

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

SANITA LĪDUMA

**REDZES ASUMS UN KONTRASTJUTĪBA ATKARĪBĀ NO RADZENES
ĀRĒJĀS VIRSMAS FORMAS**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Doktora grāda iegūšanai fizikas nozarē

Apakšnozare: medicīniskā fizika

Rīga, 2020

Promocijas darbs izstrādāts
Latvijas Universitātes
Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē
Optometrijas un redzes zinātnes nodaļā
laika posmā no 2016. gada līdz 2020. gadam.

Darbs sastāv no ievada, divām nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta, trīs pielikumiem, ir uzrakstīts datorsalikumā uz 102 lapaspusēm, satur 53 attēlus un 5 tabulas.

Darba forma: disertācija fizikas nozarē, medicīniskās fizikas apakšnozarē.

Darba zinātniskā vadītāja: Dr. phys. Gunta Krūmiņa, profesore, Latvijas Universitāte;

Darba recenzenti:

- 1) *Dr. habil.phys.* Jurijs Dehtjars, Rīgas Tehniskā universitāte
- 2) *Dr.med.* Guna Laganovska, Rīgas Stradiņa universitāte
- 3) *PhD. Jesper Hjortdal, Aarhus University, (Orhūsa, Dānija)*

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2020. gada _____
Latvijas Universitātes Fizikas, astronomijas un mehānikas zinātņu nozares
promocijas padomes atklātā sēdē.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes
Bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4.

LU Fizikas, astronomijas un mehānikas zinātņu nozares promocijas

padomes priekšsēdētājs Dr.habil.phys. Jānis Spīgulis:

promocijas padomes sekretāre Karlīna Engere:

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā uz 102 lapaspusēm. Tas satur 53 attēlus, 5 tabulas, 143 atsauces uz literatūras avotiem un 3 pielikumus. Pētījumā tiek izvērtēta redzes kvalitāte (redzes asums, kontrastjutība un aberācijas) acīm ar keratokonusu, kas ir visbiežākā radzenes saslimšana, kuras rezultātā veidojas neregulāras formas radzene, no radzenes formas izmaiņu lieluma kā keratokonusa pakāpes un virsotnes atrašanās vietas.

Izstrādāta metode, kas ļauj prognozēt redzes asumu un kontrastjutību neregulāras formas radzenēm. Redzes kvalitātes analīze parāda, ka kontrastjutība ir nozīmīgākais redzes kvalitātes raksturojošais parametrs acīm ar neregulāru radzenes formu. Kontrastjutību iespējams uzlabot, samazinot radzenes centrālās daļas virsotnes radīto slīpumu.

Atslēgvārdi: keratokonuss, redzes kvalitāte, redzes asums, kontrastjutība, radzenes aberācijas, radzenes virsotnes slīpums

SATURS

1.	VISPĀRĪGAIS DARBA RAKSTUROJUMS	5
1.1.	Darba novitāte	6
1.2.	Aizstāvamās tēzes	7
1.3.	Autores publikāciju saraksts	7
1.4.	Dalība starptautiska mēroga konferencēs	8
1.5.	Dalība vietēja mēroga konferencēs	9
2.	LITERATŪRAS PĀRSKATS	10
3.	PĒTĪJUMA DAĻA	12
3.1.	Neregulāras radzenes formas radītais virsotnes slīpums	12
3.1.1.	Metode	12
3.1.2.	Rezultāti	15
3.2.	Neregulāras radzenes formas radītā kontrastjutība	18
3.2.1.	Metode	18
3.2.2.	Rezultāti	19
3.3.	Neregulāras radzenes formas radītās aberācijas	21
3.3.1.	Metode	21
3.3.2.	Rezultāti	22
	DISKUSIJA	25
	NOBEIGUMS	28
	IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	29

1. VISPĀRĪGAIS DARBA RAKSTUROJUMS

Pēdējos 25 gadus pasaulē strauji attīstās refraktīvā ķirurģija, tādēļ aizvien būtiskāk paliek saprast un spēt analizēt radzenes topogrāfijas attēlus, atšķirt patoloģiskas radzenes izmaiņas no fizioloģiskas normas, lai lāzerekorekcija netiktu veikta radzenēm ar progresējošām patoloģiskām izmaiņām. Kā arī labāk saprotot radzenes topogrāfijas kartes, precīzāk iespējams darboties ar lāzeru, lai ne tikai nepasliktinātu, bet arī uzlabotu radzenes optiskās virsmas kvalitāti, līdz ar to tīklenes attēla kvalitāti. Vienlaikus tīklenes attēla kvalitāte, kas veidojas, laižot gaismas staru tam, ejot cauri radzenei, ir atkarīga no radzenes priekšējās virsmas formas. Tīklenes attēla kvalitāte samazinās neregulārām radzenes formām kā radzenes astigmātisms. Refrakcijas sfēriskās komponente vai astigmātisms ir viegli koriģējams ar briļļu korekciju, bet optiskās aberācijas kā koma vai distorsijas nav iespējams izkoriģēt ar brillēm. Šādas aberācijas parasti veido iregulārs astigmātisms, kurš tiek novērots acīm ar keratokonusu vai pēc radzenes transplantācijas, vai refraktīvās ķirurģijas operācijām pie izmainītas radzenes formas. Neregulārā radzenes forma keratokonusa gadījumā stipri pasliktina acs optisko kvalitāti un tīklenes attēlu. Acīm ar neregulāru radzenes formu okulārās un radzenes augstākās kārtas aberācijas ir nozīmīgi lielākas kā acīm bez patoloģiskām izmaiņām. Tiek uzskatīts, ka tieši augstākās kārtas aberācijas rada redzes kvalitātes pasliktināšanos. Ar radzenes topogrāfiju ir iespējams iegūt radzenes priekšējās virsmas individuālu radzenes punktu attēlojumu, tomēr tīklenes attēls tiek veidots no gaismas, kas ienāk caur visiem radzenes punktiem, kas atrodas zīlītes rajonā, tādēļ nav iespējams prognozēt kāda būs tīklenes attēla kvalitāte tikai pēc topogrāfijas attēla vien. Ar redzes kvalitāti jāsaprot ne tikai redzes asums augsta kontrasta apstākļos, bet tai skaitā arī acs optiskās sistēmas aberāciju samazināšanu un kontrastjutības uzlabošanu, kas svarīga perifērai redzei un redzei pazemināta apgaismojuma apstākļos. Vieni no redzes kvalitātes galvenajiem faktoriem ir radzenes virsmas kvalitāte – tās sfēriskums kombinācijā ar pārējām acs optiskās sistēmas komponentu virsmas sfēriskumu – un radzenes dzidrums.

Vēsturiski keratokonuss ir bijis kā absolūta kontrindikācija eksimera lāzera iedarbībai, iespējamās radzenes destabilizācijas un ektāzijas stāvokļa pasliktināšanas dēļ, jo ektāzija var veidoties kā eksimera lāzera komplikācija. Tomēr acīm ar keratokonusu ir iespējams izmantot lāzeru, lai izkoriģētu radzenes priekšējo virsmu, balstoties uz radzenes topogrāfijas datiem. Ārstēšanas pamatā ir radzenes formas anatomiska, nevis fizioloģiska uzlabošana. Šāda ārstēšana var uzlabot radzenes topogrāfiju un koriģēto redzes asumu, bet redzes refraktīvais defekts nav paredzama pēc šādas korekcijas. *Topo-guided cross-linking* ablācijas mehānismā notiek neregulāras radzenes ģeometriskās formas piemērošana ideālas radzenes (parasti sfēras) topogrāfijai, radzenes audus virs ideāli sfēriskas radzenes noņemot, tādā veidā ar lāzeru tiek koriģēta radzenes virsotnes daļa, kura visbiežāk atrodas perifērijā. Koriģējot radzenes neregulāro formu perifērijā, redzes kvalitāte ne

vienmēr uzlabojas. Šobrīd pirms procedūras netiek analizēts tas, kā būtu jāmaina neregulārā radzenes forma, balstoties uz individuāliem radzenes topogrāfijas datiem, lai iegūtu labāku tīklenes attēla kvalitāti, bet radzenes forma visām acīm tiek mainīta vienādi - saplacinot radzenes izvirzījumu (virsošni). Tomēr tas nav pietiekoši, jo, saplacinot keratokonusa virsošni, kas atrodas perifērijā, redzes kvalitāte netiks mainīta, jo tīklenes attēla kvalitāti nosaka tieši radzenes centrālā daļa. Lai ārstēšanas efektivitāti uzlabotu, ir nepieciešams jau pirms ārstēšanas saprast, kā radzenes neregularitātes maina tīklenes attēla kvalitāti, lai spētu prognozēt, kuros gadījumos redzes kvalitāte uzlabosies ārstēšanas rezultātā, kā arī to, kā tieši mainīt esošo radzenes formu, ņemot vērā, ka radzenes formas ir ļoti atšķirīgas. Šobrīd nav veikti pētījumi, lai saprastu to, kā būtu jāmaina radzenes ģeometriskā virsma neregulāras formas radzenēm. Tādēļ, lai saprastu to, kā mainīt radzenes formu, vispirms ir jāsaprot kā tīklenes optiskā attēla kvalitāte mainās dažādās formas radzenēm. Redzes kvalitāti raksturo radzes asums augsta kontrasta apstākļos, kontrastjutība un radzenes aberācijas.

Tādēļ mans pētījuma mērķis ir, izpētot radzenes ārējās virsmas neregularitātes ietekmi uz redzes asumu un kontrastjutību, panākt uzlaboto neregulāras formas radzenes diagnostiku.

Lai sasniegtu pētījuma mērķi, ir noteikti sekojoši uzdevumi:

1. izpētīt neregulāras radzenes formas ietekmi uz redzes asumu, kontrastjutību;
2. noteikt vissvarīgākos neregulāras radzenes formas faktoros, no kuriem ir atkarīgs redzes asums, kontrastjutība;
3. eksperimentāli noteikt, kā, mainot neregulāras radzenes formas parametrus, var uzlabot redzes asumu, kontrastjutību;
4. izstrādāt un aprobēt klīnikā neregulāras formas radzenes diagnostiku, izmantojot redzes asumu, kontrastjutību.

1.1. Darba novitāte

Darbā tika:

1. izpētīts, kā neregulāras radzenes ārējās virsmas forma ietekmē redzes asumu, kontrastjutību. Redzes kvalitāti būtiskāk ietekmē radzenes virsmas neregularitātes lielums kā keratokonusa pakāpe, nevis virsošnes atrašanās vieta, kuras ietekme uz kontrastjutību pieaug, pieaugot kontrastjutības frekvencei.
2. parādīts, ka pēc redzes kvalitātes ir iespējams identificēt neregulāras radzenes formas. Tīklenes attēla kvalitāti maina radzenes augstākās kārtas aberācijas. Augstākās kārtas aberāciju analīze parādīja, ka uz redzes kvalitāti būtiskāka ietekme ir sfēriskajai aberācijai, bet ne dominējošajai neregulāras radzenes formas aberācijai – vertikālajai komai.

3. izveidota jauna metode radzenes ārējās virsmas neregularitātes analīzei, kura pirmoreiz ļauj izvērtēt radzenes raksturojošo parametru ietekmi uz redzes kvalitāti. Metodes klīniska aprobācija parādīja, ka acīm ar neregulāru radzenes formu kontrastjutība uzlabojas katrā telpiskajā frekvencē ar nosacījumu, ka radzenes virsmas virsotnes radītais slīpums tiek samazināts radzenes centrālajā daļā, proti, uzlabots radzenes sfēriskums.

Darba ietvaros izstrādātā metode dod iespēju acu ķirurģiem prognozēt *topo-guided cross-linking* metodes iznākumu individuāli keratokonusa gadījumā, balstoties uz individuālajiem radzenes topogrāfijas datiem. Šobrīd *topo-guided cross-linking* metode tiek veikta pēc viena protokola, turklāt neprognozējot potenciālo ārstēšanas rezultātu, jo šobrīd neregulārās radzenes formas dēļ nav iespējams prognozēt to, kā mainīsies redzes kvalitāte acīm ar neregulāru radzenes formu.

1.2. Aizstāvamās tēzes

1. Noteikts, ka acīm ar neregulāru radzenes formu radzes asumu, kontrastjutību vairāk ietekmē radzenes formas neregularitātes izmaiņu lielums kā keratokonusa pakāpe, nevis radzenes virsmas virsotnes atrašanās vieta, kurai ir dažāda ietekme uz katru no kontrastjutības telpisko frekvenci (Liduma et al, 2020, Proc. SPIE 11312; Liduma et al, 2020, Proc. SPIE 11359; Proceedings of the Latvian Academy of Science, 5(710), 339-246).
2. Eksperimentāli noteikts, ka radzes asumu, kontrastjutību būtiskāk ietekmē radzenes centrālās daļas regularitāte, nekā radzenes augstākais un zemākais punkts.
3. Izpētīts, ka acīm ar neregulāru radzenes formu dominējošā aberācija ir vertikālā komas aberācija, kaut arī sfēriskajai aberācijai ir visbūtiskākā ietekme uz radzes asumu (Liduma, S., Krumina, G., 2019, Proc. SPIE 11207).
4. Pētījumā izstrādātā metode parādīja, ka kontrastjutību acīm ar neregulāru radzenes formu var uzlabot, mainot radzenes centrālās daļas slīpumu.

1.3. Autores publikāciju saraksts

1. Liduma, S., Luguzis, A., Krumina, G. (2020). "Keratoconus apex positions impact on visual acuity and contrast sensitivity", Proc. SPIE 11359, Biomedical Spectroscopy, Microscopy, and Imaging, 113591W (1 April 2020); doi: 10.1117/12.2546319
2. Liduma, S., Luguzis, A., Krumina, G. (2020). "Keratoconus stage impact on visual acuity and contrast sensitivity", Proc. SPIE 11312, Medical Imaging, 113122J (16 March 2020); doi: 10.1117/12.2543181

3. Liduma, S., Krumina, G. (2019). "The impact of keratoconus apex's localization on eye aberrations", Proc. SPIE 11207, Fourth International Conference on Applications of Optics and Photonics, 112070R (3 October 2019); doi: 10.1117/12.2527145
4. Liduma, S., Krumina, G. (2017) "Visual acuity and contrast sensitivity in different keratoconus stages", Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, 5(710), pp.339-246. DOI: 10.1515/prolas-2017-0058

1.4. Dalība starptautiska mēroga konferencēs

1. SPIE Photonics Europe Digital forum 2020 (2020. gada 6.-10. aprīlis) "Keratoconus apex positions impact on visual acuity and contrast sensitivity" Liduma, S., Luguzis, A., Krumina, G., video referāts
2. SPIE Medical Imaging 2020 (Hjūstona, ASV, 2020. gada 15.-20. februārim) "Keratoconus stage impact on visual acuity and contrast sensitivity". Liduma, S., Luguzis, A., Krumina, G., stenda referāts
3. Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft DOG 2019 (Berlīne, Vācija, 2019. gada 26. septembra līdz 29. septembrim) „The impact of keratoconus apex' slope on visual acuity and contrast sensitivity”. Liduma, S., Luguzis, A., Krumina, G., stenda referāts, p. 130
4. European Society of Cataract & Refractive Surgeons ESCRS 2019 (Parīze, Francija, 2019. gada 14.-18. septembris) "Changes in visual acuity, refraction and pachymetry after cross-linking", Liduma, S., Vavžika, E., Lukins, F., Karlson, L., Krumiņa, G., stenda referāts
5. IV International Conference on Application in Optics and Photonics AOP 2019 (Lisabona, Portugāle, 2019. gada 31. maijs-4. jūnijs) "The impact of keratoconus apex's localization on eye aberrations", Liduma, S., Krumina, G., stenda referāts, p.44
6. 15th International Young Scientist Conference „Developments in Optics and Communications 2019” (Rīga, Latvija, 2019. gada 11.-12. aprīlis) „The impact of keratoconus apex' localization on eye aberrations”, Liduma, S., Krumina, G., mutisks referāts, p.32
7. International Scientific Conference on Medicine 2019 (Rīga, Latvija, 2019. gada 22. februāris) "The evaluation of keratoconus patients' quality of life", Liduma, S., Krumina, G., stenda referāts
8. 2nd International Symposium on Visual Physiology, Environment and Perception VisPEP 2018 (Viļņa, Lietuva, 2018. gada 30. novembris-1. decembris) „Visual acuity, refraction, and pachymetry in different keratoconus stages after cross-linking” Liduma, S., Vavžika, E., Krumiņa, G., stenda referāts, p. 54.
9. 41st European Conference on Visual Perception conference ECVF 2018 (Trieste, Itālija, 2018. gada 26.-30. augusts) „Visual acuity and contrast

- sensitivity depending on keratoconus apex's position ", Liduma, S., Krumina, G., stenda referāts, p.20.
10. 14th International Young Scientist Conference „Developments in Optics and Communications 2018” (Rīga, Latvija, 2018. gada 12.-13. aprīlis) „Changes in visual acuity, refraction and pachymetry in various stages of keratoconus after cross-linking operations”, Liduma, S., Vavžika, E., Krumina, G., mutisks referāts, p.4.
 11. Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft DOG 2017 (Berlīne, Vācija, 2017. gada 28. septembra līdz 1. oktobrim) „The impact of keratoconus apex position on visual acuity and contrast sensitivity”. Liduma, S., Krumina, G., stenda referāts, p.127.
 12. 13th International Young Scientist Conference „Developments in Optics and Communications 2017” (Rīga, Latvija, 2017. gada 6.-7. aprīlis) „The impact of keratoconus apex position on visual acuity and contrast sensitivity”, Liduma, S., Krumina, G., mutisks referāts, p.2.
 13. 1st International Symposium on Visual Physiology, Environment and Perception VisPEP 2016 (Rīga, Latvija, 2016. gada 6.-8. oktobris) „Visual acuity and contrast sensitivity in different keratoconus stages”, Liduma, S., Krumina, G., stenda referāts, pp.48-49.

1.5. Dalība vietēja mēroga konferencēs

1. LU 77. zinātniskā konference (Rīga, Latvija, 2019. gada 15. februāris), „Keratokonusa virsotnes atrašanās vietas radītās izmaiņas radzenes augstākās kārtas aberācijās”, Līduma, S., Krūmiņa, G., mutisks referāts
2. LU 76. zinātniskā konference (Rīga, Latvija, 2018. gada 16. februāris), „Redzes asuma, refrakcijas un radzenes biezuma izmaiņas dažādās keratokonusa stadijās pēc kroslinkinga operācijas”, Līduma, S., Vavžika, E., Krūmiņa, G., mutisks referāts
3. LOOA un LU 75. klīniski praktiskā konference (Rīga, Latvija, 2017. gada 19. februāris), „Keratokonusa virsotnes atrašanās vietas ietekme uz redzes asumu un kontrastredzi”, Līduma, S., Krūmiņa, G., mutisks referāts
4. LU 75. zinātniskā konference Atomfizika, optiskās tehnoloģijas un medicīniskā fizika, Cilvēka tehnoloģijas un medicīniskā fizika (Rīga, Latvija, 2017. gada 17. februāris), „Redzes asuma, refrakcijas, radzenes biezuma izmaiņas dažādās keratokonusa stadijās pēc kroslinkinga operācijas”, E. Vavžika, S. Līduma, stenda referāts

2. LITERATŪRAS PĀRSKATS

Keratokonuss ir neinfekcioza, progresīva radzenes plānināšanās, kura parasti norit bilaterāli un kurā tiek iesaistītas 2/3 centrālās radzenes daļas (Rabinowitz, 1998; Espandar & Meyer, 2010). Radzenes plānināšanās un izvirzīšanās veido neregulāru astigmātismu un/vai miopiju. Vienīgā metode, ar kuru ir iespējams pārtraukt progresīvo radzenes plānināšanos un keratokonusa progresēšanu ir kroslinkinga metode, kurā tiek izmantots riboflavīns un ultravioleto-A (UVA) gaismā. Ar kroslinkinga operāciju tiek panākta papildus kovalento saišu veidošana starp kolagēna molekulām, stabilizējot kolagēna izvirzījumu un mainot vairākas audu īpašības (Espandar & Meyer, 2010; Boa et al., 2016), kā arī uzlabojot radzenes formu, uzlabojas nekoriģētais un labākais koriģētais redzes asums, kā arī samazinās augstākās kārtas radzenes aberācijas, īpaši koma (Romero-Jimenez & Santodomingo-Rubido, 2010). Keratokonusus visbiežāk lietotā un vecākā ir Amslera-Krumeica klasifikācijas sistēma (skat. 1. tab.), kurā keratokonuss tiek gradēts no pirmās līdz ceturtajai pakāpei, balstoties uz briļļu korekciju, centrālo keratometriju (radzenes liekumu), radzenes rētošanās esamību un centrālo radzenes biezumu (Duncan & Belin, 2016).

1. tabula

Amslera-Krumeica klasifikācijas shēma

I pakāpe	<ul style="list-style-type: none">• Ekscentrisks izvirzījums.• Miopija un/vai astigmātisms <5,00 D.• Vidējā centrālā K vērtība <48,00 D.
II pakāpe	<ul style="list-style-type: none">• Miopija un/vai astigmātisms no 5,00 līdz 8,00 D.• Vidējā centrālā K vērtība <53,00 D.• Nav rētošanās.• Minimālais radzenes biezums >400 μm.
III pakāpe	<ul style="list-style-type: none">• Miopija un/vai astigmātisms no 5,00 līdz 10,00 D.• Vidējā centrālā K vērtība >53,00 D.• Nav rētošanās.• Minimālais radzenes biezums 300 – 400 μm.
IV pakāpe	<ul style="list-style-type: none">• Refrakcijas kļūda nav nosakāma.• Vidējā centrālā K vērtība >55,00 D.• Centrālās radzenes rētošanās.• Minimālais radzenes biezums 200 μm.

Applegate ar kolēģiem (2006) pierādīja, ka korelācija starp neregulāras formas radzenes tīklenes attēla kvalitāti un redzes asumu ir lielāka zema kontrasta redzes asumam vājā apgaismojumā pat, ja acīm ar augstu kontrastu, redzes asums ir virs 1,0 (Applegate & Marsack, 2006). Redzes asums no kontrastjutības atšķiras ar to, ka redzes asuma mērījums balstās uz redzes izšķirtspēju augsta kontrasta apstākļos (vismaz 85%), kur objektiem ir vienāds kontrasts, bet atšķirīgs izmērs. Kontrastjutība ir sliekšņa mērījums, kas nepieciešams, lai saskatītu objektu, šajā gadījumā kontrasts ir dažāds, lai noteiktu minimālo objekta atpazīšanai

nepieciešamo kontrasta līmeni (Owsley, 2003). Daudzi speciālisti uzskata, ka acīm ar neregulāras formas radzenēm sūdzības par redzi neatspoguļo augsta kontrasta redzes asums. Acīm ar neregulāras formas radzenēm zema kontrasta redzes asums ir informatīvāks par viņu redzi (Zadnik et al., 2000). Maeda un kolēģu (2000) veiktajā pētījumā tika parādīts, ka patoloģiska topogrāfija nozīmīgi samazina burtu kontrastjutību, salīdzinājumā ar acīm bez patoloģiskām izmaiņām topogrāfijā, nemainot labāko koriģēto redzi augsta kontrasta apstākļos (Maeda et al., 2000). Acīm ar neregulāru radzenes formu pirms augsta kontrasta redzes asuma samazināšanās, samazinās kontrastjutība vidējās un augstās telpiskās frekvencēs (Hess & Carney, 1978; Zadnik & Mannis, 1984; Zadnik et al., 1987; Pesudovs et al., 2004). Zadnik veiktajā pētījumā (1987) acīm ar neregulāru radzenes formu kontrastjutības samazinājums sākas 6 telpiskajā frekvencē. Kontroles grupā acīm bez patoloģiskām izmaiņām maksimālā kontrastjutība tika novērota 6 cikli/grādu, bet 60% no acīm ar neregulāru radzenes formu maksimālā kontrastjutība bija 3 un 4 cikli/grādu, augstākās frekvencēs kontrastjutība proporcionāli samazinājās no normālas kontrastjutības ar vislielāko atšķirību 12 un 18 telpiskajā frekvencē (Zadnik et al., 1987).

Saprast radzenes priekšējās virsmas aberācijas mūsdienās, pieaugot refraktīvās ķirurģijas popularitātei, ir ļoti būtiski, jo ar jaunākajām tehnoloģijām iespējams izveidot radzenes priekšējo virsmu tādu, lai operācijas laikā samazinātu radzenes aberācijas, tādā veidā uzlabojot tīklenes attēla kvalitāti (Rosa et al., 2008). Smolek (2003) balstoties uz pieņēmumu, ka radzenēm ar lielākām virsmas izmaiņām, būs lielākas radzenes aberācijas līdz ar to labākais koriģētais redzes asums pasliktināsies, savā pētījumā parādīja, ka ne visas aberācijas vienādi ietekmē redzes kvalitāti, proti, lielu labākā koriģētā redzes asuma uzlabojumu ir iespējams iegūt, izkorigējot 4-ās kārtas aberācijas, bet izkorigējot 10-tās kārtas aberācijas redzes asums uzlabojas mazāk (Smolek & Klyce, 2003). Paranhos (2011) dzīves kvalitātes pētījums acīm ar neregulārām radzenes formām parādīja, ka dzīves kvalitāti visvairāk ietekmē sekojoši parametri – dzimums (vīrieši vairāk ir apmierināti ar dzīves kvalitāti), izmaiņas cilindra lielumā virs 1 D un kontrastjutības izmaiņas 3 un 6 telpiskajās frekvencēs. Tas liecina, ka dienas funkcionālā redze uzlabojas, uzlabojoties kontrastjutībai 3 un 6 telpiskajā frekvencē un samazinot cilindra lielumu vismaz par 1 D (Paranhos et al., 2011).

Vēsturiski keratokonusi ir bijis kā absolūta kontrindikācija eksimera lāzera iedarbībai, iespējamās radzenes destabilizācijas un ektāzijas stāvokļa pasliktināšanās dēļ, jo ektāzija var veidoties kā eksimera lāzera komplikācija. Tomēr acīm ar keratokonusu ir iespējams izmantot lāzeru, lai izkorigētu radzenes priekšējo virsmu, balstoties uz radzenes topogrāfijas datiem. Tas ir iespējams apvienojot kroslinkinga un uz topogrāfiju balstītās radzenes formas uzlabošanas ārstēšanu, lai uzlabojot radzenes priekšējo virsmu, samazinātu neregulāro astigmātismu un refrakcijas kļūdu, uzlabojot redzes asumu un apturētu keratokonusa progresēšanu (Shetty, 2013).

3. PĒTĪJUMA DAĻA

Pētījumā analizēta redzes kvalitāte neregulāras formas radzenēm atkarībā no virsotnes atrašanās vietas un radzenes izmaiņu lieluma. Ar redzes kvalitāti, saprotot tādus mērījumus kā redzes asums, kontrastjutība un aberācijas. Darbā tika analizēta neregulāras radzenes formas neregularitātes izmaiņu lieluma kā keratokonusa pakāpes un virsotnes atrašanās vietas ietekme uz redzes kvalitāti, kā arī izmaiņas redzes kvalitātē, ko rada virsotnes radītais slīpums zīlītes rajonā. Tas tika darīts ar mērķi, izpētīt radzenes ārējās virsmas neregularitātes ietekmi uz redzes asumu un kontrastjutību, panākt uzlaboto neregulāras formas radzenes diagnostiku.



3.1. Neregulāras radzenes formas radītais virsošnes slīpums

3.1.1. Metode

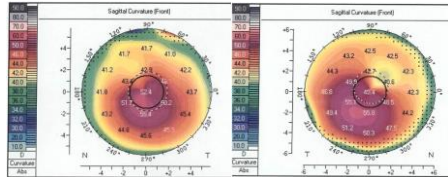
Pētījumā piedalījās 45 dalībnieki ar keratokonusu un kopējo analizēto keratokonusa acu skaitu - 79. Pētījuma dalībnieki tiek iedalīti 4 saslimšanas pakāpēs pēc Amslera-Krumeica klasifikācijas shēmas. Darbā tika iekļauti tikai dalībnieki ar pirmajām trim keratokonusa pakāpēm, dēļ nelielā dalībnieku skaita ar ceturto vistālāk aizgājušo keratokonusa pakāpi (skat. 2. tab.).

2. tabula

Dalībnieku sadalījums pa pakāpēm un virsošnes atrašanās vietām.

	I pakāpe	II pakāpe	III pakāpe	KOPĀ:
Centrā	7 (26%)	10 (32%)	16 (76%)	33
Perifērijā	20 (74%)	21 (68%)	5 (24%)	46
KOPĀ:	27	31	21	

Dalībniekiem tika veikta radzenes topogrāfija, un, balstoties uz topogrāfijas attēlu, pacēluma virsotnes atrašanās vieta tika uzskatīta par centrālu, ja radzenes sagittālajā liekuma topogrāfijas kartē, apgabals ar vislielāko liekuma vērtību dioptrijās atrodas 1,5 mm lielā rādiusā ap radzenes centru, bet ja tas atrodas ārpus riņķa, kura diametrs ir 3 mm, tad pacēluma virsotne atrodas radzenes perifērijā (skat. 1. att.).



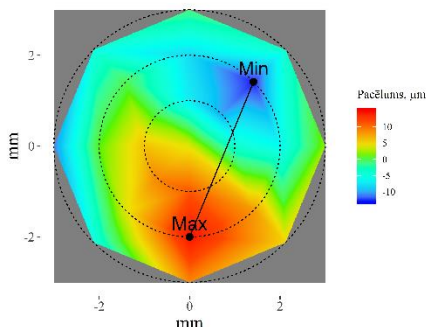
1. att. Dalībnieku topogrāfijas ar pacēluma virsotni centrā (pa kreisi) un perifērijā (pa labi). Melnā riņķa līnija ataino 1,5 mm lielu rādiusu ap radzenes centru, bet raustītā līnija zīlītes robežas.

Pētījuma dalībniekiem darbā tika noteikta labākā iespējamā subjektīvā refrakcijas korekcija, redzes asums ar un bez korekcijas, veikta radzenes topogrāfija, noteikts zīlītes izmērs krēslas apstākļos, veikta biomikroskopiskā acs apskate, lai izslēgtu dalībniekus ar nedzidrām optiskajām vidēm un noteikta kontrastjutība 8 telpiskajās frekvencēs ar un bez subjektīvās briļļu korekcijas.

Darbā tika analizēts neregulāras radzenes ģeometriskās formas radītais slīpums no pētījumā ieviestajiem parametriem par subjekta esošās radzenes atšķirību no ideālās formas radzenes (skat. 2. att.). Dati tika nolasīti no ALLEGRO *Oculyzer* topogrāfa priekšējās radzenes virsmas pacēluma kartes datiem. Radzenes pacēluma karte attēlo, kā atšķiras individuālā dalībnieka radzenes forma no ideālās sfēras. Reālas radzenes virsmas attālums līdz ideālai radzenes sfērai tiek izteikts mikrometros.

Radzenes mērījumi tika nolasīti no (skat. 3. att.):

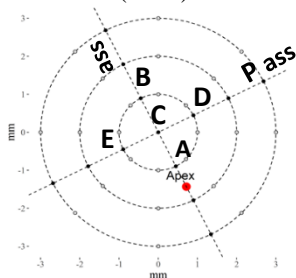
- (1) radzenes centra – C,
- (2) punktiem, kas vienmērīgi izvietoti uz 1, 2, 3 mm rādiusa riņķa līnijām ap radzenes centru – pelēkie punkti,
- (3) punktiem, kas atrodas 1, 2, 3 mm attālumā no radzenes centra uz ass, kas iet caur radzenes centru un radzenes virsmas virsotni (ass) un tam perpendikulārās ass (P ass).



2. att. Shematisks radzenes priekšējās virsmas attēls, kurš parāda reālas radzenes pacēlumu no ideāli sfēriskas radzenes virsmas. Reālas radzenes punkti kā pacēlums tiek mērīti mikrometros (μm) no katra dalībnieka iedomātās ideālās sfēriskās radzenes virsmas. Attēlā ir redzams radzenes maksimālais (Max) un minimālais (Min) pacēluma punkts no ideālās sfēras virsmas. Raustītās riņķveida līnijas attēlo 1, 2 un 3 mm analizētās riņķa līnijas. Sarkanā krāsa attēlo augstākus punktus, kamēr zilā – zemākus.

Darbā tika ieviesti jauni radzenes virsmas raksturojošie parametri, lai noteiktu to korelāciju ar tādiem redzes kvalitātes raksturojošajiem parametriem kā redzes asums un kontrastjutība. Tika noteikts radzenes augstākais, un zemākais punkts, t.i., punkti ar attiecīgi vislielāko un vismazāko augstumu, par atskaites punktu ņemot, iedomāto ideālo radzenes sfēru (datus no radzenes pacēluma topogrāfijas kartes), kā arī starpība starp šiem punktiem. Papildus darbā tika analizēti mērījumu punkti (3), visām acīm tika noteiktas pacēluma izmaiņas no radzenes centra četros virzienos, kurus nosaka radzenes virsmas virsotnes atrašanās vieta:

- radzenes pacēluma virzienā un pretēji tam pa taisni, kas iet caur centru un radzenes virsmas virsotni (ass);
- uz abām pusēm no radzenes centra pa taisni, kas ir perpendikulāra centra-radzenes virsmas virsotnes taisnei (P ass).



3. att. Shematisks piemērs mērījuma punktu izvietojumam.

3.1.2. Rezultāti

Radzenes virsmas raksturojošie parametri

Visiem dalībniekiem kopā ar neregulāru radzenes formu bija mērena redzes asuma korelācija absolūtajās vērtībās ar priekšējās radzenes virsmas augstāko radzenes punktu ($r=0,30$, $p<0,01$), bet zemāko radzenes punktu bija vājāka ($r=0,21$, $p<0,06$). Dalībniekiem ar centrālu virsotni, redzes asumam bija vājākas korelācijas ar augstāko radzenes punktu ($r=0,10$, $p=0,61$), un zemāko radzenes punktu ($r=0,15$, $p=0,44$). Dalībniekiem ar perifēru virsotni, vislielākās redzes asuma korelācijas bija ar radzenes augstāko punktu ($r=0,44$, $p<0,01$), un zemāko radzenes punktu ($r=0,34$, $p=0,02$).

Radzenes virsmas raksturojošajiem parametriem bija lielāka korelācijas ar kontrastjutību kā redzes asumam. Visiem dalībniekiem kopā, kontrastjutības korelācijas koeficients ar radzenes virsmas pacēluma izmaiņām bija atšķirīgs dažādās kontrastjutības telpiskajās frekvencēs. Radzenes augstākā punkta korelācijas koeficienta absolūtais vērtības ar kontrastjutības telpiskajām frekvencēm svārstās amplitūdā no $r=0,25$ ($p=0,03$) pie 3 cikli/grādu līdz $r=0,47$ ($p<0,01$) pie 9 cikli/grādu. Dalībniekiem ar centrālu radzenes virsmas virsotni korelācija starp kontrastjutību un radzenes augstākā punkta pacēlumu svārstās no $r=0,10$ ($p=0,61$) pie 3 cikli/grādu līdz $r=0,38$ ($p=0,05$) pie 9 cikli/grādu. Dalībniekiem ar perifēru radzenes virsmas virsotni korelācijas koeficients svārstās no $r=0,33$ ($p=0,02$) pie 3 cikli/grādu līdz $r=0,53$ ($p<0,01$) pie 9 cikli/grādu.

Visiem dalībniekiem kopā radzenes zemākajam punktam absolūtais korelācijas koeficients svārstās no $r=0,33$ ($p=0,09$) pie 5 cikli/grādu līdz $r=0,40$ ($p<0,01$) pie 11 cikli/grādu. Dalībniekiem ar centrālu radzenes virsmas virsotni radzenes zemākā punkta absolūtais korelācijas koeficients svārstās no $r=0,32$ ($p=0,09$) pie 7 cikli/grādu līdz $r=0,49$ ($p<0,01$) pie 15 cikli/grādu. Dalībniekiem ar perifēru radzenes virsmas virsotni korelācijas koeficients svārstās no $r=0,32$ ($p=0,03$) pie 3 cikli/grādu līdz $r=0,47$ ($p<0,01$) pie 11 cikli/grādu.

Virsotnes radītais pacēlums

Kā minēts iepriekš, darbā tika analizēti divi virzieni, kas raksturo radzenes virsmas izmaiņas – virziens caur radzenes centru un radzenes virsmas virsotni (ass) un tam perpendikulārais virziens (P ass). Redzes asumam vislielākās korelācijas ir ar pacēluma virzienu, kas iet caur radzenes centru un radzenes virsmas virsotni (ass).

Analizējot meridiānu, kas iet caur radzenes centru un radzenes virsmas virsotni (ass), atsevišķi virzienā no radzenes centra uz radzenes virsmas virsotnei pretējo virzienu (CB) un uz radzenes virsmas virsotni (CA), redzams, ka redzes asumam vislielākā korelācija bija ar radzenes pacēluma izmaiņu no radzenes centrālās daļas uz virsotnei pretējo pacēluma virzienu (CB) un mazākas korelācijas ar virzienu no centrālās ass uz radzenes virsmas virsotni (CA).

Visiem dalībniekiem kopā redzes asumam vislielākā korelācija bija ar tā pacēluma virziena izmaiņām, kas iet caur radzenes centru un radzenes virsmas

virsoņi (ass) 1 mm rādiusā. Dalībniekiem ar perifēru virsoņi bija līdzīga situācija, proti, vislielākā redzes asuma korelācija bija ar pacēlumu 1 mm lielā rādiusā ar asi, kas iet caur radzenes virsmas virsoņi (ass), bet dalībniekiem ar centrālu virsoņi nebija redzes asumam statistiski nozīmīgas korelācijas radzenes parametriem nevienā attālumā no radzenes centra.

Visiem dalībniekiem kopā, pacēluma datu korelācijas koeficienti ar kontrastjutību bija lielāki asij, kura iet caur radzenes virsmas virsoņi un radzenes centrālo daļu (ass), kā tam perpendikulārajam virzienam (P ass). Vislielākie kontrastjutības korelācijas koeficienti ar pacēluma izmaiņām bija radzenes centrālajam apgabalam ar 1 mm rādiusu ap radzenes centru virzienam (CB), gan visiem dalībniekiem kopā, gan ar centrālu, gan ar perifēru virsoņi.

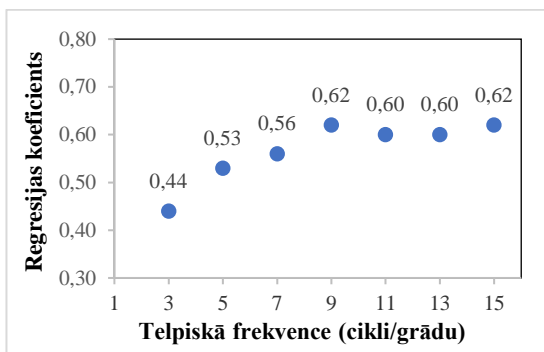
Regresijas modelis

No iepriekš aprakstītajām radzenes pacēluma izmaiņu korelācijām ar redzes asumu un kontrastjutību, bija redzams, ka kontrastjutības korelācijas ar radzenes priekšējās virsmas pacēluma izmaiņām bija lielākas nekā korelācijas ar redzes asumu, tādēļ regresijas modelī tika analizētas tieši kontrastjutības izmaiņas, pacēlumam mainoties par 1 μm. Iepriekšējie dati parādīja, ka vislielākās kontrastjutības korelācijas ar pacēluma izmaiņām bija virzienā (ass) ar rādiusu 1 mm ap radzenes centrālo daļu. Redzes ass veido redzes asumu centrālajā acs ābola vietā (fovejā). Korelācijas koeficienti liek domāt, ka dalībnieki ikdienā izjutīs izmaiņas, kas notiek no centrālās daļas līdz 1 mm lielam laukumam virsoņnes pretējā virzienā. Mainoties radzenes pacēlumam, mainīsies dalībnieku ar neregulāru radzenes formu kontrastjutība.

Darbā tika izveidots regresijas modelis, kurš dot iespēju prognozēt sagaidāmo kontrastjutību, ja bija zināms pacēlums radzenes centrālajā daļā (virzienā caur virsoņi). Regresijas modelis deva iespēju prognozēt kontrastjutību katrā telpiskajā frekvencē:

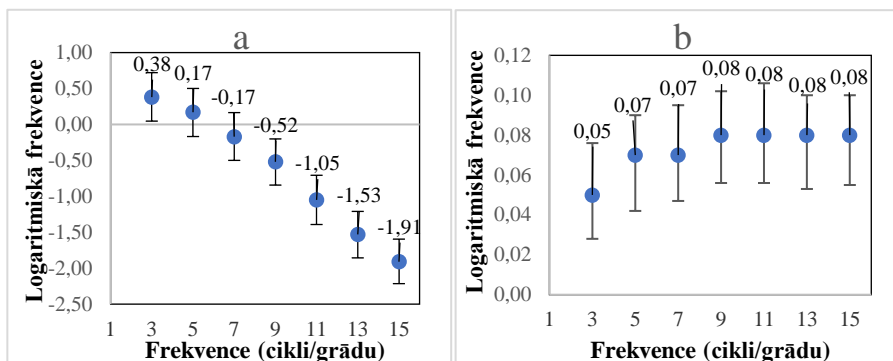
$$\text{Log-kontrastjutība} = \text{Intercept (a)} + \text{regresijas koeficients (b)} * \text{izmaiņas pacēlumā (}\mu\text{m)}$$

Regresijas koeficients (skat. 4. att.) raksturo regresijas modeļa prognozēšanas precizitāti, t. i. cik labi ar pacēluma vērtību varam raksturot kontrastjutību. Augstākās kontrastjutības telpiskajās frekvencēs (9, 11, 13 un 15 cikli/grādu) bija iespējams precīzāk novērtēt kontrastjutību pēc radītajām izmaiņām.



4. att. Regresijas koeficients dažādās kontrastjutības telpiskajās frekvencēs visiem dalībniekiem kopā.

Regresijas koeficients b raksturo to, par cik izmainās kontrastjutība katrā no telpiskajām frekvencēm, ja pacēlums palielinās par 1 vienību (μm). Redzams, ka pacēlumam izmainoties par vienu vienību, kontrastjutība vairāk tiek ietekmēta augstajās kontrastjutības telpiskajās frekvencēs, proti, kontrastjutība pasliktinās (skat. 5.b att.). *Intercept* (a) koeficientu var interpretēt kā atskaites punktu (pie pacēlums=0), no kura rēķina prognozēto kontrastjutību atbilstoši novērotajam pacēlumam (skat. 5.a att.). Redzam, ka palielinoties telpiskajai frekvencei, *intercept* ir tieksme samazināties, savukārt b koeficientam – palielināties. Tā kā pacēluma vērtības bija negatīvas un mazāks koeficients (lielāks pēc absolūtās vērtības) nozīmē lielāku slīpumu, tad regresijas rezultāti norāda – augstākās frekvencēs ir jau zemāka kontrastjutība arī pie zema radzenes slīpuma, turklāt radzenes slīpumam palielinoties, kontrastjutība pasliktinās vēl straujāk nekā zemākās frekvencēs.



5. att. A attēlā ir visu dalībnieku vidējās kontrastjutības vērtība katrā kontrastjutības frekvencē (*intercept*), bet b attēlā ir attēlotas vidējās dalībnieku kontrastjutības izmaiņas, pacēlumam mainoties par 1 μm . Novērtējums \pm kļūdas robeža (ticamības intervāls).

3.2. Neregulāras radzenes formas radītā kontrastjutība

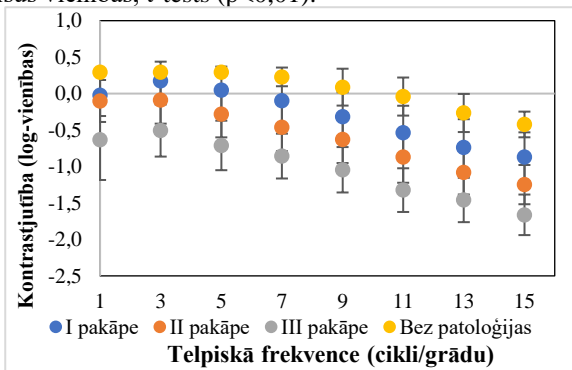
3.2.1. Metode

Pētījuma dalībniekiem tika noteikts redzes asums un kontrastjutība ar labāko iespējamo subjektīvo refrakciju un bez korekcijas 3 m attālumā, izmantojot FrACT 3.9.3. programmu, mērījumu veicot vienu reizi. Tika izmantots režģu kontrastjutības tests, novērtējot kontrastjutību sekojošās telpiskajās frekvencēs – 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 un 15 cikli/grādu. Katrai telpiskajai frekvencei tika noteikta kontrastjutība, izmantojot 10 secīgus mērījumus četros dažādos virzienos, balstoties uz psihometrisko sliekšņa noteikšanas pielīdzināšanas metodi. Redzes asums tikai noteikts ar FrACT programmu, izmantojot C optotipu, mērījumam sākoties ar viena liela optotipa atpazīšanu, katram nākamajam optotipam proporcionāli attiecīgi vai nu palielinoties, vai samazinoties, balsoties uz dalībnieka sniegto atbildi. Subjektīvi koriģētā redze un kontrastjutība tika noteikta, izmantojot probes rāmi un lēcas no probes kastes. Kontrastjutība bez patoloģiskām izmaiņām tika noteikta 5 dalībniekiem (9 acīm) bez redzes sistēmas refraktīvajiem defektiem vai patoloģiskām saslimšanām, veicot trīs secīgus mērījumus dotajos apstākļos. Lai ierobežotu dalībnieka zīlītes apgabalu, izmeklējums tika veikts 10 lx lielā apgaismojumā. Apgaismojums tika noteikts ar *Konica Minolta T-10M* luksometru. Kontrastjutība tika noteikta 3 m attālumā ar 10 reizes. Ekrāna vidējais spožums bija 99 cd/m^2 , sienu spožumu 0,83 cm/m^2 . Spožuma mērījumam tika izmantots *Konica Minolta Chroma meters CS-100A*.

3.2.2. Rezultāti

Darbā tika pieņemts, ka neregulārās radzenes priekšējās virsmas un pacēluma dēļ, dažādas radzenes formas izmaiņu lieluma kā keratokonusa pakāpes un virsotnes atrašanās vietas, acīm ar neregulāras formas radzenēm kontrastjutības samazinājums sāksies dažādās kontrastjutības telpiskajās frekvencēs, salīdzinājumā ar acīm bez patoloģiskām izmaiņām. Proti, acīm ar neregulārāku radzenes formu zemākas kontrastjutības frekvences tiks skartas, un lielākas pakāpes kontrastjutības samazinājums būs novērojams pie zemākām kontrastjutības telpiskajām frekvencēm. 6. attēlā redzama pētījuma dalībnieku kontrastjutība dažādās radzenes neregularitātes lielumā (keratokonusa pakāpēs). Darbā izvirzītais pieņēmums neapstiprinājās, jo, palielinoties keratokonusa pakāpei, pētījuma dalībnieku kontrastjutība pasliktinās vienādi visās kontrastjutības telpiskajās frekvencēs bez atšķirības iesaistītajās telpiskajās frekvencēs. *Mixed effect* modelis parāda, ka korekcijas kopējais efekts ir statistiski nozīmīgs ($p < 0,01$), bet tas ir dažāds katrā no keratokonusa pakāpēm. Starp pirmo un otro pakāpi nav statistiski nozīmīgas atšķirības nekoriģētajai kontrastjutībai ($p = 0,91$), bet tā parādās starp otro un trešo pakāpi ($p = 0,0$). Koriģētajai kontrastjutībai korekcija statistiski nozīmīgi maina kontrastjutību dalībniekiem ar pirmās pakāpes keratokonusu, bet nav statistiski nozīmīga uzlabojuma dalībniekiem ar trešās pakāpes keratokonusu ($p = 0,27$).

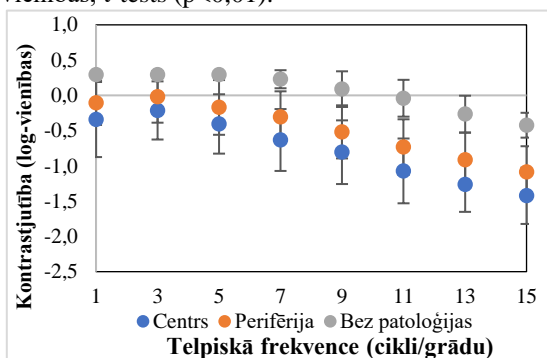
Keratokonusa pirmās pakāpes pētījuma dalībniekiem vidējais redzes asums un standartnovirze ar korekciju bija $0,72 \pm 0,27$ decimālās visus vienības, bez korekcijas redzes asums bija $0,38 \pm 0,36$ decimālās visus vienības, t-tests ($p < 0,01$). Keratokonusa otrās pakāpes pētījuma dalībniekiem vidējais redzes asums un standartnovirze bija $0,55 \pm 0,29$, bez korekcijas $0,37 \pm 0,30$ decimālās visus vienības, t-test ($p < 0,01$). Keratokonusa trešās pakāpes pētījuma dalībniekiem koriģētais redzes asums bija $0,39 \pm 0,23$ decimālās visus vienības, bet bez korekcijas $0,16 \pm 0,11$ decimālās visus vienības, t-tests ($p < 0,01$).



6. att. Koriģētā dalībnieku kontrastjutība dažādās radzenes formas izmaiņu lielumu pakāpēs (keratokonusa pakāpēs) ± standartdeviāciju.

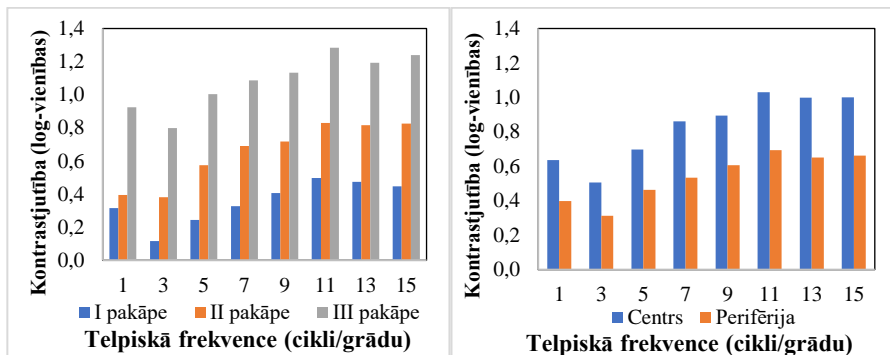
Analizējot dalībnieku radzenes pēc virsotnes atrašanās vietas (skat 7. att.), kontrastjutības izmaiņas ir līdzīgas kā iepriekš analizētās izmaiņas dažādas pakāpes radzenes formas kontrastjutībai. Viszemākā kontrastjutība ir dalībniekiem ar centrālu virsotnes atrašanās vietu, bet visaugstākā ar perifēru virsotnes atrašanās vietu. Pētījuma dalībniekiem visās kontrastjutības telpiskajās frekvencēs kontrastjutības samazinājums no dalībnieku bez patoloģiskām izmaiņām kontrastjutības, palielinās, palielinoties kontrastjutības telpiskajai frekvencei. Dalībnieku virsotnes atrašanās vietai *Mixed effect* modelis parāda, ka korekcija būtiski ietekmē kontrastjutības izmaiņas ($p=0,0$), kā arī atsevišķi virsotnes novietojumam ir statistiski nozīmīga ietekme uz dalībnieku kontrastjutības lielumu ($p=0,01$), kaut arī virsotnes novietojumam nav statistiski nozīmīga ietekme uz korekciju ($p=0,38$).

Pētījuma dalībniekiem ar centrālu radzenes virsmas virsotni vidējais redzes asums un standartnovirze bija $0,47 \pm 0,27$, bez korekcijas $0,26 \pm 0,22$ decimālās visus vienības, t-tests ($p < 0,01$). Pētījuma dalībniekiem ar perifēru virsotni, vidējais redzes asums bija $0,62 \pm 0,26$ decimālās visus vienības, bez korekcijas $0,38 \pm 0,34$ decimālās visus vienības, t-tests ($p < 0,01$).



7. att. Koriģētā dalībnieku kontrastjutība dažādās radzenes pacēluma atrašanās vietās ± standartdeviācija.

Analizējot katras kontrastjutības telpiskās frekvences novirzi no dalībnieku bez patoloģiskām izmaiņām kontrastjutības (skat. 8. att.), redzams, ka dalībniekiem ar dažādu radzenes formas izmaiņu lielumu (keratokonusa pakāpi) un virsotnes atrašanās vietu, vismazākā atšķirība no dalībnieku bez patoloģiskām izmaiņām kontrastjutības, ir 3 telpiskajā frekvencē. Pēc 3 telpiskās frekvences kontrastjutība samazinās, palielinoties kontrastjutības telpiskajai frekvencei gan dalībniekiem ar dažādu virsotnes atrašanās vietu, gan dažādu pakāpi, kas apstiprina iepriekšējos pētījuma rezultātus (skat. 6. un 7. att.).



8. att. Koriģētās kontrastjutības novirze no dalībnieku bez patoloģiskām izmaiņām kontrastjutības katrā telpiskajā frekvencē. Dalībniekiem ar dažādu neregulāras radzenes formas izmaiņu lielumu kā keratokonusa pakāpi un virsotnes atrašanās vietu ± standartdeviācija.

Modeļa rezultāti rāda, ka statistiski nozīmīgi (5% nozīmības līmenis) kontrastjutību ietekmē kontrastjutības frekvence ($p=0,0$), radzenes formas izmaiņu lielums (keratokonusa pakāpe), otrai pakāpei no pirmās $p=0,08$ un trešajai pakāpei no pirmās pakāpes $p=0,0$), bet radzenes virsmas virsotnes novietojums ir nozīmīgs mijiedarbībā ar frekvenci ($p=0,04$). Statistiski nozīmīga mijiedarbība starp kontrastjutības frekvenci un novietojumu nozīmē, ka frekvences ietekme uz kontrastjutību bija atkarīga no novietojuma – palielinoties telpiskajai frekvencei, palielinās kontrastjutības atšķirība starp centrālu un perifēru radzenes virsmas virsotni.

3.3. Neregulāras radzenes formas radītās aberācijas

3.3.1. Metode

Darbā tika aprēķinātas radzenes priekšējās virsmas 3-tās un 4-tās kārtas aberācijas pētījuma dalībniekiem ar dažādām radzenes formas neregularitātes izmaiņām kā keratokonusa pakāpi un virsotnes atrašanās vietu. Darbā tika izmantota kontroles grupa, dalībnieki bez radzenes vai citām patoloģiskām izmaiņām, bez fizioloģiska radzenes astigmātisma, lai varētu salīdzināt dalībnieku aberācijas ar dalībnieku aberācijām bez patoloģiskām izmaiņām. Kontrolgrupa sastāvēja no 7 dalībniekiem (9 acīm). Augstāko kārtu aberācijas darbā tiek iegūtas ar videokeratoskopijas palīdzību 8 mm lielai zīlītei.

Pētījuma dalībniekiem precīzāks būs radzenes viļņu frontes aberometropijas mērījums, nevis kopīgo okulāro aberometropiju mērījums, neregulāras radzenes virsmas dēļ. Radzenes topogrāfija mēra radzenes virsmas formu, kas tiek aprakstīta ar tādiem parametriem kā pacēlums, slīpums un izliekums. Pacēluma dati apraksta radzenes augstumu attiecībā pret kādu atskaites virsmu.

Slīpums apraksta tangenciālo līniju orientāciju pret virsmas punktu. Izliekums apraksta radzenes „izliekumu” un ir apgriezti proporcionāls liekuma rādiusam. Šobrīd par radzenes nozīmīgāko mērījumu tiek uzskatīta radzenes pacēluma karte, kurā tiek atainota dalībnieka radzenes atšķirība no ideāli sfēriskas virsmas. Pacēluma topogrāfijas kartē var redzēt dalībnieka radzenes neregularitātes, jo topogrāfs salīdzina „reālo” radzenes virsmu ar hipotētisko sfēru, kur tiek atsevišķi attēloti reģioni, kas atrodas vai nu „virs” (μm) vai zem (μm) ideālās sfēras.

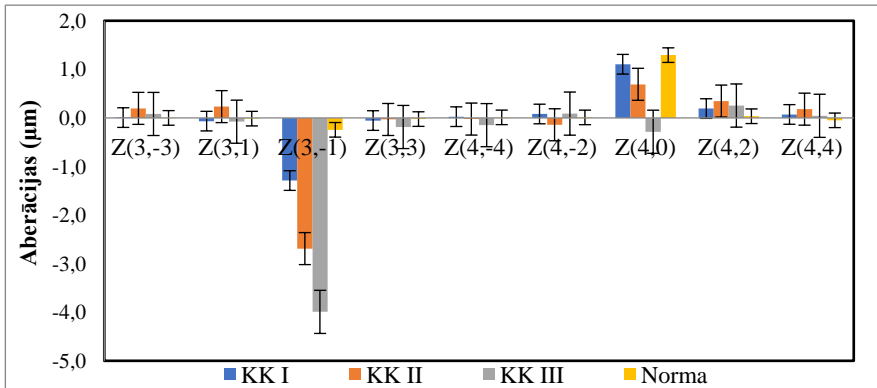
3.3.2. Rezultāti

Vidējās radzenes kopīgās aberācijas (RMS) un standartnovirze visiem dalībniekiem ar neregulāru radzenes formu kopā bija $2,0\pm 0,56$ μm , bet dalībniekiem bez patoloģiskām izmaiņām $1,14\pm 0,52$ μm . Dalībniekiem ar pirmo neregulāras radzenes formas izmaiņu lielumu (keratokonusa pakāpi) vidējās RMS un standartnovirze bija $1,51\pm 0,26$ μm , dalībniekiem ar otro pakāpi $2,09\pm 0,38$ μm , bet dalībniekiem ar trešo pakāpi $2,64\pm 0,45$ μm . Dalībniekiem ar centrālu radzenes virsmas virsotni vidējā RMS un standartnovirze bija $2,27\pm 0,61$ μm , bet ar perifēru virsotni $1,86\pm 0,46$ μm .

Pētījumā iegūtie dati parāda, ka priekšējai radzenes virsmai dominējošās aberācijas, izteiktas Zernika polinomos, bija $Z(3,-1)$ un $Z(4,0)$ aberācijas, proti, vertikālā koma un sfēriskā aberācija. Radzenes priekšējai virsmai visiem dalībniekiem kopā vidējā vertikālā komas aberācija un standartnovirze bija $-2,6\pm 1,3$ μm . Radzenes kopīgā priekšējās virsmas vidējā sfēriskā aberācija un standartnovirze bija $0,6\pm 0,8$ μm .

Vertikālās komas aberācija palielinās, palielinoties radzenes neregularitātes izmaiņu lieluma pakāpei. Dalībniekiem bez radzenes patoloģiskām izmaiņām, priekšējās radzenes virsmas vidējā vertikālā komas aberācija bija $-0,2$ μm , kas palielinās, palielinoties dalībnieku radzenes neregularitātes izmaiņu lieluma pakāpei. Dalībniekiem ar pirmās pakāpes radzenes izmaiņu lielumu vidējā vertikālā koma priekšējai radzenes virsmai un standartnovirze bija $-1,3\pm 0,7$ μm , dalībniekiem ar otrās pakāpes radzenes izmaiņām $-2,7\pm 0,8$ μm un dalībniekiem ar trešās pakāpes radzenes izmaiņām $-4,0\pm 0,9$ μm , proti, dalībniekiem ar pirmās pakāpes radzenes izmaiņām tā palielinās par $1,1$ μm , dalībniekiem ar otrās pakāpes radzenes izmaiņām par $2,5$ μm un dalībniekiem ar trešās pakāpes radzenes izmaiņām par $3,8$ μm salīdzinot ar dalībniekiem bez patoloģiskām izmaiņām (skat. 9. att.). Radzenes priekšējās virsmas vertikālā komas aberācija $Z(3,-1)$, lai gan pirmās un trešās radzenes izmaiņu lieluma pakāpes dalībniekiem aberācija ir atšķirīga, tā nav statistiski nozīmīga ($p=0,31$), veicot *Mann-Whitney U two-tailed* testu ar nozīmības līmeni $0,05$, statistiski nozīmīga atšķirība nav arī salīdzinot $Z(3,-1)$ aberāciju starp otrās un trešās pakāpes dalībniekiem, bet bija starp pirmās un trešās pakāpes dalībniekiem ar *Mann-Whitney U two-tailed* testu, ar nozīmības līmeni $0,05$, attiecīgi $p=0,31$ un $p=0,04$. Dalībnieku bez patoloģiskām izmaiņām sfēriskā aberācija bija

1,3 μm , kas samazinās, palielinoties keratokonusa pakāpei. Vidējā sfēriskā aberācija un standartnovirze pirmās pakāpes radzenes izmaiņu lielumam bija $1,1 \pm 0,3 \mu\text{m}$, tā bija samazinājusies par $0,2 \mu\text{m}$, salīdzinot ar dalībniekiem bez patoloģiskām izmaiņām. Dalībniekiem ar otrās pakāpes radzenes izmaiņu lielumu $0,7 \pm 0,6 \mu\text{m}$, sfēriskā aberācijas samazinājusies par $0,6 \mu\text{m}$. Dalībniekiem ar trešās pakāpes radzenes izmaiņu lielumu sfēriskā aberācija ir samazinājusies par $1,6 \mu\text{m}$ un kļuvusi negatīva, salīdzinot ar dalībnieku bez patoloģiskām izmaiņām priekšējo virsmu - $0,3 \pm 0,9 \mu\text{m}$. Veicot *Mann-Whitney U two-paired* testu, nav statistiski nozīmīga atšķirība, ja tiek salīdzināta radzenes priekšējās virsmas sfēriskā aberācija pirmajai un otrajai pakāpei ($p=0,60$), kā arī salīdzinot otro un trešo pakāpi ($p=0,35$) ar nozīmības līmeni $0,05$. Nav statistiski nozīmīgas atšķirības nevienai no pakāpei, salīdzinot aberācijas ar dalībniekiem sfērisko aberāciju bez patoloģiskām izmaiņām.



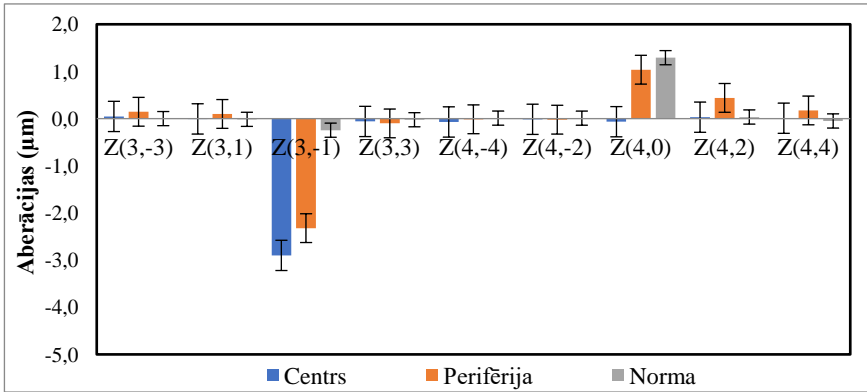
9. att. Vidējās aberācijas atkarībā no radzenes neregularitātes izmaiņu lieluma (keratokonusa pakāpes) \pm standart kļūda.

Radzenes augstākās kārtas aberācijām, salīdzinot datus atkarībā no virsotnes atrašanās vietas, dominējošās bija vertikālā komas aberācija un sfēriskā aberācija (skat. 10. att.). Radzenes priekšējai virsmai vidējā vertikālā komas aberācija un standartnovirze bija $-0,2 \pm 0,2 \mu\text{m}$, dalībniekiem ar virsotni centrā ir vislielākā aberācija, tā bija $-2,9 \pm 1,4 \mu\text{m}$ liela, bet dalībniekiem ar virsotni perifērijā tā bija $-2,3 \pm 1,2 \mu\text{m}$ liela, kas bija par $-2,1 \mu\text{m}$ lielāka par normālu, bet tikai par $0,6 \mu\text{m}$ mazāka salīdzinot ar dalībniekiem, kuriem virsotne ir centrā. Komas aberācija nav statistiski nozīmīgi atšķirīga dalībniekiem ar centrālu un perifēru virsotni no normālas, veicot *Mann-Whitney two paired U* testu radzenes priekšējai virsmai ($p=0,51$) ar nozīmības līmeni $0,05$.

Priekšējās radzenes virsmas vidējā sfēriskā aberācija un standartnovirze pētījuma dalībniekiem bez patoloģiskām izmaiņām bija $1,3 \pm 0,2 \mu\text{m}$, kas dalībniekiem ar centrālu virsotni bija negatīva $-0,1 \pm 0,1 \mu\text{m}$, bet ar perifēru virsotni pozitīva, proti, $1,0 \pm 1,0 \mu\text{m}$. Sfēriskajai aberācijai ir statistiski nozīmīgi atšķirība

radzenes priekšējai virsmai ($p=0,008$), veicot *Mann-Whitney two paired U* testu ar nozīmības līmeni 0,05.

Dalībniekiem ar neregulārām radzenes formas izmaiņām kā keratokonusa pakāpe, koriģētajam redzes asumam vislielākā korelācija bija ar radzenes priekšējās virsmas sfērisko aberāciju ($r=0,59$; $p<0,01$). Dalībniekiem ar otrās pakāpes radzenes izmaiņām nav nozīmīgas korelācijas ar nevienu no aberācijām, tāpat kā trešās pakāpes dalībniekiem. Dalībniekiem ar centrālu virsotni vislielākā korelācija atrodama starp koriģēto redzes asumu un priekšējās radzenes virsmas sfērisko aberāciju ($r=0,45$; $p<0,01$).



10. att. Vidējās aberācijas dalībniekiem ar centrālu un perifēru radzenes virsmas virsotni ± standart kļūda.

DISKUSIJA

Daudzi pētījumi parāda, ka neregulāras formas radzenei visinformatīvākais dienas funkcionālās redzes novērtējums ir nevis redzes asums augsta kontrasta apstākļos, bet tieši kontrastjutības novērtējums (*Zadnik et al.*, 2000; *Abdu & Mohidin*, 2014; *Hess & Carney*, 1978; *Zadnik et al.*, 1984; *Zadnik et al.*, 1987; *Pesudovs et al.*, 2004). Redzes asums zema kontrasta apstākļos ir informatīvāks par pētījuma dalībnieku funkcionālo redzi kā redzes asums augsta kontrasta apstākļos. Dalībniekiem ar labu augsta kontrasta redzes asumu var būt sūdzības par redzes kvalitāti. Labai redzes kvalitātei nav nepieciešama augsta kontrastjutība visās telpiskajās frekvencēs vienādi. Dalībnieki būtiskāk izjutīs funkcionālā redzes asuma samazinājumu, ja būs samazinātas zemās un vidējās telpiskās frekvences, nekā ja būs samazinātas tikai augstās telpiskās frekvences.

Neregulāras formas radzenes dalībnieku kontrastjutība ir maz pētīta, bet iepriekšējie pētījumi ir parādījuši, ka dalībnieku kontrastjutība ir samazināta vidējās un augstās kontrastjutības frekvencēs. Vienīgais pētījums ar, ko ir iespējams salīdzināt iegūtos pētījuma rezultātus, ir *Zadnik* (1987) veiktais pētījums, kurā tika noskaidrots, ka dalībnieku ar neregulāru radzenes formu maksimālā kontrastjutība ir 3 un 4 telpiskajā frekvencē, pēc kuras sākas kontrastjutības samazinājums no dalībnieku kontrastjutības bez patoloģiskām izmaiņām, maksimālo atšķirību sasniedzot augstajās telpiskajām frekvencēm. *Zadnik* pētījuma rezultāti sakrīt ar mūsu pētījuma rezultātiem. Mūsu pētījumā maksimālā kontrastjutība ir 3 cikli/grādu, pēc kuras sākas kontrastjutības samazinājums, palielinoties kontrastjutības telpiskajai frekvencei gan pētījuma dalībniekiem ar dažādām radzenes neregularitāšu izmaiņu lielumu (keratokonusa pakāpēm), gan virsotnes atrašanās vietu. Palielinoties dalībnieku radzenes formas izmaiņu lieluma pakāpei, kontrastjutība samazinās, kā arī dalībniekiem ar centrālu virsotni kontrastjutība bija zemāka kā perifērai virsotnei.

Ir zināms, ka jo lielākas kopējās radzenes aberācijas, jo sliktāks ir labākais koriģētais redzes asums (*Alio et al.*, 2011). Redzes asuma un RMS aberāciju saistība parāda to, ka jo lielākas radzenes kopējās aberācijas, jo sliktāks labākais koriģētais redzes asums, tādēļ aberācijām ir liela nozīme redzes kvalitātē. Ir pierādīts (*Fathy et al.*, 2016), ka neregulāras formas radzenēm dominējošās augstākās kārtas aberācijas ir komas aberācija un sfēriskā aberācija, kas parādījās arī mūsu pētījuma datos. Analizējot vertikālās komas aberāciju, Zernika polinoma $Z(3,-1)$, izmaiņas neregulāras formas radzenēm, pakāpei palielinoties, vertikālajai komas aberācijai ir tendence palielināties, kaut arī tās nav statistiski nozīmīgas izmaiņas. Sfēriskā aberācija samazinās un no pozitīvas kļūst negatīva, palielinoties pakāpei, salīdzinot ar dalībniekiem bez patoloģiskā izmaiņām radzenes priekšējai virsmai. Līdzīgi kā vertikālajai komas aberācijai, tā ir tendence, kura nav statistiski nozīmīga.

Vertikālajai komas aberācijai ir statistiski nozīmīga atšķirība dalībniekiem ar dažādām radzenes virsmas virsotnes atrašanās vietām. Dalībniekiem ar centrālu

virgotni vertikālā komas aberācijai ir par 0,6 μm lielāka nekā dalībniekiem ar perifēru virgotni. Atšķirība ir novērojama sfēriskajai aberācijai atkarībā no virgotnes atrašanās vietas, proti, ar centrālu radzenes virsmas virgotni radzenes priekšējai virsmai ir negatīva sfēriskā aberācija, bet ar virgotni perifērijā tā ir pozitīva. Atšķirība ir statistiski nozīmīga. Radzenes priekšējai virsmai sfēriskā aberācija atšķiras par 1,1 μm .

Lai arī vertikālā komas aberācija ir dominējošā aberācija neregulāras formas radzenēm, labākajam koriģētajam redzes asumam ir lielāka korelācija ar sfērisko aberāciju. Vērtējot korelāciju dalībniekiem ar dažādām radzenes neregularitāšu izmaiņu lielumu (keratokonusa pakāpes), nozīmīga korelācija ar koriģēto redzes asumu ir tikai dalībniekiem ar pirmās pakāpes radzenes izmaiņām ar sfērisko aberāciju ($r=0,59$), bet augstākām pakāpēm nozīmīga korelācija neparādās. Dalībniekiem ar centrālu virgotni, redzes asumam ir nozīmīga korelācija ar sfērisko aberāciju ($r=0,45$), kas skaidrojams ar šo dalībnieku radzenes ģeometrisko formu.

Analizējot mūsu pētījuma datus, redzes kvalitātes raksturojošo parametru (redzes asuma un kontrastjutības) korelācijas koeficientus ar radzenes formas raksturojošajiem parametriem un virgotnes radīto slīpumu, redzams, ka kontrastjutībai ir lielākas korelācijas kā redzes asumam. Pētījums parāda, ka kontrastjutība labāk atspoguļo redzes kvalitāti, tādēļ izmaiņas kontrastjutībā dalībnieki izjutīs vairāk ikdienas uzdevumos kā izmaiņas redzes asumā.

Pētījums parādīja, ka radzenes virsmas raksturojošie parametri kā maksimālais, minimālais radzenes punkts un starpība starp tiem, kas apraksta radzenes ģeometrisko formu (virgotnes augstumu, radzenes sfēriskumu), nav redzes kvalitātes noteicošie parametri. Radzenes pacēluma izmaiņām radzenes centrālajā daļā (1 mm rādiusā) virzienā (ass) (CB) ir lielāki korelācijas koeficienti, tādēļ radzenes pacēlums, proti, virgotnes radītais slīpums radzenes centrālajā daļā, nosaka dalībnieku ar neregulāru radzenes formu kontrastjutību.

Dalībniekiem ar centrālu virgotni, virgotnes radītais augstākais radzenes punkts atrodas tuvāk radzenes centrālajai daļai, tādēļ slīpums, kas rodas centrā ir lielāks nekā dalībniekiem ar perifēru radzenes virsmas virgotni. Dalībniekiem ar perifēru virgotni, kuriem virgotnes radītais augstākais radzenes punkts atrodas tālāk no radzenes centrālās daļas, slīpums radzenes centrālajā daļā ir mazāks. Tas izskaidro to, kādēļ pacēluma korelācijas koeficienti ar kontrastjutību bija lielāki dalībniekiem ar perifēru virgotni.

Pētījums parādīja, ka visnozīmīgākais reģions, kurš nosaka redzes kvalitāti, ir reģions virs radzenes centra ar 1 mm lielu rādiusu virgotnei pretējā virzienā. Lai varētu prognozēt dalībnieku ar neregulāru radzenes formu kontrastjutību, mainot radzenes centrālās daļas virzienā (ass) (CB) daļas pacēlumu, ko rada radzenes virgotne, tika izveidots regresijas modelis. Izveidotais regresijas modelis ļauj aprēķināt to, kā mainīsies dalībnieku kontrastjutība ar neregulāru radzenes formu attiecīgajā telpiskajā frekvencē, ja radzenes pacēlums samazināsies par 1 μm , kas bija pētījuma mērķis. Regresijas modelis precīzāks ir augstākās telpiskajās

frekvencēs kā arī dalībniekiem ar centrālu virsotni. Augstākās kontrastjutības telpiskajās frekvencēs kontrastjutībai ir novērojama tendence, ka dalībniekiem ar centrālu virsotni kontrastjutība samazinās vairāk nekā dalībniekiem ar perifēru virsotni, jo sevišķi izteikti tas ir augstākām telpiskajām frekvencēm.

NOBEIGUMS

Promocijas darba mērķis bija, izpētot radzenes ārējas virsmas neregularitātes ietekmi uz redzes asumu un kontrastjutību, panākt uzlaboto neregulāras formas radzenes diagnostiku. Metodes mērķis ir spēt prognozēt kā mainot acs radzenes priekšējās virsmas ģeometrisko formu, uzlabosies redzes asums un kontrastjutība. Lai to panāktu, tika analizēti redzes kvalitātes raksturojošo parametru (redzes asums un kontrastjutība) korelācijas koeficienti ar radzenes ģeometrisko formu.

Radzenes virsmas raksturojošo parametru analīzes rezultātā tika noskaidrots, ka redzes kvalitātes uzlabojumu dalībniekiem ar neregulāras formas radzenēm visbūtiskāk dos izmaiņas radzenes centrālajā apgabalā, nevis mainot augstāko un/vai zemāko radzenes punktu, kuri parasti atrodas ārpus centrālā apgabala. Kā rezultātā pētījumā tika izveidots regresijas modelis, kurš ļauj aprēķināt, kā mainīsies kontrastjutība katrā telpiskajā frekvencē, ja radzenes slīpums radzenes centrālajā apgabalā tiks samazināts. Regresijas modeļa korelācijas koeficientu analīze parādīja, ka visbūtiskākais redzes kvalitātes raksturojošais parametrs ir kontrastjutība.

Analizējot dalībnieku ar neregulāras formas radzenēm kontrastjutību dažādām radzenes neregularitāšu izmaiņu lieluma kā keratokonusa pakāpēm un dažādas virsotnes atrašanās vietas radītajām izmaiņām, tika noteikts, ka būtiskāka ietekme uz redzes asumu un kontrastjutību ir lielumam, kādā atrodas radzenes neregularitāte (keratokonusa pakāpe), nevis virsotnes atrašanās vieta. Virsotnes atrašanās vietas ietekme visās kontrastjutības telpiskajās frekvencēs nav vienāda – palielinoties telpiskajai frekvencei, palielinās virsotnes atrašanās vietas ietekme.

Pētījumā tika noteikts, ka dominējošās augstākās kārtas aberācijas dalībniekiem ar neregulāras formas radzenēm ir vertikālās komas aberācija un sfēriskā aberācija. Vertikālā komas aberācija ir vislielākā neregulāras formas radzenēm, bet redzes kvalitāti vairāk maina sfēriskā aberācija.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

Abdu, M., Mohidin, N., Mohd-Ali, B. (2014). Visual performance and aberration associated with contact lens wear in patients with keratoconus: a pilot study. *Clinical Optometry*, 6, 47-57

Alio, J. L., Pineró, D. P., Aleson, A., Teus, M. A., Barraquer, R. I., Murta, J., Maldonado, M. J., de Luna, G. C., Gutierrez, R., Villa, C., Uceda-Montanes, A. (2011). Keratoconus-integrated characterization considering anterior corneal aberrations, internal astigmatism, and corneal biomechanics. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 37(3), 552-568

Applegate, R. A., Marsack, J. D., Thibos, L. N. (2006). Metrics of Retinal Image Quality Predict Visual Performance in Eyes With 20/17 or Better Visual Acuity. *Optometry and Vision Science*, 83(9), 635-40

Boa, F. J., Geraghty, B., Wang, Q., Elsheikh, A. (2016). Consideration of corneal biomechanics in the diagnosis and management of keratoconus: is it important? *Eye and Vision*, 3(18), 1-6

Duncan, J. K., Belin, M. W., Borgstrom, M. (2016). Assessing progression of keratoconus: novel tomographic determinants. *Eye and vision*, 3:6

Espandar, L., Meyer, J. (2010). Keratoconus: Overview and Update on Treatment. *Middle East Afr J Ophthalmol*. 17(1): 15-20

Fathy, M., el Agooz, M. H, Samman, A. H, Mostafa, E. M (2016). Anterior Segment Characteristics of Keratoconus Eyes Using Scheimpflug-Placido Topography. *Journal of Clinical Research and Ophthalmology*, 3, 003-007

Hess, R. F., Carney, L. G. (1978). Vision through an abnormal cornea: a pilot study of the relationship between visual loss from corneal distortion, corneal edema, keratoconus, and some allied corneal pathology. *The Association for Research in Vision and Ophthalmology*, 18(5), 476-483

Maeda, N., Sato, S., Watanabe, H., Inoue, Y., Fujikado, T., Shimomura, Y., Tano, Y. (2000). Prediction of letter contrast sensitivity using videokeratographic indices. *American Journal of Ophthalmology*, 129(6), 759-763

Owsley, C. (2003). Contrast sensitivity. *Ophthalmology Clinics of North America*, 16(2), 171-177

Paranhos, J. F. S., Paranhos, A. Jr., Avila, M. P., Schor, P. (2011). Analysis of the correlations between ophthalmic examination and quality of life outcomes following intracorneal ring segment implantation for keratoconus. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, 74(6), 410-413

Pesudovs, K., Schoneveld, P., Seto, R. J., Coster, D. J. (2004). Contrast and glare testing in keratoconus and after penetrating keratoconus. *British Journal of Ophthalmology*, 88(5), 653-657

Rabinowitz, Y.S. (1998). Keratoconus. *Survey of Ophthalmology*, 42(4), 297-319

Romero-Jimenez, M., Santodomingo-Rubido, J., Wolffsohn, J. S. (2010). Keratoconus: A review. *Contact Lens and Anterior Eye*, 33(4), 157-166

Rosa, N., Bernardo, M. D., Lanza, M., Borrelli, M., Fusco, F., Flagiello, A. (2008). Corneal Aberrations Before and After Photorefractive Keratectomy. *Journal of Optometry*, 1(2), 53-58

Shetty, R., D'Souza, S., Srivastava, S., Ashwini, R. (2013). Topography-guided custom ablation treatment for treatment of keratoconus. *Indian Journal of Ophthalmology*, 61(8), 445-50

Smolek, M. K., Klyce, S. D. (2003). Zernike Polynomial Fitting Fails to Represent All Visually Significant Corneal Aberrations. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 44(11), 4676-4681

Zadnik, K., Barr, J. T., Edrington, T. B., Nichols, J. J., Wilson, B. S., Siegmund, K., Gordon, M. O. (2000). Corneal Scarring and Vision in Keratoconus. A Baseline Report from the Collaborative Longitudinal Evaluation of Keratoconus (CLEK) Study. *Cornea*, 19(6), 804-812

Zadnik, K., Mannis, M. J., Johnson, C. A. (1984). An Analysis of Contrast Sensitivity in Identical Twins with Keratoconus. *Cornea*, 3(2), 99-103

Zadnik, K., Mannis, M. J., Johnson, C. A., Rich, D. (1987). Rapid Contrast Sensitivity Assessment in Keratoconus. *American Journal of Optometry*, 64(9), 693-697