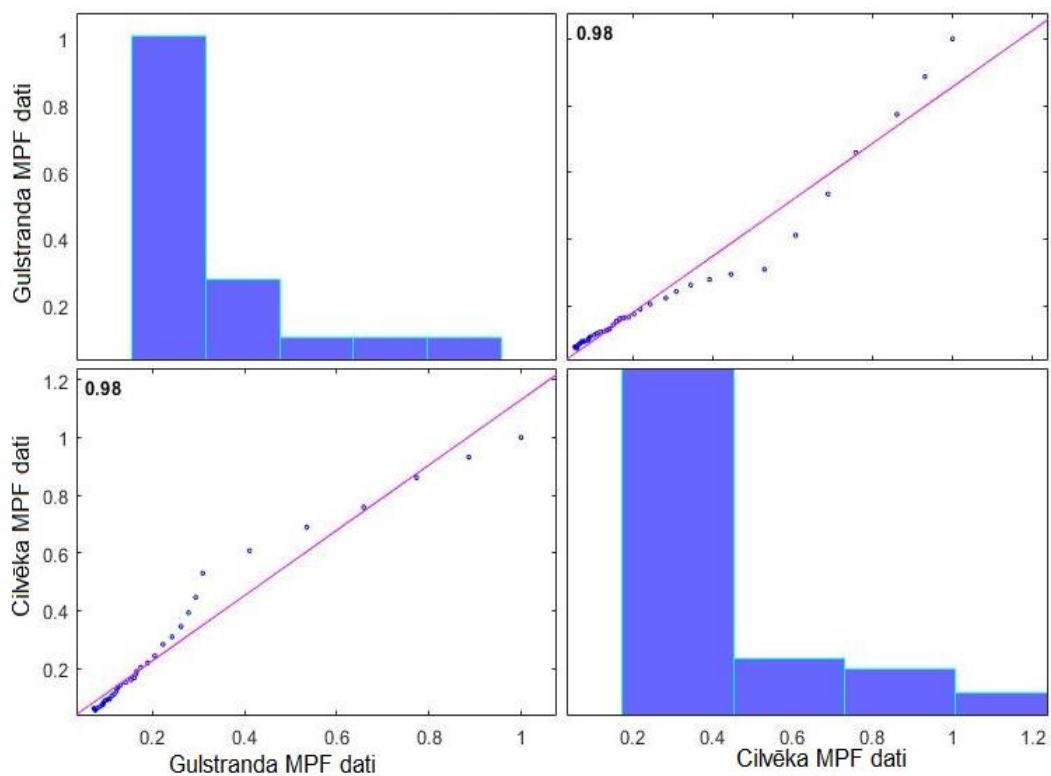
**Liu un Brenana acs modelis:**



**2.1. attēls.** Visi uzsimulētie acs modeļi šķērsgriezumā

## 2.1.2. Modulācijas pārneses funkciju novērtēšana

Pētījumā tika pētītas modulācijas pārneses funkcijas (MPF) izvēlētajiem acs modeļiem. Pēc modeļu MPF iegūšanas programmā Zemax tās tika saglabātas kā teksta fails un importēts programmā MATLAB. Acs modeļu MPF salīdzināja ar emetropu cilvēku MPF balstoties uz 1994. gadā publicēto Pablo Artala un Rafaela Navarro pētījuma datiem (Artal & Navarro, 1994), kuri arī tika importēti programmā MATLAB. No cilvēka MPF tika ņemti vērā tie dati, kas bija mērīti pie 4 mm platas zīlītes, jo visi acs modeļi tika simulēti pie 4 mm zīlītes, kas ir optimāls zīlītes izmērs cilvēkam ikdienas apstākļos. Lai noskaidrotu vai pastāv kāda sakarība starp acu modeļu MPF un īsta cilvēka acu MPF, tika izmantotas divas metodes, tas ir, korelācijas analīze, un vismazāko kvadrātu metode, kur vismazākā kvadrātu laukumu summa nozīmē vismazāko atšķirību starp acu modeļu MPF un cilvēka acu MPF. 2.2. attēlā ir attēlots programmā MATLAB iegūts korelācijas grafiks ar datu sadalījumiem Gulstranda MPF un cilvēka acs MPF, uzrādot cieši pozitīvu korelāciju.



2.2. attēls. Korelācijas grafiks ar datu sadalījumu

## 2.1.3. Redzes asuma aprēķins

Lai noteiktu katra modeļa redzes asuma sniegumu tika izmantotas divas metodes. Pēc iegūtajiem rezultātiem tie tika salīdzināti ar lielu cilvēku populācijas redzes asumu (Uchino, u.c., 2017). Pirmajā metodē programmā Zemax tika iegūta katra modeļa punkta izplūdes funkcija, kas parāda redzes sistēmas atbildi uz punkta vai objekta avotu (skat. 2.3. attēlu).

Iegūtās punkta izkliedes funkcijas tika apstrādās programmā MATLAB, kur ar pilna platuma maksimuma pusē metodi (FWHM) tika izrēķināts redzes asums katram modelim ar formulu:

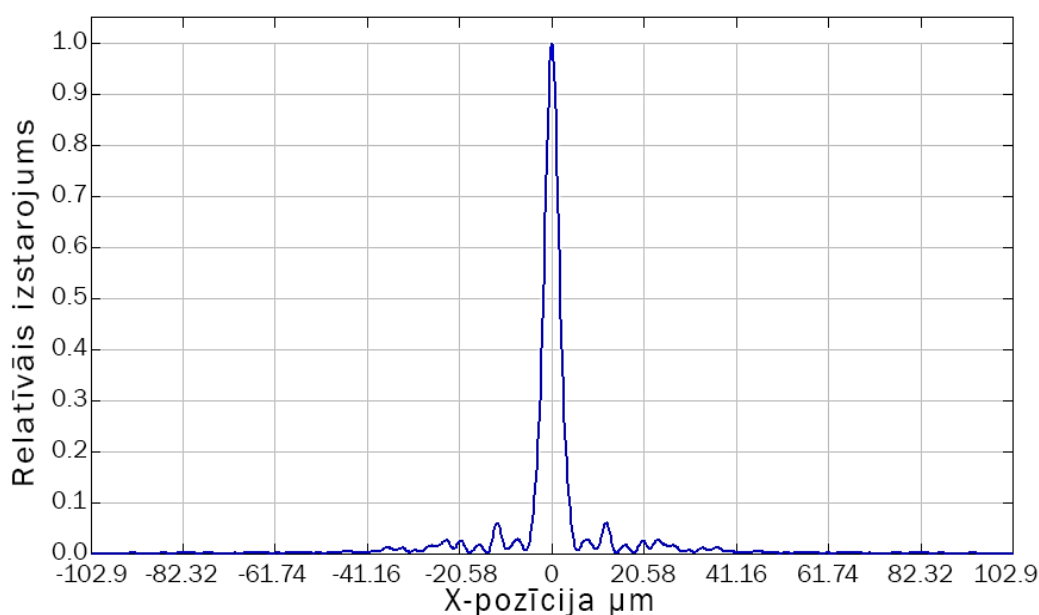
$$V = \frac{1}{60 * \arctan\left(\frac{d}{f}\right)} \quad (2.1.)$$

kur:

V – redzes asums

d - pilna platuma maksimuma pusē;

f - modeļa fokālais garums



### 2.3. attēls. Liu un Brenana modeļa punkta izkliedes funkcija

Otras metodes pamatā ir katra simulētā modeļa MPF robežfrekvences izvērtēšana. Nosakot, pie kādas frekvences MPF nokrītas līdz 5 % no tās kopējā kontrasta līmeņa, iegūstot robežfrekvenci ciklos uz grādu, kas tālāk tika ievietota formulā, lai aprēķinātu redzes asumu ņemot vērā Snellena likumu:

$$V = 2 * \left( \frac{1}{\frac{60}{x}} \right) = \frac{x}{30} \quad (2.2.)$$

kur:

V - redzes asums

x - robežfrekvence

### 2.1.3. Hromatisko aberāciju izvērtēšana

Hromatiskās aberācijas tika mērītas pie trīs viļņu garumiem – 480 nm, 550 nm un 680 nm, kas ir zilā, zaļā un sarkanā gaismā programmā Zemax. Simulējot modeļus Abbes skaitļa vērtību iestatīja 50,23 (Atchison & Smith, 2000), jo tā tiek definēta kā vidējā Abbes vērtība cilvēka acī. Pēc acs modeļu simulēšanas tika iegūti hromatisko aberāciju fokālās nobīdes grafiki, ar kuru palīdzību tika noskaidrota kopējā fokālā nobīde un pārreķināta, lai izteiktu dioptrijās ar formulu<sup>6</sup>:

$$D = \frac{3 * f_n}{1 * 10^{-3}} \quad (2.3.)$$

kur:

D - dioptrijas

$f_n$  - kopējā fokālā nobīde

Hromatiskās aberācijas tika salīdzinātas ar lielu cilvēku populācijas hromatiskajām aberācijām (Merino, u.c., 2013). Tādējādi noskaidrojot, kuri modeļi uzrāda iegūtās hromatiskās aberācijas vērtības līdzīgi kā cilvēku populācijas hromatiskajām aberācijām.

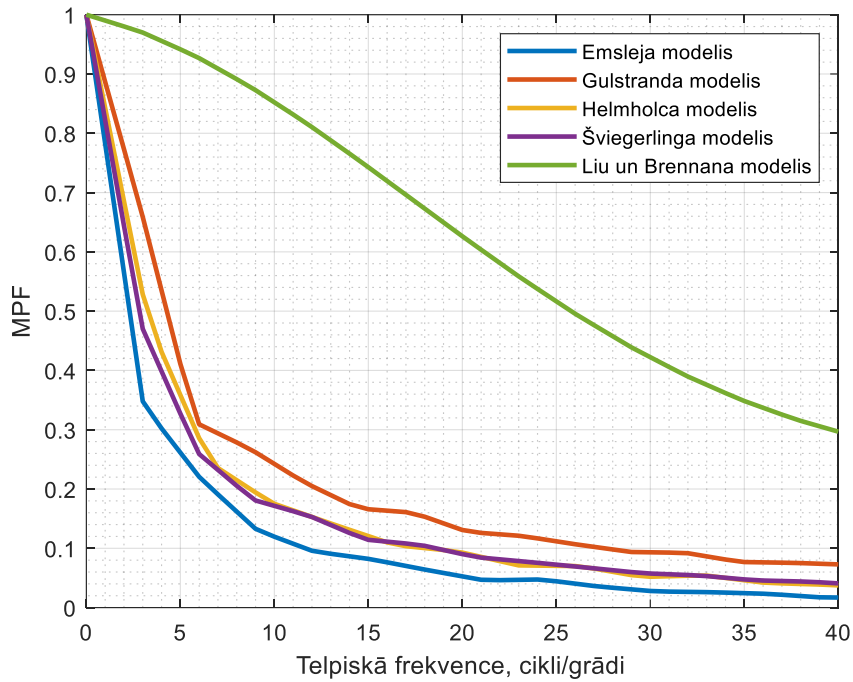
## 2.2. Pētījuma rezultāti un analīze

### 2.2.1. Simulēto acs modeļu MPF un to salīdzinājums ar cilvēka MPF

Pētījuma gaitā tika iegūtas piecas modulācijas pārneses funkcijas. Visas modulācijas pārneses funkcijas var aplūkot 2.4. attēlā. Tā kā redzes asums un kontrasts var tikt raksturots ar modulācijas pārneses funkciju, ir zināms, ka labai lēcai vai sistēmai tās veiktspēja ir virs 95 % pie 1,5 cikli/grādu frekvences gan sagitālajiem, gan tangenciālajiem virzieniem, bet vērtības zem 90 % šajā pašā frekvencē atspoguļo sliktu veiktspēju. Pēc iegūtajiem datiem var redzēt, ka Liu un Brenana acs modelis izdod labāko modulācijas pārneses funkciju starp visiem simulētajiem acs modeļiem, sasniedzot aptuveni 98 % veiktspēju pie 1,5 cikli/grādu frekvences, taču gluži pretēji uzrāda pārējie acs modeļi. Vissliktākais sniegums ir Emsleja reducētajam acs modelim. Ir novērojams, kad telpiskā frekvence sasniedz 12 ciklus/grādu, tad modulācijas pārneses funkcijas Emsleja, Gulstranda, Helmholca un Šviegerlinga acs modeļiem ir nokritusies zem 20 %, savukārt Liu un Brenana acs modeļa modulācijas pārneses funkcija 12 ciklos/grādu uzrāda 80 % sniegumu, tādā veidā izceļoties starp pārējiem modeļiem.

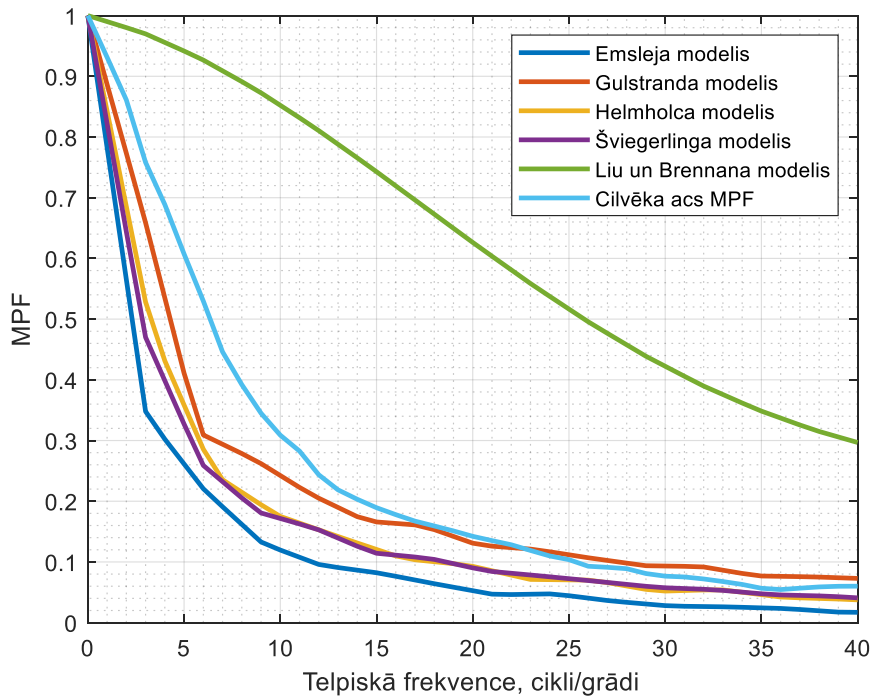
---

<sup>6</sup> <https://www.quora.com/Ophthalmology-What-is-the-relationship-between-refractive-error-and-the-axial-length-of-an-eye>



**2.4. attēls.** Visu modeļu modulācijas pārnese funkcijas

Salīdzinot visu acs modeļu modulācijas pārnese funkcijas ar cilvēka modulācijas pārnese funkciju (Artal & Navarro, 1994) ir redzams, ka vistuvāk pietuvojas Gulstrandā acs modeļa modulācijas pārnese funkcija (skat. 2.5. attēla). Cilvēka MPF uzrāda labāku sniegumu par Emsleja, Helmholca, Šviegerlinga un Gulstrandā modeļiem, bet Liu un Brennana modelis, kas šajā gadījumā uzrāda vislabāko sniegumu un atrodas vistālāk no cilvēka MPF.



**2.5. attēls.** Visu acs modeļu un cilvēka acs modulācijas pārnese funkcijas

Lai novērtētu saistību starp modulācijas pārnese funkciju cilvēkam un shematiskajiem acs modeļiem, tika veikta korelācijas analīze. Iegūtie rezultāti norāda uz cieši pozitīvu korelāciju starp cilvēka modulācijas pārnese funkciju un shematisko acs modeļu modulācijas pārnese funkcijām (skat. 2.1. tabulā). Starp visiem modeļiem Gulstranda acs modelis korelē visciešāk, taču Liu un Brenana modelis tieši pretēji, ko apstiprina arī vismazāko kvadrātu metode. Šajā gadījumā jo mazāku rezultātu sniedz vismazāko kvadrātu metode, jo līdzīgāks ir acs modeļu MPF ar cilvēka acu MPF.

**2.1. tabula**

Modeļu un cilvēka MPF savstarpējās sakarības salīdzinājums

<b>Acs modelis</b>	<b>Korelācijas koeficients</b>	<b>Vismazāko kvadrātu metode</b>
Emsleja modelis	r= 0,93	1,02
Gulstranda modelis	r= 0,98	0,44
Helmholca modelis	r= 0,96	0,68
Šviegerlinga modelis	r= 0,95	0,76
Liu un Brenana modelis	r= 0,84	2,61

### **2.2.2. Acs modeļu redzes asuma prognozējums**

Šīs prognozēšanas metodes ietver modulācijas pārnese funkcijas un punkta izkliedes funkcijas, kurās ir iekļautas acs optiskās aberācijas, difrakcija, tīklenes kontrastjutība, kuri ir ietekmējošie faktori redzes asuma sniegunam. Emsleja reducētais acs modelis sniedz labāku redzes asumu kā gaidīts gan ar pilna platuma maksimuma pusē metodi, gan ar robežfrekvences novērtēšanas metodi. Ir redzams, ka abas metodes uzrāda tuvus rezultātus (skat. 2.2. tabulā). Pretēji Emsleja reducētajam acs modeļa sniegunam Gulstranda shematiskajam acs modelim uzrāda lielāku atšķirību redzes asumā starp metodēm, lai gan abas metodes parāda, ka redzes asuma prognozējums ir virs 100 %.

Ņemot vērā to, ka Gulstranda shematiskais acs modelis ir uzlabojums Helmholca modelim ir prognozējams, ka redzes sniegums Helmholca shematiskajam acs modelim būs zemāks, kā to var arī redzēt 2.2. tabulā.

Šviegerlinga acs modelis ar abām redzes asuma aprēķina metodēm uzrāda 100 % redzes asumu. Abu metožu atšķirība ir nenozīmīga. Modelējot šo acs modeli tika prognozēts labāks redzes asums nekā iepriekš aprakstītajiem acs modeļiem, jo Šviegerlinga modelis ir viens no pilnveidotajiem modeļiem, atšķirībā no Emsleja, Gulstranda un Helmholca acs modeļiem, kas

neatrodas pilnveidoto acs shematisko modeļu kategorijā. Tomēr šajā gadījumā Gulstranda acs modelis uzrādīja labāku sniegumu redzes asumā nekā Šviegerlinga acs modelis.

Liu un Brenana acs modelis izceļas uz pārējo modeļu fona, uzrādot redzes asumam ar FWHM metodi  $V = 2,80$  dec. v., bet ar robežfrekvences novērtēšanu, uzrādot vislielāko robežfrekvenci iegūstot  $V = 4,00$  dec. v, tas ir iespējami saistīts ar to, ka Liu un Brenana acs shematiskā modeļa uzbūve ir daudz komplicētāka un šī acs modeļa autori vēlējās radīt modeli, kas būtu pēc iespējas līdzīgāk atveidots reāla cilvēka acij, iekļaujot tādus parametrus, kuri nav pārējiem pētījuma modeļiem, piemēram, refrakcijas indekss, kas mainās ejot cauri videi.

Salīdzinot modeļu redzes asuma sniegumu ar Uchino M. et. al. pētījuma datiem, kur lielas cilvēku populācijas vidējais redzes asums ir  $0,98 \pm 0,68$  dec.v. (Uchino, u.c., 2017), pēc 2.2. tabulas atspoguļotajiem datiem ir skaidri redzams, ka Emsleja, Gulstranda, Helmholca un Šviegerlinga modeļi ietilpst lielas cilvēku populācijas vidējās redzes asuma robežās.

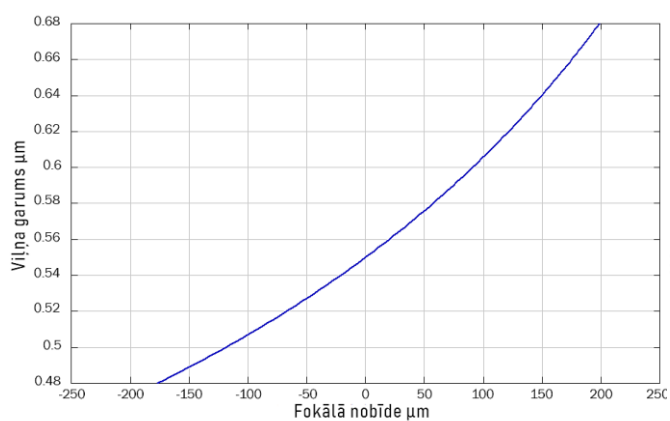
## 2.2. tabula

Redzes asuma sniegums visiem simulētajiem acs modeļiem

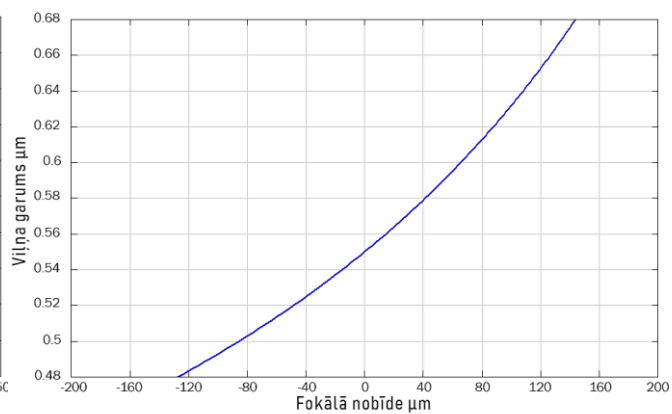
Acs modelis	Pilna platuma maksimuma pusē metode (FWHM)	Robežfrekvences novērtēšanas metode
Emsleja modelis	$V = 0,71$ dec.v.	$V = 0,68$ dec.v.
Gulstranda modelis	$V = 1,21$ dec.v.	$V = 1,66$ dec.v.
Helmholca modelis	$V = 0,82$ dec.v.	$V = 1,13$ dec.v.
Šviegerlinga modelis	$V = 1,00$ dec.v.	$V = 1,14$ dec.v.
Liu un Brenana modelis	$V = 2,80$ dec.v.	$V = 4,00$ dec.v.

### 2.2.3. Acs modeļu hromatiskās aberācijas

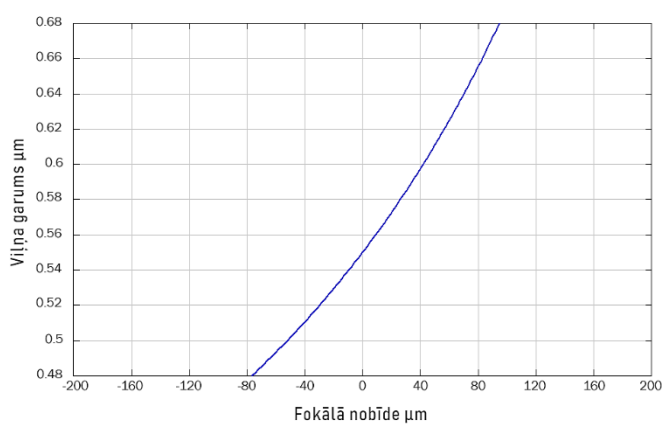
Pētot hromatiskās aberācijas ir būtisks ne tikai Abbes skaitlis, bet arī ar citi faktori, tostarp modeļu virsmas formas, kas ir liekuma rādiuss, biezums, taču lielāku uzmanību jāvērs materiāla laušanas indeksa vērtībai. Laušanas indeksam ir nozīmīga loma, jo dažādi viļņa garuma stari savā starpā lieksies atšķirīgi, līdz ar to tie fokusēsies dažādos punktos. Piemēram, modeļiem, kuriem parametros ietilpst laušanas koeficienti, kuri ir tuvu ūdens laušanas koeficientam, veicinās zilās gaismas liekšanos vairāk nekā zaļās vai sarkanās. Visu simulēto acs modeļu hromatisko aberāciju fokālās nobīdes grafikus skatīt 2.6. attēlā.



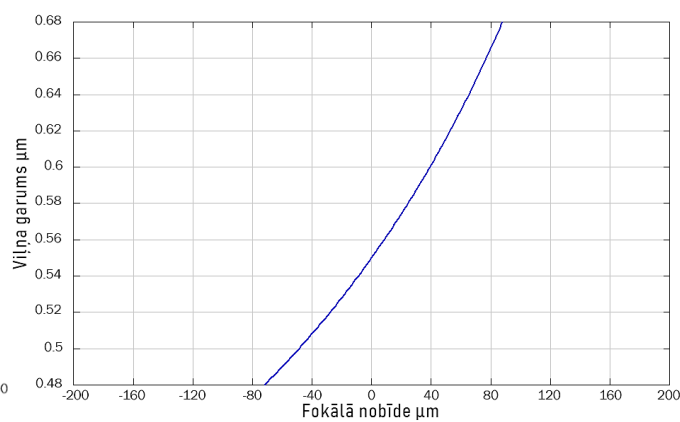
a) Emsleja modelis



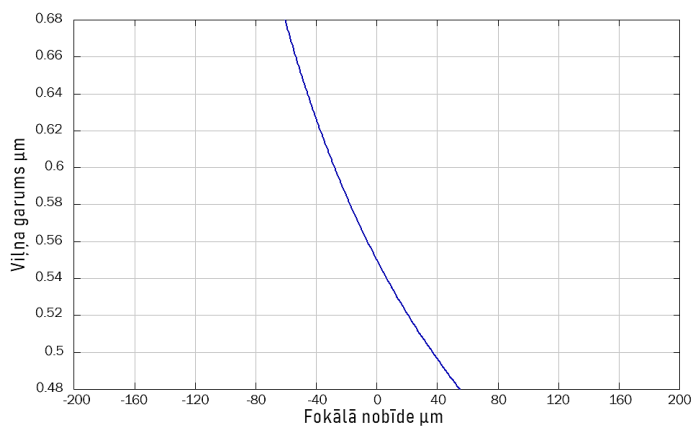
b) Gulstranda modelis



c) Helmholca modelis



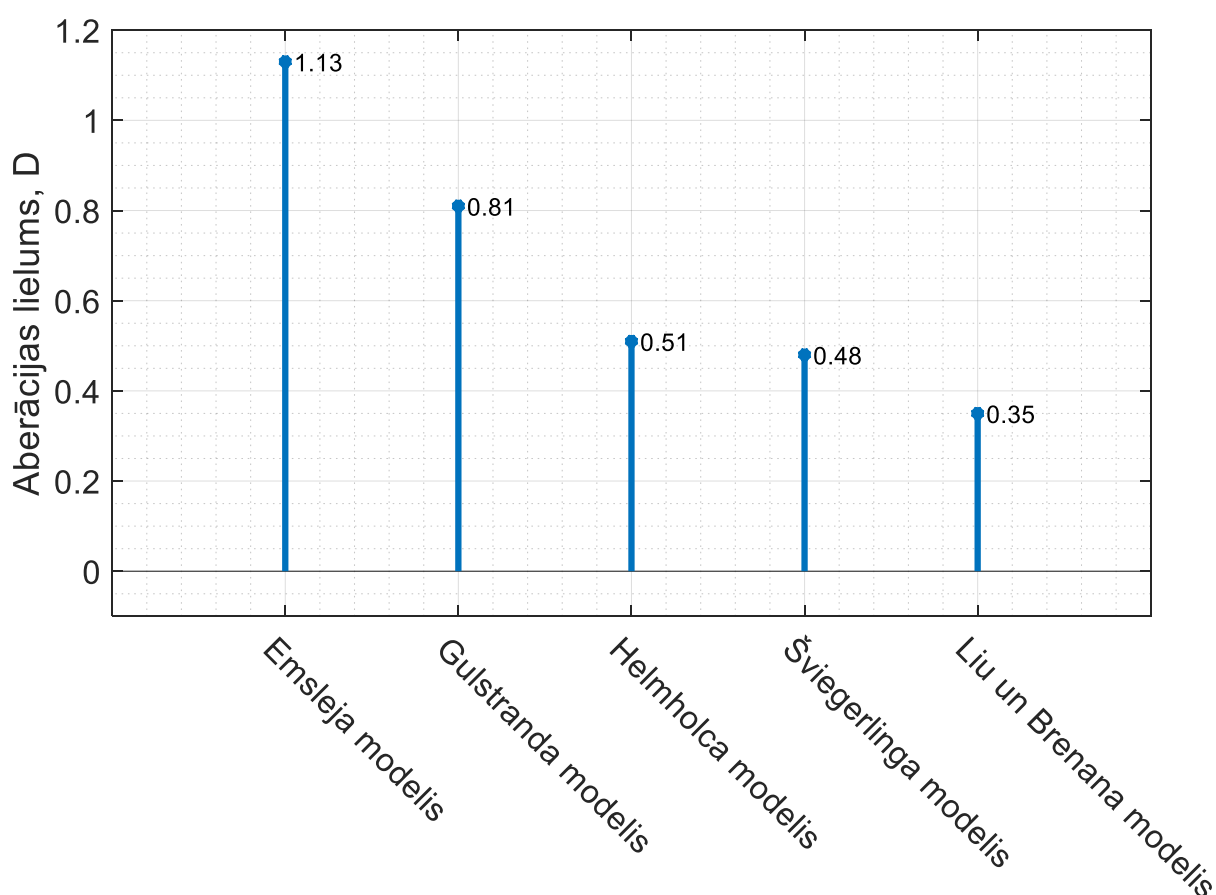
d) Šviegerlinga modelis



e) Liu un Brenana modelis

2.6. attēls. Hromatisko aberāciju fokālās nobīdes grafiki visiem acs modeļiem

Pēc 2.7. attēlā redzamajiem rezultātiem, var novērot, ka acs modeļu hromatiskā fokālā nobīde samazinās proporcionāli modeļu kategorijām. Emsleja acs modelis, kurš atrodas reducēto modeļu kategorijā, saturot tikai vienu refrakcijas virsmu uzrāda vislielāko hromatiskās aberācijas nobīdi starp pārējiem simulētajiem modeļiem, kas ir 1,13 D. Modeļiem, kas atrodas vienkāršoto acs modeļu kategorijā ir mazākas hromatiskās aberācijas par Emsleja modeli, šajā gadījumā Gulstranda acs modelis, kurš uzrāda 0,81 D, un Helmholca acs modelis, kurš uzrāda 0,51 D lielu hromatiskās aberācijas fokālo nobīdi. Pilnveidoto modeļu kategorijas modeļi uzrāda labākus rezultātus nekā iepriekš minētie modeļi. Šviegerlinga acs modelis sniedz 0,48 D lielu hromatiskās aberācijas nobīdi, taču Liu un Brenana acs modelis 0,35 D.



**2.7. attēls.** Hromatiskās aberācijas fokālā nobīde dioptrijās visiem acs modeļiem

Salīdzinot esošo modeļu hromatiskās aberācijas fokālās nobīdes rezultātus ar Merino et. al pētījumu, kur cilvēka acs hromatisko aberāciju nobīdi norāda  $0,46 \pm 0,15$  D (Merino, u.c., 2013), ir novērojama atbilstība ar Helmholca, Šviegerlinga, Liu un Brenana acs modeļiem. Mazāku līdzību ar Merino et. al pētījumā cilvēka hromatiskās aberācijas nobīdi parāda Gulstranda un Emsleja acs modeļi. Savukārt Wang, J., et. al. pētījumā noskaidrots, ka longitudinālā hromatiskā aberācija pieauguša cilvēka acī ir  $0,92 \pm 0,17$  D (Wang, Candy, Teel, & Jacobs, 2008). Līdz ar to šajā gadījumā Emsleja un Gulstranda acs modeļu rezultāti tuvinās

Wang, J., et. al. pētījumā iegūtajai vērtībai. Šo datu atšķirību varētu skaidrot ar to, ka aberācijas acī var mainīties atkarībā no vecuma, mainoties acs struktūrām, tām augot vai pēc fizioloģiskā viedokļa mazinoties struktūru veikspējai, kā tas notiek ar acs lēcu dzīves laikā. Piemēram, Wang, J., et. al. pētījumā tika pētīta arī hromatiskās aberācijas fokālā nobīde zīdaiņiem, kuru vērtība sasniedza  $1,62 \pm 1.14$  D. Nevienam simulētajam acs modelim neuzrāda hromatiskās aberācijas fokālo nobīdi kā zīdaiņiem, ko var skaidrot ar to, ka jaundzimušajiem zīdaiņiem acs garums atšķiras ar pieauguša cilvēka acs garumu.

## SECINĀJUMI

1. Modulācijas pārneses funkcijas pamatā esošais salīdzinājums piecu teorētisko modeļu gadījumā, kas zināmi no literatūras, atklāj, ka Liu un Brenana modelis uzrāda vislabāko modulācijas pārneses funkciju. Pēc korelācijas analīzes un vismazāko kvadrātu metodes Gulstranda acs modelis uzrādīja vistuvākos rezultātus cilvēka acs modulācijas pārneses funkcijai.
2. Liu un Brenana modelis uzrādīja visaugstāko robežfrekvenci modulācijas pārneses funkcijai, tādējādi iegūstot redzes asumu  $V=4,00$  dec. v., savukārt pēc modeļa punkta izkliedes funkcijas pilna platuma pusē maksimuma metodes uzrādot redzes asumu  $V=2,80$  dec. v., atšķiroties no cilvēka populācijas vidējā redzes asuma, kas ir  $0,98 \pm 0,68$  dec. v.. Emsleja, Gulstranda, Helmholca un Šviegerlinga modeļu rezultāti ietilpst lielas cilvēku populācijas vidējās redzes asuma robežās.
3. Liu un Brenana modelis polihromatiskā gaismā uzrāda vismazāko hromatiskās aberācijas dioptrisko nobīdi  $0,35$  D. Gulstranda, Helmholca, Šviegerlinga, Liu un Brenana acs modeļi labāk raksturo cilvēka vidējo hromatiskās aberācijas nobīdi, ietilpstot abu cilvēku hromatisko aberāciju pētījumu rezultātu robežās.

## **NOBEIGUMS**

Darbā tika simulēti pieci acs modeļi, lai pētītu optiskos parametrus. Tiek parādīts, ka ar simulēšanas metodi var iegūt un pētīt modulācijas pārneses funkciju, punkta izkliedes funkciju, aberācijas un prognozēt redzes asumu. Pētījumā uzstādītie darba uzdevumi un mērķis ir izpildīti, hipotēze apstiprinājās, norādot uz to, ka ir modeļi, kas uzrāda labu optiskās sistēmas veikspēju kā Liu un Brenana modelis, taču ir acs modeļi, kas labāk raksturo cilvēka acs optiskos parametrus.

## **PATEICĪBA**

Vēlos pateikties darba vadītājam Varim Karitānam par piedāvāto tēmu, palīdzību.

Pateicos ģimenei un draugiem par atbalstu. Paldies Dāvim Danielam Anstrangam par motivāciju grūtos brīžos, par pacietību, kad bija jāuzklausā aktuālās problēmas saistībā ar bakalaura darba izstrādi.

Paldies Latvijas Universitātes Optometrijas un redzes zinātnes nodaļai par iespēju iegūt jaunas zināšanas!

## IZMANTOTĀ LITERĀTŪRA

- Artal, P., & Navarro, R. (1994). Monochromatic modulation transfer function of the human eye for different pupil diameters: an analytical expression. *Journal of the Optical Society of America*, 246-249.
- Artal, P., Chen, L., Fernández, E. J., Singer, B., Manzanera, S., & Williams, D. R. (2004). Neural compensation for the eye's optical aberrations. *Journal of Vision*, 281-287.
- Atchison, D. A., & Smith, G. (2000). *Optics of the human eye*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Bakaraju, R. C., Ehrmann, K., Papas, E., & Ho, A. (2008). Finite schematic eye models and their accuracy to in-vivo data. *Vision Research, Volume 48, Issue 16*, 1681-1694.
- Balashevich, L. I. (2003). Diagnosis and correction of optic aberrations of the eye. *International medical Journal*, 62-69.
- Carvalho, L. A., & Almeida, M. S. (2007). Different schematic eyes and their accuracy to the in vivo eye: a quantitative comparison study. *Brazilian Journal of Physics*, 378-387.
- Diaz, J. A. (2009). Optical design techniques in current eye models development. *Optics Research*, 1-28.
- Eglīte, K. (2010). *Anatomija 2. daļa*. Rīga: SIA "Latgales druka".
- Espinosa, J., Mas, D., & Kasprzak, H. T. (2009). Corneal primary aberrations compensation by oblique light incidence. *Journal of biomedical Optics*, 50-56.
- Esteve-Taboada, J. J., Montés-Micó, R., & Ferrer-Blasco, T. (2018). Schematic eye models to mimic the behavior of the accommodating human eye. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 627-641.
- Fleck, A., & Lakshminarayanan, V. (2011). Zernike polynomials: A guide. *Journal of Modern Optics*, 545-561.
- Gatinel, D., Haouat, M., & Hoang-Xuan, T. (2002). Review of mathematical descriptors of corneal apshericity. *Journal Français D'Ophtalmologie*, 81-90.
- Jose J. Esteve-Taboada, R. M.-M.-B. (2018). Schematic eye models. *Esteve-Taboada, J. J., Montés-Micó, R., & Ferrer-Blasco, T. (2018). Schematic eye models to mimic the behavior of the acJournal of Cataract & Refractive Surgery*, 627-641.
- Kalbergs, V. (1973). *Cilvēka anatomija 2. daļa*. Rīga: Izdevniecība "Zvaigzne".

- Keating, M. P. (2002). *Geometric, physical, and visual optics*. Woburn: Butterworth-Heinemann.
- Kelly, J. E., Mihashi, T., & Howland, H. C. (2004). *Compensation of corneal horizontal/vertical astigmatism, lateral coma, and spherical aberration by internal optics of the eye*, 262-271.
- Levin, L. A., Nilsson, S. F., Ver Hoeve, J., Wu, S. M., Alm, A., & Kaufman, P. L. (2011). *Adler's physiology of the eye*. Saunders.
- Merino, P. P., Dorronsoro, C., Llorente, L., Duran, S., Alfaro, I. J., & Marcos, S. (2013). In Vivo Chromatic Aberration in Eyes Implanted With Intraocular Lenses. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 12;54(4):2654-61.
- Oyster, C. W. (1999). *The human eye, structure and function*. Sunderland: Sinauer Associates.
- Packer, O. S., & Williams, D. R. (2003). *Light, the retinal image, and photoreceptors*. New York.
- Sheppard, C. (2011). Diffraction optics. *Handbook of biomedical Optics*, 23-29.
- Students, O. (1971). *Optika*. Rīga.
- Sturzu, A., & Luca-Motoc, D. (2011). Theoretical eye models comparison based on mtf. *Engineering Science*, 34-38.
- Tandon, R. (2011). *Parsons' Diseases of the Eye*. India: Elsevier.
- Uchino, M., Kawashima, M., Kaido, M., Suwaki, K., Uchino, Y., Kawachi, I., . . . Tsubota, K. (2017). Evaluation of a paper-based visual acuity questionnaire. *Clinical Ophthalmology*, 1213-1217.
- Wang, J., Candy, T. R., Teel, D. F., & Jacobs, R. J. (2008). Longitudinal chromatic aberration of the human infant eye. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 25(9): 2263–2270.
- Williams, D. R., Berrio, E., Guirau, A., & Artal, P. (2001). Aberrations. *Compensation of corneals Aberrations by the internal Optics in the human Eye*, 1-8.
- Zajac, H. E. (2003). *Optics 4th edition*. Addison-Wesley.

Bakalaura darbs “Dažādu acs modeļu optisko parametru izpēte” izstrādāts LU fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: Kornēlija Brigzna  
Stud.Apl.nr. kb16064

Rekomendēju/nerekomendēju darbu aizstāvēšanai  
Vadītājs: fiziķis, Dr.phys. Varis Karitāns

Recenzents: docents, Dr. phys. Sergejs Fomins

Darbs iesniegts Optometrijas un redzes zinātnes nodaļā \_\_\_\_\_

Dekāna pilnvarotā persona: metodiķe Dzintra Holsta

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē \_\_\_\_\_.

Protokola nr. \_\_\_\_\_

Komisijas sekretārs: \_\_\_\_\_