

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ: ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΑΝΑΤΟΜΙΚΕΣ, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΙ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΟΥΣ

Όνοματεπώνυμο Φοιτήτριας: Μαρία Ιωάννα Ξυδάκη

Αριθμός Μητρώου: bisc20678233

Όνοματεπώνυμο Επιβλέποντα: Κωνσταντίνος Καραμπάτσας,

Επίκουρος καθηγητής Οφθαλμολογίας

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF HEALTH AND CARE SCIENCES
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL SCIENCES
DIVISION: OPTICS AND OPTOMETRY

DISSERTATION: A REVIEW OF THE LAST- FIVE-YEARS ANATOMIC, IMAGING AND FUCTIONAL
METHODS OF CORNEAL EXAMINATION

STUDENT NAME: MARIA IOANNA XYDAKI

CN: bisc20678233

NAME OF SUPERVISOR: KONSTANTINOS KARAMPATSAS,
ASSISTANT PROFESSOR OF OPHTHALMOLOGY

Athens, October 2024

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΑΝΑΤΟΜΙΚΕΣ, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΟΥΣ

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΕΙΣΗΓΗΤΗ

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς στις 04/10/2024 από την κάτωθι
Εξεταστική Επιτροπή:

A/A	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Κωνσταντίνος Καραμπάτσας	Επίκουρος Καθηγητής Οφθαλμολογίας, Τμήμα Βιοϊατρικών Επιστημών, Τομέας Οπτικής & Οπτομετρίας, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής	
2	Γιαελής Θεμιστοκλής	Μόνιμο μέλος Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού, Τμήμα Βιοϊατρικών Επιστημών, Τομέας Οπτικής & Οπτομετρίας, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής	
3	Κωνσταντακοπούλου Ευγενία	Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Βιοϊατρικών Επιστημών, Τομέας Οπτικής & Οπτομετρίας, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μαρία Ιωάννα Ξυδάκη του Πέτρου, με αριθμό μητρώου bisc20678233 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Επιστημών Υγείας και Πρόνοιας, του Τμήματος Βιοϊατρικών Επιστημών, του Τομέα Οπτικής και Οπτομετρίας, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα



ΜΑΡΙΑ ΙΩΑΝΝΑ ΞΥΔΑΚΗ

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στις σύγχρονες μεθόδους ελέγχου του κερατοειδούς χιτώνα κατά την τελευταία πενταετία. Ο έλεγχος του κερατοειδούς διεξάγεται σε ανατομικό, απεικονιστικό και λειτουργικό επίπεδο. Για την κατανόηση των παθολογιών, αρχικά, αναλύονται βασικά στοιχεία ανατομίας και φυσιολογίας του κερατοειδούς. Έπειτα, παρουσιάζονται η Σχισμοειδής Λυχνία και το Συνεστιακό Μικροσκόπιο, συσκευές οι οποίες ανιχνεύουν ανατομικές μεταβολές του κερατοειδούς. Αναλύονται οι διαθέσιμες τεχνικές της Σχισμοειδούς Λυχνίας και τα πιθανά ευρήματα της Συνεστιακής Μικροσκοπίας σε παθήσεις που επηρεάζουν τις οφθαλμικές νευρικές ίνες. Ακολουθεί η περιγραφή των απεικονιστικών συσκευών του κερατοειδούς Placido, Pentacam, Galilei, Orbscan II, Sirius+, LED Cassini και της Οπτικής Τομογραφίας Συνοχής (OCT) του κερατοειδούς. Με αυτά τα μέσα μελετάται η μορφολογία του κερατοειδούς, η ανωμαλία της οποίας συνδέεται με πλήθος οφθαλμικών παθήσεων. Οι τοπογράφοι και οι τομογράφοι ταξινομούνται ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν: Placido, Scheimpflug, σάρωση σχισμής, έγχρωμοι φωτοδίοδοι -LED και συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά και οι ενδείξεις τους. Τα αποτελέσματα της τοπογραφίας κερατοειδούς εξάγονται σε χάρτες: αξονικούς, παχυμετρικούς, πρόσθιας και οπίσθιας ανύψωσης κ.ά., ανάλογα με την τεχνολογία και το αντικείμενο μελέτης. Για κάθε τοπογράφο, τα αποτελέσματα ερμηνεύονται βάση ενσωματωμένων δεικτών για την αξιολόγηση της μορφολογίας του κερατοειδή. Ορισμένοι παράμετροι αξιοποιούνται για τον εκτίμηση της πιθανότητας ύπαρξης κερατοειδικών εκτασιών και τον προσδιορισμό του σταδίου του κερατόκωνου. Τέλος, εκτίθενται οι λειτουργικές μέθοδοι εξέτασης του κερατοειδούς, δηλαδή η ενδοθηλιομέτρηση για τον έλεγχο του ενδοθηλίου και τα τονόμετρα Ocular Response Analyzer, Corvis ST για την κατανόηση των εμβιομηχανικών ιδιοτήτων του κερατοειδούς. Επιπρόσθετες πληροφορίες παρατίθενται στο τέλος της εργασίας, για τον κερατόκωνο και τους τρόπους διάγνωσής του με τις προαναφερθείσες συσκευές.

Λέξεις- κλειδιά: κερατοειδής, τοπογραφία, παχυμετρία, σχισμοειδής λυχνία, συνεστιακή μικροσκοπία, κερατόκωνος, οπτική τομογραφία συνοχής, ενδοθηλιομέτρηση, εμβιομηχανική κερατοειδούς, τονομετρία

Abstract

The dissertation focuses on the modern methods for the assessment of the cornea according to the references published over the last five years. The cornea assessment is performed on an anatomical, imaging and functional basis. Firstly, basic elements of anatomy and physiology of the cornea are analyzed to understand the corneal pathology. Then, the Slit Lamp and the Confocal Microscope are presented. These devices are able to detect anatomical changes in the cornea. All the Slit Lamp techniques are analyzed and the possible findings of Confocal Microscopy in diseases affecting the optic nerve fibers are presented. The corneal imaging devices Placido, Pentacam, Galilei, Orbscan II, Sirius+, LED Cassini and Optical Coherence Tomography (OCT) are described below. With these means, the morphology of the cornea is studied, the abnormality of which testifies to a multitude of eye diseases. The topographers and tomographers are classified according to the technology they use: Placido, Scheimpflug, slit scanning, color photodiodes -LED and their characteristics and indications are compared. The corneal topography produces a series of maps that display colors and numbers: axial, pachymetric, anterior and posterior elevation map, etc. depending on the technology used and the object of study. For each topographer, the results are interpreted based on built-in markers to examine the corneal morphology. Certain parameters are used to assume the probability of corneal ectasia and determine the stage of keratoconus. Finally, the functional methods of examining the cornea are presented, i.e. endotheliometry to examine the endothelium, and the Ocular Response Analyzer, Corvis ST tonometers to understand the biomechanical properties of the cornea. At the end of the dissertation, additional information is listed concerning keratoconus and its diagnostic methods with reference to the aforementioned devices.

Key words: cornea, topography, pachymetry, slit lamp, confocal microscopy, keratoconus, optical coherence tomography, endotheliometry, corneal biomechanics, tonometry

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	12
Abstract	13
Πίνακας περιεχομένων εικόνων	15
Πίνακας Συντομογραφιών (με αλφαβητική σειρά).....	16
Κεφάλαιο 1 ^ο	1
1.1.I. Ιστολογική δομή κερατοειδούς χιτώνα	1
1.1.II. Παράγοντες διαφάνειας κερατοειδούς	4
1.2. Νεύρωση κερατοειδή	5
Κεφάλαιο 2ο.....	6
Κεφάλαιο 2.1.1. Εξέταση στη Σχισμοειδή Λυχνία	6
2.1.2. Συνεστιακή Μικροσκοπία (<i>Corneal confocal microscopy</i>).....	12
2.2. Σύγχρονες απεικονιστικές μέθοδοι ελέγχου κερατοειδούς	19
1. Εισαγωγή στην Τοπογραφία Κερατοειδούς	19
2.2.2. Τοπογραφία <i>Placido</i>	22
2.2.3. Τοπογράφος <i>Orbscan IIz, Bausch and Lomb</i>	24
2.2.4. Τοπογραφία <i>Scheimpflug</i>	25
2.2.4.I. Τοπογράφος <i>Pentacam (Oculus, Wetzlar, Germany)</i>	27
2.2.5. Τοπογράφος <i>CASSINI LED CORNEAL TOPOGRAPHY, i-Optics, Hague, Netherlands</i> ...	37
2.2.6 Ερμηνεία τοπογραφίας κερατοειδούς	42
2.2.7. Οπτική Τομογραφία Συνοχής/ <i>OCT</i> Κερατοειδούς	46
2.3. Σύγχρονες λειτουργικές μέθοδοι ελέγχου κερατοειδή.....	54
I. Ενδοθηλιομέτρηση	54
2.3.II. <i>Reichert's Ocular Response Analyzer (ORA)</i>	58
2.3.III. Τονόμετρο <i>Oculus Corvis- ST/ CST (Corneal Visualization Scheimpflug Technology)</i>	60
Συζήτηση	67
Συμπεράσματα	71
Βιβλιογραφία	72
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	77

Πίνακας περιεχομένων εικόνων

Εικόνα 1. Ιστολογική δομή του κερατοειδούς.....	1
Εικόνα 2. Νεύρωση κερατοειδούς.....	5
Εικόνα 3. Είδη Σχισμοειδούς Λυχνίας.....	6
Εικόνα 4. Ξένο σώμα στον κερατοειδή με την τεχνική της οπτικής τομής.....	9
Εικόνα 5. <i>Guttata</i> με <i>specular reflection</i>	10
Εικόνα 6. <i>Sclerotic scatter</i>	11
Εικόνα 7. Τεχνική <i>Retroillumination</i> για εξέταση νεοαγγειώσεων.....	11
Εικόνα 8. Εφαπτομενικός φωτισμός.....	12
Εικόνα 9. Αρχή λειτουργίας Συνεστιακού Μικροσκοπίο	13
Εικόνα 10. Εξέταση στο συνεστιακό μικροσκόπιο.....	14
Εικόνα 11. Προοδευτική απώλεια νευρικών σε διαβητική περιφερική νευροπάθεια.	16
Εικόνα 12.α. Υγιής κερατοειδής b.μείωση νευρικών ινών και αύξηση δενδριτικών κυττάρων στην νόσο <i>Fabry</i>	16
Εικόνα 13. Κύτταρα του <i>Langerhans</i> ως δενδριτικές βλάβες στο συνεστιακό μικροσκόπιο.	19
Εικόνα 14. Αριστερά: Τοπογράφος <i>Placido</i> μεγάλου κώνου, δεξιά: Τοπογράφος <i>Placido</i> μικρού κώνου.	22
Εικόνα 15. Τοπογράφος <i>Orbscan IIz</i>	24
Εικόνα 16. Τοπογράφος <i>Pentacam</i> (2002).....	27
Εικόνα 17. Οι τέσσερις διαθλαστικοί χάρτες στον τοπογράφο <i>Pentacam</i>	27
Εικόνα 18. <i>Belin Ambrosio map</i>	29
Εικόνα 19. <i>EKR map</i>	30
Εικόνα 20. <i>Densitometry map</i> πριν από διαθλαστική επέμβαση	32
Εικόνα 21. Τοπογράφος <i>Galilei</i>	33
Εικόνα 22. Τοπογραφικοί χάρτες με το σύστημα <i>Galilei</i>	33
Εικόνα 23. Πολύωνυμα <i>Zernike</i>	35
Εικόνα 24. Τοπογράφος <i>Sirius+</i>	35
Εικόνα 25. Τοπογράφος <i>Cassini</i>	39
Εικόνα 26. Τοπογραφικοί χάρτες από το σύστημα <i>Cassini</i> . Με τις μη διακριτές περιοχές σημείων δηλώνεται η ασυμμετρία του κερατοειδή.	40
Εικόνα 27. Μοτίβα κερατοειδικών ανωμαλιών.....	42
Εικόνα 28. Μορφές κερατοειδικών εκτασιών στο <i>OCT</i>	49
Εικόνα 29. Ενδοστρωματικοί δακτύλιοι (<i>ICRS</i>) στο <i>OCT</i>	49
Εικόνα 30. Γραμμή οριοθέτησης μετά από Διασύνδεση <i>Κολλαγόνου</i>	50
Εικόνα 31. Χάρτης παχυμετρίας και επιθηλίου <i>OCT</i>	50
Εικόνα 32. Στιβάδες του κερατοειδή στο <i>OCT</i>	51
33. Μέτρηση πάχους στιβάδων με <i>OCT</i>	52
Εικόνα 34. <i>OCT</i> προσθίου θαλάμου σε κερατόκωνο.	53
Εικόνα 35. Ενδοθηλιακή δυστροφία του <i>Fuchs</i>	56
Εικόνα 36. <i>Ocular Response Analyzer</i>	58
Εικόνα 37. Διάγραμμα αποτελεσμάτων <i>ORA</i>	59
Εικόνα 38. Τονόμετρο <i>Oculus Corvis ST</i>	61
Εικόνα 39. Η θέση του εξαγόμενου περιγράμματος του κερατοειδή με το τονόμετρο <i>Corvis</i> πριν και μετά την Διασύνδεση <i>Κολλαγόνου</i>	64
Εικόνα 40. Κλινικά σημεία κερατόκωνου	78

Πίνακας Συντομογραφιών (με αλφαβητική σειρά)

AA	Analyzed Area
AAI	Posterior Asphericity Asymmetry Index
ACD	Anterior Chamber Depth
ACP	Average Central Dioptric Power
A/D	Analog to Digital
AK	Angle Kappa
AL	Length of Applanation
ARTh	Ambrosio Relational Thickness
ASM	Spectralis Anterior Segment Module
AT	Applanation Time
AV	Velocity of Applanation
AVG	Average
BAD	Belin Ambrosio Enhanced Ectasia Display
BCV	Baiocchi-Calossi-Versaci Index
BFS	Best Fitting Sphere
BIOP	biomechanical Corrected Intraocular Pressure
CBI	Corneal Biomechanics Index
CD	(Endothelial) Cell Density
CH	Corneal Hysteresis
CKI	Central Keratoconus Index
CLMI	Cone Location and Magnitude Index
CSI	Center/ Surround Index
CTSP	Corneal Thickness Spatial Profile
CV	Coefficient of Variation
DAM	Maximum Deformation Amplitude
DCR	Dynamic Corneal Response
DMEK	Descemet Membrane Endothelial Keratoplasty
DSAEK	Descemet Stripping Endothelial Keratoplasty
DSI	Differential Sector Index
DSP	Diabetes Distal Peripheral Neuropathy

EBMD	Epithelial Basement Membrane Dystrophy
EKR	The Equivalent K Reading Map
FD	Fabry Disease
HEX-6A	Variability in Hexagonal Shape
HOA	High Order Aberrations
HRT	Heidelberg Retina Tomograph
HSV keratitis	Herpes Simplex Virus
HVID	Horizontal Visible Iris Diameter
IAI	Irregular Astigmatism Index
ICRS	Intracorneal Ring Segments
IHA	INDEX OF HEIGHT ASYMMETRY
IIR	INTEGRATED INVERSE RADIUS
IOPcc	Corneal Compensated Intraocular Pressure
IOPg	Goldman Collerated Intraocular Pressure
I-S	Inferior-Superior
ISV	Index of Surface Variance
IVA	Index of Vertical Asymmetry
IWL	Inferior Whorl Length
KC	Keratoconus
KISA%	Keratoconus Percentage Index
KVf/ KVb	Keratoconus Vertex (front and back)
NBD	Nerve Branch Density
NFD	Nerve Fiber Density
NFL	Nerve Fiber Length
NFT	Nerve Fiber Tortuosity
NUM	Number per mm ²
OCT	Optical Coherence Tomography
PMD	Pellucid Marginal Degeneration
PTI	Percentage Thickness Index
RCM	Rostock Corneal Module
RGP	Rigid Gas Permeable Contact Lenses
SAI	Surface Asymmetry Index
SD	Standard Deviation

SD/FD-OCT	Spectral/ Fourier Domain OCT
SIMK	Simulated Keratometry
SIMKF	Simulated Keratometry Flat
SIMKS	Simulated Keratometry Steep
SRI	Surface Regularity Index
SS-OCT	Swept- Source OCT
TCA	Total Corneal Astigmatism
TCP	Total Corneal Power
TD-OCT	Time Domain OCT
ORA	Ocular Response Analyzer
OSI	Opposite Sector Index

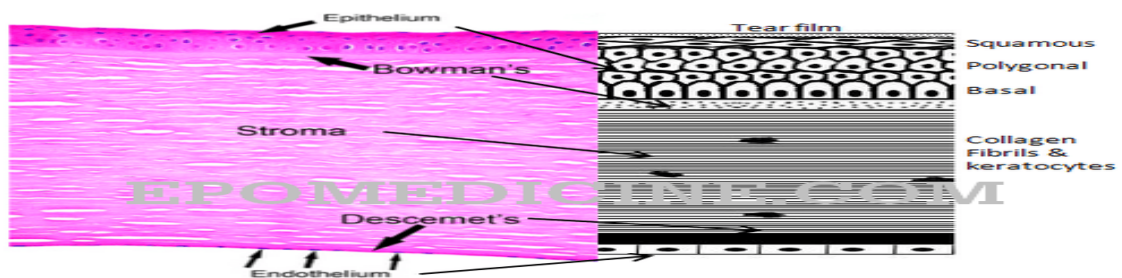
Κεφάλαιο 1°

1.1.1. Ιστολογική δομή κερατοειδούς χιτώνα

Ο κερατοειδής είναι ο ανάγγειος διαφανής χιτώνας που περιβάλλει την πρόσθια επιφάνεια του βολβού. Αποτελεί το πρόσθιο ένα έκτο του ινώδη χιτώνα και η κύρια λειτουργία του είναι η διάθλαση του εισερχόμενου εντός του οφθαλμού φωτός με όσο το δυνατόν μειωμένη διασπορά. Η πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή είναι ελαφρώς ωοειδής με την πρόσθια οριζόντια διάμετρο στα 11-12mm και την πρόσθια κάθετη διάμετρο στα 9-11mm κατά προσέγγιση. Η οπίσθια επιφάνεια του είναι σφαιρική με μέση διάμετρο 11,7mm. Κεντρικά, ο κερατοειδής εμφανίζεται κυρτότερος και λεπτότερος (551-565μ), λόγω της σταδιακής αύξησης της ποσότητας κολλαγόνου προς την περιφέρεια (612-640μ). Η πρόσθια καμπυλότητα του είναι περίπου 7,8mm, ενώ η οπίσθια υπολογίζεται στα 6,5mm. Ο κερατοειδής έχει δείκτη διάθλασης 1,376, παρεμβάλλεται μεταξύ του αέρα (με δείκτη διάθλασης 1,00) και του υδατοειδούς (με δείκτη διάθλασης 1,33) και συμβάλλει στη διαθλαστική δύναμη του οφθαλμού σε ποσοστό περίπου 66%, που αντιστοιχεί σε 40-44D. Ο κερατοειδής απαρτίζεται από τις εξής στιβάδες: το επιθήλιο, το πρόσθιο αφοριστικό πέταλο ή μεμβράνη του Bowman, το (ιδίως) στρώμα, την προδεσκεμέτιο μεμβράνη ή Dua ή Dua-Fine, το οπίσθιο αφοριστικό πέταλο ή Δεσκεμέτιο μεμβράνη και το ενδοθήλιο. (Karlin , et al., 2023)

Εικόνα 1. Ιστολογική δομή του κερατοειδούς.

<https://epomedicine.com/wp-content/uploads/2014/05/cornea-histology.png>



Το επιθήλιο είναι η εξωτερική στιβάδα του κερατοειδούς και βρίσκεται σε άμεση επαφή με το βλεννώδες στρώμα των δακρύων -το οποίο παράγεται από τα καλυκοειδή κύτταρα του επιπεφυκότα- δημιουργώντας ένα φυσικό φραγμό απέναντι στο νερό. Στην περιφέρεια, κυρίως, του κερατοειδικού επιθηλίου απαντώνται τα ανοσοενεργά κύτταρα του Langerhans. Ο κερατοειδής έχει πάχος περίπου 50μ και αποτελείται από πέντε έως επτά στρώματα κυττάρων στο κεντρικό τμήμα και από επτά έως δέκα στο περιφερικό. Τα κύτταρα αυτά έχουν επτά έως δέκα ημέρες ζωής και διαιρούνται σε τριών ειδών στιβάδες: την

επιφανειακή, τη μεσαία και τη βασική. Η επιφανειακή στιβάδα είναι μη κερατινοποιημένη, με δύο σειρές των αποπλατυσμένων πλακωδών κυττάρων, μικρολάχνες και μικροπτυχώσεις που συμβάλλουν στη συγκράτηση της δακρυϊκής στιβάδας. Παρατηρούνται, επίσης, ισχυρές συνδέσεις μεταξύ των δεσμοσωμάτων, γεγονός που καθιστά την επιφανειακή στιβάδα ημιδιαπερατή μεμβράνη. Η μεσαία στιβάδα συγκροτείται από δύο έως τρεις σειρές πολυεδρικών κυττάρων χαλαρά συνδεδεμένων μεταξύ τους και ισχυρά συνδεδεμένων με τη βασική μεμβράνη.

Τέλος, η βασική στιβάδα του επιθηλίου, με τα κυλινδρικά βασικά κύτταρα, έχει άφθονα ενεργά μιτωτικά οργανίδια. Ημιδεσμοσώματα συνδέουν το βασικό τμήμα της κυτταροπλασματικής μεμβράνης με τη βασική μεμβράνη του επιθηλίου και συνδέονται με το στρώμα μέσω καθηλωτικών ινιδίων (anchoring fibrils) που διέρχονται από τη βασική μεμβράνη και τη μεμβράνη του Bowman. Τα καθηλωτικά ινίδια αποτελούνται από κολλαγόνο τύπου IV και μετά από πολλαπλές διακλαδώσεις καταλήγουν στις καθηλωτικές πλάκες. Μέσω των επιθηλιακών κυττάρων διέρχονται αμύελες νευρικές απολήξεις ευαίσθητες κυρίως για τον πόνο.

Η μεμβράνη του Bowman είναι ένας ακυτταρικός υμένας από διαπλεκόμενα κολλαγόνα ινίδια (τύπου I και IV) και πρωτεογλυκάνες, που δεν αναγεννάται, με αποτέλεσμα πιθανός τραυματισμός να οδηγήσει σε ουλοποίηση. Η μεμβράνη αυτή δημιουργεί μία λεία επιφάνεια για το επιθήλιο και τελειώνει απότομα στο σκληροκερατοειδές όριο. Αποτρέπει την σε βάθος διείσδυση των πολυμορφοπύρηνων και την επέκταση κοκκιωματώδους ιστού και επιθηλιακού όγκος, χωρίς όμως να παρεμποδίζει την είσοδο βακτηρίων, τοξινών και χημικών ουσιών.

Το κερατοειδικό στρώμα με πάχος 500μm (80-85% του συνολικού πάχους του κερατοειδή) είναι συμπαγές και περιέχει κερατοκύτταρα που παράγουν μεταλλοπρωτεϊνάσες (MMPs) υπεύθυνες για τη στρωματική ομοιοστάση, εξωκυττάρια θεμέλια ουσία (ECM) και κολλαγόνα τύπου I,III,VI. Τα κολλαγόνα ινίδια οργανώνονται σε 200 με 300 ελάσματα με τις δεσμίδες παράλληλες προς την επιφάνεια του κερατοειδή και ισαπέχουσες μεταξύ τους και εμβυθίζονται σε γλυγοζαμινογλυκάνες. Σε κάθε δεσμίδα, επίσης, τα ινίδια είναι παράλληλα και ισαπέχουν μεταξύ τους. Η δομή του στρώματος, επομένως, διασφαλίζει, αφενός, τη διαφάνεια του κερατοειδούς και αφετέρου την ελαχιστοποίηση της διασποράς του φωτός. (Lemp & Snell, 2008)

Η προδεσκαμέτειος μεμβράνη με πάχος 5-20μm ανακαλύφθηκε το 2005 και δημοσιεύτηκε από την επιστημονική ομάδα έντεκα χρόνια πριν, μετά από πειραματική εν τω βάθην πρόσθια κερατοπλαστική με την τεχνική «big bubble». Σύμφωνα με τα έως τώρα

αποσαφηνισμένα κλινικά στοιχεία, η μεμβράνη Dua βρίσκεται μπροστά από τη Δεσκεμέτριο μεμβράνη, είναι σχεδόν ακυτταρική, αποτελούμενη από κολλαγόνο τύπου I και VI σε μικρότερο ποσοστό και με τη μεγαλύτερη ποσότητα ελαστίνης, συγκριτικά με τον υπόλοιπο κερατοειδή. Είναι αδιαπέραστη από τον αέρα και ιδιαίτερα ανθεκτική σε εφελκυσμό. Οι περιφερικές της σπές διακλαδίζονται στον πυρήνα του δικτυωτού πλέγματος, επιδρώντας στην ενδοφθάλμια πίεση. (Dua, et al., 2023)

Η δεσκεμέτριο μεμβράνη βρίσκεται οπισθίως του στρώματος, θεωρείται η βασική μεμβράνη του ενδοθηλίου και εκκρίνεται από τα ενδοθηλιακά κύτταρα. Είναι ισχυρή και ελαστική με πάχος 10μm που αυξάνεται με την ηλικία. Το οπίσθιο αφοριστικό πέταλο εμφανίζει μεγάλη αναγεννητικότητα μετά από τραυματισμό, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αναδιπλασιασμό της μεμβράνης. Στην περιφέρεια του κερατοειδούς, μπορεί να παρατηρηθούν κυρίως σε μεγαλύτερης ηλικίας άτομα, τα σωματίδια Hassal-Henle, μικρές προεξοχές της δεσκεμέτριο επικαλυμμένες με ενδοθήλιο. (Carlos de Oliveira & Wilson , 2020), (Lemp & Snell, 2008).

Το ενδοθήλιο αποτελείται από μία στιβάδα εξαγωνικών κυττάρων χαλαρά συνδεδεμένα μεταξύ τους με μεσοκυττάρια συγκολλητική ουσία. Τα κύτταρα του ενδοθηλίου περιέχουν πολυάριθμα μιτοχόνδρια, ενδοπλασματικό δίκτυο και συσκευή Golgi, που εξυπηρετούν τη διπλή λειτουργία του ενδοθηλίου ως διαρρέων φραγμός και αντλία υγρών ταυτόχρονα. Οι μικρολάχνες τους ελέγχουν την είσοδο νερού και διαλυμένων θρεπτικών ουσιών από το υδατοειδές υγρό προς το στρώμα, συνεισφέροντας στην επαρκή εφύγρανση, θρέψη και διαύγεια του κερατοειδή. Παράλληλα, με μηχανισμό ενεργητικής μεταφοράς μετακινούνται ιόντα και απομακρύνεται η περίσσεια ύδατος από το στρώμα προς το υδατοειδές. Σημαντικό ρόλο σε αυτήν την αμφίδρομη ροή ενέργειας, διαδραματίζουν η αντλία $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ και η καρβονική ανυδράση με τον σχηματισμό των διττανθρακικών ιόντων, επιτρέποντας την παθητική διάχυση του νερού κατά μήκος της κυτταρικής μεμβράνης. Τέλος, τα ενδοθηλιακά κύτταρα δεν αναγεννούνται και δεν αναπληρώνονται, ενώ μειώνονται με την ηλικία, λ.χ., από 3.000-3.500 κύτταρα/ mm^2 σε νεαρά άτομα σε 1.000 έως 2.000 κύτταρα/ mm^2 σε ηλικιωμένους. Η ελάχιστη επαρκής πυκνότητα για τη διατήρηση της λειτουργίας του ενδοθηλίου είναι περίπου 500 κύτταρα/ mm^2 .

1.1.II. Παράγοντες διαφάνειας κερατοειδούς

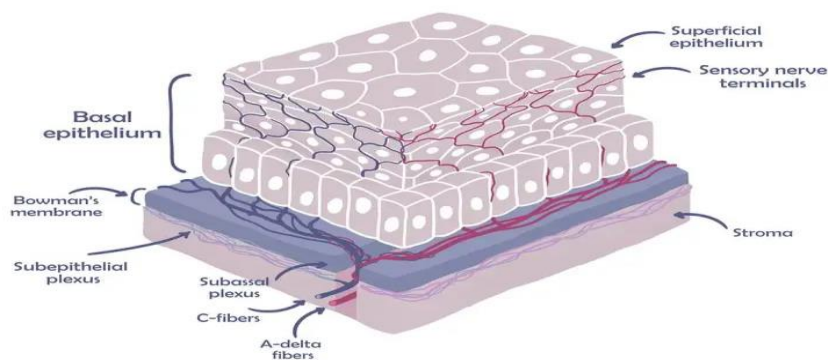
Η διαύγεια του κερατοειδούς είναι απότοκο της ανατομίας του επιθηλίου και συγκεκριμένα της απουσίας αγγείων και χρωστικής, των μη κερατινοποιημένων επιθηλιακών κυττάρων και των στενών συνδέσεων ανάμεσά τους. Η διαφάνεια του κερατοειδούς έχει άμεση συνάφεια με την οργάνωση της δομής των ιών κολλαγόνου εντός των ελασμάτων στο στρώμα. Για να είναι διαυγής και συνεπώς λειτουργικός ο κερατοειδής, οι ίνες κολλαγόνου πρέπει να έχουν όμοια διάμετρο και να είναι ομοιόμορφα διατεταγμένες με περιορισμένη απόσταση μεταξύ τους. Η ενδιάμεση απόσταση πρέπει να είναι σταθερή και μικρότερη από το μήκος κύματος του φωτός. Αυτή η χωρική κατανομή επιτρέπει τη σκέδαση του φωτός μόνο προς τα εμπρός, με κατεύθυνση από τον κερατοειδή προς τον αμφιβληστροειδή. Άλλοι παράγοντες που καθορίζουν τη διαύγεια του κερατοειδούς είναι η πυκνότητα των ιών κολλαγόνου, το πάχος του στρώματος και οι διαφορές στον δείκτη διάθλασης μεταξύ των ιών και της ενδιάμεσης ζώνης. Η απόσταση μεταξύ των κολλαγόνων ιών επιτυγχάνεται χάρη στο αρνητικό φορτίο των πρωτεογλυκάνων που περιβάλλουν τις ίνες κολλαγόνου και αποτρέπουν τη σύντηξη τους. Άλλος ένας εμπλεκόμενος παράγοντας διαφάνειας είναι το ποσοστό ενυδάτωσης του κερατοειδή. Φυσιολογικά, ο κερατοειδής βρίσκεται σε κατάσταση σχετικής αφυδάτωσης με περιεκτικότητα 65% σε νερό, καθώς τα υδρόφιλα βλενοπολυσακχαρίδια γύρω από τις ίνες του κολλαγόνου, συγκρατούν το νερό. Όταν οι πρωτεογλυκάνες προσλάβουν περισσότερο νερό, η απόσταση μεταξύ των ινιδίων αυξάνεται, δημιουργώντας κενά μεταξύ των ελασμάτων. Το οίδημα που δημιουργείται στον κερατοειδή εμποδίζει τη σκέδαση του φωτός και μειώνει τη διαφάνεια του. Η ανατομική δομή του ενδοθηλίου συντελεί στη διαφάνεια του κερατοειδούς, μέσω των μη κερατινοποιημένων στενά συνδεδεμένων ενδοθηλιακών κυττάρων και της αυξημένης διαπερατότητάς τους σε νερό. Επιπλέον, η απουσία αγγείων και εμμέλων νευρικών ιών από τον κερατοειδή συνεπικουρεί για την κερατοειδική διαύγεια. (Lemp & Snell, 2008), (Klyce, 2020)

1.2. Νεύρωση κερατοειδή

Η νεύρωση του κερατοειδούς προέρχεται από τον οφθαλμικό κλάδο του τριδύμου, κυρίως από τα μακρά ακτινοειδή νεύρα. Τα μακρά ακτινοειδή νεύρα εισέρχονται στον σκληρό ελάχιστα πιο πίσω από το σκληροκερατοειδές όριο, διακλαδίζονται και σχηματίζουν το δακτυλιοειδές / περικεράτειο πλέγμα. Οι κλάδοι του δακτυλιοειδούς πλέγματος ακολουθούν ακτινοειδή πορεία, διεισδύουν στο στρώμα και απομυελινώνονται ύστερα από μερικές διακλαδώσεις, σχηματίζοντας το υποεπιθηλιακό πλέγμα. Στη συνέχεια, οι τελικοί κλάδοι εισέρχονται στη μεμβράνη του Bowman και επεκτείνονται διαμορφώνοντας το ενδοθηλιακό πλέγμα. Οι νευρικοί άξονες είναι αμύελοι, στερούνται κυττάρων Schwann και καταλήγουν ως ελεύθερες νευρικές απολήξεις με αισθητηριακή λειτουργία για την αίσθηση της αφής, του ψύχους του άλγους και των χημικών ερεθισμάτων. Η νεύρωση του κερατοειδούς συμπληρώνεται από ορισμένα συμπαθητικά νεύρα με κυτταρικά σώματα από το άνω αυχενικό γάγγλιο. (Akona, et al., 2019)

Εικόνα 2. Νεύρωση κερατοειδούς.

https://cdn5.f-cdn.com/contententries/1910952/50506899/6065f79b6768c_thumb900.jpg



Ο κερατοειδής στερείται αγγείων και λεμφικής αποχέτευσης. Στην περιφέρεια του κερατοειδούς καταλήγουν τριχοειδή αγγεία από τις πρόσθιες ακτινοειδείς αρτηρίες του επιπεφυκότα και του σκληρού. Το κεντρικό τμήμα του κερατοειδούς οξυγονώνεται έμμεσα από τον αέρα, από το διαλυμένο οξυγόνο στα δάκρυ και το περιφερικό μέσω διάχυσης από τα πρόσθια ακτινοειδή αγγεία. (Lemp & Snell, 2008)

Κεφάλαιο 2ο

Κεφάλαιο 2.1.1. Εξέταση στη Σχιμοειδή Λυχνία

Η Σχιμοειδής Λυχνία (Slit Lamp) είναι απαραίτητη στις καθημερινές οφθαλμιατρικές πράξεις. Πρόκειται για ένα στερεοσκοπικό βιομικροσκόπιο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του κερατοειδούς, την οπτικοποίηση αλλά και τη φωτογράφιση των ενδοφθάλμιων δομών με την αξιοποίηση διάφορων μεθόδων φωτισμού (άμεσου και έμμεσου). Η σχιμοειδής λυχνία συνίσταται από το σύστημα παρατήρησης, το σύστημα φωτισμού και το σύστημα μηχανικής υποστήριξης. Υφίστανται δύο τύπων λυχνίες με βάση το σημείο τοποθέτησης του συστήματος φωτισμού τους: στον έναν τύπο λυχνίας (Zeiss) το σύστημα φωτισμού βρίσκεται κάτω από το μικροσκόπιο, ενώ στον άλλον τύπο (Haag-Streit), επάνω από το μικροσκόπιο. (Naeem AH, 2021)

Εικόνα 3. Είδη Σχιμοειδούς Λυχνίας.

<https://image.slidesharecdn.com/slit-lampbiomicroscopy-140720101817-phpapp01/85/Slit-Lamp-Biomicroscopy-7-320.jpg>



Το σύστημα μηχανικής υποστήριξης περιλαμβάνει ρυθμιζόμενο τραπέζι, διακόπτη και ρυθμιστή ηλεκτρικού ρεύματος, κουμπί κλειδώματος και μοχλό εστίασης (joystick). Για την ορθή τοποθέτηση του ασθενούς διατίθενται περιμετώπιο και υποσιάγωνο για το μέτωπο και πηγούνι αντίστοιχα, λαβές υποστήριξης ασθενών, βραχίονας ρύθμισης υποσιαγώνου με δείκτη για τον έξω κανθό.

Η πηγή φωτισμού είναι υψηλής έντασης και προβάλλει ως σχισμή με μεταβαλλόμενες παραμέτρους: ύψος, πλάτος, γωνία.

Ο φωτισμός γίνεται με χρήση λάμπας Tungsten (πυρακτώσεως) ή Halogen (αλογόνου). Περιλαμβάνει φίλτρα: λευκό για γενική παρατήρηση, λευκό χαμηλής έντασης για λιγότερη θερμική δυσφορία στον εξεταζόμενο, μπλε για την εκτίμηση της εφαρμογής φακών επαφής και για χρώση με φλουροσκεΐνη, πράσινο για την ανίχνευση αγγείων, αιμορραγιών αλλά και των δακτυλίων Fleischer στον κερατόκωνο και γκρι για τους φωτοευαίσθητους εξεταζόμενους. Ο φωτισμός διακρίνεται σε άμεσο και έμμεσο. Στον άμεσο φωτισμό, ο άξονας περιστροφής μεταξύ του συστήματος φωτισμού και παρατήρησης είναι κοινός. Με τον άμεσο φωτισμό, αναδεικνύονται μεγάλες ανατομικές δομές και ελέγχονται για παθολογικά ευρήματα. Αντίθετα στον έμμεσο φωτισμό, αναδεικνύονται μικρές ανατομικές δομές και οι παθολογικές τους καταστάσεις. Εδώ, η φωτεινή δέσμη προβάλλεται δίπλα ή πίσω από το σημείο παρατήρησης φωτίζοντας το μέσω αντανάκλασης.

Το σύστημα παρατήρησης συγκροτείται από τα το δίοφθαλμο προσοφθάλμιο (+10 με +14D), που κατοχυρώνει την στερεοσκοπική όραση και το τύμπανο ρύθμισης μεγέθυνσης. Η μεγέθυνση διακρίνεται σε χαμηλή, μεσαία και υψηλή. Η χαμηλή μεγέθυνση από x7, 10 ,16 ενδείκνυται για γενική σάρωση σε βλέφαρα, βλεφαρίδες, επιπεφυκότα, σκληροκερατοειδές όριο και δακρυϊκό πόρο) και παρατήρηση όσο το δυνατόν περισσότερων δομών. Η μεσαία μεγέθυνση από x20 ως x25 για έλεγχο διηθήσεων, ουλών, λοιμώξεων και χρώσης του κερατοειδούς. Η υψηλή μεγέθυνση από x30 ως x40-50 αξιοποιείται για παρατήρηση του ενδοθηλίου, νεοαγγειώσεων, αποπτώσεων, μικροκυστών. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης του διαθλαστικού σφάλματος και της κορικής απόστασης του εξεταστή στο προσοφθάλμιο σύστημα. (Davies , et al., n.d.), (Bharat & Kirandeep , 2023)

2.1.1.1. Τεχνικές Άμεσου Φωτισμού

- **ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ (DIFFUSE ILLUMINATION)**

Η εξέταση του κερατοειδή στη σχισμοειδή λυχνία ξεκινά με την τεχνική της διάχυσης. Αρχικά, χρησιμοποιείται ο διαχυτής του φωτός, ένα πρίσμα που διαχέει τη δέσμη ώστε να οπτικοποιεί μεγαλύτερη επιφάνεια. Το μικροσκόπιο βρίσκεται ακριβώς μπροστά από τον κερατοειδή. Με λευκό φίλτρο χαμηλής έντασης και γωνία 30-45° μεταξύ συστήματος παρατήρησης – φωτισμού, μεγέθυνση x7-10, πλήρες ύψος και πλάτος δέσμης 3-4mm, ξεκινά η σάρωση από κροταφικά προς ρινικά. Γίνεται μία πρώτη εκτίμηση τυχόν κερατοειδικών ουλών ή διηθήσεων, πτυχώσεων στη δεσμεύεται μεμβράνη, νεοαγγειώσεων και οιδήματος στον κερατοειδή. Με μπλε φίλτρο και φλουροσκεΐνη είναι δυνατόν να αξιολογηθούν η θέση και η κινητικότητα των φακών επαφής και χρωματισμένα επιθηλιακά κύτταρα ή αποπτώσεις.

- **ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΠΙΠΕΔΗΣ ΔΕΣΜΗΣ (PARALLELEPIPED SECTION)**

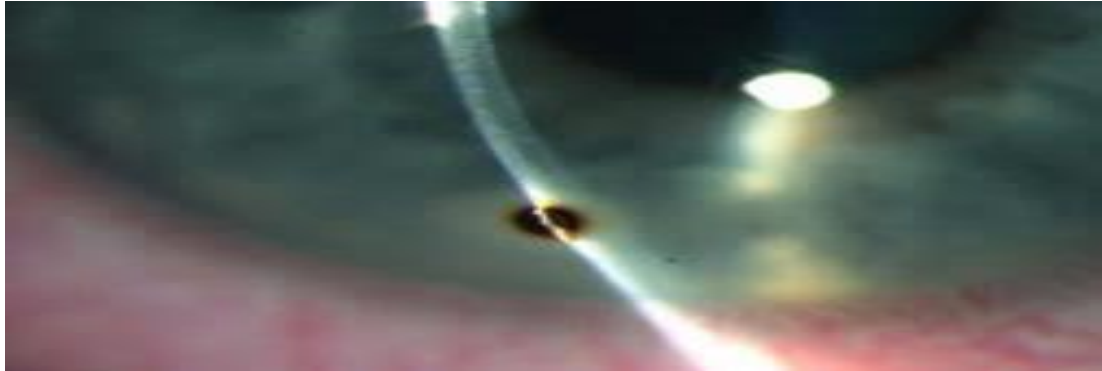
Για την τεχνική της παραλληλεπίπεδης δέσμης, εφαρμόζεται μεγέθυνση x7-10 ή μεγαλύτερη, αν απαιτείται περισσότερη ακρίβεια, πλήρες ύψος δέσμης και πλάτος δέσμης περίπου 2mm, γωνία 45°-60° κροταφικά. Ο εξεταστής ξεκινά την παρατήρηση από το σκληροκερατοειδές όριο κροταφικά προς το σκληροκερατοειδές όριο ρινικά, ελέγχοντας για τυχόν νεοαγγειώσεις, αδιαφάνειες, ουλές, αποπτώσεις, θόλωση κερατοειδούς εντοπίζονται ξένα σώματα, μικροκύστες, ραβδώσεις (striae) που οφείλονται στη μειωμένη οξυγόνωση του κερατοειδή λόγω κακής εφαρμογής φακών επαφής υδρογέλης ή κερατόκωνου, κερατοειδικά νεύρα, ορατά με μεγαλύτερη μεγέθυνση ως λευκά νήματα σε σχήμα Y, πτυχώσεις στη δεσκεμέτιο μεμβράνη και το κερατοειδικό ενδοθήλιο. Οι πτυχώσεις στη δεσκεμέτιο μεμβράνη εμφανίζονται για πρώτη φορά όταν το πάχος του κερατοειδή αυξάνεται κατά 10%. Το οίδημα του κερατοειδούς γίνεται αντιληπτό όταν το πάχος ξεπεράσει τα 700μm.

- **ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ (OPTIC SECTION)**

Η τεχνική της οπτικής διατομής χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της κυρτότητας και του πάχους του κερατοειδούς, τον ακριβή εντοπισμό του βάθους των αδιαφανειών ή ξένων σωμάτων και νεύρων στον κερατοειδή. Το πλάτος της δέσμης ελαχιστοποιείται ($\leq 0,02\text{mm}$), η γωνία τοποθετείται περίπου στις 45° κροταφικά του κέντρου του κερατοειδούς, η μεγέθυνση αρχικά είναι χαμηλή μέχρι την επίτευξη της εστίασης και καταλήγει μέγιστη. Έτσι, με λευκό φως λαμβάνεται η τομή του κερατοειδούς με στόχο την πιο λεπτομερή εξέταση των ιστών του. Ειδικότερα, με εστίαση της λεπτής δέσμης ελαφρώς κροταφικά από το κέντρο του κερατοειδούς, εντοπίζεται η μπροστινή (φυσιολογικά) διαυγής ζώνη, η οποία αντιστοιχεί στην δακρυϊκή επιφάνεια. Έπειτα, έχοντας επιτύχει μία λεπτή δέσμη με τη βοήθεια του μοχλού εστίασης, η σκοτεινή ζώνη είναι το επιθήλιο, η αμέσως επόμενη και πιο φωτεινή είναι η μεμβράνη του Bowman, η γκρι πιο ευρεία περιοχή είναι το στρώμα και τέλος, η φωτεινή εσωτερικότερη ζώνη είναι το ενδοθήλιο. Αυξάνοντας τη γωνία μικροσκοπίου και συστήματος φωτισμού, γίνεται ορατή μεγαλύτερη επιφάνεια του στρώματος.

Εικόνα 4. Ξένο σώμα στον κερατοειδή, με την τεχνική της οπτικής τομής.

https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcR_TyOzIFGFywgNpNEF0ZsTlmpGzvYU2ML7vq&...



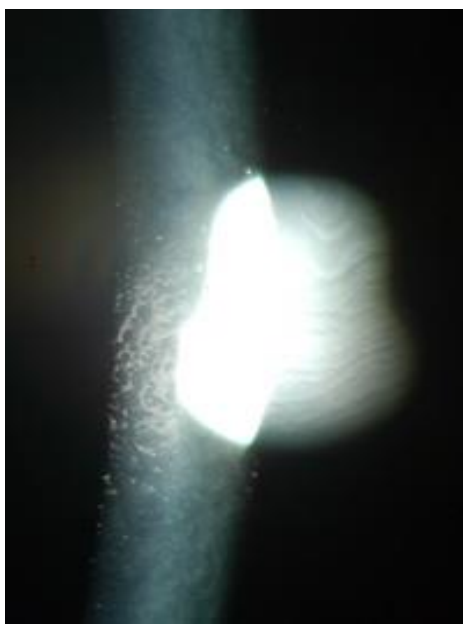
- **ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΚΑΤΟΠΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ (SPECULAR REFLECTION)**

Οι αντανάκλασεις από το δακρυϊκό φιλμ δίνουν πληροφορίες για την πυκνότητα και μορφολογία των ενδοθηλιακών κυττάρων του κερατοειδούς. Η γωνία μεταξύ του συστήματος παρατήρησης και του φωτισμού πρέπει να είναι ακριβώς στη διχοτόμο της γωνίας που διέρχεται από την δομή που παρατηρείται, στις 30° ή 45°, αν η συνολική γωνία είναι 60° ή 90° αντίστοιχα. Το ζητούμενο, δηλαδή, είναι η γωνία πρόσπτωσης να είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης, ώστε να εμφανιστεί η αντανάκλαση της δομής. Αρχικά, το μικροσκόπιο βρίσκεται μπροστά από τον οφθαλμό, το σύστημα φωτισμού σε μία από τις παραπάνω γωνίες και η παρατήρηση γίνεται μονόφθαλμα. Καθώς η παραλληλεπίπεδη δέσμη περνά απέναντι από τον κερατοειδή με τη μεγέθυνση στο μέγιστο, εμφανίζεται η αντανάκλαση του φωτός. Η εστίαση επιστρέφει στα ενδοθηλιακά κύτταρα μέχρι το ένα είδωλο να φαίνεται θαμπό και το άλλο φωτεινό. Σε φυσιολογικούς κερατοειδείς, το ενδοθήλιο είναι μονόστιβο και ομοιάζει με μωσαϊκό αποτελούμενο από εξαγωνικά ισομεγέθη κύτταρα. Αν η επιφάνεια παρουσιάζει ανωμαλίες και ιζήματα, το φως δεν αντανάκλαται και η περιοχή εμφανίζεται πιο σκούρα από το περιβάλλον. Διάφορες παθολογίες μπορεί να εντοπιστούν, όπως ο πολυμεγεθυσμός με τα ενδοθηλιακά κύτταρα να είναι μεγαλύτερα από τα φυσιολογικά, ο πλεομορφισμός με ποικιλία στο μέγεθος και το σχήμα των κυττάρων και ανακλαστικές σημεία λόγω απώλειας ενδοθηλιακών κυττάρων όπως στο σύνδρομο Guttata, στα πρώιμα στάδια της δυστροφίας του Fuchs. Η Guttata μπορεί να εκδηλωθεί και ως ευρύτερες ανακλαστικές περιοχές, με θολή όραση και οίδημα κερατοειδούς (δυστροφία του Fuchs). Επίσης, οφθαλμικά τραύματα/ επεμβάσεις επηρεάζουν το ενδοθήλιο. Λόγω της αδυναμίας αναγέννησης των ενδοθηλιακών κυττάρων, όταν η πυκνότητα των ενδοθηλιακών κυττάρων μειωθεί στα 500 κύτταρα/mm²,

δημιουργείται βλάβη στην πιο εσωτερική μεμβράνη του κερατοειδούς που οδηγεί σε οίδημα κερατοειδούς με νεφέλια (Bullous keratopathy).

Εικόνα 5. Guttata με specular reflection

https://www.eyecenters.com/wp-content/uploads/2016/10/fuchs_early_photo.jpg



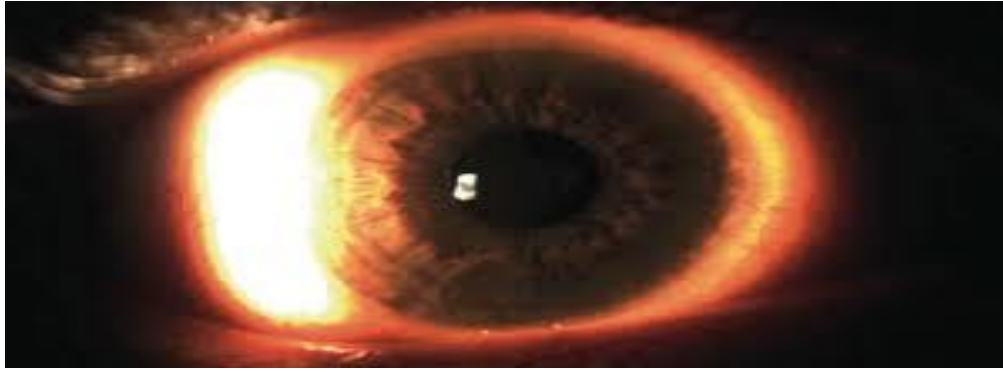
2.1.1.II. Τεχνικές Έμμεσου Φωτισμού

- **ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΣΤΟΝ ΣΚΛΗΡΟ ΧΙΤΩΝΑ (SCLEROTIC SCATTER)**

Μία παραλληλεπίπεδη δέσμη προβάλλεται στο σκληροκερατοειδικό όριο και γίνεται αποσύζευξη της λυχνίας. Με μέγιστο ύψος και πλάτος δέσμης 0,5 -1mm, γωνία 40-60°, μεγέθυνση x10-16, το φως που προβάλλεται στο σκληροκερατοειδές όριο ανακλάται εσωτερικά μέσω του κερατοειδούς και ένας φωτεινός δακτύλιος περιβάλλει τον κερατοειδή. Στο σκοτεινό φόντο, διακρίνονται οι ανακλαστικές αδιαφάνειες, εκδορές, οίδημα του επιθηλίου σχετιζόμενο με συνεχή χρήση ημίσκληρων κερατοειδικών φακών επαφής, διήθηση του στρώματος και εναποθέσεων αποπροϊόντων του μεταβολισμού κλπ.

Εικόνα 6. Sclerotic scatter

<https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTOa5HDbafuig3J1v2leQ1Us59clM8CpBSJQ&s>

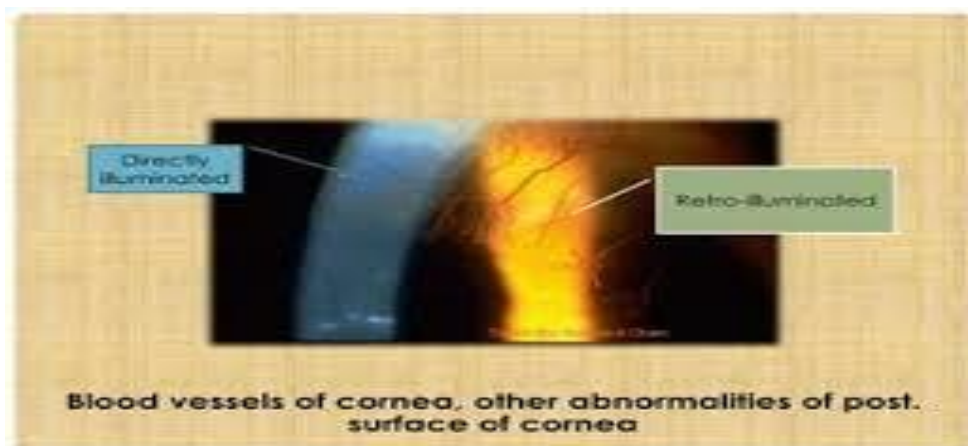


- **ΕΞ ΑΝΤΑΝΑΚΛΑΣΕΩΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ**

Η φωτεινή πηγή αντανακλάται από την ίριδα, ενώ η εστίαση γίνεται στον κερατοειδή. Με πλάτος 0,1 mm και ύψος 4-5mm, γωνία 0-60°, λευκό φίλτρο και μεγέθυνση x16-40, η δέσμη κατευθύνεται στην περιοχή της ίριδας ακριβώς πίσω από την ανωμαλία του κερατοειδούς. Είναι δυνατόν να ανακαλυφθούν ιζήματα και άλλα υπολείμματα στο ενδοθήλιο, τα οποία θα χρωματιστούν λευκά στο σκούρο φόντο. (American Academy of Ophthalmology, 2021)

Εικόνα 7. Εξ αντανακλάσεως φωτισμός για εξέταση νεοαγγειώσεων.

https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRUhyPhS9Yf3hz0fo4R02dcdu_dY5MISIZDQ&s



- **ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ (TANGENTIAL ILLUMINATION)**

Μία δέσμη μεσαίου εύρους και ύψους με μεγέθυνση x10, 16, 25 σχηματίζεται σχεδόν παράλληλα προς τον κερατοειδή, με το σύστημα φωτισμού και παρατήρησης κάθετα μεταξύ τους. Με την τεχνική αυτή ελέγχονται η πρόσθια και η οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδούς για τυχόν ανωμαλίες. (Davies, et al., n.d.)

Εικόνα 8. Εφαπτομενικός φωτισμός

<https://image.slidesharecdn.com/slitlampilluminationtechniques-091129061239-phpapp02/85/Slit-Lamp-Illumination-Techniques-9-320.jpg>



2.1.2. Συνεστιακή Μικροσκοπία (Corneal confocal microscopy)

Η συνεστιακή μικροσκοπία κερατοειδούς είναι μία άμεση, μη επεμβατική in-vivo τεχνική απεικόνισης των μεταβολών των νευρικών ινών του κερατοειδούς μετά από έκθεση σε συγκεκριμένα ερεθίσματα. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στις αρχές της συνεστιακής μικροσκοπίας που έγιναν γνωστές στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα. Η συνεστιακή μικροσκοπία επιτυγχάνει υψηλότερη ανάλυση και μεγέθυνση εικόνων από τη συμβατική μικροσκοπία. Δείγματα ιστών μεγάλου πάχους υφίστανται οπτική τομή για την ποσοτικοποίηση των παθολογικών μικρών νευρικών ινών σε νευροεκφυλιστικές ασθένειες όπως ο διαβήτης, η νόσος Fabry, η σκλήρυνση κατά πλάκας κλπ. Ο φωτισμός γίνεται με ένα διοδικό laser He-Ne με περιορισμένη περίθλαση και η ανίχνευση του φωτός από έναν σημειακό ανιχνευτή. Οι ανιχνευτές είναι ουσιαστικά κάμερες που λειτουργούν ως ευαίσθητοι πολλαπλασιαστές του σήματος. Όταν το φως προέρχεται από μία περιοχή κοντά στην εστιακή περιοχή του ιστού, αυξάνεται η ισχύς του σήματος. Αντίθετα, φως που απομακρύνεται από το εστιακό επίπεδο παράγει ασθενέστερο σήμα. Μία δέσμη laser σαρώνει το δείγμα με τη βοήθεια ειδικών κατόπτρων. Η δέσμη οδηγείται προς ένα ζεύγος κατόπτρων όπου εκτελείται η σάρωση στον κάθετο και τον οριζόντιο άξονα. Η διαδικασία συνεχίζεται ώστε να παραχθεί μία τρισδιάστατη εικόνα του υπό εξέταση ιστού. Η ανάλυση της εικόνας καθορίζεται από το αριθμητικό άνοιγμα του αντικειμενικού φακού, τον δείκτη διάθλασης και το μήκος κύματος του φωτός.

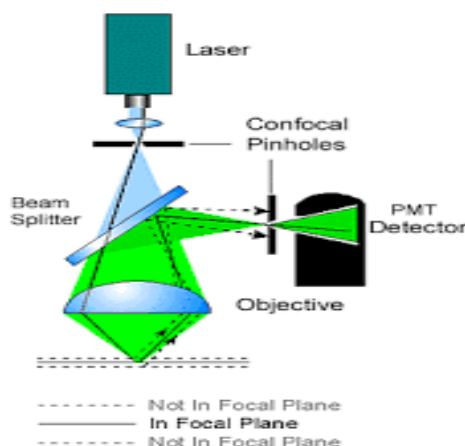
Οι δύο συχνότερα χρησιμοποιούμενοι τύποι συνεστιακών μικροσκοπίων, σήμερα, είναι οι: Confoscan 4, Nidek και ο Heidelberg Retina Tomograph III, Heidelberg. Αυτά τα ομοεστιακά μικροσκόπια ακολούθησαν τα μικροσκόπια διαδοχικής σάρωσης, επιτρέποντας την

παράλληλη σάρωση πολλών σημείων. Η συσκευή Confoscan 4 είναι ένα μικροσκόπιο σάρωσης σχισμής που διαθέτει αντικειμενικό φακό 20D για σάρωση έως 12mm από το κέντρο του κερατοειδούς. Το μειονέκτημά του είναι ότι η αποτελεσματικότητά του εστιάζεται μόνο στον άξονα που είναι κάθετος στη σχισμή.

Ο τομογράφος Heidelberg Retina III οποίος συμπληρώνεται από τη μονάδα κερατοειδούς Rostock με σάρωση laser, η οποία παρέχει την υψηλότερη ανάλυση και μεγέθυνση. Το σύστημα Heidelberg χρησιμοποιεί αντικειμενικό φακό 63D, αριθμητικό άνοιγμα 0,9NA και παράγει τις ποιοτικές εικόνες υψηλής αξονικής ανάλυσης σχεδόν 4μm. Έτσι, από τα στρώματα του κερατοειδούς διατέμνεται το επιθήλιο, αρχικά. Κάτω από τα βασικά κύτταρα του επιθηλίου βρίσκεται το πλέγμα των λεπτών νευρικών ινών. Στο στρώμα του κερατοειδούς τυπικά εντοπίζεται μόνο οι πυρήνες των κυττάρων. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα ποσοτικοποίησης των ενδοθηλιακών κυττάρων, όπως και άλλων εγκατεστημένων κυττάρων, λ.χ. ανοσοκύτταρα σε αυτοάνοσες ή φλεγμονώδεις νευροπάθειες. (Elliott, 2020), (Chiang, et al., 2023)

Εικόνα 9. Αρχή λειτουργίας Συνεστιακού Μικροσκοπίου.

<https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSmDCyAO2dPYdzOwfosU0y3isCXcUW3SgJBpg&s>



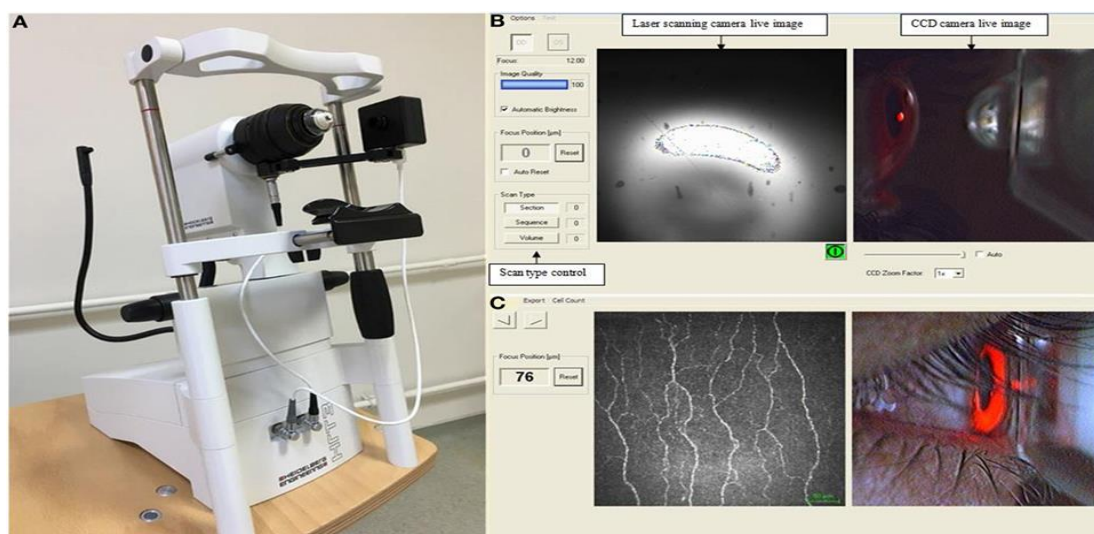
Για την πραγματοποίηση της εξέτασης με τον Heidelberg Τομογράφο, ο εξεταστής:

- Ρυθμίζει τις διοπτρίες σε +12D στον αντικειμενικό φακό
- Χαμηλώνει το ύψος της κάμερας και εφαρμόζει τεχνητά δάκρυα στο άκρο του φακού.
- Έπειτα, τοποθετεί προσεκτικά το κάλυμμα TomoCar μπροστά από το φακό, ώστε να σχηματιστεί ένας δακρυϊκός μηνίσκος μεταξύ φακού και TomoCar. Ρυθμίζει τον μοχλό εστίασης έως ότου ενωθούν σε μία οι φωτεινές αντανάκλασεις από τα laser και το βάθος φθάσει στα $\pm 150\mu\text{m}$. Τελικά, το βάθος μηδενίζεται.
- Ενσταλάζει αναισθητικό στους οφθαλμούς του εξεταζόμενου και τον συμβουλεύει να παραμένει σταθερά σε επαφή με το περιμετώπιο και το υποσιάγωνο.
- Τοποθετεί την κάμερα συζευγμένου φορτίου κάθετα στην κάμερα σάρωσης, η οποία είναι παράλληλα με τον εξεταζόμενο οφθαλμό.

- Μετακινεί την κάμερα σάρωσης κατακόρυφα μέχρι το Tomocap να είναι στο κέντρο του κερατοειδούς, διατηρώντας ελάχιστη γέφυρα επαφής. Ενημερώνει τον ασθενή να κρατήσει σταθερά ανοιχτά τα μάτια του.
- Λαμβάνονται εικόνες από το στρώμα και τη μεμβράνη του Bowman κεντρικά. Μεταβάλλονται οι ρυθμίσεις για την ενότητα, την ένταση, την ακολουθία και το βάθος σάρωσης ανάλογα με τα ευρήματα. Η λειτουργία ενότητας επιτρέπει την χειροκίνητη λήψη, αλλά απαιτεί εμπειρία στην εξέταση. Οι λειτουργίες ακολουθίας και έντασης είναι αυτοματοποιημένες αλλά με μειωμένη ποιότητα. Για την απεικόνιση του πλέγματος του υποβασικού νεύρου εφαρμόζεται η επιλογή του ευρέως οπτικού πεδίου.

Εικόνα 10. Εξέταση στο συνεστιακό μικροσκόπιο

https://www.frontiersin.org/files/Articles/349769/fneur-09-00204-HTML-r1/image_m/fneur-09-00204-q001.jpg



Κατά την αποθήκευση της εικόνας, επιλέγεται η κατάλληλη κλίμακα. Στη γραμμή επεξεργασίας, εμφανίζονται οι εξής δείκτες:

- Πυκνότητα νευρικών ινών (Nerve Fiber Density -NFD): Ο αριθμός των κύριων νεύρων ανά πλαίσιο (ίνες/mm²).
- Πυκνότητα νευρικών κλάδων (Nerve Branch Density- NBD): Αριθμός κύριων κλάδων ανά πλαίσιο.
- Μήκος νευρικής ίνας (Nerve Fiber Length- NFL): Το συνολικό μήκος όλων των νευρικών ινών και κλάδων ανά πλαίσιο (mm/mm²).
- Στρεβλότητα νευρικών ινών των κύριων νεύρων (Nerve Fiber Tortuosity -NFT).
- Συνολικό μήκος νεύρων στον κάτω στρόβιλο (Inferior Whorl Length-IWL). (University of Bristol, 2024)

Η συνεστιακή μικροσκοπία τελεσφορεί στη διάγνωση και παρακολούθηση των νόσων που επηρεάζουν τις οφθαλμικές νευρικές ίνες, όπως των παρακάτω:

- Διαβητική περιφερική συμμετρική πολυνευροπάθεια (DSP).

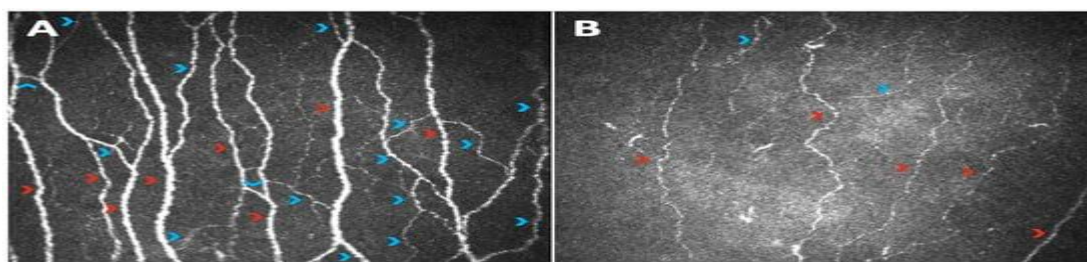
Η διαβητική νευροπάθεια πλήττει τους νευρικούς άξονες σε ποσοστό 50% των διαβητικών

ασθενών. Ο κερατοειδής έχει την πιο πυκνή νεύρωση στον ανθρώπινο οργανισμό, για αυτό είναι επιβεβλημένη η ποσοτικοποίηση της μορφολογίας των ινών του κερατοειδούς. Στη διαβητική νευροπάθεια, μικρά απομυελινωμένα αισθητήρια νεύρα υπεύθυνα για το άλγος και την αίσθηση της θερμοκρασίας υφίστανται διάχυτο τραυματισμό, ο οποίος σταδιακά επεκτείνεται σε μεγαλύτερες νευρικές ίνες. Οι ασθενείς με προχωρημένη διαβητική περιφερική νευροπάθεια εμφανίζουν προοδευτική συμμετρική απώλεια των νευρικών ινών με πορεία από τον κάτω στρόβιλο προς τον κεντρικό κερατοειδή. Σε σχετική μελέτη που δημοσιεύτηκε το 2020 στο *Journal of Diabetes Investigation*, συμμετείχαν 20 άτομα από 12 έως 16 ετών με σακχαρώδη διαβήτη τύπου 1 για 2-7 χρόνια, γλυκοζυλιωμένη αιμοσφαιρίνη HbA1c από 7,2% έως 11,4% χωρίς άλλα αίτια νευροπάθειας και είκοσι υγιή άτομα. Οι σαράντα συμμετέχοντες υπεβλήθησαν σε συνεστιακή μικροσκοπία κερατοειδούς με τον Τομογράφο Heidelberg Rostock Cornea Module III για τη διερεύνηση της πυκνότητας των νευρικών ινών, των νευρικών κλάδων, του μήκους της νευρικής ίνας, της στρεβλότητας των νευρικών ινών και του συνολικού μήκους των νεύρων στον κάτω στρόβιλο. Οι προαναφερθείσες παράμετροι ποσοτικοποιήθηκαν βάση του εγχειριδίου CCmetrics, αφού επιλέχθηκαν έξι εικόνες του πλέγματος του υποβασικού νεύρου από τον κεντρικό κερατοειδή. Τα αποτελέσματα εμφάνισαν μείωση κατά περίπου δύο τάξεις μεγέθους, της πυκνότητας των νευρικών ινών στους διαβητικούς ασθενείς, παρόμοια στρεβλότητα των νευρικών ινών στις δύο ομάδες και μείωση του συνολικού μήκους νεύρων στον κάτω στρόβιλο στους διαβητικούς ασθενείς. Η μείωση της πυκνότητας των νευρικών ινών είναι ανεξάρτητη της διάρκειας του διαβήτη. (Al-Jarrah , et al., 2020)

Άλλη, επί του θέματος, μελέτη δημοσιεύτηκε την ίδια χρονιά στο επιστημονικό περιοδικό *Diabetes Care*. Συνολικά, εξετάστηκαν 998 ενήλικοι ασθενείς με διαβήτη τύπου I,II και 204 μη πάσχοντες από διαβήτη. Η εξέταση διενεργήθηκε και πάλι με τον Τομογράφο Heidelberg Rostock Cornea Module III. Οι οχτώ εικόνες του υποβασικού νεύρου σε βάθος 50μ ελέγχθηκαν από το αυτοματοποιημένο σύστημα. Εξετάστηκαν το συνολικό μήκος και η πυκνότητα των νευρικών ινών και των νευρικών κλάδων για την ετήσια μεταβολή στους ασθενείς. Αποδείχθηκε η μείωση κατά 5-6% του μήκους των νευρικών ινών στο 1/5 των διαβητικών ασθενών μέσα σε έναν χρόνο. Τέλος, από την έρευνα, συνάγεται ότι τιμές CNFL μικρότερες των 15mm/mm² θεωρούνται πρόδρομος διαβητικής νευροπάθειας εντός τεσσάρων ετών και μικρότερες των 11mm/mm² αποδεικνύουν εγκατεστημένη διαβητική νευροπάθεια. (Ahmed Malik, et al., 2020)

Εικόνα 11. Προοδευτική απώλεια νευρικών σε διαβητική περιφερική νευροπάθεια.

https://www.mdpi.com/jcm/jcm-11-05130/article_deploy/html/images/jcm-11-05130-q001-550.jpg

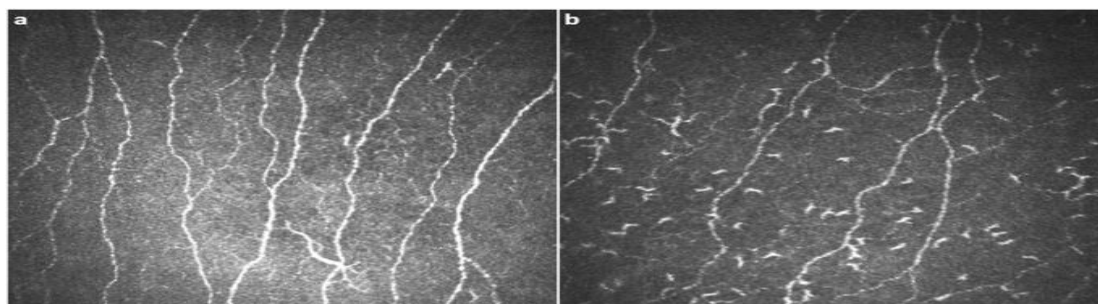


-Νόσος Fabry / Fabry Disease (FD).

Η νόσος Fabry είναι μία σπάνια προοδευτική πολυσυστηματική ασθένεια με φυλοσύνδετη κληρονομικότητα, η οποία προκαλεί χαρακτηριστική επώδυνη νευροπάθεια από την παιδική ηλικία. Η ασθένεια αυτή προκαλείται από μία σειρά μεταλλάξεων στο γονίδιο της α-γαλακτοσιδάσης GLA με αποτέλεσμα ελάχιστη ή μηδενική έκφραση της λυσοσωμικής α-γαλακτοσιδάσης A, με επακόλουθη συσσώρευση γλυκοζυλιωμένων προϊόντων όπως το globotriaosylceramide και το lyso-globotriamiosyl. Αυτά τα γλυκοζυλιωμένα προϊόντα είναι γλυκοσφιγγολιπίδια, τα οποία επειδή δεν μπορούν να αποδομηθούν διαφορετικά, σχηματίζουν συσσωματώματα στο περιφερικό νευρικό σύστημα. Οι νευρώνες διογκώνονται και οι διάλυτοι ιόντων σε όλα τα νεύρα καταλήγουν δυσλειτουργικοί. Με την πάροδο του χρόνου αυτές οι συναθροίσεις γλυκοσφιγγολιπιδίων στα γάγγλια της ραχιαίας ρίζας επιφέρουν απώλεια των αισθητηριακών νευρικών ινών, πόνο και άλλες αισθητηριακές διαταραχές όπως υπαισθησία σε θερμικά ερεθίσματα και υπερευαισθησία σε μηχανικά ερεθίσματα. Ειδικά, στη σχισμοειδή λυχνία είναι εμφανή τα γλυκοσφιγγολιπίδια στο επιθήλιο. Η εξέταση με συνεστιακό μικροσκόπιο, αποκαλύπτει απώλεια του κερατοειδικού νεύρου και αύξηση των δενδριτικών κυττάρων στον κερατοειδή. (Burand & Stucky, 2021)

Εικόνα 12.α. Υγιής κερατοειδής b.μείωση νευρικών ινών και αύξηση δενδριτικών κυττάρων στην νόσο Fabry.

https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1038%2Fs41598-01830688-z/MediaObjects/41598_2018_30688_Fig1_HTML.png



- *Σκλήρυνση κατά πλάκας.*

Η σκλήρυνση κατά πλάκας είναι μία χρόνια φλεγμονώδης νευροεκφυλιστική νόσος με επαναλαμβανόμενα επεισόδια φλεγμονώδους απομυελίνωσης και αξονικής εκφύλισης του κεντρικού νευρικού συστήματος. Η σκλήρυνση κατά πλάκας προκαλεί περιφερική νευροπάθεια, έντονο νευροπαθητικό πόνο στο ένα τρίτο των ασθενών και απώλεια όρασης. Για την αξιολόγηση των αλλοιώσεων των νευρικών ινών του κερατοειδούς σε διάστημα παρακολούθησης δύο ετών σε ασθενείς με σκλήρυνση κατά πλάκας διενεργήθηκε έρευνα που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό *Translational Vision Science and Technology* τον Δεκέμβριο 2020. Τριάντα ένα ασθενείς με υποτροπιάζουσα διαλείπουσα σκλήρυνση κατά πλάκας ελέγχθηκαν από το συνεργαζόμενο πανεπιστημιακό νοσοκομείο στο Ελσίνκι. Τα κριτήρια αποκλεισμού από την έρευνα αφορούσαν οφθαλμικό τραύμα ή επέμβαση, χρήση φακών επαφής και άλλες νόσους- αιτίες οφθαλμικής νευροπάθειας. Συγκεντρώθηκαν τρεις έως πέντε εικόνες του πλέγματος του υποβασικού νεύρου μόνο του δεξιού οφθαλμού του κάθε ασθενούς με το συνεστιακό μικροσκόπιο HRT II στην έναρξη και τη λήξη της έρευνας. Από τα αποτελέσματα κατέστη σαφές ότι, σε ασθενείς με σκλήρυνση κατά πλάκας παρουσιάζεται σημαντική μείωση της πυκνότητας του υποεπιθηλιακού νεύρου του κερατοειδούς, του πλάτους και του μήκους των νευρικών ινών και αύξηση των κυττάρων του ανοσοποιητικού στον κερατοειδή, κατά τη διάρκεια των δύο ετών. Επιπλέον, μείωση του πλήθους και όχι του μήκους των νευρικών ινών συσχετίστηκε με επιδείνωση της σκλήρυνσης κατά πλάκας. Ακόμη, αν και ο αριθμός δενδριτικών κυττάρων δεν μεταβλήθηκε ιδιαίτερα, μία αύξηση στην πυκνότητα των δενδριτικών κυττάρων συνδέθηκε με επιδείνωση της νευρολογικής αναπηρίας. Η αύξηση αυτή ήταν εντονότερη σε ασθενείς που έκαναν χρήση φινγκολιμόδης αντί ιντερφερόνης-β. Αγνωείται, ωστόσο, η αιτιολογία του πόνου και η σύνδεσή του με την απώλεια των νευρικών ινών του κερατοειδούς. (D'Onofrio , et al., 2021)

- *Ερπητική κερατίτιδα (Herpes Simplex Virus- HSV keratitis).*

Η ερπητική κερατίτιδα προκαλείται από λοίμωξη από τον DNA ιό (κυρίως τον τύπου I) του απλού έρπητα. Για την εκδήλωση της ερπητικής κερατίτιδας, συνήθως έχει προηγηθεί έκθεση στον ιό κατά την παιδική ηλικία και έχει ακολουθήσει η επανενεργοποίησή του στα νευρικά κύτταρα του οφθαλμού, όπου παρέμενε αδρανής. Μερικά συνήθη αίτια επανενεργοποίησης του ιού είναι η ανοσοκαταστολή, το άγχος, η έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία, το οφθαλμικό τραύμα, η χρήση αντιγλαυκωματικών κολλυρίων προσταγλανδίνης. Κλινικά σημεία της ερπητικής κερατίτιδας αποτελούν η ερυθρότητα της οφθαλμικής επιφάνειας, ο πόνος, το αίσθημα ξένου σώματος, η δακρύρροια, οφθαλμικές εκκρίσεις και η φωτοφοβία. Η ερπητική κερατίτιδα μπορεί να εκδηλωθεί με τρεις μορφές:

-Επιθηλιακή: η συχνότερη μορφή. Η έναρξη της επιθηλιακής ερπητικής κερατίτιδας σηματοδοτείται από διάσπαρτα διαυγή κυστίδια που εξελίσσονται εντός ωρών σε δενδριτικά έλκη. Λανθασμένη χρήση κορτικοστεροειδών κολλυρίων μπορεί να προκαλέσει γεωγραφικό έλκος.

- Στρωματική: οι υποτροπές της δημιουργούν ουλές, νεοαγγειώσεις και χρόνια θόλωση στον κερατοειδή.

- Ενδοθηλίτιδα ή δισκοειδής κερατίτιδα: εκδηλώνεται με διηθήσεις στα ενδοθηλιακά κύτταρα και προκαλεί οίδημα και θόλωση στο κερατοειδικό στρώμα.

Αν και η διάγνωση της λοίμωξης γίνεται συνήθως με χρήση σχισμοειδούς λυχνίας, σύγχρονες μελέτες αναγίνουν την εξέταση με το συνεστιακό μικροσκόπιο σε πιο αντικειμενική για τη διάγνωση της HSV κερατίτιδας. Συγκεκριμένα, στην οξεία φάση, η συνεστιακή μικροσκοπία εντοπίζει διογκωμένα, νεκρωτικά επιθηλιακά κύτταρα ως υπερανακλαστικές περιοχές των δενδριτικών βλαβών -ιδιαίτερα στην επαναλοίμωξη- και φλεγμονώδη κύτταρα του Langerhans. Σε έρευνα που διεξήγαγαν οι Yokugawa et. al, εξετάζοντας τέσσερις ασθενείς με ερπητική κερατίτιδα στο συνεστιακό μικροσκόπιο, εξακρίβωσαν την παρουσία δενδριτικών βλαβών με μορφή υπερανακλαστικών διογκωμένων επιθηλιακών κυττάρων. Σε άλλη επί του θέματος μελέτη σε είκοσι ένα ασθενείς, παρατηρήθηκε απουσία υποβασικών νεύρων σε ποσοστό 40% και απώλεια σχεδόν στο 50% των ασθενών. Εκτός αυτών, οι Hamrah et al. διέκριναν έντονη διήθηση του πρόσθιου στρώματος από δενδριτικά κύτταρα και καθίζηση φλεγμονωδών κυττάρων στο ενδοθήλιο. Οι μορφολογικές αυτές μεταβολές έγιναν ορατές τόσο στην οξεία όσο και στη χρόνια φάση της ερπητικής κερατίτιδας, υποδηλώνοντας, μάλλον, ότι οι βλάβες της οξείας φάσης επιμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα. (Abdolrahimzadeh , et al., 2023)

Εικόνα 13. Κύτταρα του Langerhans ως δενδριτικές βλάβες στο συνεστιακό μικροσκόπιο.

https://www.dovepress.com/getfile_article_fulltext.php?filename=article_fulltext%2Fs92000%2F92517/img/OPT

[H-92517-F03.jpg](#)

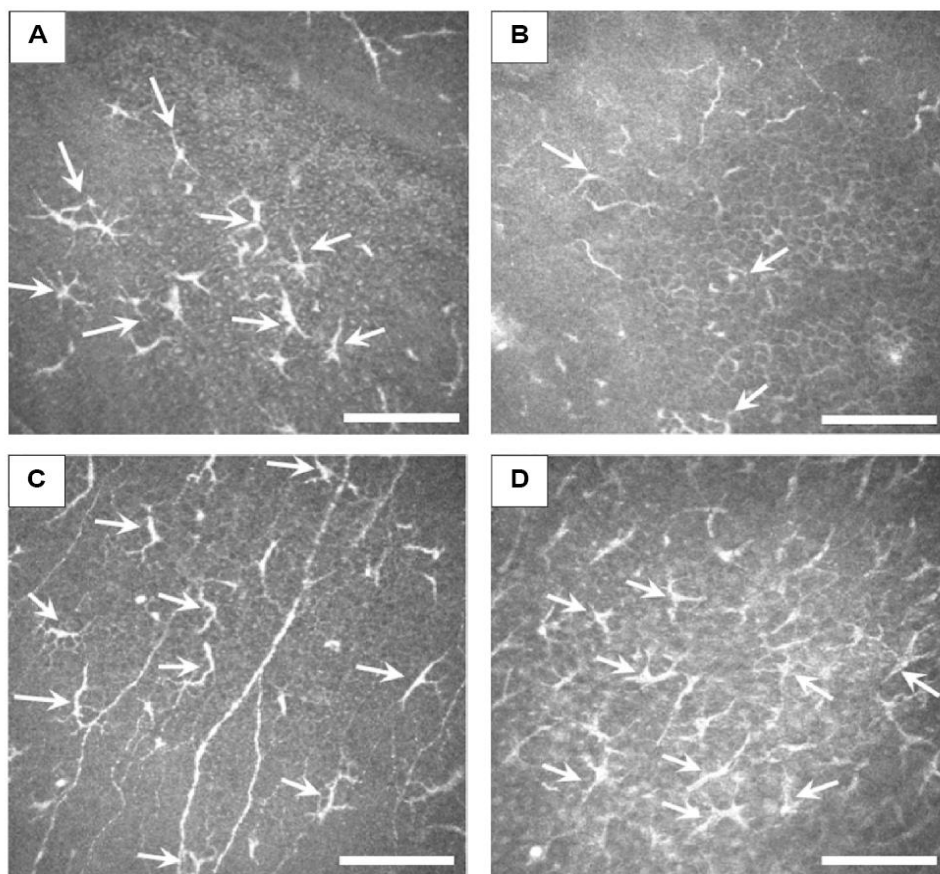


Figure 3 In vivo confocal microscopic images at the level of deep epithelium to subbasal nerve plexus in Case 1 (A), Case 2 (B), Case 3 (C), and Case 4 (D).
Notes: Numerous Langerhans cells as dendritic inflammatory cells (arrows) were noted, and were not exclusively located at the dendritic lesion. (Bar = 100 μ m).

2.2. Σύγχρονες απεικονιστικές μέθοδοι ελέγχου κερατοειδούς

1. Εισαγωγή στην Τοπογραφία Κερατοειδούς

Η τοπογραφία (ετυμολογικά, η απεικόνιση σε χάρτη) του κερατοειδούς είναι μία άμεση, ανέπαφη και ασφαλής απεικονιστική μέθοδος της μορφολογίας του κερατοειδούς. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν οι σύγχρονοι τοπογράφοι είναι οι: Placido, σάρωσης σχισμής, Scheimpflug και έγχρωμης ασύμμετρης ανάκλασης της διόδου εκπομπής φωτός - LED. Οι τοπογράφοι της πρώτης τεχνολογίας βασίζονται στη φωτεινή αντανάκλαση των δακτυλίων Placido στον κερατοειδή και αναλύουν το σήμα και την καμπυλότητα της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδή. Οι τομογράφοι, όμως, που βασίζονται στη σάρωση σχισμής (Orbscan IIz, Bausch and Lomb, New York), στην κάμερα Scheimpflug (Pentacam, Galilei, Sirius+) ή οι συσκευές που βασίζονται στην πολύχρωμη ασύμμετρη ανάκλαση της διόδου εκπομπής φωτός (Cassini LED Topography), προσφέρουν ποιοτική και ποσοτική

ανάλυση του σχήματος, της πρόσθιας και οπίσθιας κερατοειδικής επιφάνειας, εκτελώντας τομογραφία του κερατοειδούς.

Τοπογραφικά διακρίνουμε τις εξής ζώνες στον κερατοειδή:

- i. την κεντρική ζώνη, η οποία καταλαμβάνει τα κεντρικά 3-4mm,
- ii. την παρακεντρική ζώνη, η οποία καταλαμβάνει τα 4-8mm μετά την κεντρική και είναι πιο επίπεδη από την κεντρική σε έναν φυσιολογικό κερατοειδή,
- iii. την περιφερική ζώνη, στα ακόλουθα 8-11mm. Η πιο επίπεδη ζώνη, ο κερατοειδής γίνεται ασφαιρικός.
- iv. η σκληροκερατοειδική ζώνη.

- **Ενδείξεις τοπογραφίας κερατοειδούς**

Η τοπογραφία, χάρη στην άμεση ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση της καμπυλότητας του κερατοειδούς, ενδείκνυται για την έγκαιρη διάγνωση, παρακολούθηση και διαχείριση παθήσεων όπως ο κερατόκωνος και άλλες κερατοειδικές εκτασίες, για τον έλεγχο του αστιγματισμού, την επίτευξη της ιδανικής εφαρμογής φακών επαφής και την αξιολόγηση της δακρυϊκής στιβάδας για την ασθένεια του ξηρού οφθαλμού μη επεμβατικά.

Με την τοπογραφία αξιολογείται η καταλληλότητα του ασθενούς για διαθλαστικές επεμβάσεις, διενεργείται προεγχειρητικός σχεδιασμός και μετεγχειρητική παρακολούθηση, ώστε να εξασφαλίζεται ο έλεγχος των διαθλαστικών επεμβάσεων, της επέμβασης αφαίρεσης καταρράκτη και γενικότερα επεμβάσεων στον κερατοειδή, όπως για αφαίρεση πτερυγίου, ουλές κλπ., αλλά και της τοποθέτησης ενδοκερατοειδικών δακτυλίων.

Μορφές τοπογραφικών χαρτών

- **Αξονικός χάρτης (Axial/ sagittal map).**

Λαμβάνεται από όλους τους τοπογράφους. Ειδικά στον Placido τα δεδομένα από το κέντρο είναι πιο ακριβή. Χρησιμοποιείται συχνότερα για την ανίχνευση ανώμαλου αστιγματισμού και τον σχεδιασμό της Φωτοδιαθλαστικής Κερατεκτομής (PRK).

Μετρά την ακτίνα καμπυλότητας για μία σφαίρα με την ίδια εφαπτομένη στο εκάστοτε σημείο μελέτης με κέντρο περιστροφής στον άξονα της λήψης της τοπογραφίας και τη μετατρέπει σε διοπτρίες σύμφωνα με τον νόμο Gauss.

- **Τοπικής εφαπτομενικής διεύθυνσης χάρτης καμπυλότητας (Instantaneous Map).**

Υπολογίζει την τοπική ακτίνα καμπυλότητας με βάση τα γειτονικά σημεία. Εντοπίζει τοπικές αλλαγές στη μορφολογία του κερατοειδούς στα 5mm κεντρικά του κερατοειδούς, όπως εκτασίες ιατρογενείς και μη. Ειδικότερα, ο εφαπτομενικός

χάρτης παρέχει τα πιο αξιόπιστα δεδομένα για την περιφέρεια του κερατοειδούς και αξιοποιείται στην Ορθοκερατολογία και στην επιλογή των κατάλληλων σκληρικών φακούς επαφής σε κερατοκωνικούς ασθενείς.

- **True Net Map.**

Υπολογίζει την ισχύ του κερατοειδούς από τις τιμές της πρόσθιας και οπίσθιας συνεφαπτομενικής (οβελιαίας) καμπυλότητας της πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς. Για τον υπολογισμό της πρόσθιας οβελιαίας ισχύος χρησιμοποιούνται οι δείκτες διάθλασης η ίσο με ένα για τον αέρα και 1,376 τον κερατοειδή. Αντίστροφα, υπολογίζεται η οπίσθια οβελιαία ισχύς.

- **Διαθλαστικός χάρτης (Refractive Map).**

Εμφανίζει τη διαθλαστική δύναμη του κερατοειδούς, βάση του νόμου του Snell. Μετατρέπει, δηλαδή, τα στοιχεία της καμπυλότητας της πρόσθιας επιφάνειας σε διαθλαστική ισχύ. Προσεγγίζει την πιθανή όραση και την προβλεπόμενη όραση μετά από οφθαλμολογική επέμβαση. (Becky, et al., 2023)

- **Χάρτης Ανύψωσης (Elevation Map).**

Εντοπίζει το μέγεθος της απόκλισης (σε mm) του ύψους του κερατοειδούς σε σχέση με τη σφαίρα καλύτερης εφαρμογής, δηλαδή μία "τέλεια" σφαίρα προσεγγιστική του κερατοειδούς κατά μέσο όρο, τόσο στον πρόσθιο όσο και στον οπίσθιο κερατοειδή. Σημεία πάνω από το επίπεδο αναφοράς είναι θετικά και χρωματίζονται με θερμές αποχρώσεις, ενώ κάτω από το επίπεδο αυτό χρωματίζονται ψυχρά. Αποτυπώνεται το τρισδιάστατο σχήμα του κερατοειδούς και προσδιορίζεται η περιοχή του κώνου σε περίπτωση κερατόκωνου. Ο κώνος στα 3mm θεωρείται κεντρικός, στα 3-5mm παρακεντρικός και μετά τα 5mm περιφερικός (Διαφανής Περιφερική Εκφύλιση/ Pellucid Marginal Degeneration- PMD). Σε περίπτωση διαφοράς ανύψωσης άνω των 350μm ανάμεσα στο μέγιστο και στο ελάχιστο σημείο ανύψωσης σε ανώμαλο κερατοειδή, είναι σταθερότερη η εφαρμογή ενός σκληρικού φακού. Επομένως, ο χάρτης ανύψωσης είναι απαραίτητος για την επιλογή μεταξύ σκληρικών φακών επαφής και σκληρών αεροδιαπερατών φακών (RGP) σε κερατοκωνικούς ασθενείς. Επίσης, με τον χάρτη ανύψωσης μετράται το ποσό του ιστού που πρέπει να αφαιρεθεί σε μία διαθλαστική επέμβαση. (Ahmed , et al., 2024)

- **Παχυμετρικός χάρτης (Pachymetry map).**

Εφαρμόζεται στην κλινική κατηγοριοποίηση των σταδίων του κερατόκωνου, στην παρακολούθηση χρηστών φακών επαφής (ιδιαίτερα σκληρικών) σε περιπτώσεις υποξίας του κερατοειδή και στην Ορθοκερατολογία για διόρθωση μυωπίας. Ακόμη, παρέχει τη δυνατότητα αξιολόγησης της συμμετρίας της μετατόπισης του κερατοειδικού πάχους από το κέντρο προς την περιφέρεια.

Ανάλογα με την κλίμακα τους διακρίνουμε τους τοπογραφικούς χάρτες σε:

1. Απόλυτης κλίμακας (*absolute scale*). Εδώ, κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει πάντα την ίδια διοπτρική ισχύ από 35 διοπτρίες ως 50 διοπτρίες, δηλαδή η διαφορά κάθε χρώματος είναι σταθερή και ίση με 1,5 διοπτρίες ή 5 διοπτρίες για ισχύς μικρότερες των 35 διοπτριών και ανώτερες των 50 διοπτριών. Ωστόσο, πολύ ήπιες ανωμαλίες μπορεί να μην γίνουν αντιληπτές.

2. Μεταβλητής κλίμακας (*normalized scale, relative scale*). Εδώ κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετική ισχύ κάθε φορά με όρια τις 40,5 και 49,5 διοπτρίες. Προσφέρονται περισσότερες λεπτομέρειες και εμφανίζονται ακόμα και οι ήπιες ανωμαλίες, αλλά γίνεται δυσκολότερη η σύγκριση της τοπογραφίας των ασθενών. Ορισμένες φορές δίνεται υπερβάλλουσα έμφαση στα κόκκινα/πορτοκαλί και μπλε/πράσινα, δυσχεραίνοντας την ορθή διάγνωση.

3. Αριθμητικός τοπογραφικός χάρτης (*numeric map-16 or 32 meridians*). Εδώ, αριθμοί και όχι χρώματα, εμφανίζονται σε δεκαέξι ή τριάντα δύο σημεία του χάρτη.

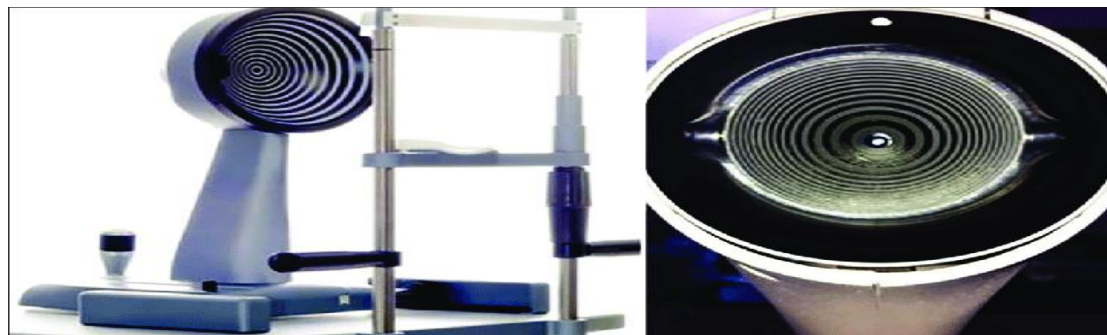
4. Αυτόματης κλίμακας (*automated scale*). Η κλίμακα δημιουργείται σύμφωνα με τις ανάγκες του χειριστή του τοπογράφου. (Becky, et al., 2023)

2.2.2. Τοπογραφία Placido

Στα τέλη του 1800 ο Antonio Placido εφηύρε το πρώτο κερατοσκόπιο με κεντρικό άνοιγμα και ομόκεντρους φωτεινούς και σκοτεινούς δακτυλίους να εναλλάσσονται για να φωτογραφήσει τις αντανάκλασεις του κερατοειδή, εισάγοντας έτσι την τεχνολογία Placido στην μελέτη της τοπογραφίας του κερατοειδούς. Η τοπογραφία Placido αναλύει χωρίς επαφή μόνο την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς. Οι τοπογράφοι Placido διακρίνονται σε μεγάλου και μικρού κώνου. Οι μικρού κώνου συλλέγουν πληροφορίες από περισσότερα κερατοειδικά σημεία εκατέρωθεν του σκληροκερατοειδούς ορίου και τείνουν να είναι πιο ακριβείς στις μετρήσεις, λόγω των πιο κυρτών δακτυλίων. Αντίθετα, οι μεγάλου κώνου καλύπτουν τα 7-8mm του κεντρικού κερατοειδούς. Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημά τους είναι η μικρή απόσταση εργασίας σε ασθενείς με μεγάλο βάθος κόγχου.

Εικόνα 14. Αριστερά: Τοπογράφος Placido μεγάλου κώνου, δεξιά: Τοπογράφος Placido μικρού κώνου.

<https://www.researchgate.net/publication/273340976/figure/fig3/AS:765190559768577@1559447054069/This-figure-shows-the-different-cone-designs-in-Placido-systems-The-figure-on-the-left.png>



Με την τεχνολογία Placido προβάλλονται μία σειρά είκοσι δύο ισαπεχόντων και ομόκεντρων λευκών δακτυλίων στον κερατοειδή με γωνιακή ανάλυση δύο μοιρών και αποτυπώνεται η αντανάκλασή τους από μία κάμερα που είναι τοποθετημένη στο κέντρο των δακτυλίων. Από την αντανάκλαση της εξωτερικής επιφάνειας του κερατοειδή λαμβάνεται το πρώτο είδωλο Purkinje. Η αντανάκλαση αυτή είναι αποτέλεσμα της διεπαφής αέρα και κερατοειδή, για αυτό τα αποτελέσματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ακεραιότητα της δακρυϊκής επιφάνειας. Οι δακτύλιοι είναι επικεντρωμένοι στον οπτικό άξονα. Όσο πιο κοντά βρίσκονται οι δακτύλιοι μεταξύ τους, τόσο πιο κυρτός ο κερατοειδής. Παραμορφωμένες εικόνες αποτελούν ένδειξη κερατόκωνου.

Η τοπογραφία Placido μετρά με ακρίβεια τη διαθλαστική ισχύ του οφθαλμού αλλά όχι το πραγματικό σχήμα του κερατοειδούς, καθώς υφίστανται περιορισμοί στην εξέταση. Τα κύρια μειονεκτήματα της τεχνολογίας Placido περιλαμβάνουν την πιθανή υποεκτίμηση αστιγματισμών άνω των τριών διοπτριών ή πολύ ελαφριών ή σε πρώιμο στάδιο κερατοειδικών ανωμαλιών, τα μειωμένα σημεία δεδομένων από την παρακεντρική, την περιφερική και την οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδούς, τον ενδεχόμενο περιορισμό πεδίου εξέτασης λόγω ανατομίας κόγχου και μύτης, την έντονη εξάρτηση από την ακεραιότητα του δακρυϊκού φιλμ και την πιθανή δυσφορία εξεταζόμενου από το έντονο φως. Επιπλέον, θα ήταν ωφέλιμο να αποφεύγεται η τοπογραφία Placido σε οίδημα ή έλκος κερατοειδούς. Παρόλα αυτά οι τοπογράφοι που βασίζονται στην τεχνολογία Placido κατέχουν σημαντική θέση στον πρωτοβάθμιο έλεγχο του πρόσθιου κερατοειδούς, αναλύοντας επιστάμενα τη μορφολογία του πρόσθιου κερατοειδούς και την αμπερομετρία του κερατοειδούς με τους πολυωνυμικούς χάρτες Zernike.

Με την τοπογραφία Placido τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους χάρτες αξονικής καμπυλότητας, κερατομετρίας, στους μέσης καμπυλότητας και τους εφαπτομετρικούς

καμπυλότητας χάρτες. Θερμότερα χρώματα (κόκκινο, πορτοκαλί) αντιπροσωπεύουν κυρτότερους κερατοειδείς με μεγαλύτερη διοπτρική ισχύ, ενώ ψυχρότερα χρώματα (μπλε, ιώδες) αντιπροσωπεύουν πιο επίπεδους κερατοειδείς με μικρότερη διοπτρική ισχύ. Με πράσινο και κίτρινο απεικονίζονται οι φυσιολογικές περιοχές στον κερατοειδή. Ο χάρτης αξονικής καμπυλότητας είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος, καθώς αξιολογεί τη συνολική τοπογραφία του κερατοειδή, ελέγχοντας έτσι αν είναι φυσιολογικός ή όχι. (Sridhar & Tripathy , 2023)

2.2.3. Τομογράφος Orbscan IIz, Bausch and Lomb

Ο τομογράφος Orbscan (1995) συνδυάζει την τεχνολογία σάρωσης σχισμής και ένα εξελιγμένο σύστημα Placido. Αναλύει την τοπογραφία κερατοειδούς από περισσότερα από 9.000 σημεία σε 1,5 δευτερόλεπτα.

Εικόνα 15. Τομογράφος Orbscan IIz.

<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTgKe3dM3LXdWs-Xvg4lDEt7ROcNyfLKAG8xw&s>



Χρησιμοποιώντας σαράντα σχισμές 12,5mm ύψους και 0,30mm πλάτους, είκοσι από δεξιά και είκοσι από αριστερά σε γωνία 45° από τον άξονα του τομογράφου. Ο Orbscan εξετάζει την κυρτότητα και την ανύψωση της πρόσθιας και της οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς, εντοπίζοντας ακόμη και πρώιμες ανωμαλίες της οπίσθιας επιφάνειας, μετρά τα κερατομετρικά χαρακτηριστικά στα 3mm και 5mm από το κέντρο του κερατοειδούς, το λεπτότερο σημείο του κερατοειδούς, το βάθος του προσθίου θαλάμου και τη γωνία Κάππα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εξάγονται με τη μορφή τεσσάρων τοπογραφικών χαρτών:

- *Anterior float*. Χάρτης ανύψωσης της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδή.
- *Posterior float*. Χάρτης ανύψωσης της οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδή. Σε αντίθεση με τους τομογράφους της τεχνολογίας Placido, ο Orbscan φέρει το πλεονέκτημα της αναγνώρισης πρώιμων εκτασιών του οπίσθιου κερατοειδή.

- *Keratometric Map*. Χάρτης κερατομετρίας για την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή.
- *Thickness Map*. Χάρτης παχυμετρίας.

Υπογραμμίζονται οι ενδείξεις μη φυσιολογικής μορφολογίας του κερατοειδούς στην τοπογραφία Orbscan:

- Λεπτότερο σημείο με πάχος μικρότερο από 470μm. Επίσης, ύποπτη θεωρείται η αναντιστοιχία του λεπτότερου σημείου με το σημείο μέγιστης ανύψωσης στον οπίσθιο κερατοειδή.
- Στους χάρτες οπίσθιας ανύψωσης μία απόκλιση μεγαλύτερη από 100μm μεταξύ του ανώτερου και κατώτερου σημείου, κερατομετρικές ενδείξεις μεγαλύτερες των 46 D σε συνδυασμό με το μοτίβο του ασύμμετρου παπιγιόν θέτουν την υποψία εκτασίας.
- Μία διαφορά πάνω από 3D από το ανώτερο στο κατώτερο τεταρτημόριο της κεντρικής ζώνης των 3mm, διαμορφώνοντας την κάθετη κόμη, τη συχνότερη εκτροπή του κερατόκωνου.
- Μία διαφορά μεγαλύτερη από 1,5D στην κεντρική ζώνη των 3mm και μεγαλύτερη από 2D στην κεντρική ζώνη των 5mm μεταξύ του χάρτη της πρόσθιας BFS και της οπίσθιας BFS σημειώνεται ως μη αναμενόμενη σε φυσιολογικούς κερατοειδείς.

2.2.4. Τοπογραφία Scheimpflug

Με την τεχνολογία Scheimpflug (τομογράφοι Pentacam, Galilei, Sirius), μία περιστρεφόμενη κάμερα λαμβάνει διατομές του κερατοειδούς -φωτιζόμενες από, επίσης, περιστρεφόμενους φωτοδιόδους μπλε φωτός στα 475nm- υπό διαφορετικές γωνίες σε σχέση με τον οπτικό άξονα. Οι τομογράφοι διαθέτουν μία δευτερή μπροστινή κάμερα, η οποία μετρά το άνοιγμα της κόρης σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού. Η τεχνολογία αυτή, κατορθώνει την τρισδιάστατη απεικόνιση του κερατοειδούς με αυξημένη ακρίβεια και σε περιπτώσεις έντονων κερατοειδικών ανωμαλιών. Υπολογίζεται η διασπορά φωτός κατά μήκος του οπτικού άξονα για την αξιολόγηση του τμήματος από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς ως την οπίσθια επιφάνεια του φακού. Για το λόγο αυτό, οι τομογράφοι της τεχνολογίας Scheimpflug θεωρούνται οι πιο ευαίσθητοι στην ανίχνευση πρώιμου κερατόκωνου. Μειονεκτήματα των τομογράφων Pentacam/ Galilei είναι η παρεμβολή δεδομένων στην κορυφή του κερατοειδούς και πιθανή ανακρίβεια μετρήσεων σε περιοχές απότομης μεταβολής των ανυψώσεων του κερατοειδούς.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά τομογράφων Pentacam, Galilei, Orbscan. (Becky, et al., 2023)

ΤΟΜΟΓΡΑΦΟΣ	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΣΚΩΝ PLACIDO	ΣΗΜΕΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ/ ΣΑΡΩΣΗ	ΧΡΟΝΟΣ ΣΑΡΩΣΗΣ
ORBSCAN II/IIz (Bausch and Lomb)	Σάρωση σχισμής και δίσκοι Placido	40	9.000	1,5s
PENTACAM (HR/Oculus)	Περιστρεφόμενη κάμερα Scheimpflug	0	>25.000	<2s
GALILEI (Ziemer Ophthalmology Co)	Διπλή περιστρεφόμενη κάμερα Scheimpflug και δίσκοι Placido	20	122.000	1-2s
SIRIUS (Construzione Strumenti Oftalmici, Florence, Italy)	Περιστρεφόμενη κάμερα Scheimpflug και δίσκοι Placido	22	21.632 στον πρόσθιο και 16.000 στον οπίσθιο κερατοειδή	1s

Συνήθως η λήψη των αποτελεσμάτων στους τοπογράφους τεχνολογίας Scheimpflug γίνεται μέσω μίας σειράς τεσσάρων έγχρωμων χαρτών (Αξονικός ή Οβελιαίος /Axial, Sagittal, Πρόσθιας Ανύψωσης / front, Παχυμετρίας του κερατοειδούς και Οπίσθιας Ανύψωσης/ Elevation back. (Sridhar & Tripathy , 2023)

2.2.4.I. Τομογράφος Pentacam (Oculus, Wetzlar, Germany)

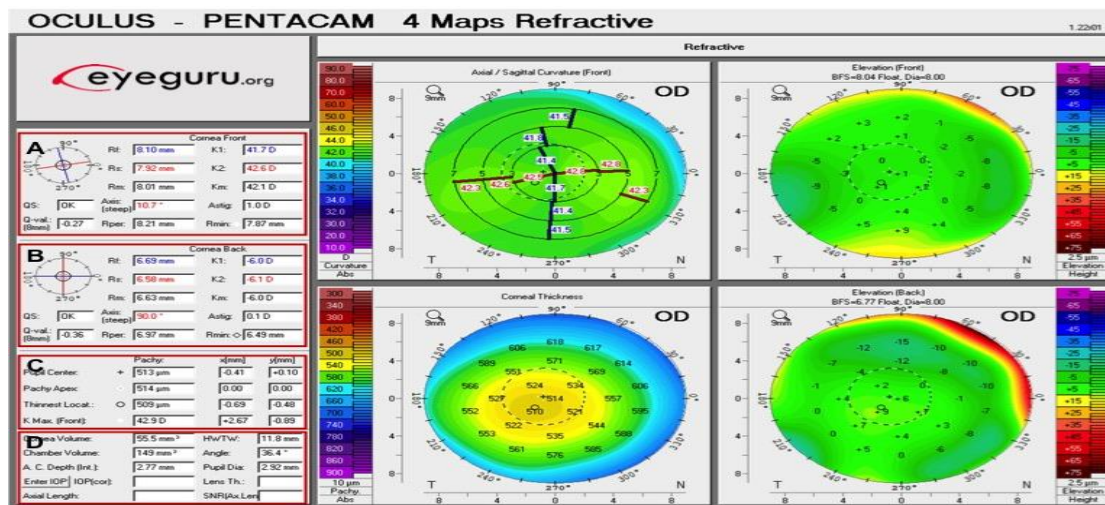
Εικόνα 16. Τομογράφος Pentacam (2002).

<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:AND9GcSNsEx0f-sQjLPpL5aBk-MHYMqdxB1zcpeOYA&w=1000&h=1000&from=webp&source=images&imgg=1&itg=1>



Εικόνα 17. Οι τέσσερις διαθλαστικοί χάρτες στον τοπογράφο Pentacam.

<https://eyeguru.org/wp-content/uploads/2020/04/Normal-Pentacam.jpg>



Για την ανάγνωση των συγκεκριμένων τοπογραφικών χαρτών επεξηγούνται οι μεταβλητές της αριστερής στήλης της εικόνας 17:

-QS : Δείκτης ποιότητας των μετρήσεων. Αν δεν εμφανίζεται η ένδειξη OK, οι μετρήσεις δεν είναι αξιόπιστες και πρέπει να επαληθευτούν.

- Κερατομετρικές ενδείξεις. K1 θεωρείται ο επίπεδος μεσημβρινός και K2 ο κυρτός μεσημβρινός. Μετεγχειρητικά της διόρθωσης μυωπίας η K1 δεν πρέπει να είναι μικρότερη

από 34D και στη διόρθωση της υπερμετρωπίας, η K2 δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 48D. (OCULUS, 2024)

- *Κερατοειδικός αστιγματισμός*. Στον συνολικό κερατοειδικό αστιγματισμό προσμετράται και αυτός της οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς και συγκρίνεται με τον αστιγματισμό της διάθλασης. Διαφορά ανάμεσα στον κερατοειδικό αστιγματισμό και στην τελική διάθλαση μπορεί να οφείλεται σε φακικό αστιγματισμό, διαταραχή του δακρυϊκού φιλμ ή θόλωση του κρυσταλλοειδούς φακού.

- ***Belin Ambrosio Enhanced Ectasia Display (BAD)***. Ο χάρτης βελτιωμένης οπτικοποίησης εκτασίας συνδυάζει δεδομένα από τον τοπογράφο Pentacam, όπως παχυμετρία, κάθετη παρεκτόπιση του λεπτότερου σημείου ως προς την κορυφή και ανύψωση πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας για οφθαλμούς που δεν έχουν υποστεί διαθλαστική επέμβαση. Έτσι, παράγονται δύο χάρτες ανύψωσης, με τον ένα να στηρίζεται σε μία *ιδανική σφαίρα αναφοράς (best-fit sphere)* και τον άλλον σε μία *βελτιωμένη σφαίρα αναφοράς (Enhanced best-fit sphere)*. Από τη διαφορά της ανύψωσης στους δύο χάρτες, είναι δυνατόν να εντοπιστεί η προεξοχή του κώνου, ειδικά στον πρώιμο κερατόκωνο. Έχει αποδειχθεί ότι η απόσταση του λεπτότερου σημείου του κερατοειδούς και του γεωμετρικού κέντρου, αλλά και ο *ρυθμός λέπτυνσης της κερατοειδικής επιφάνειας για κάθε μεσημβρινό μιας μοίρας (PPI)* είναι σαφώς μεγαλύτεροι στους κερατοκωνικούς ασθενείς. Τα δεδομένα της εξέτασης, τα οποία λαμβάνονται από τις ανακλάσεις είκοσι δύο δακτυλίων στο λεπτότερο κερατοειδικό σημείο, συγκρίνονται με τις καμπύλες που αναπαριστούν το *χωρικό προφίλ του κερατοειδούς (CTSP)* και η *ποσοστιαία αύξηση του πάχους (PTI)*. Οι μετρήσεις του εξεταζόμενου οφθαλμού αναπαριστώνται με μία κόκκινη συνεχόμενη γραμμή σε σύγκριση με τις δύο διακεκομμένες μαύρες. Οι δείκτες CTSP, PTI υπολογίζονται για τον μέσο κερατοειδικό όγκο και για τους μεσημβρινούς με την ελάχιστη και τη μέγιστη ποσοστιαία αύξηση πάχους. Ο δείκτης Ambrosio Relational Thinnest (ART) υπολογίζεται ως η πιο μικρή παχυμετρική τιμή διαιρούμενη με την αναμενόμενη για τον γενικό πληθυσμό παχυμετρική τιμή για το ελάχιστο (ART -Min), τον μέσο όρο (ART -Mid) και το μέγιστο (Art-Max). Επιπρόσθετα, οι δείκτες διαφοροποίησης D (Deviation), ταυτοποιούν τους κερατοκωνικούς, με άνω των 95% ευαισθησία. Συγκεκριμένα, οι δείκτες D είναι οι κάτωθι:

-Df: Σταθερή απόκλιση από την κύρια πρόσθια ανύψωση

-Db: Σταθερή απόκλιση από την κύρια οπίσθια ανύψωση

-Dp: Σταθερή απόκλιση από τη μέση παχυμετρική διακύμανση

-Dt: Σταθερή απόκλιση από το μέσο του λεπτότερου κερατοειδικού σημείου

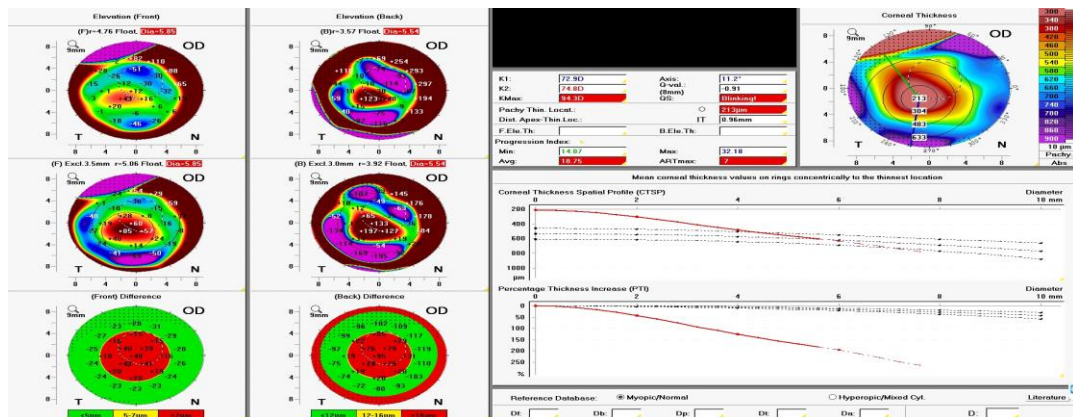
-Dy: Σταθερή απόκλιση από τη μέση μετατόπιση του λεπτότερου κερατοειδικού σημείου στον κάθετο άξονα

-Da: Σταθερή απόκλιση από το μέσο πάχος του χάρτη Ambrosio

-D: Συνολική ανάλυση αναγωγής των παραπάνω παραμέτρων βάση δεδομένων από φυσιολογικούς και κερατοκωνικούς οφθαλμούς. Οι δείκτες αυτοί ποσοτικοποιούνται σε SD. Συνεπώς, τιμές μεγαλύτερες ή ίσες του 1,6SD από τον μέσο όρο χρωματίζονται κίτρινες, μεγαλύτερες ή ίσες του 2,6SD από τον μέσο όρο κόκκινες και μικρότερες του 1,6SD από τον μέσο όρο εμφανίζονται λευκές. Αξίζει να σημειωθεί το ενδεχόμενο, οι επιμέρους παράμετροι D να εμφανίζονται κίτρινες (ύποπτες) αλλά η D να είναι εντός των φυσιολογικών ορίων.

Εικόνα 18. Belin Ambrosio map

<https://rainbowoptometry.com/images/pentacam3.jpg>



Οι πάνω δεξιά και αριστερά χάρτες της εικόνας 18 αντίστοιχα εκφράζουν την ανύψωση του κερατοειδούς σε σχέση με μία ιδανικής εφαρμογής σφαίρα (η διάμετρος και η ακτίνα καμπυλότητας σημειώνονται επάνω από τον κάθε χάρτη) για την μπροστινή και την οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδούς. Κάτω ακριβώς, βρίσκονται οι χάρτες απόκλισης, ο πρόσθιος δεξιά και ο οπίσθιος αριστερά, οι οποίοι εμφανίζουν τα ίδια υψομετρικά δεδομένα από τη εξέταση αλλά με βάση τη βελτιωμένη ιδανική σφαίρα. Για τη δημιουργία της βελτιωμένης ιδανικής σφαίρας με οπτική ζώνη διαμέτρου 8mm, δεν λαμβάνονται υπόψη τα 3,5-4mm γύρω από το λεπτότερο κερατοειδικό σημείο (ζώνη αποκλεισμού). Η ζώνη αποκλεισμού εμφανίζεται σε έναν κόκκινο κύκλο ανάλογης διαμέτρου με τον αστιγματισμό και δεν μεταβάλλεται. Τέλος, υπολογίζεται η διαφορά στις τιμές ανύψωσης της ιδανικής και της

βελτιωμένης ιδανικής σφαίρας, για τη διάκριση φυσιολογικών και κερατοκωνικών κερατοειδών.

Οι επόμενοι δύο χάρτες, αξιολογούν τη σχετική αλλαγή ανύψωσης με αφετηρία την κορυφή του κερατοειδούς και σταδιακή αύξηση διαμέτρου κατά 0,4mm. Το χωρικό προφίλ του κερατοειδούς (CTSP), είναι ενδεικτικό της προοδευτικής πάχυνσης από το κέντρο του κερατοειδούς και κατά μήκος των ομόκεντρων δακτυλίων. Ο δείκτης ΡΤΙ, υπολογίζει την ποσοστιαία αλλαγή του πάχους από το λεπτότερο σημείο προς την περιφέρεια. Μία τριχρωματική κλίμακα αναπαριστά τις διαφορές αυτές με το πράσινο να χρωματίζει μία φυσιολογική περιοχή με διαφορά ανύψωσης από 6μ στην πρόσθια και 8μ στην οπίσθια επιφάνεια, το κίτρινο μία ύποπτη περιοχή με διαφορά ανύψωσης από 6-12μ στην πρόσθια και 8-20μ στην οπίσθια επιφάνεια και το κόκκινο μία μη φυσιολογική περιοχή με διαφορά ανύψωσης από 12μ στην πρόσθια ή 20μ στην οπίσθια επιφάνεια. Έντονη και γρήγορη μεταβολή του πάχους από το κέντρο προς την περιφέρεια υποκρύπτει πρώιμη εκτασία κερατοειδούς. (Espinoza , et al., 2023)

-The Equivalent K Reading (EKR) Map. Αξιοποιεί πληροφορίες από την πρόσθια και οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδούς για να εκφράσει σε διοπτρίες τη δύναμη σε μία κεντρική ζώνη 8mm του κερατοειδούς. Αντιπροσωπεύει τις ισοδύναμες κερατομετρικές μετρήσεις, αντισταθμίζει την οποιαδήποτε απόκλιση της ισχύος του οπίσθιου κερατοειδούς από τις μέσες τιμές και μεταβάλλει ανάλογα τη δύναμη της πρόσθιας επιφάνειας. Με βάση τη ζώνη που επιλέγεται, τα δεδομένα που εμφανίζει μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό ενδοφακών SRKT, Holladay I, Hoffer Q, κλπ. για επεμβάσεις καταρράκτη, για κερατοκωνικούς ασθενείς και για διαθλαστικές επεμβάσεις.

Εικόνα 19. Equivalent K Reading map

https://static.wixstatic.com/media/6454f7_a4e8e8ed9bad436fb54cabd2f38c73a1~mv2.png/v1/fill/w_901,h_352,.ai_c,q_85,enc_auto/6454f7_a4e8e8ed9bad436fb54cabd2f38c73a1~mv2.png



Ο πίνακας πάνω αριστερά στην εικόνα 19 περιλαμβάνει τη μέση ισοδύναμη τιμή EKR65 που αντιστοιχεί στο 65% της ισχύος του κερατοειδούς στα κεντρικά 4,5mm. Επιπλέον,

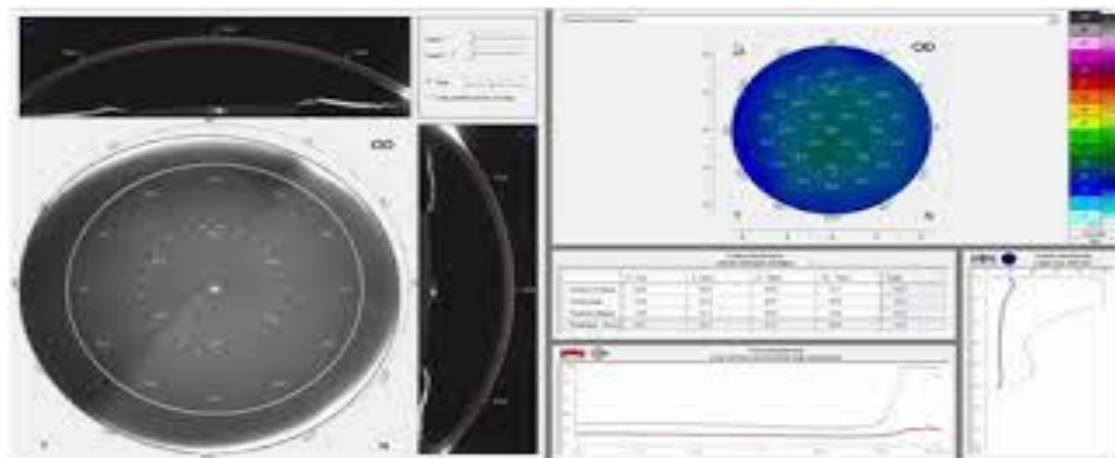
υπολογίζεται ο παράγοντας ασφαιρικότητας Q του κερατοειδούς, για την εκτίμηση της κλίσης του κερατοειδούς που είναι υπεύθυνη για τη σφαιρική εκτροπή. Αύξηση του παράγοντα Q συνεπάγεται αύξηση της θετικής σφαιρικής εκτροπής. Μία άνοδος της θετικής σφαιρικής εκτροπής είναι φυσιολογική και αναμενόμενη, σύμφωνα με τη μορφολογία του κερατοειδή. Το γράφημα πάνω δεξιά, αναπαριστά με μπλε χρώμα την γραφική παράσταση της μέσης τιμής EKR ως προς τη διάμετρο της επιλεχθείσας ζώνης, με κόκκινο χρώμα τη μέση αξονική ακτίνα ως προς τη διάμετρο της ζώνης και με πράσινο χρώμα τη μέση αξονική ακτίνα καμπυλότητας του δακτυλίου της ζώνης ως προς τη διάμετρο της ζώνης. Με μπλε απεικονίζονται οι τιμές της διαθλαστικής ισχύος της ζώνης από το κέντρο προς την περιφέρεια. Το διάγραμμα κάτω αριστερά απεικονίζει τη συχνότητα της ισχύος EKR στην επιλεγμένη ζώνη. Είναι σύνηθες να δημιουργούνται έντονες κορυφώσεις εύρους 2-3 διοπτριών. Ο κεντρικός κάτω πίνακας είναι αποτέλεσμα του επαναπροσδιορισμού του 65% των τιμών EKR σύμφωνα με το ελάχιστο εύρος των τιμών. Ο κατώτερος δεξιός χάρτης Equivalent K-Reading Map χρησιμοποιεί δεδομένα από την πρόσθια και οπίσθια επιφάνεια, τον νόμο του Snell και επαναπροσδιορίζει τις απαραίτητες τιμές για τον υπολογισμό των ενδοφακών.

Με διακεκομμένες γραμμές στον χάρτη παχυμετρίας, κάτω αριστερά, προσδιορίζεται η θέση της κόρης ως συνάρτηση των συντεταγμένων x,y. Η εύρεση της θέσης της κόρης είναι πολύ χρήσιμη στον υπολογισμό της γωνίας k, δηλαδή της γωνίας μεταξύ του κέντρου της κόρης και του άξονα της όρασης. Κατώτερη μετατόπιση της κάθετης συντεταγμένης σε συνδυασμό με μεγάλη διαφορά του οπτικού άξονα και του κέντρου του κερατοειδούς, λογίζονται ως ένδειξη κερατόκωνου. Γενικά, το λεπτότερο σημείο του κερατοειδούς θα πρέπει να βρίσκεται κεντρικά ή πλησίον του οπτικού άξονα. Η μεταβλητή HWTW αντιπροσωπεύει την απόσταση από το ένα άκρο του σκληροκερατοειδούς ορίου στο άλλο και πληροφορεί για τη γωνία άλφα μεταξύ του οπτικού κέντρου και του οπτικού άξονα.

- **DENSITOMETRY MAP.** Ο χάρτης αυτός χρησιμεύει στον εντοπισμό και τη σύγκριση του βάθους της κερατοειδικής θολερότητας, ειδικά μετά από διαθλαστικές επεμβάσεις. Διαιρεί τον κερατοειδή σε διάφορα βάθη και ζώνες έως τα 12mm . Οι περιοχές με την πιο έντονη θολερότητα σημαίνονται με κρυστάλλους και η γύρω περιοχή οριοθετείται από έναν κύκλο και περιβάλλεται από ένα τετράγωνο. (OCULUS, 2024)

Εικόνα 20. Densitometry map πριν από διαθλαστική επέμβαση.

<https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRUdhrGjmkqAvvK5fClwo5Qut8YKbBkzCnCUA&...>



- **Σύγκριση μετρήσεων των τοπογράφων Orbscan II, Pentacam.**

Σε μελέτη για τη σύγκριση των μετρήσεων των τοπογράφων Orbscan II, Pentacam που δημοσιεύτηκε τον Μάιο 2022 στο Korean Journal of Ophthalmology από τους Kim, Jun.Τριάντα οφθαλμοί από τριάντα ασθενείς με μέση ηλικία τα 66,5 έτη του νοσοκομείου Severance, που επρόκειτο να υποβληθούν σε επέμβαση αφαίρεσης καταρράκτη. Από την έρευνα αποκλείστηκαν ασθενείς με οφθαλμικές παθήσεις και επεμβάσεις, οφθαλμικά τραύματα και χρήση φακών επαφής κατά την προηγούμενη εβδομάδα από την εξέταση. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν την ίδια ημέρα από τον ίδιο εξεταστή. Ελέγχθηκε η συμφωνία των μέσων τιμών κερατομετρίας ($K_f+K_s/2$), παχυμετρίας και οριζόντιας ορατής διάμετρος ίριδας (HVID). Το Orbscan έτεινε να υπολογίζει μεγαλύτερες κατά 0,7D τιμές κερατομετρίας σε σχέση με το Pentacam. Γενικότερα, το Orbscan αποδεικνύεται ότι μετρά μεγαλύτερη διαθλαστική ισχύ κερατοειδή πιθανώς λόγω της διαφορετικής τεχνολογίας που εφαρμόζει και του μεγαλύτερου χρόνου λήψης της μέτρησης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα της δακρυϊκής στιβάδας και να εμφανίζει αναληθή δεδομένα. Ισχυρή συμφωνία εμφάνισαν οι τιμές για την HVID και CCT, αν και το Pentacam έτεινε να μετρά μεγαλύτερο κεντρικό πάχος. (Ikhyun & Yi Kim, 2022)

2.2.4. II Τομογράφος Galilei Dual Scheimpflug Analyzer (Ziemer, Biel, Switzerland)

Πρόκειται για νεότερη συσκευή από το Pentacam με σημαντικά πλεονεκτήματα τη μεγάλη επαναληψιμότητα και την αντιστάθμιση της αποκέντρωσης του οφθαλμού, λόγω μετακίνησης του ασθενούς κατά τη λήψη των μετρήσεων.

Εικόνα 21. Τομογράφος Galilei

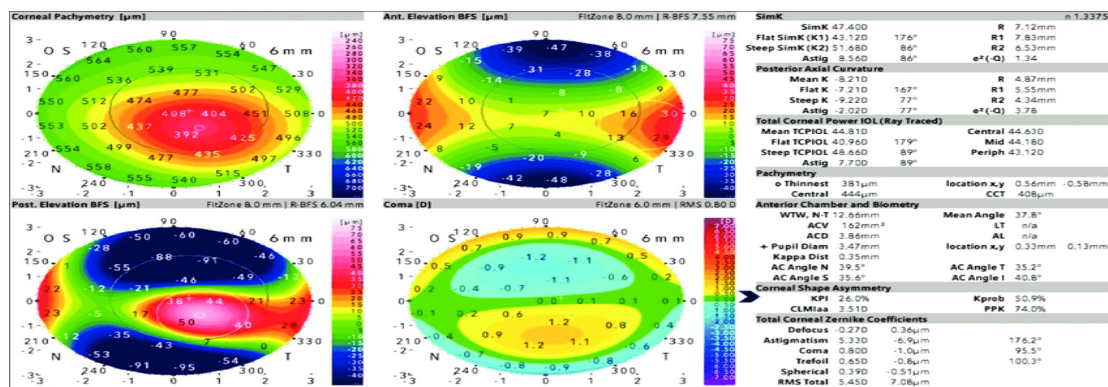
https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQO5q3H6Djjq-Y3AvO8YlaP2_GBUs6whme_mq&s



Χρησιμοποιεί μία μονοχρωματική πηγή φωτός που εκπέμπει στα 470nm και συνδυάζει την τεχνολογία Placido για βελτίωση ευαισθησίας με την περιστρεφόμενη Scheimpflug κάμερα για αυξημένη εξειδίκευση στην απεικόνιση. Λαμβάνει εικόνες από τις αντανακλάσεις πάνω από 12.200 σημείων της πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδή ανά δευτερόλεπτο με αυξημένη ακρίβεια χάρη στη διπλή κάμερα. Τα αποτελέσματα της τομογραφίας εμφανίζονται με τέσσερις χάρτες: καμπυλότητας, πάχους, πρόσθιας (8mm) και οπίσθιας (7,8mm) ανύψωσης με βάση την εφαρμογή της ιδανικής σφαίρας. Επιπλέον, ο τομογράφος Galilei έχει εισαγάγει την έννοια της ιδανικής τορικής και ασφαιρικής επιφάνειας (Best Toric and Aspheric surface), η οποία εναρμονίζεται περισσότερο με την επιφάνεια του κερατοειδούς εκμηδενίζοντας σχεδόν την ασφαιρικότητα και την τορικότητά του.

Εικόνα 22. Τοπογραφικοί χάρτες με το σύστημα Galilei.

<https://www.researchgate.net/publication/347263249/figure/fig3/AS:971028587085837@1608522664859/Galilei-topographic-map-Asphericity-asymmetry-index-AAI-difference-between-maximum.png>



- Ο χάρτης *True Corneal Power* βασίζεται στο σύστημα ιχνηλάτησης ακτινών. Ακολουθώντας τον νόμο του Snell, οι εισερχόμενες παράλληλες ακτίνες διαθλώνται μέσω της πρόσθιας και οπίσθιας κερατοειδικής επιφάνειας. Κατά αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται η συνολική ισχύς του κερατοειδούς και ο άξονας του αστιγματισμού.

Με τον χάρτη *True Corneal Power* συνδέονται οι εξής μεταβλητές:

- *ACP (Average central dioptric power)*: δείκτης της μέσης διοπτρικής δύναμης στο κέντρο του κερατοειδούς και

- *TCP (Total Corneal Power)*: η συνολική κερατοειδική ισχύς υπολογίζεται σύμφωνα με το σύστημα ιχνηλάτησης ακτινών πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας και δεδομένα παχυμετρίας.

Από τον χάρτη της οπίσθιας ανύψωσης υπολογίζεται ο δείκτης ασυμμετρίας της οπίσθιας επιφάνειας: *AAI (Posterior Asphericity Asymmetry Index)* ή *δείκτης Krakemann -Arce*.

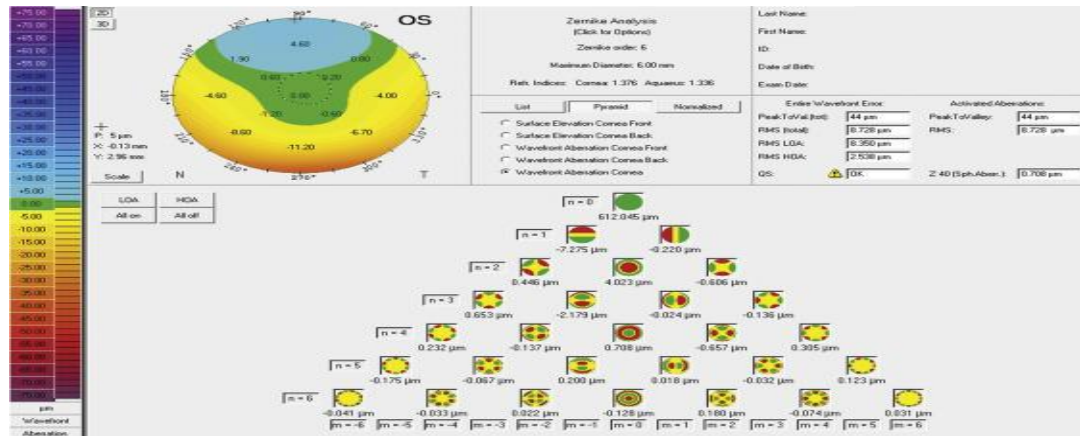
Αθροίζονται κατά απόλυτη τιμή η μέγιστη ανύψωση και η μέγιστη καθίζηση στα κεντρικά 6mm της ιδανικής τορικής και σφαιρικής επιφάνειας. Σε ασύμμετρους κερατοειδείς παρατηρείται μεγαλύτερη μεταβολή στην ανύψωση. Ειδικότερη τιμή *AAI* μεγαλύτερη από 25 μ m είναι ισχυρή ένδειξη κερατοκώνου. Με δεδομένο ότι οι κερατοκωνικές αλλαγές διαδραματίζονται πρώτα στην οπίσθια επιφάνεια, ο δείκτης ασυμμετρίας οπίσθιας επιφάνειας, αναδεικνύει τον τοπογράφο Galilei σε ιδιαίτερα ευαίσθητη συσκευή για την ανίχνευση του πρώιμου κερατόκωνου (*Form- Fruste*).

Ο τομογράφος Galilei, εξάγει πιο σαφή αποτελέσματα για την ανάλυση εκτροπών μετώπου κύματος για την πρόσθια και την οπίσθια επιφάνεια την κερατοειδούς αυτόματα και χωρίς την επίδραση του φακού, σε σχέση με τον τοπογράφο Pentacam. Γενικά, για τον υπολογισμό των εκτροπών υψηλότερης τάξης του κερατοειδούς (*HOA-Higher Order Aberrations*), τα δεδομένα μετώπου κύματος αναλύονται σε πολυώνυμα Zernike και κάθε επιφάνεια του κερατοειδούς χαρακτηρίζεται από το άθροισμα των είκοσι οχτώ πολυωνύμων Zernike. Οι εκτροπές του κερατοειδούς συνοψίζονται στην Αναφορά Μετώπου Κύματος (*Wavefront Report*). Οι συντελεστές Zernike για αστιγματισμό και αφεστίαση ορίζονται ως εκτροπές δεύτερης τάξης. Εκτροπές τρίτης τάξης σχετίζονται με την αφεστίαση στον κάθετο και τον οριζόντιο άξονα, σε καταστάσεις όπως το κόμη του κερατοειδούς στον κερατόκωνο και ο αστιγματισμός σε τρεις άξονες. Εξαιτίας της κόμης στον κερατόκωνο, η όραση των ασθενών επιδεινώνεται στο σκοτάδι, όπου η κόρη διαστέλλεται και οι εκτροπές αυξάνονται. Εκτροπές τέταρτης τάξης περιλαμβάνουν το τετράφυλλο, τον αστιγματισμό σε τέσσερις άξονες, τη σφαιρική εκτροπή και διαφοροποιούνται ανάλογα με τη μορφολογία του κερατοειδή. Παρόλα αυτά, απαιτείται

περαιτέρω διερεύνηση για τη συσχέτιση της τάξης των εκτροπών με το στάδιο του κερατόκωνου.

Εικόνα 23. Πολυώνυμα Zernike.

<https://ar.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0886335019300860-gr1.jpg>



Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS/ Root Mean Square Error ($\mu\text{m}/\text{mm}^2$) είναι η απόκλιση της ομαλής μορφολογίας του κερατοειδούς σε σχέση με την ιδανική τορική και ασφαιρικής επιφάνεια. Το RMS/A (Root Mean Square Error/ Area) αναφέρεται στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα για κάθε περιοχή που εξετάζεται και υπό κανονικές συνθήκες είναι χαμηλό. Τιμές RMSf/ A (Root Mean Square Error/ front Area) μεγαλύτερες των $0,13 \mu\text{m}/\text{mm}^2$ για την πρόσθια επιφάνεια και τιμές RMSb/ A (Root Mean Square Error/ behind Area) μεγαλύτερες των $0,269 \mu\text{m}/\text{mm}^2$ για την οπίσθια επιφάνεια σχετίζονται με ύπαρξη κερατόκωνου. (Hoopes , et al., 2019)

2.2.4.III. Τομογράφος Sirius (Construzione Strumenti Oftalmici, Florence, Italy)

Εικόνα 24. Τομογράφος Sirius+.

https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSW1EQR_b2n6HzxvMpCHI0xu7a1GOGSeVrBaw&s



Συνδυάζει την τεχνολογία Placido με την κάμερα Scheimpflug και χρησιμοποιεί πηγή μπλε φωτός για να λαμβάνει μετρήσεις από 21.632 σημεία στον πρόσθιο κερατοειδή και 16.000 σημεία στον οπίσθιο κερατοειδή. Αναλύει σε βάθος τη μορφολογία του κερατοειδή και παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για την ταξινόμηση του κερατόκωνου σε κανονικό κερατοειδή (normal), ύποπτο (suspect) για κερατόκωνο, κερατόκωνο (keratoconus) και ανώμαλο κερατοειδή (abnormal). Επιπρόσθετα, διαθέτει λειτουργία μέτρησης της διαμέτρου και εύρεσης του κέντρου της κόρης σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού (αξιοποιείται για διαθλαστικές επεμβάσεις, μείβογραφίας και ανάλυσης του δακρυϊκού φιλμ (Non Invasive Break Up Time). Εμφανίζει πιο αναλυτικά από τους υπόλοιπους τοπογράφους τις μετρήσεις του προσθίου θαλάμου και δεδομένα παχυμετρίας για ολόκληρο τον κερατοειδή, ιδιαίτερα χρήσιμα για περιπτώσεις κερατοπλαστικής και εναπόθεσης κερατοειδικών δακτυλίων.

Η ανάλυση της διάθλασης (Refractive Analysis) προκύπτει από την εκτίμηση των εκτροπών μέσω μιας κόρης εισόδου η θέση της οποίας ταυτίζεται με αυτήν της κόρης του εξεταζόμενου. Έτσι, η μέση δύναμη κόρης (Mean Pupil Power) αντιστοιχεί στη συνολική διοπτρική ισχύ του κερατοειδούς και η σφαιρική εκτροπή (Longitudinal Spherical Aberration- LSA) αποτελεί εκτροπή τέταρτης τάξης. Σημειώνεται ότι ο κύλινδρος είναι αποκλειστικά κερατοειδικής προέλευσης.

Μαζί με τους τοπογραφικούς χάρτες, στις μετρήσεις με τον τοπογράφο Sirius+ εμφανίζονται και οι παρακάτω μεταβλητές:

- *Keratoconus Vertex (front and back)- KVf/ KVb* : Το υψηλότερο σημείο της εκτασία στον χάρτη πρόσθιας και οπίσθιας ανύψωσης, αντίστοιχα.

- *Baiocchi- Calossi -Versaci -BCV front and back index*. Όμοια και με τον τοπογράφο Galilei για την ανάλυση των εκτροπών υψηλής τάξης σε πολυώνυμα Zernike. Ο δείκτης BCV είναι το διανυσματικό άθροισμα των BCVf, BCVb. (Sahu, 2022)

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων τοπογράφων Pentacam και Sirius.**

Οι Abdi, Atighehchian, Farsiani δημοσίευσαν τον Οκτώβριο 2023 την έρευνά τους αναφορικά με τη σχετικότητα των μετρήσεων που λαμβάνονται από τους τοπογράφους της τεχνολογίας Scheimpflug, Pentacam και Sirius. Στο δείγμα των μελετητών συμπεριλήφθηκαν τριάντα άτομα (δεκατρείς άνδρες και δεκαεπτά γυναίκες με μέση ηλικία τα 29 έτη), των οποίων εξετάστηκαν αμφότεροι οι οφθαλμοί πρώτα από τον τοπογράφο Pentacam και μετά από τον Sirius, χωρίς να έχει προηγηθεί μυδρίαση. Οι συμμετέχοντες ήταν υγιείς και

υποψήφιοι για διαθλαστική επέμβαση στο Τμήμα Οφθαλμολογίας του Οφθαλμικού Νοσοκομείου Farabi, στο Ιράν. Από την έρευνα αποκλείστηκαν άτομα με κερατεκτασία, ιστορικό οφθαλμικής επέμβασης, κερατοειδοπάθεια, βλεφαροπάθεια, χρήση μαλακών φακών επαφής για πάνω από δύο εβδομάδες και σκληρών αεροδιαπερατών για πάνω από τέσσερις εβδομάδες. Όλες οι μετρήσεις εκτελέστηκαν από τον ίδιο εξεταστή, την ίδια ημέρα και έχοντας εξασφαλίσει την αποδεκτή ποιότητα εικόνας. Τουλάχιστον τρεις λήψεις αποθηκεύτηκαν για κάθε οφθαλμό και τελικά επιλέχθηκε η εικόνα με την καλύτερη ανάλυση. Για τη συσχέτιση των μετρήσεων σχεδιάστηκε το γράφημα συμφωνίας Bland-Altman. Στην εύρεση του λεπτότερου σημείου του κερατοειδούς, υπήρξε συμφωνία μεταξύ των τοπογράφων σε ποσοστό 95%, με αμυδρή υπεροχή στην ακρίβεια του Sirius. Αντίστοιχα, οι μετρήσεις για το βάθος του προσθίου θαλάμου ACD και για τις κερατομετρικές ενδείξεις Fkm ήταν σύμφωνες στο 95% των περιπτώσεων. Η μέτρηση της οριζόντιας ορατής διαμέτρου της ίριδας γίνεται μέσω φωτογραφιών της ίριδας που λαμβάνονται από την κάμερα του Pentacam. Στον αντίποδα, ο Sirius υπολογίζει την οριζόντια ορατή διάμετρο ίριδας από την απόσταση του δεξιού και αριστερού άκρου της ίριδας σε γκρι κλίμακα από την απεικόνιση στον οριζόντιο μεσημβρινό στο κέντρο του κερατοειδούς. Ο Sirius υπολόγισε μεγαλύτερη κατά 0,2mm περίπου αυτή τη διάμετρο σε σχέση με τον Pentacam. Συνοψίζοντας, και οι δύο τοπογράφοι αποδείχτηκαν αξιόπιστοι στη χαρτογράφηση του κερατοειδούς, εξασφαλίζοντας ισχυρή συμφωνία αποτελεσμάτων.

2.2.5. Τοπογράφος CASSINI LED CORNEAL TOPOGRAPHY, i-Optics, Hague, Netherlands

Η έγχρωμη τοπογραφία κερατοειδούς LED, γνωστή ως τοπογραφία κερατοειδούς CASSINI, η οποία πρωτοκυκλοφόρησε το 1997, κάνει την χαρτογράφηση του κερατοειδούς με βάση την ανακατασκευή από σημείο σε σημείο κατοπτρικών ανακλάσεων εξακοσίων εβδομήντα εννέα ψευδοτυχαίων έγχρωμων σημείων. Χάρη στα κόκκινα, κίτρινα, πράσινα LED που επιτρέπουν τον "τριγωνισμό" των σημείων και τον υπέρθυρο φωτισμό για την απεικόνιση των δεύτερων εικόνων Purkinje, λαμβάνονται μετρήσεις σημείο προς σημείο για τα 10mm προσθίου κερατοειδούς. Όσο αυξάνεται η ανύψωση σε ένα σημείο του κερατοειδούς, τόσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των σημείων. Η σχηματική αναπαράσταση του κερατοειδή είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των πολυωνύμων Zernike που παράγεται από την επαναλαμβανόμενη ανίχνευση ακτινών μέχρι να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές των γωνιών πρόσπτωσης και ανάκλασης. Ένα μέρος της δέσμης διασχίζει την πρόσθια επιφάνεια και ανακλάται από την οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδούς, ενισχυόμενο από

το υπέρυθρο σύστημα φωτισμού. Ο συγκεκριμένος τοπογράφος υπολογίζει άμεσα τον αστιγματισμό της οπίσθιας επιφάνειας (TCA) και τον συνδυάζει με αυτόν της πρόσθιας επιφάνειας για να υπολογίσει τον ολικό κερατοειδικό αστιγματισμό με μεγάλη ακρίβεια τόσο στη δύναμη όσο και στον άξονα του αστιγματισμού. Ο ολικός αστιγματισμός μετράται με παράλληλη ανίχνευση των ακτινών στα κεντρικά 3mm της πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας, εφαρμόζοντας τον νόμο του Snell. Η μέτρηση του ολικού αστιγματισμού με τον τοπογράφο Cassini είναι ανεξάρτητη του πάχους του κερατοειδούς.

Ο τοπογράφος Cassini υπερτερεί έναντι των άλλων συστημάτων, στην πυκνότητα δειγματοληψίας και την ανεξαρτησία από την παρουσία ακμών, όπως στην τοπογραφία Placido, χάρη στην οποία επιτυγχάνεται η ανακατασκευή και των μη συμμετρικών επιφανειών τοπογραφικά του κερατοειδούς μη περιστροφικά. Επιπροσθέτως, ο τοπογράφος αυτός, αξιολογεί, τη σταθερότητα του δακρυϊκού φιλμ, υπολογίζει την HVID και το μέγεθος της κόρης υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού.

Άλλο ένα σημείο υπεροχής του Cassini είναι η σχεδόν αμελητέα καθυστέρηση λήψης της επιθυμητής εικόνας (χρονική διάρκεια λήψης δύο δευτερόλεπτα) που συνεπάγεται ανεξαρτησία από μικροσακκαδικές κινήσεις, καθώς απλά αντανακλά φως σε σύγκριση με το Scheimpflug. Η ποιότητα της λήψης εκτιμάται αυτόματα από το λογισμικό και ποσοτικοποιείται η αξιοπιστία της. Η απεικόνιση ενός ανώμαλου κερατοειδή πιθανώς να είναι περιορισμένη ή συγκεχυμένη με την τεχνολογία Placido και ελλιπής, λόγω μειωμένης

παρέκτασης με Scheimpflug. Ακόμη, με την τοπογραφία Cassini, επιτυγχάνεται εξαιρετική ανάλυση των εκτροπών υψηλής τάξης.

Εικόνα 25. Τοπογράφος Cassini

<https://media.opthalmologyweb.com/m/27/images/3260747-2-400x300-4422-400x300.jpg>

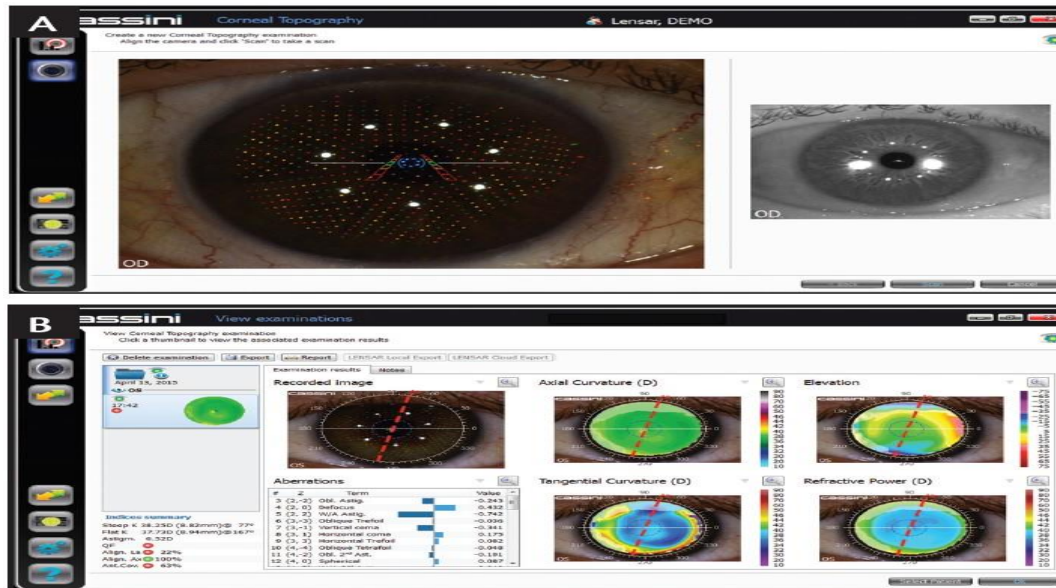


Η τεχνολογία Cassini αξιοποιείται ιδιαίτερα στην ορθή επιλογή και τοποθέτηση τορικών και πολυεστικών, κυρίως, ενδοφακών. Με ενδεδειγμένες μετρήσεις, λαμβάνεται στιγμιαία ο άξονας του κυλίνδρου με μέγιστη απόκλιση τριών μοιρών και το προβλεπόμενο μέγεθος ενδοφακού. Χάρη στον υπολογισμό των εκτροπών υψηλότερης τάξης, κρίνεται αν ο ασθενής είναι κατάλληλος για ένθεση πολυεστικού φακού. Οι προηγούμενες -διαθλαστικές και μη- επεμβάσεις, ο κερατόκωνος και η ξηροφθαλμία (στα σημεία έντονης αστάθειας παρατηρείται άνιση διάθλαση των ακτινών) είναι παράγοντες αποτρεπτικοί για ένθεση πολυεστικού ενδοφακού. Ακόμη, η εύρεση του μεγέθους και της επικέντρωσης της κόρης είναι ιδιαίτερα σημαντικές παράμετροι για την αντίληψη της κατανομής του φωτός μέσα από τις ζώνες του πολυεστικού ενδοφακού. Η λανθασμένη επικέντρωση του ενδοφακού μπορεί να προκαλέσει “φωτοστέφανα” και ανεπιθύμητες αντανάκλασεις, μειώνοντας την λειτουργικότητα του ασθενή. Ο Cassini, τέλος, υπολογίζει τις γωνίες άλφα

και κάππα για τη μεσοπική και τη φωτοπική κόρη. Μικρότερες γωνίες κάππα αποθαρρύνουν τον οφθαλμίατρο από την επιλογή πολυεστιακού ενδοφακού. (Ginting , et al., 2024)

Εικόνα 26. Τοπογραφικοί χάρτες από το σύστημα Cassini. Με τις μη διακριτές περιοχές σημείων δηλώνεται η ασυμμετρία του κερατοειδή.

<https://crstodayeurope.com/wp-content/themes/crste/assets/article-images/2015/07/ss7.jpg>



Γίνεται χρωματική αναπαράσταση της κατανομής της διαθλαστικής ισχύος από το κέντρο ως την περιφέρεια ή των χιλιοστών της καμπυλότητας του κερατοειδή για τον Αξονικό χάρτη και τον Τοπικής εφαπτομενικής διεύθυνσης χάρτη καμπυλότητας ή των microns για τον χάρτη Ανύψωσης. Ομαλές χαρακτηρίζονται οι μεταβολές μέχρι 0,5 διοπτριών της χρωματικής κλίμακας. Αντίθετα, απότομες θεωρούνται οι μεταβολές $\geq 2,0$ διοπτριών. Τα θερμά χρώματα, όπως κόκκινο, πορτοκαλί αναπαριστούν κυρτές επιφάνειες του κερατοειδή υψηλής διαθλαστικής ισχύος, ενώ τα ψυχρά χρώματα, πράσινο, μπλε αναπαριστούν πιο επίπεδες περιοχές.

Ο δείκτης κανονικότητας επιφάνειας (Surface Regularity Index- SRI) αυξάνεται σε περιπτώσεις ανώμαλης επιφάνειας κερατοειδούς λ.χ., ξηροφθαλμίας ή συνδρόμου υποτροπιάζουσας απόπτωσης επιθηλίου λόγω δυστροφίας Map Dot Fingerprint / Epithelial Basement Membrane Dystrophy - EBMD). Υπό κανονικές συνθήκες ο δείκτης αυτός είναι κατώτερος της μονάδας και μαζί με τον δείκτη ασυμμετρίας επιφάνειας SAI, αποτελούν διαγνωστικά εργαλεία του κερατόκωνου. (Ferreira , et al., 2021)

• ΣΥΓΚΡΙΣΗ PENTACAM HR- CASSINI LED CORNEAL TOPOGRAPHY

Αναδρομική μελέτη που δημοσιεύτηκε το 2019 στο PubMed Central από τους An,Cui et al. ερεύνησε τη συμφωνία των κερατοειδικών μετρήσεων μεταξύ του τοπογράφου Pentacam

HR της τεχνολογίας Scheimpflug και του τοπογράφου LED Cassini. Εξετάστηκαν 117 δεξιό οφθαλμοί από 117 υγιείς ασθενείς που επρόκειτο να υποβληθούν σε επέμβαση αφαίρεσης καταρράκτη από τον Ιούνιο έως τον Ιούλιο 2017. Η μέση ηλικία των ασθενών ήταν 53-76 έτη εκ των οποίων οι 34 ήταν άνδρες. Παθολογίες της πρόσθιας οφθαλμικής επιφάνειας όπως θόλωση του κερατοειδή, πτερύγια, στεάτια, έντονη ξηροφθαλμία, παθήσεις του επιπεφυκότα και του κόγχου αποτέλεσαν κριτήρια αποκλεισμού από την έρευνα. Πρώτα πραγματοποιήθηκε η τοπογραφία με τον τοπογράφο Cassini και μετά με τον Pentacam από τον ίδιο εξεταστή σε χρονικό διάστημα εντός δέκα λεπτών. Ελήφθησαν τρεις έγκυρες μετρήσεις από την κάθε συσκευή και υπολογίστηκε ο μέσος όρος του. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για την μέση κερατομετρία, την πιο επίπεδη και την πιο κυρτή κερατομετρική ένδειξη, τη δύναμη και τον άξονα του αστιγματισμού για την πρόσθια και την οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδούς. Για τη διανυσματική ανάλυση του αστιγματισμού οι μετρηθείσες τιμές μετατράπηκαν σε τιμές Jackson cross-cylinder J0-J45. Ο άξονας και η δύναμη του αστιγματισμού μετρήθηκαν 3 φορές και στη συνέχεια εκφράστηκαν σε J0-J45. Έπειτα, οι μέσες τιμές των J0-J45 μετατράπηκαν ξανά σε δύναμη και άξονα. Η συμφωνία ανάμεσα στις μετρηθείσες τιμές αποτυπώθηκε στο διάγραμμα Bland-Altman I. Υπήρξαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις μέσες τιμές αστιγματισμού πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας ήταν υψηλότερες στο Cassini. Η διαφορά Cassini- Pentacam στις μέσες τιμές του πρόσθιου κερατοειδούς ήταν 0,08D, για την επίπεδο μεσημβρινό η διαφορά ήταν 0,01D, για τον κυρτό μεσημβρινό η διαφορά άγγιξε 0,08D και 0.89D έως 1,02 για τη μέση κερατομετρία. Η διαφορά στον άξονα του πρόσθιου αστιγματισμού ήταν 3,88° και 0,11D για το μέγεθος του κυλίνδρου. Στον οπίσθιο κερατοειδή υπήρξε ταύτιση για τον επίπεδο μεσημβρινό. Όμως, η δύναμη για τον κυρτό μεσημβρινό, τη μέση κερατομετρία και τη γωνία και το ποσό του αστιγματισμού ήταν αυξημένα στο Cassini κατά 0,08D, 0.03D, 4,25° και 0,07Dc αντίστοιχα. Παρόλα αυτά η ποσότητα του υπολειπόμενου αστιγματισμού φάνηκε παρόμοια και στις δύο συσκευές. Το όριο συμφωνίας 95% αφορούσε τις -0,60-0,76D της πρόσθιας επιφάνειας και τις -0,26-0,32D της οπίσθιας επιφάνειας. Ως εκ τούτου, η συμφωνία των μετρήσεων θεωρήθηκε χαμηλή ίσως λόγω του διαφορετικού τρόπου λειτουργίας των συσκευών, της ακρίβειας και της βαθμονόμησής τους αλλά και του μεγαλύτερου χρόνου λήψης της μέτρησης μέσω Pentacam. Σε αυτό το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα εμπλέκονται παράγοντες όπως η μειωμένη σταθερότητα των οφθαλμών, η δυσκολότερη συνεργασία του ασθενούς, η αστάθεια του δακρυϊκού φιλμ και η θέση της κεφαλής. (Choun-Ki , et al., 2019)

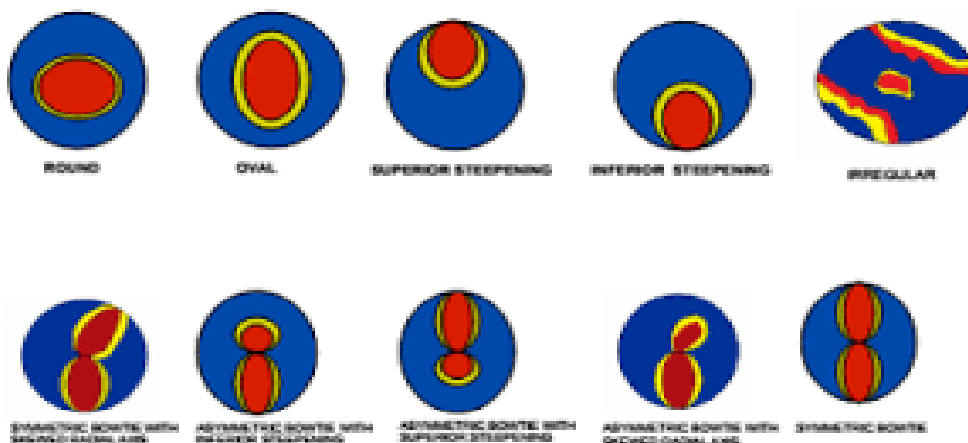
2.2.6 Ερμηνεία τοπογραφίας κερατοειδούς

- **ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΑ ΜΟΤΙΒΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΙΚΩΝ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ**

Διάφορα τοπογραφικά μοτίβα μπορεί να αναπαριστούν έναν φυσιολογικό κερατοειδή. Κατά κανόνα, κάθε άνθρωπος έχει ένα ορισμένο ποσό αστιγματισμού σύμφωνα με τον κανόνα, δηλαδή ο κάθετος μεσημβρινός είναι ελαφρώς πιο απότομος από τον οριζόντιο. Τοπογραφικά, παρατηρείται το “συμμετρικό παπιγιόν”, ίσοι σε μέγεθος λοβοί με τον ίδιο άξονα. Ακολουθούν επιπλέον μοτίβα ασυμμετρίας:

Εικόνα 27. Μοτίβα κερατοειδικών ανωμαλιών.

https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ6Q6eDH8Q8QP_9eF-cz-pINvAYnkvUdRW_SA&s%22s



- **Κυκλικό:** το κυρτότερο σημείο είναι μία θερμά χρωματισμένη κορυφή.
- **Ωοειδές:** το κυρτότερο σημείο του κερατοειδούς είναι μία θερμά χρωματισμένη ωοειδής ζώνη.
- **Ανώτερο κυρτό (SS-Superior Steep):** το κυρτότερο σημείο του κερατοειδούς βρίσκεται στο ανώτερο τμήμα του κερατοειδούς.
- **Κατώτερο κυρτό (IS-Inferior Steep):** το κυρτότερο σημείο του κερατοειδούς βρίσκεται στο κατώτερο τμήμα του κερατοειδούς.
- **Ανώμαλο (Irregular):** Μη προσδιορισίμο σχήμα, οι επίπεδες επιφάνειες αναμιγνύονται με τις κυρτές.

- *Συμμετρικό παπιγιόν (Symmetric bow-tie)*: Ισομεγέθεις και ομοαξονικοί λοβοί.

Χαρακτηριστικό ομαλού αστιγματισμού ή συμμετρικού κερατόκωνου.

- *Συμμετρικό παπιγιόν με λοξό ακτινωτό άξονα /Το “μοτίβο του ράθυμου 8” (SB/SRAX-Symmetric bow-tie with skewed radial axis)*: Πρόκειται για συμμετρικό παπιγιόν με λοξή γωνία μεταξύ των λοβών. Ο αστιγματισμός θεωρείται λοξός. Η γωνίωση είναι κλινικά σημαντική όταν είναι άνω των 22°.

- *Ασύμμετρο παπιγιόν/κατώτερο κυρτό (AB/IS -Asymmetric bow-tie /Inferior Steep)*: Ασύμμετρο παπιγιόν με μεγαλύτερο τον κατώτερο λοβό. Διαφορά των συμμετρικών τιμών στα κεντρικά 5mm, μεγαλύτερη των 1,5D χρήζει διερεύνησης. (Tăbăcaru, et al., 2020)

- **ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ**

Οι ενσωματωμένοι τοπογραφικοί δείκτες ποσοτικοποιούν την ανωμαλία της κερατοειδικής επιφάνειας, συμβάλλοντας στην διάγνωση των κερατοειδικών εκτασιών:

1. **AA (Analyzed Area)**: Ποσοστό περιοχής ανάλυσης. Επιδιώκεται το ποσοστό αυτό να είναι αυξημένο για την ανάλυση όσο το δυνατόν ευρύτερης περιοχής του κερατοειδούς.
2. **AK (Angle Kappa)**: Αναφέρεται στην τιμή της γωνίας Κάππα, δηλαδή της γωνίας μεταξύ του κορικού άξονα (γραμμή που συνδέει το σημείο προσήλωσης με το βοθρίο) και του άξονα της όρασης (γραμμή που διέρχεται κάθετα από την κόρη και εισόδου και το κέντρο καμπυλότητας του κερατοειδούς). Μία μεγάλη γωνία Κάππα είναι δυνατόν να προκαλέσει σφάλματα ευθυγράμμισης, υποδιόρθωση στη διαθλαστική χειρουργική και σφάλματα αποκέντρωσης πολυεστιακών ενδοφακών-άλως (halos).
3. **HVID (Horizontal Visible Iris Diameter)**. Η ορατή διάμετρος ίριδας από το ένα άκρο του σκληροκερατοειδούς ορίου στο άλλο. Εκφράζεται σε mm.
4. **SIMK (Simulated Keratometry)**: Υπολογίζει την καμπυλότητα στα κεντρικά 3mm.
5. **SIMKS (Simulated Keratometry steep)**: Ο πιο κυρτός μεσημβρινός του κερατοειδή στο κέντρο.
6. **SIMKF (Simulated Keratometry flat)**: Ο πιο επίπεδος μεσημβρινός, κάθετος στον SIMKS.
7. **Thinnest location/ Τοποθεσία λεπτότερου σημείου**: Πληροφορεί για το σημείο με το μικρότερο πάχος στον κερατοειδή. Σε συνδυασμό με τον παχυμετρικό χάρτη και

τη διοπτρική ισχύ μπορούν να ερμηνευτούν οι ασυμμετρίες στην επιφάνεια του κερατοειδούς.

Ο κάθε τοπογράφος αξιοποιεί διαφορετικούς τοπογραφικούς δείκτες.

- Για τον Pentacam υφίστανται οι παρακάτω:
 1. **ACD (Anterior Chamber Depth)**. Περιλαμβάνει το κεντρικό πάχος του κερατοειδούς, το βάθος του υδατοειδούς υγρού και τον συνολικό όγκο του πρόσθιου θαλάμου. (Sridhar & Tripathy , 2023)
 2. **CKI (Central Keratoconus Index)**: Δείκτης ύπαρξης κεντρικού κερατόκωνου. Υπολογίζει την αναλογία της κύριας ακτίνας καμπυλότητας σε έναν περιφερικό και στον κεντρικό δακτύλιο- Placido. Τιμές έως 1,03 είναι φυσιολογικές.
 3. **IHA (Index of Height Asymmetry)**: δείκτης ασυμμετρίας ύψους. Φανερώνει την κύρια διαφορά μεταξύ της κερατοειδικής ανύψωσης στο ανώτερο και κατώτερο ημισφαίριο στον οριζόντιο άξονα. Τιμές άνω των 19μm θεωρούνται μη φυσιολογικές και άνω των 21μm παθολογικές.
 4. **IHD (Index of Height Decentration)** : δείκτης του ύψους αποκέντρωσης. Υπολογίζει την κατακόρυφη αποκέντρωση από τον χάρτη ανύψωσης, σε έναν δακτύλιο 3mm. Τιμές μεγαλύτερες των 0,014 δεν είναι φυσιολογικές και μεγαλύτερες των 0,016 παθολογικές.
 5. **ISV (Index of Surface Variance)**: δείκτης της διαφοροποίησης της μορφολογίας του κερατοειδή. Υπολογίζει τη διαφορά διοπτρικής ισχύος σε πέντε ανώτερα και κατώτερα σημεία στα κεντρικά 3mm του κερατοειδή σε διάστημα 30°. Τιμές >37 είναι κίτρινες και θεωρούνται μη φυσιολογικές, ενώ >41 είναι παθολογικές.
 6. **IVA (Index of Vertical Asymmetry)** : δείκτης κατακόρυφης ασυμμετρίας επιφάνειας, εμφανίζει την κύρια διαφορά κυρτότητας μεταξύ ανώτερης και κατώτερης καμπυλότητας. Τιμές από 0,28 -0,32 θεωρούνται ύποπτες, ενώ μεγαλύτερες των 0,32 ενδεικτικές παθολογίας.
 7. **KI (Keratoconus Index)**: Ποσοστιαία πιθανότητα κερατόκωνου. Υπολογίζει την αναλογία ανάμεσα στις κύριες ακτίνες στο άνω και κάτω μισό του πρόσθιου κερατοειδή. Τιμές μεγαλύτερες από 20% θέτουν την υποψία κερατόκωνου, ενώ μεγαλύτερες από 30% εκφράζουν σοβαρή υποψία κερατόκωνου ή περιφερικής οριακής εκφύλισης (PMD).
 8. **Pupil**. Η διάμετρος και το κέντρο της κόρης ως συνάρτηση των x,y. Ιδιαίτερα χρήσιμο σε διαθλαστικές επεμβάσεις διόρθωσης υπερμετρωπίας.

9. **Q-value:** Ασφαιρικότητα κερατοειδούς. Μέτρηση της μέσης ασφαιρικότητας με τον τοπογράφο Pentacam σε διάμετρο έξι χιλιοστών για κάθε τεταρτημόριο (άνω, ρινικό, κάτω, κροταφικό) και μεσημβρινό (οριζόντιο και κάθετο). Αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε κερατοειδείς που δεν έχουν υποστεί διαθλαστική επέμβαση, σε αντίθεση με τιμές μεγαλύτερων της μονάδας.
- Για τον Galilei υπάρχουν οι παρακάτω δείκτες:
1. **CSI (Center/ Surround Index):** Εντοπίζει τη διαφορά ισχύος μεταξύ των κεντρικών και περιφερικών 3-5mm. Η επιφάνεια του κερατοειδούς διαιρείται ανά 45 μοίρες σε οχτώ τομείς και υπολογίζεται η ισχύς κάθε τομέα.
 2. **CLMI (Cone Location and Magnitude Index):** Εντοπισμός της θέσης και του μεγέθους του κώνου σε κάθε τύπο χάρτη.
 3. **DSI (Differential Sector Index):** Η μεγαλύτερη διαφορά ισχύος μεταξύ δύο τομέων. Χρήσιμος δείκτης για την ανίχνευση περιφερικών εκτασιών και ομαλού αστιγματισμού. Ωστόσο, δεν μπορεί να αξιολογηθεί μεμονωμένα σε υποψία κερατοειδικής εκτασίας.
 4. **IAI (Irregular Astigmatism Index):** δείκτης της διαφοροποίησης της αξονικής ισχύος ανάμεσα στους κεντρικούς δακτυλίους οποιουδήποτε μεσημβρινού. Υπολογίζεται ως η μέση τιμή όλων των αθροισμάτων της διακύμανσης αξονικής ισχύος για όλο τον κερατοειδή. Έχει υψηλή διαγνωστική αξία στον κερατόκωνο.
 5. **KISA% (Keratoconus Percentage Index):** Συνδυάζει τα δεδομένα από το την κεντρική καμπυλότητα K ,τον δείκτη I-S, το μέγεθος του ομαλού κερατοειδικού αστιγματισμού (AST) και του δείκτη του ανώμαλου αστιγματισμού SRAX. Ένα ποσοστό >100% αποτελεί διάγνωση κερατόκωνου.
 6. **KPI (Keratoconus Prediction Index):** υπολογίζει την πιθανότητα ύπαρξης εκτασίας με βάση τους δείκτες AA, CSI, DSI, IAI, OSI, SAI για την πρόσθια επιφάνεια. Με KPI ως 10%, ο κερατοειδής χαρακτηρίζεται φυσιολογικός ή ύποπτος για κερατόκωνο. Με KPI από 20% ως 30%, ο κερατοειδής χαρακτηρίζεται ύποπτος για κερατόκωνο ή κερατοκωνικός. Με KPI μεγαλύτερο από 30%, είναι πιθανή η παρουσία PMD.
 7. **OSI (Opposite Sector Index):** δείκτης της μεγαλύτερη διαφοράς ισχύος μεταξύ δύο απέναντι τομέων. Ανεπαρκής, ωστόσο, για τη διάγνωση του πρώιμου κερατόκωνου.
 8. **SAI (Surface Asymmetry Index):** Δείκτης ασυμμετρίας επιφάνειας. Υπολογίζει τη διαφορά διοπτρικής ισχύος των αντιδιαμετρικών σημείων ενός δακτυλίου και αποτελεί δείκτη ποσοτικοποίησης και παρακολούθησης της εξέλιξης του κερατόκωνου.

9. **SRI (Surface Regularity Index):** Το άθροισμα της διακύμανσης ισχύος σε δέκα κεντρικούς δακτυλίους, ενδεικτικό τοπικών ανωμαλιών. Μηδενικό SRI ταυτίζεται με απόλυτα ομαλό κερατοειδή.
- Ο Sirius εκτός των όσων αναφέρθηκαν αξιοποιεί τον δείκτη:
1. **S-I (Inferior -Superior):** Υπολογίζει τη διαφορά της μέσης τιμής της διοπτρικής δύναμης ανωτέρων και κατωτέρων ωρών. Τιμές μεγαλύτερες των 1,4D υποδεικνύουν υποκλινικό κερατόκωνο και μεγαλύτερες των 1,9D εμφανίζονται σε κλινικό κερατόκωνο. (Doctor , et al., 2020)

2.2.7. Οπτική Τομογραφία Συνοχής/ OCT Κερατοειδούς

Η Οπτική Τομογραφία Συνοχής αποτελεί μία μη επεμβατική και αναπαραγωγίμη μέθοδο χαρτογράφησης του κερατοειδούς. Οι εικόνες προκύπτουν άμεσα, ως αποτέλεσμα της μέτρησης της έντασης και της ηχούς της χρονικής καθυστέρησης του φωτός. Ο ιστός σαρώνεται και εντοπίζεται με χρήση laser στο εγγύς υπέρυθρο (850-1050nm), για να εξασφαλίζει την μέγιστη δυνατή διείσδυση στον υπό εξέταση ιστό. Οι σαρώσεις γυ λαμβάνονται ως συνάρτηση του αξονικού βάθους z. Έτσι, διενεργείται τομογραφική απεικόνιση της δομής του ζωντανού ιστού ανέπαφα και ανώδυνα.

Η λειτουργία του OCT βασίζεται στη συμβολομετρία χαμηλής συνοχής του οπισθίως ανακλώμενου φωτός. Η ανάλυση του OCT διακρίνεται σε αξονική 4-10μ και πλευρική 20-50μ. Ακριβώς, επειδή η αξονική διακριτική ικανότητα καθορίζεται από την ευρυζωνικότητα Δλ της φωτεινής πηγής και όχι από το εστιακό μέσο, το OCT υπερτερεί έναντι άλλων μεθόδων απεικόνισης, επιτυγχάνοντας υψηλή αξονική ανάλυση, παρά τη μικρή διάμετρο της κόρης. Η φωτεινή δέσμη από το laser αφού προσπέσει στον διαχωριστή δέσμης, διαιρείται σε δύο βραχίονες. Με αυτόν τον τρόπο, σχηματίζεται η δέσμη αναφοράς, που προκύπτει από ανάκλαση στο κάτοπτρο αναφοράς και η δέσμη του δείγματος, μετά από ανάκλαση στην επιφάνεια του δείγματος. Και οι δύο δέσμες υφίστανται οπίσθια σκέδαση και συμβολή, στη συνέχεια. Η ένταση της δέσμης που προκύπτει από τη συμβολή του προσπίπτοντος και ανακλώμενου φωτός καταγράφεται έμμεσα (λόγω της αυξημένης ταχύτητας του φωτός), σαν ηλεκτρικό σήμα, από τον φωτοαισθητήρα κι έτσι αποτυπώνεται η αξονική θέση των διαφορετικών στρωμάτων του κερατοειδούς. Διατίθενται τρεις κύριοι τύποι συστημάτων OCT:

- TD-OCT (Time Domain) με 400A–σαρώσεις/sec. Διαθέτει περιορισμένη συνολική ευαισθησία και προϋποθέτει αυξημένη δαπάνη φωτεινής ισχύος, καθώς το κάτοπτρο αναφοράς αναλύει ένα στενό πλαίσιο συνοχής της φωτεινής δέσμης.
- SD/FD-OCT (Spectral Domain/ Fourier Domain) με 18.000-70.000 A-σαρώσεις/sec. Σε αυτόν τον τύπο OCT το κάτοπτρο αναφοράς παραμένει σταθερό και ο φωτοαισθητήρας αντικαθίσταται από ένα φασματοσκόπιο. Βάση του μετασχηματισμού Fourier, ανακτάται η τιμή Δz (διαφοράς των οπτικών δρόμων στους δύο βραχίονες) κάθε επιφάνειας οπισθοσκέδασης. Επιτυγχάνεται πολύ μεγάλος αριθμός σάρωσης A scan, άρα αποκτάται πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα σάρωσης και μικρότερη ευαισθησία σε προβλήματα μετακίνησης του οφθαλμού. Το μέγιστο βάθος απεικόνισης προσδιορίζεται από τη μέγιστη μετρήσιμη συχνότητα, δηλαδή από τη διακριτική ικανότητα του φασματοσκοπίου. Λόγω των παραπάνω, το FD-OCT έχει ουσιαστικά αντικαταστήσει το TD-OCT.
- SS-OCT (Swept Source) με 400.000 A-σαρώσεις/sec. Πρόκειται για μία συσκευή, με μεγαλύτερο οικονομικό κόστος, που οπτικοποιεί λεπτομερέστερα τις εν τω βάθει δομές και χρησιμοποιεί αόρατη πηγή φωτός για μεγαλύτερη άνεση του εξεταζόμενου. Με το SS-OCT, μετρούνται ταυτόχρονα όλες οι θέσεις κατά μήκος του A scan, χωρίς να απαιτούνται κινητά μέρη. Επίσης, με τη χρήση μετατροπών A/D (αναλογικού σήματος σε ψηφιακό), επιτρέπεται αύξηση ταχύτητας και πενταπλάσια ευαισθησία σε σχέση με το φασματοσκόπιο στο SD/FD-OCT. Ακόμη, το μέγιστο βάθος αυξάνεται, με την αύξηση του εύρους συχνοτήτων των μετατροπών A/D. Για την εξέταση OCT πρόσθιου ημιμορίου, στο SD-OCT προστίθεται ο φακός Spectralis Anterior Segment Module (ASM) με εύρος πλευρικής ανάλυσης 8-16mm για υψηλή ακρίβεια απεικόνισης του πρόσθιου ημιμορίου και ειδικά της γωνίας κερατοειδούς.
Εναλλακτικά, η συσκευή ANTERION OCT με πηγή φωτός 1300nm σαρώνει σε μεγάλο βάθος και με υψηλή αντίθεση τον πρόσθιο θάλαμο ή η τεχνολογία SS-OCT με μία πηγή μεγαλύτερου μήκους κύματος, εξετάζουν την τοπογραφία του κερατοειδούς. Η συσκευή ANTERION σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο λαμβάνει 256 A-scan εικόνες ανά B-scan και έπειτα τις οπτικοποιεί σε χάρτες κερατοειδούς με διάμετρο 8mm. Οι χάρτες ταξινομούνται σε πρόσθιας, οπίσθιας αξονικής και εφαιπτομενικής καμπυλότητας, εκτροπών πρόσθιου και συνολικού κερατοειδικού μετώπου και παχυμετρίας. Νεότερες συσκευές, όπως η AS-OCTA πολύ υψηλής ανάλυσης ανέδειξαν την ικανότητα εντοπισμού και ποσοτικοποίησης της αγγείωσης

του κερατοειδούς.

Η τεχνολογία SS-OCT σε συνδυασμό με μία πηγή μεγαλύτερου μήκους κύματος, συνδυάζει την βέλτιστη ευαισθησία και το μεγάλο βάθος διείσδυσης, αξιολογούν σε ελάχιστο χρόνο την επιφάνεια του κερατοειδούς αλλά και γενικότερα τον πρόσθιο θάλαμο. Χάρη σε αυτές τις συσκευές, αναλύονται τα στρώματα του κερατοειδούς και εντοπίζονται ουλές, δυστροφίες, ποσοτικοποιούνται αδιαφάνειες του κερατοειδούς. Το SS-OCT με το τυπικό και το ράστερ μοτίβο, επιτυγχάνει σχεδόν ιστολογική ανάλυση του κερατοειδούς και διευκολύνει τη διαφοροδιάγνωση των δυστροφιών του κερατοειδούς. Η λεπτομερής χαρτογράφηση της δυστροφίας συντελεί στην επιλογή της ορθότερης μεθόδου αντιμετώπισής της. Ειδικά, για τη δυστροφία του Fuchs, ο λόγος του κεντρικού πάχους του κερατοειδούς προς το περιφερικό, χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του σταδίου της νόσου.

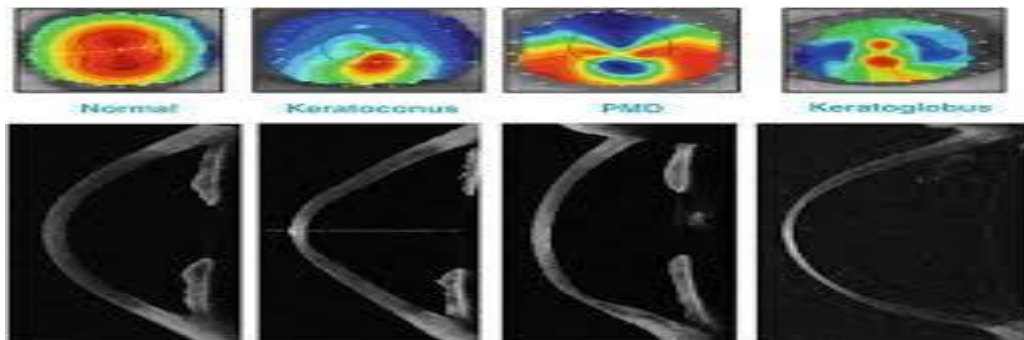
Το OCT βρίσκει εφαρμογή και στον υπολογισμό του βάθους της στρωματικής διήθησης σε κερατίτιδες, όπως αυτή από *Acanthamoeba* και κυτταρομεγαλοϊό (δενδριτική ή νομισματοειδή απεικονιστικά ευρήματα στην επιφάνεια του κερατοειδή) ανέπαφα, μειώνοντας το ρίσκο της μετάδοσης της λοίμωξης. Οι διηθήσεις εμφανίζονται ως υπερανακλαστικές περιοχές με οπίσθια σκίαση και εστιασμένη λέπτυνση του κερατοειδούς. Το οίδημα στον κερατοειδή εντοπίζεται ως διάχυτη στρωματική πάχυνση και αλλαγή της κυρτότητας της οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς. Η μείωση του οιδήματος και της διήθησης, σε δεύτερο χρόνο, προοιωνίζουν την αποδρομή της κερατίτιδας. Σε κερατίτιδα από *Acanthamoeba*, παρατηρούνται ανακλαστικές γραμμές που διέρχονται από το στρώμα λοξά ή παράλληλα. Στις κερατίτιδες από αδενοϊό οι βλάβες είναι υποεπιθηλιακές.

Εντούτοις, όταν τα διηθήματα είναι πυκνά, δυσχεραίνουν τη μέτρηση του πάχους του κερατοειδούς και τη βλάβης. Επίσης, δύσκολα διαχωρίζεται το φάρμακο από τις επιθηλιακές πλάκες και την χρωστική, καθώς όλα αυτά παρουσιάζονται ως υπερανακλαστικές περιοχές πάνω από το έλκος.

Στον κερατόκωνο, παρατηρείται λέπτυνση του επιθηλίου πάνω από το προεξέχον στρώμα και μεγάλη μεταβλητότητα του πάχους του επιθηλίου. Οι επιστημονικές έρευνες αποκαλύπτουν τη μεγάλη αποτελεσματικότητα του OCT στη λεπτομερή χαρτογράφηση της μεμβράνης του Bowman. (Galor, et al., 2021)

Εικόνα 28. Μορφές κερατοειδικών εκτασιών στο OCT

https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTuvZPmaDzci2G6kInWay4_sLOpcbHhEQT_w&s



Αυξημένο πάχος επιθηλίου, στρωματική αραιώση στην κορυφή του κερατοειδούς, υπερανακλαστικότητα στη μεμβράνη του Bowman, με χαρακτηριστική τοπική λέπτυνση του κατώτερου κερατοειδούς και της μεμβράνης του Bowman, αποτελούν υπόδειξη για ύδρωπα κερατοειδούς, δηλαδή αιφνίδια εισροή υδατοειδούς υγρού στον κερατοειδή. Ακόμη, το AS-OCT δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της σοβαρότητας της αποκόλλησης της μεμβράνης του Descemet.

Ιδιαίτερα σημαντική, είναι η αξιολόγηση της κερατοειδικής επιφάνειας προεγχειρητικά, για τον σχεδιασμό διαθλαστικών επεμβάσεων ή διασύνδεσης κολλαγόνου ή του βάθους ένθεσης ενδοστρωματικών κερατοειδικών δακτύλιων (Intracorneal Ring Segments, ICRS) και μετεγχειρητικά, για την παρακολούθηση της επούλωσης του κερατοειδούς.

Εικόνα 29. Ενδοστρωματικοί δακτύλιοι (ICRS) στο OCT.

https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSvaThuf4Jb3crHAKXZ5_olhh4KDNVk0pxe28MwCbGaPw&s

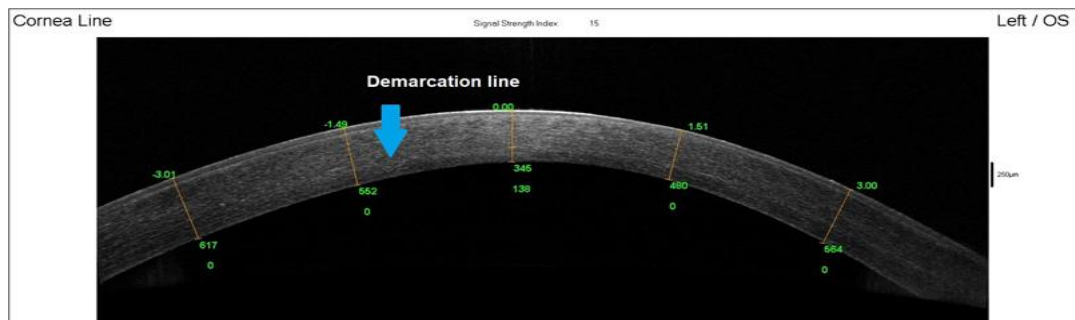


Πριν από επεμβάσεις όπως ενδοθηλιακή κερατοπλαστική μερικού πάχους (Descemet Stripping Endothelial Keratoplasty- DSAEK, Descemet Membrane Endothelial Keratoplasty- DMEK), είναι καθοριστική η γνώση της μορφολογίας του οπίσθιου κερατοειδούς για την επιλογή της κεφαλής του μικροκερατόμου και για την άμεση παρέμβαση σε αποκόλληση

του μοσχεύματος. Το SS-OCT, λόγω της μεγαλύτερης επαναληψιμότητας του, αποδεικνύεται πιο αξιόπιστο από την τεχνολογία Scheimpflug και τη σχισμοειδή λυχνία στη μετεγχειρητική αξιολόγηση των μεταμοσχεύσεων κερατοειδούς και στην απεικόνιση της γραμμής οριοθέτησής τους (demarcation line), αντίστοιχα.

Εικόνα 30. Γραμμή οριοθέτησης μετά από Διασύνδεση Κολλαγόνου.

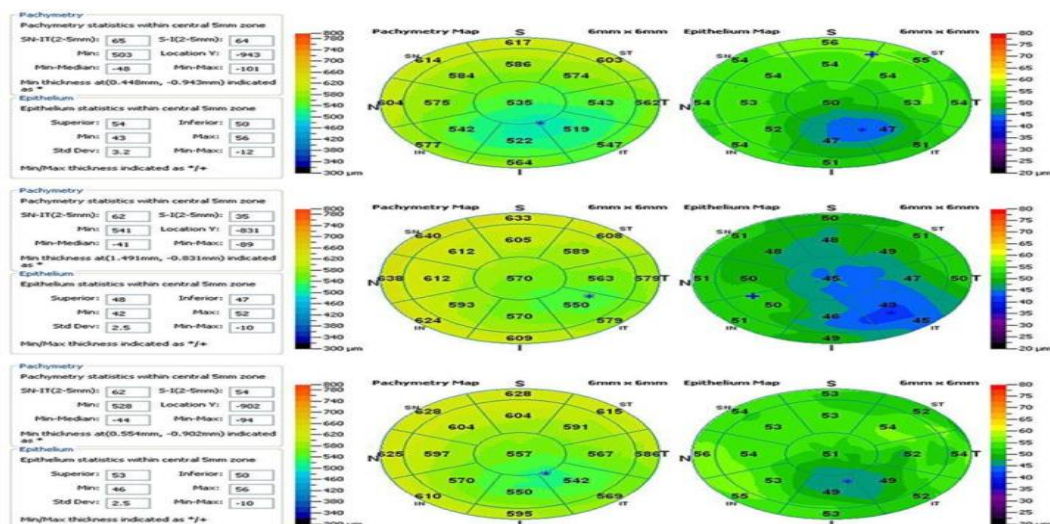
https://openophthalmologyjournal.com/contents/volumes/V16/e187436412207130/e187436412207130_F2.jpg



Επίσης, στη διαθλαστική χειρουργική, οι εικόνες από το OCT εμφανίζουν το πάχος του κρημού σε επεμβάσεις LASIK και ανιχνεύουν το σύνδρομο υγρού διεπαφής στον κερατοειδή, προκαλώντας οίδημα εντοπίζονται και παρακολουθούνται εκτασίες κερατοειδούς σε πρώιμα στάδια (κερατόκωνος, PMD) και περιστατικά Ορθοκερατολογίας. (Acharya, et al., 2022)

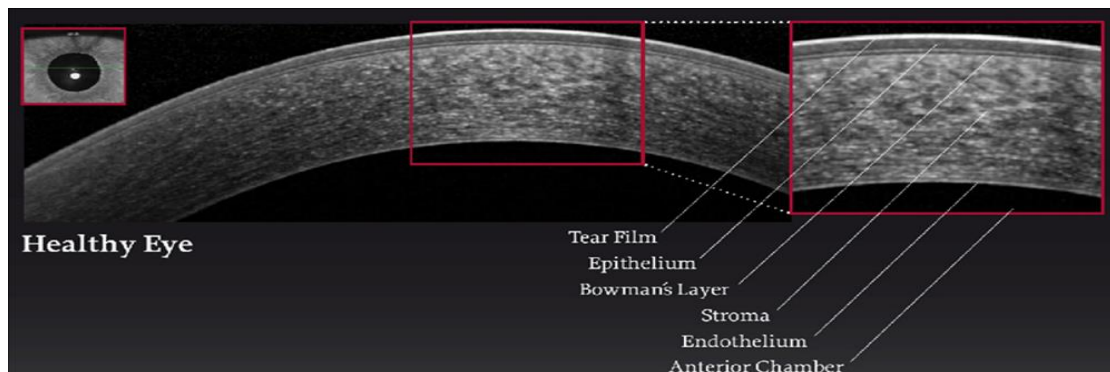
Εικόνα 31. Χάρτης παχυμετρίας και επιθηλίου OCT.

<https://www.researchgate.net/profile/GeorgeAsimellis/publication/263257677/figure/fig4/AS:214156163719187@1428070216602/Anterior-segment-OCT-imaging-pachymetry-maps-for-the-cornea-left-and-corneal-epithelium.png>



Εικόνα 32. Στιβάδες του κερατοειδή στο OCT.

https://www.know-the-eye.com/wp-content/uploads/sites/3/2022/09/OCT_ASM_Cornea_EN_01.jpg



Στην απεικόνιση OCT εμφανίζονται τα εξής στρώματα κερατοειδούς:

- Η πρώτη υπερανακλαστική ζώνη (πάχος λιγότερο από 5μm) είναι το δακρυϊκό φιλμ.
- Η επόμενη, υποανακλαστική ζώνη με πάχος 50-70μm αντιπροσωπεύει το επιθήλιο του κερατοειδούς.
- Με παρόμοια ανακλαστικότητα, ακολουθεί η μεμβράνη του Bowman ως μία γραμμική αναπαράσταση.
- Έπειτα, το στρώμα με μεταβλητή ανακλαστικότητα και πάχος 500μm.
- Η προ-δεσκεμέτιος μεμβράνη και η δεσκεμέτιος εμφανίζονται ως μία υπερανακλαστική περιοχή αλλά σε αποκόλληση δεσκεμετίου, είναι δυνατόν να διαχωριστούν. Γενικά, δύσκολα γίνονται διακριτές σε έναν φυσιολογικό κερατοειδή.
- Τέλος, το ενδοθήλιο είναι η λεπτότερη ζώνη, σαν μία υπερανακλαστική γραμμή με πάχος 5μm. (Findl , et al., 2019)

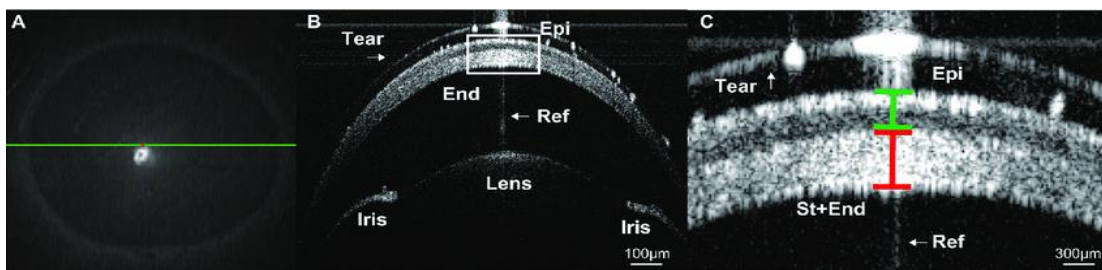
- **ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΗΨΗ OCT ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΟΥΣ:**

- Είναι σημαντικό να ελέγχεται η ποιότητα (QS) της σάρωσης. Μία ισχύς σήματος κατώτερη του 3 θεωρείται πτωχή και χρειάζεται επανάληψη της σάρωσης. Αποδεκτές τιμές άνω του 6, με μέγιστη το 10 και ελάχιστη το 0. Οι λειτουργίες Heidelberg Noise Reduction και TruTrack Active Eye Tracking, όταν είναι επιλεγμένες, βελτιώνουν την ανάλυση της εικόνας και την ευθυγράμμιση, αντίστοιχα.
- Αρχικά αναγνωρίζεται η ζώνη του επιθηλίου και σημειώνεται το κατώτερο όριο της. Έπειτα, προσδιορίζεται αν το επιθήλιο έχει φυσιολογικό πάχος και την αναμενόμενη ανακλαστικότητα.
- Χρησιμοποιείται το εργαλείο "μέτρησης πάχους ανά στιβάδα" για να αξιολογηθούν

τα διάφορα στρώματα.

Εικόνα 33. Μέτρηση πάχους στιβάδων με OCT.

<https://www.researchgate.net/publication/320260897/figure/fig1/AS:546689212534784@1507352273844/Corneal-thickness-measurement-by-AS-OCT-A-En-face-projection-view-green-line-shows.png>



- Εντοπίζεται η θέση της βλάβης. Εάν το επιθήλιο είναι ανώμαλο, ή η βλάβη βρίσκεται εντός του, η ανωμαλία χαρακτηρίζεται ως επιθηλιακή. Αντίθετα, εάν η βλάβη είναι κατώτερη του επιθηλίου, η ανωμαλία είναι υποεπιθηλιακή.

- Απαιτείται έλεγχος του κεντρικού πάχους (Central Point Thickness-CPT) και της απόκλισής του. Το κεντρικό πάχος υπολογίζεται από τη διασταύρωση έξι ακτινικών σαρώσεων. Ο δείκτης \pm παρουσιάζει την απόκλιση σε ποσοστό %. Μία απόκλιση $>10\%$ καθιστά τη μέτρηση αναξιόπιστη. (Galor, et al., 2021), (Acharya, et al., 2022)

- ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΡΜΗΝΕΙΑΣ OCT ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΟΥΣ:

1. SN- IT (Superior Nasal -Inferior Temporal): Η διαφορά του μέσου πάχους του ανώτερου ρινικού τόξου- από τα οχτώ στα οποία έχει διαιρεθεί η εξεταζόμενη επιφάνεια- από το μέσο πάχος του κατώτερου κροταφικού τόξου.
2. S – I (Superior – Inferior): Η διαφορά του μέσου πάχους του ανώτερου τόξου από το μέσο πάχος του κατώτερου τόξου.
3. Minimum- Maximum: Η διαφορά του ελάχιστου πάχους του κερατοειδούς από το μέγιστο πάχος.

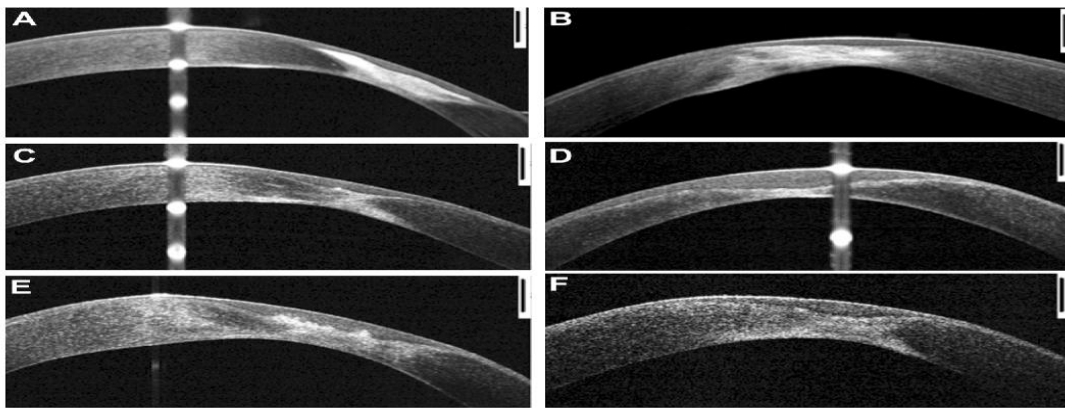
- OCT ΚΑΙ ΚΕΡΑΤΟΚΩΝΟΣ:

Με την λήψη μεσημβρινών τομών, γίνεται εμφανής σε μεγαλύτερο βαθμό από την τοπογραφία, η ασυμμετρία στο πάχος του κερατοειδούς και στην οπίσθια καμπυλότητά του. Πρέπει να δοθεί προσοχή στις περιοχές λέπτυνσης του επιθηλίου εξαιτίας του κώνου, ώστε να μην θεωρηθεί ομαλή η κατανομή του πάχους του κερατοειδούς και να αγνοηθεί ένας πρώιμος κερατόκωνος, κάτι που θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί με την τομογραφία Scheimpflug. Αναλυτικότερα, διαφορές SN-IT και S-I ανώτερες των $45\mu\text{m}$,

ελάχιστο πάχος μικρότερο από 470μm και διαφορά ελάχιστου- μέγιστου πάχους μικρότερη από 100 μm, εγείρουν την υποψία κερατόκωνου. (Asimellis & Kaufman, 2024)

Εικόνα 34. OCT προσθίου θαλάμου σε κερατόκωνο.

<https://d3i71xaburhd42.cloudfront.net/8b5edde62502488c7f6d69d3eedd8d0154a67bce/5-Figure4-1.png>



Τον Ιούλιο 2020 δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Annals of Translational Medicine από τους Cen et al. μελέτη σύγκρισης των μετρήσεων του βάθους του προσθίου θαλάμου (ACD) και του πάχους των άνω (SCT), κάτω (ICT), ρινικών (NCT) και κροταφικών (TCT) ζωνών 6mm του κερατοειδή με τη οπτική τομογραφία συνοχής AS-OCT και τον τοπογράφο Oculus Pentacam. Σαράντα εννέα υγιείς ενήλικες 18- 36 ετών, με διαθλαστικό σφάλμα μικρότερο των 6D, οι οποίοι δεν έπασχαν από παθήσεις του κερατοειδούς και του επιπεφυκότα, προχωρημένο καταρράκτη, γλαύκωμα ή αποκόλληση αμφιβληστροειδούς εξετάστηκαν στο πανεπιστημιακό νοσοκομείο Sun Yat-Sen στην Κίνα από τον Μάιο έως τον Ιούλιο 2018. Οι συμμετέχοντες (28 άνδρες και 21 γυναίκες), δεν είχαν υποβληθεί σε οφθαλμική επέμβαση στο παρελθόν και δεν είχαν εφαρμόσει φακούς επαφής τις προηγούμενες δεκαπέντε ημέρες. Οι δεξιόι οφθαλμοί κάθε ατόμου εξετάστηκαν χωρίς να έχουν μυδριαστεί, αρχικά από τον τοπογράφο Pentacam και στη συνέχεια από τον τομογράφο Casia2, Tomey Corporation, από τον ίδιο εξεταστή. Η συμφωνία των μετρήσεων αναπαραστάθηκε με τη γραφική παράσταση Bland-Altman. Οι μετρήσεις CCT αποδείχτηκαν ελαφρώς υψηλότερες με το Pentacam από ότι με το AS-OCT. Στις επιμέρους τιμές παχυμετρίας και στη μέτρηση του βάθους του προσθίου θαλάμου σημειώθηκε εξαιρετική συμφωνία με τιμές συντελεστή επαναληψιμότητας CCT: 2,42%, SCT:7,87, ICT: 7,80%, NCT: 8,85%, TCT: 7,83% , ACD: 9,26%. Η γραφική παράσταση Bland-Altman επιβεβαίωσε τη συσχέτιση των μετρήσεων. Το AS-OCT με ταχύτητα σάρωσης 50.000 A-σαρώσεις ανά δευτερόλεπτο περιορίζει τις ακούσιες

κινήσεις των ασθενών. Επιπλέον, η πηγή υπέρυθρου φωτός στα 1.310nm περιορίζει τη μύση της κόρης και διεισδύει βαθύτερα στους αδιαφανείς ιστούς από την πηγή ορατού φωτός του Pentacam. (Chen , et al., 2020)

2.3. Σύγχρονες λειτουργικές μέθοδοι ελέγχου κερατοειδή

I. Ενδοθηλιομέτρηση

Ενδοθηλιομέτρηση με φασματικό μικροσκόπιο

Η ενδοθηλιομέτρηση με φασματικό μικροσκόπιο είναι μία ανέπαφη μέθοδος απεικόνισης του μονόστιβου κερατοειδικού ενδοθηλίου. Η λειτουργία του βασίζεται στην κατοπτρική ανάκλαση από τη διεπιφάνεια μεταξύ του ενδοθηλίου και του υδατοειδούς υγρού, με πηγή λευκού φωτός και μικροσκόπιο υψηλής μεγέθυνσης. Μετά την οπτικοποίηση του ενδοθηλίου, γίνεται αλγοριθμική καταμέτρηση των κυττάρων. Η ενδοθηλιομέτρηση χρησιμοποιείται διαγνωστικά στις ασθένειες του ενδοθηλίου αλλά και ελεγκτικά πριν από οφθαλμικές επεμβάσεις. Η φυσιολογία του ενδοθηλίου διαταράσσεται στις πρωτογενείς ενδοθηλιοπάθειες (δυστροφία του Fuchs) ή στις δευτερογενείς, μετά από τραύματα, οφθαλμικά χειρουργεία ή παρατεταμένη χρήση φακών επαφής. Υποανακλαστικές περιοχές μπορεί να είναι ενδεικτικές οίδηματος κερατοειδούς, εναπόθεσης χρωστικής ουσίας στο ενδοθήλιο ή του συνδρόμου Guttata. Αντίθετα, υπερανακλαστικές περιοχές παραπέμπουν σε παρουσία φλεγμονωδών κυττάρων.

- **Δείκτες στο φασματικό μικροσκόπιο.**

Οι παρακάτω δείκτες: Πυκνότητα ενδοθηλιακών κυττάρων (Cell Density- (Jeang , et al., 2022)CD), Συντελεστής διακύμανσης (Coefficient of Variation- CV), Ποσοστό εξαγωνικών κυττάρων (Variability in Hexagonal Shape- HEX-6A) και το Κεντρικό πάχος κερατοειδούς (Central Corneal Thickness- CCT) αποτελούν διαγνωστικά εργαλεία με μεγάλη σπουδαιότητα στον εντοπισμό των ενδοθηλιοπαθειών.

- **Κεντρικό πάχος κερατοειδούς (Central Corneal Thickness- CCT).** Συνδέεται άμεσα με τη φυσιολογία του ενδοθηλίου, καθώς μία αύξηση του κεντρικού πάχους μπορεί να υποδηλώνει οίδημα κερατοειδούς. Το οίδημα, όμως, εκπορεύεται από μη αντιρροπούμενη από την ενεργή μεταφορά μέσω αντλιών του ενδοθηλίου του υδατοειδούς υγρού. Ο οίδηματικός κερατοειδής χαρακτηρίζεται από υπερενυδατωμένο στρώμα, μειωμένη διαφάνεια, που συνεπάγεται πτώση της όρασης.

- **Πυκνότητα ενδοθηλιακών κυττάρων (Cell Density- CD):** Δηλώνει τον αριθμό των

ενδοθηλιακών κυττάρων ανά mm². Η αναμενόμενη πυκνότητα μεταβάλλεται ανάλογα με την ηλικία, για αυτό είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη ο ακόλουθος πίνακας:

Πίνακας 2. Πυκνότητα ενδοθηλιακών κυττάρων/ ηλικία

Ηλικία	Αναμενόμενη πυκνότητα ενδοθηλιακών κυττάρων
10-29	2.600-3.400
30-39	2.300-2.400
40-49	2.300-3.100
50-59	2.100-2.900
60-69	2.000-2.800
70-79	1.800-2.600
80-89	1.500-2.300

Πυκνότητα ενδοθηλιακών κυττάρων μικρότερη από 1.000 κύτταρα/mm² αυξάνει τον κίνδυνο για εκδήλωση φυσαλιδώδους κερατοπάθειας. Όταν η πυκνότητα των ενδοθηλιακών κυττάρων γίνει μικρότερη από 300- 600 κύτταρα/mm² (η ελάχιστη τιμή που επιτρέπει την σωστή ενυδάτωση του κερατοειδούς), εμφανίζεται οίδημα κερατοειδούς με επακόλουθη απώλεια της διαφάνειάς του.

- **Συντελεστής διακύμανσης (Coefficient of Variation-CV)**. Αντιπροσωπεύει το ποσό της διακύμανσης στο μέγεθος των ενδοθηλιακών κυττάρων. Όταν ο συντελεστής διακύμανσης ξεπεράσει το 33 (φυσιολογικό όριο), γίνεται λόγος για πολυμεγεθυσμό (αυξημένη διακύμανση μεγέθους των κυττάρων) εξαιτίας ενδοθηλιακής πάθησης ή παρατεταμένης χρήσης φακών επαφής.

- **Ποσοστό εξαγωνικών κυττάρων (Variability in Hexagonal Shape- HEX-6A)**. Ένας μορφομετρικός δείκτης για τον υπολογισμό των εξαγωνικών κυττάρων. Η μείωση του πλήθους των κυττάρων με εξαγωνικό σχήμα κάτω από το 50% καλείται πλειομορφισμός. Η μεταβολή αυτή προκαλεί μείωση της λειτουργίας του ενδοθηλίου ως ημιδιαπερατού φραγμού μεταξύ του αγγείου και του περιβάλλοντος ιστού. Η μείωση του αριθμού των ενδοθηλιακών κυττάρων, προκαλεί μετατοπίσεις και δομικές αλλοιώσεις στα γειτονικά κύτταρα, με αποτέλεσμα πλειομορφισμός και πολυμεγεθυσμός να συνυπάρχουν σε περιπτώσεις έκπτωσης της λειτουργίας του ενδοθηλίου.

- **Αριθμός μετρηθέντων ενδοθηλιακών κυττάρων (Number per mm²- NUM).** Τα συνολικά ενδοθηλιακά κύτταρα που απεικονίζονται πρέπει να είναι επαρκή για την αξιολόγηση τυχόν ενδοθηλιακής νόσου.

- **Μέση τιμή αριθμού ενδοθηλιακών κυττάρων (Average- AVG).** Έχει αυξητική τάση με την πάροδο της ηλικίας και την αύξηση του πολυμεγεθυσμού. (Ershtein, 2019),

- **Τυπική απόκλιση από την κεντρική τιμή των μετρήσεων (Standard Deviation- SD).**

- **Ενδοθηλιοπάθειες:**

- **Ηλικιακός ενδοθηλιακός εκφυλισμός.** Με την αύξηση της ηλικίας, είναι αναπόδραστη η απώλεια ενδοθηλιακών κυττάρων με συνοδό πλειομορφισμό και πολυμεγεθυσμό. Το CD θα μειώνεται σχεδόν κατά 0,5% κάθε χρόνο, αλλά θα παραμένει εντός φυσιολογικών ορίων, το CV θα αυξάνεται και το HEX/6A θα μειώνεται, χωρίς όμως να συνυπάρχει οίδημα κερατοειδούς ή αυξημένο CCT.

- **Δυστροφία του Fuchs.** Αυτοσωμικά επικρατής, αμφοτερόπλευρη προοδευτική φλεγμονώδης δυστροφία του ενδοθηλίου του κερατοειδούς. Χαρακτηριστικές είναι οι σταγονοειδείς συναθροίσεις κολλαγόνου στην οπίσθια επιφάνεια της μεμβράνης του Descemet, γνωστές ως Guttata. Αρχικά, τα Guttata εντοπίζονται κεντρικά και στην εξέλιξη της νόσου επεκτείνονται περιφερικά. Παρατηρείται θολή όραση το πρωί που βελτιώνεται το απόγευμα, λόγω της μη αντισταμιζόμενης -από το μη λειτουργικό επιθήλιο- υπερενυδάτωσης του κερατοειδούς από τα κλειστά βλέφαρα κατά τη διάρκεια του ύπνου.

Εικόνα 35. Ενδοθηλιακή δυστροφία του Fuchs.

<https://www.nzoptics.co.nz/media/5swovxap/fig2a-specular-fecd-early.jpg>



- **Ιατρογενής ενδοθηλιοπάθεια.** Πρόκειται για δευτερογενή ενδοθηλιοπάθεια σχετιζόμενη με οφθαλμιατρικές πράξεις και χειρουργεία, όπως η φακοθρυψία στην επέμβαση καταρράκτη (πιθανή μείωση CD της τάξης του 10%) ή ακόμη και η επαφή

ενδοθηλίου με υγρά και εργαλεία. Άλλη αιτία είναι η απότομη αύξηση της ενδοφθάλμιας πίεσης κατά τη διάρκεια χειρουργείων, όπως στην εμφύτευση συσκευών παροχέτευσης σε γλαυκωματικούς ασθενείς. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να ελέγχεται προεγχειρητικά το ενδοθήλιο για χαμηλή CD/HEX/6A, υψηλή CV και παρουσία Guttata, προς αποφυγή φυσαλιδώδους κερατοπάθειας. Η φυσαλιδώδης κερατοπάθεια προκαλεί σημαντικό οίδημα και φυσαλίδες με υγρό στο στρώμα και κάτω από αυτό, φωταψίες και μειωμένη όραση. Οι φυσαλίδες εφάπτονται στα νεύρα του κερατοειδούς, προκαλώντας πόνο, ερεθισμό και αίσθηση ξένου σώματος με κίνδυνο θραύσης και επακόλουθων επώδυνων αποπτώσεων επιθηλίου. Η κατάσταση αντιμετωπίζεται με ενδοθηλιακή κερατοπλαστική. Μετά από οφθαλμικά χειρουργεία, μπορεί να εμφανιστούν, επίσης, υποανακλαστικές περιοχές λόγω οιδήματος των κυττάρων, οι οποίες μιμούνται τις Guttata και δεν σχετίζονται με μόνιμη βλάβη.

- Ενδοθηλιοπάθεια σχετιζόμενη με επαναλαμβανόμενες φλεγμονές του προσθίου θαλάμου, όπως ραγοειδίτιδα ή ενδοθηλίτιδα. Σε χρόνιες μορφές, φλεγμονώδη κύτταρα ή ανοσοπρωτεΐνες διεισδύουν στο ενδοθήλιο, οδηγώντας σε μορφώματα ομοιάζοντα με Guttata.

- Εκφυλισμός του ενδοθηλίου σε γλαυκωματικούς ασθενείς είναι πιθανός. Συνήθως, υπάρχει μείωση πυκνότητας ενδοθηλιακών κυττάρων και αύξηση αριθμού απόπτωσης. Ενοχοποιητικοί παράγοντες θεωρούνται η αυξημένη ενδοφθάλμια πίεση, η υποξία και η τοξικότητα από αντιγλαυκωματικά κολλύρια.

- Ενδοθηλιοπάθεια από φακούς επαφής. Συχνότερα η παρατεταμένη χρήση σκληρών με μειωμένη μεταδραστικότητα σε οξυγόνο, φακών επαφής μπορεί να δημιουργήσει βλάβες μιμούμενες τις Guttata, λόγω υποξίας του κερατοειδούς. Η σοβαρότητα της ενδοθηλιόπαθειας είναι αναλογική του χρόνου εφαρμογής των φακών. Περιορισμένη βελτίωση επιτυγχάνεται μετά από διακοπή των φακών ή αλλαγή σε φακούς με μεγαλύτερη μεταδραστικότητα οξυγόνου. (Esparna, et al., 2022)

2.3.II. Reichert's Ocular Response Analyzer (ORA)

Το Reichert's Ocular Response Analyzer είναι ένα αυτοματοποιημένο τονόμετρο χωρίς επαφή και αναισθησία, το οποίο μετρά τη συσχετισμένη με Goldmann ενδοφθάλμια πίεση (ORA IOPg), την αντιρροπούμενη ενδοφθάλμια πίεση του κερατοειδούς (ORA IOPcc), την υστέρηση του κερατοειδούς (CH) και τον παράγοντα αντίστασης κερατοειδούς (CRF). Ο αναλυτής οφθαλμικής απόκρισης (ORA) είναι η μόνη συσκευή που λαμβάνει υπόψη την υστέρηση του κερατοειδούς στη μέτρηση της ενδοφθάλμιας πίεσης, χρησιμοποιώντας μία κάμερα Scheimpflug εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας που καταγράφει τη διαδικασία παραμόρφωσης του κερατοειδούς. Συγκριτικά με την τονομετρία επιπέδωσης Goldmann, το ORA φαίνεται ότι υποτιμά ή υπερεκτιμά την ενδοφθάλμια πίεση, έχει μικρότερη επαναληψιμότητα και αναπαραγωγιμότητα μετρήσεων και κοστίζει περισσότερο. Η δεύτερη τιμή ενδοφθάλμιας πίεσης, IOPcc, είναι μία εκτίμηση της πίεσης προσαρμοσμένη με την εμβιομηχανική του κερατοειδούς.

Εικόνα 36. Ocular Response Analyzer

<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQfJWGFcy-OIYANQniPFKTW1ixUKrY9nfuMYg&...>



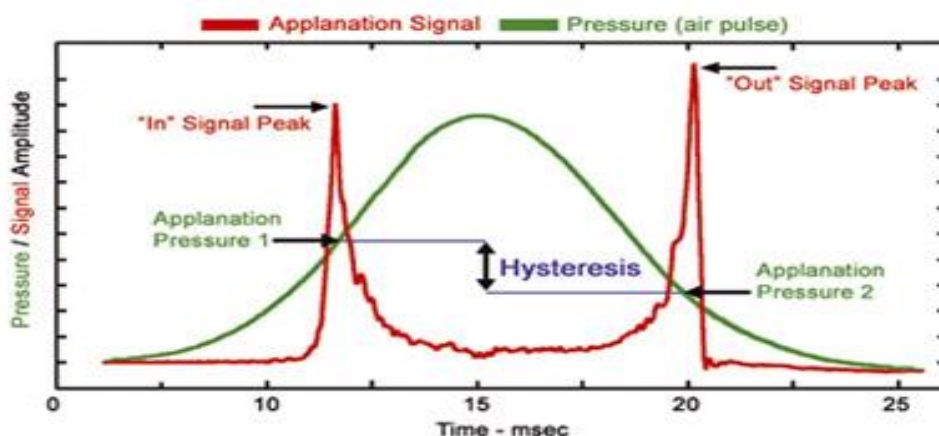
Ο αισθητήρας του οργάνου (ανιχνευτής υπέρυθρων) τοποθετείται αυτόματα πάνω από τον οφθαλμό, παρέχοντας αντικειμενικά αποτελέσματα. Οι υπολογισμοί γίνονται με βάση ένα σύστημα ευθυγράμμισης που κατευθύνει ένα ρεύμα αέρα σε συγκεκριμένη θέση του

κερατοειδή. Η δύναμη του αέρα επιπεδώνει τον κερατοειδή σε μία μικρή εσοχή. Μετά το πέρας του παλμού αέρα, ο κερατοειδής επανέρχεται και επιπεδώνεται. Το ORA υπολογίζει τη δύναμη στα δύο σημεία επιπέδωσης: στην αρχική επαναφορά από την επίδραση του αέρα (P1 κορυφή στο διάγραμμα ORA) και στην τελική επιστροφή του κερατοειδούς στο κυρτό του σχήμα (P2 κορυφή στο διάγραμμα ORA). Η πίεση στη δεύτερη επιπέδωση είναι μικρότερη και η διαφορά της ενδοφθάλμιας πίεσης (P1-P2) αντιστοιχεί στην υστέρηση του κερατοειδή. Ουσιαστικά, η υστέρηση είναι η ποσοτικοποίηση της ικανότητας του κερατοειδή να απορροφά και να διαχέει ενέργεια. Η μέση τιμή υστέρησης κερατοειδή εκτείνεται από 9,6 mmHg έως 12,2 mmHg. Χαμηλή υστέρηση κερατοειδούς, πιθανώς, αφορά την πορεία του γλαυκώματος και τον περιορισμό των οπτικών πεδίων.

Ο παράγοντας αντίστασης κερατοειδούς, επίσης, προέρχεται από τις δύο τιμές ενδοφθάλμιας πίεσης και πληροφορεί για το ιξώδες και την ελαστικότητα του κερατοειδούς. Λαμβάνεται το ιστόγραμμα της υστέρησης του κερατοειδούς (CH) το οποίο παρουσιάζει την κατανομή των τιμών υστέρησης του κανονικού πληθυσμού (CHvalues) και την υστέρηση του εξεταζόμενου σε σχέση με τη φυσιολογική κατανομή (CHresults). Επειδή το CH σχετίζεται με την ακεραιότητα του κερατοειδούς, συνήθως αλλάζει μετά από οφθαλμικές επεμβάσεις, τραύματα ή εκτασίες του κερατοειδούς. Οι έως τώρα επιστημονικές μελέτες αναφέρουν ότι η μέτρηση της υστέρησης κερατοειδούς είναι η μόνη διαθέσιμη μέτρηση της οφθαλμικής εμβιομηχανικής και θεωρείται δείκτης για τη διάγνωση και την παρακολούθηση του γλαυκώματος, χωρίς να είναι γνωστός ο λεπτομερής μηχανισμός αλληλεξάρτησης. Συγκεκριμένα, πιστεύεται ότι κάθε μείωση κατά 1mmHg της CH αυξάνει στο μισό την πιθανότητα εξέλιξης του γλαυκώματος.

Εικόνα 37. Διάγραμμα αποτελεσμάτων ORA

https://www.reichert.com/-/media/project/ametksxa/basesite/ametkreichertv2/products/discontinued-and-obsolete/discontinued/headerimage/ora_waveform.jpg?dmc=1&revision=7d85419b-7f99-4f45-ad61-fd5106e14643&la=en&hash=B84684C59E330D09DDB51064C1DB90AA



Τα αποτελέσματα των μετρήσεων απεικονίζονται σε μία κυματομορφή με δύο καμπύλες, ιδανικά παρόμοιου πλάτους, με σαφώς καθορισμένο και σχετικά κεντρικό υψηλότερο σημείο: μία πράσινη καμπύλη που αντιπροσωπεύει την πίεση του αέρα στον κερατοειδή και μία κόκκινη καμπύλη που αναπαριστά το σήμα του συστήματος ανίχνευσης επιφανειών. Το οπτικό σήμα που εντοπίζεται κατά τη διάρκεια των δύο επιπεδώσεων σχηματίζει τις δύο κορυφές P1,P2 εκατέρωθεν της καμπύλης πίεσης. Σε μεγαλύτερη υστέρηση από το φυσιολογικό, θα παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των δύο κορυφών.

Η πράσινη καμπύλη πίεσης θα πρέπει να εμφανίζει αρκετή συμμετρία. Το ύψος της πράσινης μεταβάλλεται αναλογικά με την ποσότητα της πίεσης που απαιτείται για την επιπέδωση. Η κόκκινη καμπύλη μπορεί να διαφέρει σημαντικά μεταξύ των μετρήσεων, αλλά το πλάτος των κορυφών της πρέπει να είναι παρόμοιο με αυτών της πράσινης καμπύλης.

Για την ορθή τοποθέτηση του ασθενούς, διατίθεται συρόμενο περιμετώπιο για την εύρεση του εξεταζόμενου οφθαλμού, το οποίο πρέπει να τοποθετηθεί στο τέρμα της αντίστοιχης πλευράς πριν ξεκινήσει η μέτρηση. Ο ασθενής θα πρέπει να προσηλώνει στον πράσινο στόχο που περιβάλλεται από έναν κόκκινο δακτύλιο κατά τη λήψη της μέτρησης. Εάν φαίνονται οι κόκκινοι δακτύλιοι, το σύστημα ευθυγράμμισης θα εμφανίσει τον πράσινο στόχο και θα ληφθεί αυτόματα η μέτρηση. (Felipe , et al., 2022)

Η αξιολόγηση της εμβιομηχανικής του κερατοειδούς μπορεί να προστεθεί στα μέσα διάγνωσης του κερατόκωνου. Ένα διαγνωστικό σημείο είναι ότι ο κερατοκωνικός οφθαλμός παρουσιάζει μειωμένη υστέρηση κερατοειδούς σε σχέση με τον φυσιολογικό. Η λέπτυνση του στρώματος μειώνει σημαντικά τη μηχανική σταθερότητα. Ωστόσο, η διασύνδεση κολλαγόνου μέσω των ομοιοπολικών δεσμών που σχηματίζει μεταξύ των ινιδίων, έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει άμεσα τη σταθερότητα και επαναφέρει σε έναν βαθμό την ιξωδοελαστικότητα του κερατοειδούς. (Gongru , et al., 2023)

Σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη ελέγχου της συσχέτισης της θέσης του κώνου στον κερατόκωνο και της εμβιομηχανικής του κερατοειδούς, υπάρχουν πρώιμες ενδείξεις για την αναλογική σχέση της ακαμψίας του κερατοειδή με την απόσταση του κώνου από το κέντρο του κερατοειδούς. (Fortman , et al., 2024)

2.3.III. Τονόμετρο Oculus Corvis- ST/ CST (Corneal Visualization Scheimpflug Technology)

Το τονόμετρο Corvis ST/ CST με πηγή φωτός στα 455nm είναι ένα τονόμετρο μη επαφής για τον υπολογισμό της ενδοφθάλμιας πίεσης και την καταγραφή της δυναμικής παραμόρφωσης του κερατοειδή σε πραγματικό χρόνο, από ελεγχόμενους παλμούς αέρα,

μέσω μίας κάμερας Scheimpflug με ταχύτητα μεγαλύτερη από 4.330 οριζόντιες εικόνες ανά 100ms. Το εύρος της ενδοφθάλμιας πίεσης που μετρά κυμαίνεται από 6 έως 60 mmHg. Πιστεύεται ότι είναι μία υψηλής διαγνωστικής αξίας μέθοδος τονομέτρησης, παχυμετρίας αλλά και εκτίμησης των εμβιομηχανικών ιδιοτήτων όπως το πάχος, τον όγκο, την καμπυλότητα της πρόσθιας επιφάνειας και την ιξωδοελαστικότητα του κερατοειδούς.

Εικόνα 38. Τονόμετρο Oculus Corvis ST

<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT6ifm5x3I-IBJRiqFYUjP1n6sNR-kkJNm4A&s>



Όπως προαναφέρθηκε, η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του κερατοειδή συνδέεται στενά με την ανατομία του κερατοειδούς. Σε περίπτωση ανομοιομορφής συσσώρευσης κολλαγόνων ινιδίων διαταράσσεται η διαφάνεια, ο δείκτης διάθλασης και μειώνεται η αντοχή σε εφελκυσμό. Η ανάγνωση των τιμών ενδοφθάλμιας πίεσης που υπολογίζει το τονόμετρο Corvis με την επιλογή Biomechanical Corrected IOP (BIOP), εξαρτάται λιγότερο από το πάχος και την εμβιομηχανική του κερατοειδούς και καθόλου από το δακρυϊκό φιλμ. Η βιομηχανικά διορθωμένη ενδοφθάλμια πίεση υπολογίζεται μαθηματικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων βάση της τάσης- παραμόρφωσης (μαθηματικό μοντέλο Odgen) και των πέντε παραμέτρων δυναμικής απόκρισης του κερατοειδούς -Dynamic Corneal Response/ DCR (μαθηματικό μοντέλο Prony), του πάχους και της καμπυλότητας του κερατοειδούς. Σε υγιείς οφθαλμούς είναι εμφανής ο εναντιομορφισμός, ο οποίος συνίσταται στην κατοπτρική συμμετρία της τιμής και του άξονα του αστιγματισμού του πρόσθιου κερατοειδή, της κερατομετρίας και της παχυμετρίας. Ο εναντιομορφισμός χαρακτηρίζει και την εμβιομηχανική του κερατοειδούς, καθώς τα ινίδια κολλαγόνου διατάσσονται ευθυγραμμισμένα και συμμετρικά ως προς τη μέση γραμμή σε δεξιό και αριστερό οφθαλμό.

Το λογισμικό Vinciguerra, επιτρέπει τον έλεγχο της εμβιομηχανικής μη φυσιολογικών κερατοειδών. Με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης, ο Κερατοειδικός Εμβιομηχανικός Δείκτης (CBI) πιστεύεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποκλειστικός δείκτης ανίχνευσης πρώιμου κερατόκωνου με διαγνωστική ακρίβεια συγκρίσιμη με αυτήν των δεικτών του Pentacam. Ο δείκτης CBI, επίσης, συνεισφέρει στην ταξινόμηση του κερατόκωνου σύμφωνα

με το σύστημα ABCD. Αυτό συμβαίνει διότι οι εμβιομηχανικές παραμορφώσεις, όπως μία τοπική μείωση του συντελεστή ελαστικότητας, είναι αιτία του κερατόκωνου και άρα προηγούνται της σταδιακής λέπτυνσης του στρώματος. Υπογραμμίζεται ότι μόνο στην περιοχή του κώνου διαφοροποιούνται οι εμβιομηχανικές ιδιότητες, αλλοιώνεται δηλαδή η ιξωδοελαστικότητα της επιφάνειας.

Τα ακόλουθα δεδομένα ελέγχονται με το τονόμετρο Corvis, πληροφορώντας μεταξύ άλλων για την παραμόρφωση και τη σταθερότητα του κερατοειδούς.

- *Χρόνος επιπέδωσης 1 / Time of Appplanation 1 (AT1)*: Υπολογίζεται από την αρχή έως τη στιγμή που ένας παλμός αέρα επιφέρει επιπέδωση του κερατοειδούς. Με τις ακολουθίες εικόνων που λαμβάνονται με την κάμερα Scheimpflug, εντοπίζονται οι χρόνοι επιπέδωσης 1,2, οπότε οι κλίσεις του κερατοειδικού προφίλ κοντά στην κορυφή γίνονται εξαιρετικά γρήγορες.

- *Μήκος επιπέδωσης 1 / Length of Appplanation 1 (AL1)*: Το μήκος του κερατοειδούς που επιπεδώνεται κατά τον Χρόνο επιπέδωσης 1.

- *Ταχύτητα επιπέδωσης 1/ Velocity of Appplanation 1 (AV1)*: Η ταχύτητα παραμόρφωσης του κερατοειδούς κατά τον Χρόνο επιπέδωσης 1.

- *Παράμετρος ακαμψίας στον χρόνο επιπέδωσης 1/ Stiffness Parameter at first appplanation (SP-A1)*: Υπολογίζεται από τη διαφορά ισχύος του παλμού αέρα στον κερατοειδή και της βιομηχανικά διορθωμένης ενδοφθάλμιας πίεσης. Αναφέρεται στην ολική ακαμψία του κερατοειδούς και είναι αναγνωριστική κερατοκώνου.

- *Integrated Inverse Radius 1/R (IIR)*: Κατά τη φάση της κοίλανσης υπολογίζεται η τιμή της κεντρικής ακτίνας καμπυλότητας και έπειτα υπολογίζεται η αντίστροφη ακτίνα. Επίσης, προσδιορίζεται η περιοχή κάτω από την αντίστροφη ακτίνα ως προς τον χρόνο. Η περιοχή αυτή ονομάζεται Integrated Inverse Radius και αξιοποιείται στην ποσοτικοποίηση της επίδρασης της Διασύνδεσης κολλαγόνου στον κερατοειδή. Μικρότερες τιμές IIR συνδέονται με δύσκαμπτο κερατοειδή.

- *Χρόνος επιπέδωσης 2 / Time of Appplanation 2 (AT2)*: Η χρονική διάρκεια από τη στιγμή που ο κερατοειδής αποκτά τη μεγαλύτερη κοίλανση ως τη στιγμή που επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα.

- *Μήκος επιπέδωσης 2 / Length of Appplanation 2 (AL2)*: Το μήκος του κερατοειδούς που επιπεδώνεται κατά τον Χρόνο επιπέδωσης 2.

- *Ταχύτητα επιπέδωσης 2/ Velocity of Appplanation 2 (AV2)*: Η ταχύτητα παραμόρφωσης του κερατοειδούς κατά τον Χρόνο επιπέδωσης 2.

- *Εύρος παραμόρφωσης στη μεγαλύτερη κοίλανση/ Deformation Amplitude at the Highest*

Concavity (HCDA): Αναφέρεται στο μεγαλύτερο εύρος παραμόρφωσης από την αρχή ως τη στιγμή της μεγαλύτερης κοίλανσης με φυσιολογική διακύμανση από 0,94- 1,16mm. Τιμές μεταξύ 1,16mm και 1,58mm είναι συχνότερες σε κερατόκωνο.

- *Μέγιστο πλάτος παραμόρφωσης (Maximum Deformation Amplitude- DAM)*. Προσδιορίζει την κατακόρυφη μετατόπιση της κορυφής. Η κίνηση της κορυφής εξαρτάται από την ενδοφθάλμια πίεση και τη συνολική ακαμψία του κερατοειδούς. Όσο μεγαλύτερη η ακαμψία, τόσο μικρότερο το πλάτος παραμόρφωσης.

- *Μετακίνηση ολόκληρου του οφθαλμού (Whole Eye Movement)*. Η μετακίνηση ολόκληρου του οφθαλμού στον κάθετο άξονα εξαρτάται από την εμβιομηχανική του σκληρού χιτώνα και του λιπώδους οφθαλμικού ιστού.

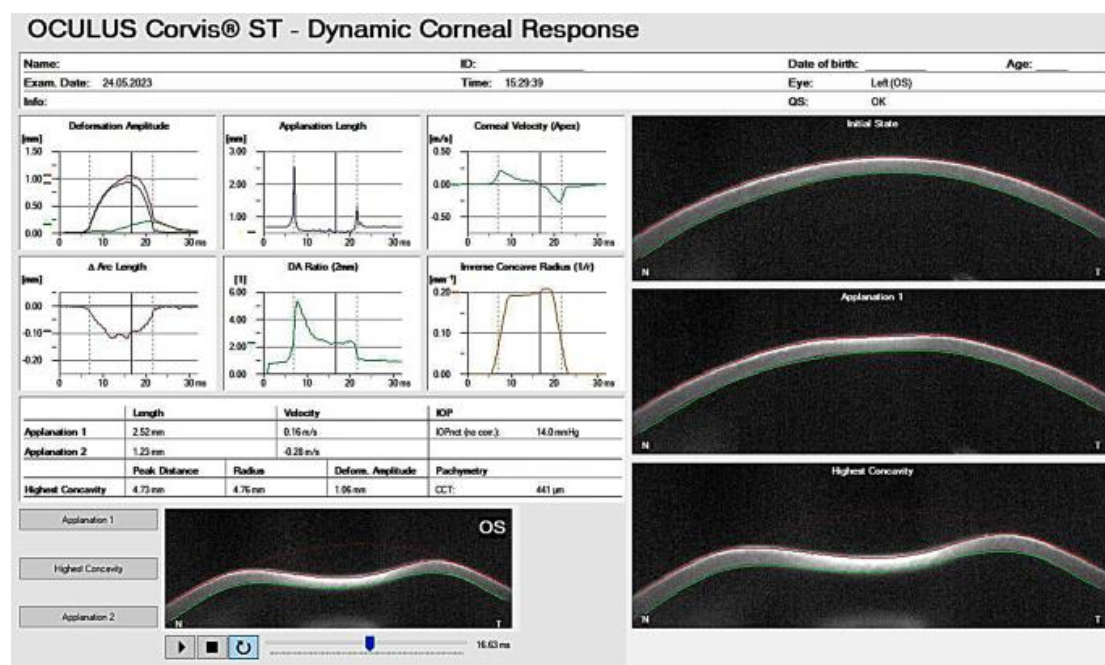
- *Πλάτος εκτροπής (Deflection Amplitude)*. Η διαφορά μεταξύ του πλάτους παραμόρφωσης και της μετακίνησης ολόκληρου του οφθαλμού. Στην πραγματικότητα, περιγράφει την κίνηση του κερατοειδούς και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εμβιομηχανικές του ιδιότητες.

- *Αναλογία μεταξύ του πλάτους παραμόρφωσης στην κορυφή και στα 2mm ρινικά και κροταφικά (DARatio2- Deformation Amplitude Ratio 2)*. Ο λόγος του πλάτους παραμόρφωσης στον κατακόρυφο άξονα στην κορυφή του κερατοειδούς προς το πλάτος παραμόρφωσης στα 2mm ρινικά και κροταφικά από την κορυφή του κερατοειδούς. Η αναλογία DA παρουσιάζει καθοδική τάση όσο αυξάνεται η ακαμψία, οπότε η κεντρική και παρακεντρική παραμόρφωση είναι παρόμοια. Αντίθετα όταν αυξάνεται η ελαστικότητα, η κεντρική παραμόρφωση είναι πολύ μεγαλύτερη της κεντρικής και συνεπώς η αναλογία DARatio2 αυξάνεται.

- *Δείκτης συσχέτισης Ambrosio/ Ambrosio Relational Thickness (ARTh)*. Συνδυάζει εμβιομηχανικές και τομογραφικές παραμέτρους και αξιολογεί την ευαισθησία για εκτασία. Κατά τη διάρκεια της δυναμικής απόκρισης του κερατοειδή δίνεται έμφαση στον χρόνο επιπέδωσης 1, τη στιγμή της μεγαλύτερης κοίλανσης (highest concavity) και ο χρόνος επιπέδωσης 2, οπότε ο κερατοειδής επιπεδώνεται πριν επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. (Optikgeräte, 2024)

Εικόνα 39. Η θέση του εξαγόμενου περιγράμματος του κερατοειδή με το τονόμετρο Corvis πριν και μετά την Διασύνδεση Κολλαγόνου.

https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs00417-024-06549-z/MediaObjects/417_2024_6549_Fig1_HTML.png



Το τονόμετρο Corvis εμφανίζει τη μέση απόκλιση για κάθε παράμετρο του εξεταζόμενου οφθαλμού από τη μέση τιμή ενός φυσιολογικό οφθαλμό. Θετικές τιμές δηλώνουν εύκαμπτο και ελαφρύ κερατοειδή, ενώ αρνητικές τιμές σχετίζονται με παχύτερο ιστό. Η λευκή περιοχή περιλαμβάνει τιμές απόκλισης από -1 ως +1 SD, η ελαφρώς γκρι περιοχή περιλαμβάνει τιμές απόκλισης από 1-2SD και η έντονα γκρι περιοχή περιλαμβάνει τιμές άνω των 2 SD. Έρευνα που δημοσιεύτηκε το 2023 στο American Journal of Ophthalmology και διεξήχθη σε 1084 οφθαλμούς από 983 ασθενείς μελετούσε τη δυνατότητα κατηγοριοποίησης με το Corvis ST των οφθαλμών σε φυσιολογικούς, Forme Fruste κερατοκωνικούς, υποκλινικούς κερατοκωνικούς, ήπιους κλινικούς κερατοκωνικούς μέτριας βαρύτητας κερατοκωνικούς και σοβαρούς κερατοκωνικούς. Οι οφθαλμοί που συμπεριλήφθηκαν στην έρευνα ήταν κατά 20% να φυσιολογικοί, 20% Forme Fruste κερατοκωνικοί, 10% υποκλινικοί κερατοκωνικοί και ανά 20% ήπιοι (CKC-I), μέτριοι (CKC-II) και σοβαροί κερατοκωνικοί (CKC-III). Όλοι οι συμμετέχοντες υπεβλήθησαν σε πλήρη οφθαλμολογική εξέταση συμπεριλαμβανομένων των Corvis ST και Pentacam. Για την ένταξη στην ομάδα των φυσιολογικών οφθαλμών απαιτούνταν η φυσιολογική βιομικροσκόπηση αμφοτέρων των κερατοειδών, διορθωμένη οπτική οξύτητα μεγαλύτερη ή ίση των 20/20, μία φυσιολογική τοπογραφία και ελεύθερο ιστορικό οφθαλμικών επεμβάσεων και τραυμάτων. Για τις κερατοκωνικές ομάδες, κριτήρια

ήταν οι τοπογραφικές αλλοιώσεις στον τοπογράφο Pentacam (λοξό ασύμμετρο παπιγιόν ή κατώτερη κλίση) και τουλάχιστον ένα εύρημα σχετιζόμενο με κερατόκωνο στη σχισμοειδή λυχνία, όπως η κωνοειδής προεξοχή, ο δακτύλιος Fleischer, το σημάδι Münson, οι ραβδώσεις Vogt ή το σημάδι Rizutti. Συγκεκριμένα για την SKC, ήταν αναγκαία ελαφρά μη φυσιολογική τοπογραφία κερατοειδούς με μοτίβο ασύμμετρου παπιγιόν ή με δείκτη KISA μεγαλύτερο του 60%. Η ταξινόμηση των ομάδων έγινε σύμφωνα με το σύστημα TKC του Pentacam, όπου το 0 αντιστοιχεί σε φυσιολογική τοπογραφία, το 1 σε Forme Fruste, τα 1-2,2 σε υποκλινικό, τα 2-3, 3 σε μέτριο κερατόκωνο. Τα στάδια 3, 3-4, με σοβαρό κερατόκωνο αποκλείστηκαν από την έρευνα λόγω ανεπαρκούς δείγματος. Οι Forme Fruste και οι υποκλινικοί κερατόκωνοι αφορούσαν τους ετέρους οφθαλμούς κερατοκωνικών ασθενών που δεν είχαν κλινικές ανατομικές και τοπογραφικές ενδείξεις κερατόκωνου. Για τις ανάγκες της έρευνας, απαιτήθηκε διακοπή από τους χρήστες των μαλακών φακών επαφής πριν από τουλάχιστον δύο εβδομάδες και σκληρών αεροδιαπερατών πριν από τουλάχιστον τέσσερις εβδομάδες. Για τον κάθε οφθαλμό αξιολογήθηκε η ευαισθησία και η ακρίβεια των δεικτών για το κεντρικό του πάχος CCT, την ενδοφθάλμια πίεση biOP, τους δείκτες SSIv1 (Stress Strain Index), SSIv2 (updated Stress Strain Index), SP-A1, A1T, ARTH (Ambrosio Relational Thickness to the horizontal profile), IIR, DAM, DARatio2 και CBI. Οι δείκτες CCT, biOP, SSIv2 και ARTH παρουσίασαν σημαντική άνοδο στους φυσιολογικούς κερατοειδείς, ενώ σημαντική μείωση σημειώθηκε στους IIR, CBI. Παράλληλα, οι δείκτες SSIv2, ARTh, IIR και CBI, αποδείχτηκαν επαρκείς στον ταξινόμησης του σταδίου του κερατόκωνου με τον δείκτη SSIv2, όμως να υπερέχει σημαντικά στον εντοπισμό του Forme Fruste κερατόκωνου. (Ahmed, et al., 2024)

Ακόμη, το συγκεκριμένο τονόμετρο είναι δυνατόν να ποσοτικοποιήσει έγκαιρα την επίδραση του Corneal Collagen Crosslinking στα εμβιομηχανικά χαρακτηριστικά ενός κερατοκωνικού κερατοειδή μέσω της παρουσίασης BEST (Homburg Biomechanical E-Staging Display) και του βιοδείκτη SSI (Stress Strain Index) καθώς οι εμβιομηχανικές αλλαγές συντελούνται σε τέσσερις εβδομάδες από την Διασύνδεση Κολλαγόνου. Αντίθετα, η τοπογραφική απεικόνιση παρουσιάζει αξιόλογες μεταβολές μετά το πέρας κάποιων μηνών. Ο δείκτης SSI, χάρη και στην μηδαμινή εξάρτησή του από το πάχος, αποδεικνύεται αξιόλογος για τον συστηματικό έλεγχο της ακαμψίας του κερατοειδούς, ειδικά μετά από διαθλαστικές επεμβάσεις. Επιπλέον, σύμφωνα με τον δείκτη SSI σχεδιάζονται σε διάγραμμα οι καμπύλες της ελαστικότητας του κερατοειδούς που ονομάζονται «stress-strain curves». Οι καμπύλες αυτές έχουν κλίση προς τα δεξιά, όταν ο κερατοειδής εμφανίζει ελαστικότητα και προς τα αριστερά όταν εμφανίζει ακαμψία. Ο δείκτης SSI περιγράφει την

κλίση της καμπύλης. Τιμές SSI ίσες με τη μονάδα χαρακτηρίζουν έναν ελαστικό κερατοειδή, μικρότερες από τη μονάδα τιμές χαρακτηρίζουν έναν πολύ ελαστικό και μεγαλύτερες από τη μονάδα έναν πιο άκαμπτο από τον φυσιολογικό κερατοειδή. (Optikgeräte, 2024)

Συζήτηση

Ο κερατοειδής χιτώνας είναι η διαθλαστικότερη επιφάνεια του οφθαλμού και συνεπώς η διατήρηση της φυσιολογικής δομής του είναι αδήριτης ανάγκης για τη λειτουργία της όρασης. Για το λόγο αυτό στις σύγχρονες οφθαλμιατρικές πράξεις, εκτελείται ενδεδειγμένος έλεγχος της ανατομίας του κερατοειδούς με τη Σχισμοειδής Λυχνία. Η Σχισμοειδής Λυχνία συνιστά μία πρωτεύουσας σημασίας απεικονιστική μονάδα της οφθαλμικής επιφάνειας, στη φαρέτρα των οφθαλμιάτρων και οπτομετρών. Η παρατήρηση ξεκινά πιο γενικά με τη διάχυση και την παραλληλεπίπεδη δέσμη για τον εντοπισμό εμφανών παθολογιών του κερατοειδούς. Όσο αυξάνεται η μεγέθυνση, άρα και η ανάλυση της εικόνας, μειώνεται το οπτικό πεδίο. Η φωτεινή δέσμη, ωστόσο, κάνει ορατές σημαντικές λεπτομέρειες, λ.χ. οριοθετεί το βάθος των ξένων σωμάτων, σπύλων κλπ. και απεικονίζει τα βαθύτερα στρώματα του κερατοειδή, λ.χ. στο ενδοθήλιο. (Bharat & Kirandeep , 2023) Επόμενη μη επεμβατική απεικονιστική μέθοδος του κερατοειδούς είναι η συνεστιακή μικροσκοπία. Η συνεστιακή μικροσκοπία διενεργείται σε πιο εξειδικευμένες καταστάσεις σε σύγκριση με τη συμβατική μικροσκοπία. Με μηχανισμό όμοιο με μη επεμβατική βιοψία, το διοδικό laser He- Ne του συνεστιακού μικροσκοπίου εξετάζει τις μεταβολές στις νευρικές ίνες του κερατοειδούς ενός μεγάλου πάχους δείγματος ιστού. Είναι δεδομένο, λοιπόν, ότι πρόκειται για ένα εξελιγμένο μικροσκόπιο οπτικοποίησης των νευρικών ινών του κερατοειδούς, εξαιρετικά αξιοποιήσιμο σε νευροεκφυλιστικές ασθένειες με οφθαλμική συμμετοχή, όπως στη διαβητική νευροπάθεια, στη σκλήρυνση κατά πλάκας κλπ. Αλλά και στην δισκοειδή κερατίτιδα HSV, το συνεστιακό μικροσκόπιο αποκαλύπτει περισσότερες πληροφορίες από τη σχισμοειδή λυχνία. Συγκεκριμένα, η παρουσία στο συνεστιακό μικροσκόπιο νεκρωτικών επιθηλιακών κύτταρων και τα φλεγμονωδών κύτταρων του Langerhans συνδέεται με επαναλοίμωξη HSV και η μείωση των νεύρων του πλέγματος του υποβασικού νεύρου σε οξεία και χρόνια φάση αποκαλύπτει τη μεγάλη διάρκεια αποδρομής της λοίμωξης. (Abdolrahimzadeh , et al., 2023)

Αναφορικά με τις απεικονιστικές μεθόδους ελέγχου του κερατοειδή, οι τοπογράφοι αποτελούν αναμφισβήτητα αναπόσπαστο κομμάτι της ολοκληρωμένης εξέτασης του κερατοειδούς. Ξεκινώντας από τον τοπογράφο Placido με τους είκοσι δύο ισαπέχοντες και ομόκεντρους δακτυλίους στον κερατοειδή με γωνιακή ανάλυση δύο μοιρών, μπορούμε να υπερτονίσουμε την ακρίβεια των δεδομένων από την κεντρική ζώνη του Αξονικού του χάρτη, σε σχέση με τους άλλους τοπογράφους. Συνεπώς, εξυπηρετεί ιδιαίτερα τον προεγχειρητικό έλεγχο της Φωτοδιαθλαστικής Κερατεκτομής (PRK). Επίσης, οι τοπογράφοι

Placido εκτελούν επιστάμενο έλεγχο της αμπερομετρίας του κερατοειδούς με τους πολυωνυμικούς χάρτες Zernike. Εντούτοις, οι τοπογράφοι Placido, αν και μετρούν με ακρίβεια τη διαθλαστική ισχύ των οφθαλμών, υστερούν στην τρισδιάστατη απεικόνιση του σχήματος του κερατοειδούς. Η πιθανή παράλειψη ανίχνευσης αστιγματισμών άνω των τριών διοπτριών ή πολύ ελαφριών ή σε πρώιμο στάδιο κερατοειδικών ανωμαλιών, τα μειωμένα σημεία δεδομένων από την παρακεντρική, την περιφερική και η αδυναμία χαρτογράφησης της οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς είναι μερικά από τα μειονεκτήματα της τοπογραφίας Placido. Η επόμενη τομογραφική μέθοδος που αναλύεται, η τεχνολογία Scheimpflug με τους τομογράφους Pentacam, Galilei, Sirius κατορθώνει την τρισδιάστατη απεικόνιση του κερατοειδούς με αυξημένη ακρίβεια για αυτό και θεωρείται ιδιαίτερα ευαίσθητη στην ανίχνευση πρώιμου κερατόκωνου. Ο χάρτης βελτιωμένης οπτικοποίησης εκτασίας *Belin Ambrosio Enhanced Ectasia Display (BAD)* του τοπογράφου *Pentacam* είναι ένας επιπρόσθετος χάρτης εντοπισμού κερατοειδικής εκτασίας. Χαρακτηριστικά ευρήματα στον κερατόκωνο είναι ένας αυξημένος ρυθμός λέπτυνσης της κερατοειδικής επιφάνειας για κάθε μεσημβρινό μιας μοίρας (PPI) και μία μεγαλύτερη απόσταση του λεπτότερου σημείου του κερατοειδούς και του γεωμετρικού κέντρου. (Espinoza , et al., 2023)

Ο τοπογράφος Galilei εμφανίστηκε αργότερα από τον Pentacam βελτιώνοντας την επαναληψιμότητα και τα σφάλματα αποκέντρωσης των οφθαλμών χάρη στον μικρότερο χρόνο λήψης της μέτρησης. Μία ιδιαίτερη προσθήκη του τοπογράφου Galilei, είναι η εισαγωγή της ιδανικής τορικής και ασφαιρικής επιφάνειας (Best Toric and Aspheric surface), η οποία εναρμονίζεται περισσότερο με την επιφάνεια του κερατοειδούς εκμηδενίζοντας σχεδόν την ασφαιρικότητα και την τορικότητά του. Ακόμη, η ευαισθησία του δείκτη ασυμμετρίας της οπίσθιας επιφάνειας *AAI (Posterior Asphericity Asymmetry Index)* στην ανίχνευση του πρώιμου κερατόκωνου, αναδεικνύει την μεγάλη αξιοπιστία του τοπογράφου Galilei για χρήση σε υποψία κερατόκωνου.

Ο τοπογράφος Sirius, από την άλλη πλευρά, κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμος για την ταξινόμηση του κερατόκωνου, τη μέτρηση της διαμέτρου και εύρεσης του κέντρου της κόρης σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, μείβογραφίας και ανάλυσης του δακρυϊκού φιλμ (Non Invasive Break Up Time). Φαίνεται να υπερέχει σε ακρίβεια στις μετρήσεις του προσθίου θαλάμου και την παχυμετρία ολόκληρου του κερατοειδή, γεγονός που τον καθιστά προτιμότερο σε περιπτώσεις κερατοπλαστικής και εναπόθεσης κερατοειδικών δακτυλίων, σε σχέση με άλλους τοπογράφους. (Sahu, 2022)

Ο τοπογράφος Orbscan II συγκριτικά με τον Pentacam έχει την τάση να υπολογίζει

μεγαλύτερες κερατομετρικές ενδείξεις και διαθλαστική ισχύ, πιθανώς λόγω της διαφορετικής τεχνολογίας και της επιρροής της δακρυϊκής στιβάδας λόγω του μεγαλύτερου χρόνου λήψης της μέτρησης. Αντίθετα, ο Orbscan υποεκτιμά ελαφρώς το κεντρικό πάχος του κερατοειδούς σε σχέση με τον Pentacam. (Ikhyun & Yi Kim, 2022)

Οι μέσες τιμές αστιγματισμού πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας παρουσιάζουν ανοδική τάση στην έγχρωμη τοπογραφία Cassini σε σχέση με τον Pentacam. Συνολικά, η συμφωνία των μετρήσεων των δύο συσκευών αποδείχτηκε χαμηλή ίσως λόγω του διαφορετικού τρόπου λειτουργίας των συσκευών, της ακρίβειας και της βαθμονόμησής τους αλλά και του μεγαλύτερου χρόνου λήψης της μέτρησης μέσω Pentacam. Δεν έχει αποσαφηνιστεί ακόμη, η σχέση των μετρήσεων με άλλους τοπογράφους της τεχνολογίας Placido ή Scheimpflug. (Choun-Ki , et al., 2019).

Αναφορικά με την οπτική τομογραφία συνοχής, η τεχνολογία SS-OCT σε συνδυασμό με μία πηγή μεγαλύτερου μήκους κύματος, υπερνικά σε ευαισθησία και βάθος διείσδυσης τους άλλους τύπους OCT. Με τη σχεδόν ιστολογική ανάλυση του SS-OCT, αναλύονται τα στρώματα του κερατοειδούς και εντοπίζεται το βάθος αδιαφανειών, διηθήσεων δυστροφιών και ουλών του κερατοειδούς. Η διεισδυτική χαρτογράφηση των μορφωμάτων ή των δυστροφιών διευκολύνει τη διαφοροδιάγνωση και την επιλογή στοχευμένης μεθόδου αντιμετώπισης. Το SS-OCT, επίσης, διαθέτει μεγαλύτερη επαναληψιμότητα από την τεχνολογία Scheimpflug και συνεπώς προτιμάται για τη μετεγχειρητική παρακολούθηση των ασθενών, π.χ. σε περιπτώσεις κερατόκωνου. (Chen , et al., 2020)

Για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας του κερατοειδούς συστήνεται η ενδοθηλιομέτρηση με φασματικό μικροσκόπιο. Η φασματική ενδοθηλιομέτρηση έχει το πλεονέκτημα ότι είναι άμεση, ανέπαφη μέθοδος απεικόνισης του μονόστιβου κερατοειδικού ενδοθηλίου μέσω της κατοπτρικής ανάκλαση από τη διεπιφάνεια μεταξύ του ενδοθηλίου και του υδατοειδούς υγρού. Σημειώνεται ότι η ενδοθηλιομέτρηση εκτελείται αλγοριθμικά, άρα δεν εμπλέκεται ο υποκειμενικός παράγοντας στην καταμέτρηση των κυττάρων. Η μεγάλη της διαγνωστική αξία στις ενδοθηλιοπάθειες, καθιστά τη φασματική ενδοθηλιομέτρηση απαραίτητη για τον προεγχειρητικό έλεγχο διαθλαστικών επεμβάσεων και τη μετεγχειρητική παρακολούθηση των ασθενών για την αποφυγή δευτεροπαθών ενδοθηλιοπαθειών. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραγνωρίζουμε την επίδραση μη επεμβατικών πράξεων, όπως τη μακρόχρονη και λανθασμένη χρήση φακών επαφής, στην παθογένεση ασθενειών του ενδοθηλίου. (Jeang , et al., 2022)

Στη συνέχεια, από την ανάλυση του Reichert's Ocular Response Analyzer, συμπεραίνεται ότι πρόκειται για μία πρωτοποριακή συσκευή στη μέτρηση της ενδοφθάλμιας πίεσης. Η

καινοτομία της έγκειται στον υπολογισμό της υστέρησης, του παράγοντα αντίστασης του κερατοειδούς και την παραγωγή της δεύτερης τιμής ενδοφθάλμιας πίεσης IOPcc, προσαρμοσμένη με την εμβιομηχανική του κερατοειδούς. Είναι εντυπωσιακό το ότι τα εμβιομηχανικά χαρακτηριστικά του κερατοειδούς είναι δυνατόν να μεταβληθούν ανάλογα με τις εκτασίες και τα οφθαλμικά τραύματα. Πλεονεκτεί σε σχέση με άλλα τονόμετρα στο ότι είναι ανέπαφη μέθοδος τονομετρίας, περιορίζοντας τον κίνδυνο μολύνσεων και δεν απαιτεί αναισθητικό, προάγοντας τη συνεργασία του ασθενή. Η ακρίβεια των μετρήσεων της ενδοφθάλμιας πίεσης με το Ocular Response Analyzer είναι υπό αμφισβήτηση, λόγω της μικρότερης επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας. Γενικότερα, η χρήση του συγκεκριμένου τονομέτρου δεν είναι εκτεταμένη και λόγω υψηλού κόστους. Παρόμοια, το τονόμετρο Corvis ST, εξετάζει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του κερατοειδή. Σημειώνεται ότι το Corvis ST, έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει τη Biomechanical Corrected IOP, χωρίς να επηρεάζεται από το πάχος και την εμβιομηχανική του κερατοειδούς. Προκαλεί εντύπωση, επιπλέον, ότι ο εναντιομορφισμός στους υγιείς οφθαλμούς χαρακτηρίζει και την εμβιομηχανική του κερατοειδούς. Ιδιαίτερης βαρύτητας είναι η συμβολή του συγκεκριμένου τονομέτρου στην ανίχνευση πρώιμου κερατοκώνου με διαγνωστική ακρίβεια συγκρίσιμη με αυτήν των δεικτών του Pentacam με την αξιολόγηση αποκλειστικά του Κερατοειδικού Εμβιομηχανικού Δείκτη. (Ahmed, et al., 2024). Άλλο ένα ρηξικέλευθο χαρακτηριστικό του Corvis ST είναι η δυνατότητα ποσοτικοποίησης της επίδρασης της διασύνδεσης κολλαγόνου στην εμβιομηχανική του κερατοειδή. (Gongru , et al., 2023)

Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία μελετά τα διαθέσιμα σύγχρονα μέσα ανατομικού, απεικονιστικού και λειτουργικού ελέγχου του κερατοειδούς. Ο ανατομικός έλεγχος πραγματοποιείται με τη Σχισμοειδής Λυχνία και τη Συνεστιακή Μικροσκοπία. Η Σχισμοειδής Λυχνία είναι η θεμελιώδης απεικονιστική συσκευή της οφθαλμικής επιφάνειας. Είναι ένα βιομικροσκόπιο με μεταβαλλόμενες ρυθμίσεις για το ύψος, το πλάτος, τη γωνία, τη μεγέθυνση, τον φωτισμό. Όλες αυτές οι παράμετροι καθορίζονται ώστε να εφαρμοστεί συγκεκριμένη τεχνική εξέτασης ανάλογα με τον απαιτούμενο έλεγχο. Η Συνεστιακή Μικροσκοπία εξειδικεύεται στον εντοπισμό παθολογιών των νευρικών ινών του κερατοειδούς. Στη συγκεκριμένη προσπάθεια αναλύονται οι αλλαγές των νευρικών ινών στη Διαβητική περιφερική συμμετρική πολυνευροπάθεια, τη νόσο Fabry, την σκλήρυνση κατά πλάκας και την οφθαλμική λοίμωξη HSV. Θα ήταν ωφέλιμο, να διεξαχθεί περαιτέρω μελέτη στο μέλλον σχετική με την παθοφυσιολογία αυτών των νόσων και να διασταυρωθούν τα αποτελέσματα με τα τρέχοντα δεδομένα.

Ο απεικονιστικός έλεγχος του κερατοειδή συνοψίζεται στην τοπογραφαφική και τομογραφική απεικόνιση του κερατοειδούς με τις τεχνολογίες Placido, σάρωσης σχισμής, Scheimpflug, LED Cassini και το OCT κερατοειδούς. Οι τομογράφοι Scheimpflug χάρη στην υψηλή ευαισθησία τους στη διάγνωση του πρώιμου κερατοκώνου, τείνουν να είναι οι επικρατέστεροι για τον σύγχρονο διεξοδικό έλεγχο της κυρτότητας και μορφολογίας του κερατοειδούς. Ο τοπογράφος LED Cassini είναι από τις πιο σύγχρονες συσκευές τοπογραφίας. Συνεπώς, συγκριτικές μελέτες των μετρήσεων του σχετικά με άλλες τεχνολογίες, θα μπορούσαν να διεξαχθούν σε δεύτερο χρόνο.

Εν κατακλείδι, η εξέταση της λειτουργικότητας του κερατοειδούς εστιάζεται στη φασματική ενδοθλιομέτρηση, και την τονομετρία με τα συστήματα Ocular Response Analyzer, Corvis ST. Επειδή τα προαναφερθέντα τονόμετρα έχουν εισαχθεί σχετικά πρόσφατα στο πεδίο της εμβιομηχανικής εξέτασης του κερατοειδούς, απομένει να συμπληρωθεί η εγκυρότητα και η συνάφεια των μετρήσεών τους με παρόμοιες συσκευές, σε κατοπινές μελέτες.

Βιβλιογραφία

Abdolrahimzadeh , S. και συν., 2023. *Optical Diagnostics in Herpetic Keratitis*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.mdpi.com/2304-6732/10/4/349>

Acharya, M. και συν., 2022. *Role of AS-OCT in Managing Corneal Disorders*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.mdpi.com/2075-4418/12/4/918>

Ahmed Malik, R. και συν., 2020. *Rapid Corneal Nerve Fiber Loss: A Marker of Diabetic Neuropathy Onset and Progression*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://diabetesjournals.org/care/article/43/8/1829/35573/Rapid-Corneal-Nerve-Fiber-Loss-A-Marker-of>

Ahmed , S. και συν., 2024. *Corneal elevation topographic maps assessing different diseases detection: A review*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923001818>

Ahmed, E. και συν., 2024. *Performance of Corvis ST Parameters Including Updated Stress-Strain Index in Differentiating Between Normal, Forme-Fruste, Subclinical, and Clinical Keratoconic Eyes*. [Ηλεκτρονικό].

Akova, Y. και συν., 2019. *Role of corneal nerves in ocular surface homeostasis and disease*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/aos.13844>

Al-Jarrah , B. και συν., 2020. *Corneal nerve loss in children with type 1 diabetes mellitus without retinopathy or microalbuminuria*. [Ηλεκτρονικό].

American Academy of Ophthalmology, 2021. *Chapter 2: Examination Techniques for the External Eye and Cornea*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.aao.org/education/bcscsnippetdetail.aspx?id=ce1ab280-11ac-46a1-95ba-f2a25c7f9b47>

Asimellis, G. & Kaufman, E., 2024. *Keratoconus*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK470435/>

Becky, S., Gelles, J. & Noyes, M., 2023. *The Definitive Guide to Corneal Topography*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.revieweducationgroup.com/ce/the-definitive-guide-to-corneal-topography>

Bharat , G. & Kirandeep , K., 2023. *Slit-Lamp Biomicroscope*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587440/>

Burand, A. & Stucky, C., 2021. *Fabry disease pain: patient and preclinical parallels*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
https://journals.lww.com/pain/fulltext/2021/05000/fabry_disease_pain_patient_and_preclinical.5.aspx

Carlos de Oliveira , R. & Wilson , S., 2020. *Descemet's membrane development, structure, function and regeneration*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0014483520303493?via%3Dihub>

Chen , A. και συν., 2020. *Comparison of a new anterior segment optical coherence tomography and Oculus Pentacam for measurement of anterior chamber depth and corneal thickness*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://atm.amegroups.org/article/view/46917/html>

Chiang , J. και συν., 2023. *In-vivo corneal confocal microscopy: Imaging analysis, biological insights and future directions*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.nature.com/articles/s42003-023-05005-8>

Choun-Ki , J., Xian-Hua , C., Young-Sik, Y. & Youngju, A., 2019. *Comparison of keratometric measurements between color light-emitting diode topography and Scheimpflug camera*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6486681/>

Davies , I., Meyler , J. & Veys , J., χ.χ. 1-12. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587440/>

Doctor , K., Ganesan Lalgudi , V., Gupta , K. & Kaweri , L., 2020. *Simplifying and understanding various topographic indices for keratoconus using Scheimpflug based topographers*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7856941/>

D'Onofrio , L. και συν., 2021. *Corneal Confocal Microscopy to Image Small Nerve Fiber Degeneration: Ophthalmology Meets Neurology*. [Ηλεκτρονικό].

Dua, H. και συν., 2023. *The pre-Descemet's layer (Dua's layer, also known as the Dua-Fine layer and the pre-posterior limiting lamina layer): Discovery, characterisation, clinical and surgical applications, and the controversy*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350946222001215?via%3Dihub>

Elliott, A., 2020. *Confocal Microscopy: Principles and Modern Practices*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6961134/>

Epshtein, D., 2019. *What Specular Microscopy Reveals About Your Patients*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.reviewofcontactlenses.com/article/what-specular-microscopy-reveals-about-your-patients>

Espana, E., Jeang, L. & Margo , C., 2022. *Diseases of the Corneal Endothelium*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8044020/>

Espinoza , D., Guachichulca , A. & Rojas, A., 2023. *Refractive and Topographic Parameters of the Belin/Ambrósio Module in Patients with Refractive Defects in Cuenca, Ecuador*.

[Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.openophthalmologyjournal.com/VOLUME/17/ELOCATOR/e187436412302030/FULLTEXT/>

- Felipe , A., Jammal , A. & Medeiros, A., 2022. *Corneal Hysteresis: Ready for Prime Time?*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10287060/>
- Ferreira , T., Mendes , J. & Ribeiro , F., 2021. *Evaluation of posterior and total corneal astigmatism with colour-LED topography*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8377057/>
- Findl , O. και συν., 2019. *Chapter 13 Anterior Segment OCT*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554035/>
- Fortman , M., Mahmoud , A., Roberts , C. & Yuhas, P., 2024. *Keratoconus cone location influences ocular biomechanical parameters measured by the Ocular Response Analyzer*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://eandv.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40662-023-00371-0>
- Galor, A. και συν., 2021. *High resolution anterior segment optical coherence tomography of ocular surface lesions: A review and handbook*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9611086/>
- Ginting , M. και συν., 2024. *Cassini Corneal Topographer*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-50666-6_31
- Gongpu , L. και συν., 2023. *In vivo corneal elastography: A topical review of challenges and opportunities*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2001037023001629>
- Hoopes , P. και συν., 2019. *Galilei Corneal Tomography for Screening of Refractive Surgery Candidates: A Review of the Literature, Part II*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6778460/#B33>
- Ikhyun, J. & Yi Kim, B., 2022. *Comparison of Anterior Segment Measurements with a New Multifunctional Unit and Five Other Devices*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://ekjo.org/journal/view.php?doi=10.3341/kjo.2022.0025>
- Jeang , L., Margo, C. & Espana, E., 2022. *Diseases of the Corneal Endothelium*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8044020/>
- Karlin , E., Lopez, M., Ludwig, P. & Sevensma, . K., 2023. *Anatomy, Head and Neck, Eye Cornea*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK470340/>
- Klyce, S., 2020. *12. Endothelial pump and barrier function*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0014483520303274?via%3Dihub>
- Lemp, M. & Snell, R., 2008. Cornea Anatomy. Στο: *Clinical Ocular Anatomy*. s.l.:Broken Hill, pp. 155-160.
- Lemp , M. & Snell, R., 2008. Ophthalmic bulb. Στο: *Clinical Ocular Anatomy*. s.l.:s.n., p. 160.

Naeem AH, 2021. *what is slit lamp Biomicroscopy | What is a slit lamp exam used for? /Difference between Haag Streit and Zeiss /Slit lamp Filters*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.slideshare.net/mhmd17/what-is-slit-lamp-biomicroscopy-what-is-a-slit-lamp-exam-used-for-difference-between-haag-streit-and-zeiss-slit-lamp-filters>

OCULUS, 2024. *Interpretation Guide 3rd edition*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
https://www.pentacam.com/fileadmin/user_upload/pentacam.de/downloads/interpretation-s-leitfaden/interpretation_guideline_3rd_edition_0417.pdf
[Πρόσβαση 2024].

Optikgeräte, O., 2024. *Corneal Biomechanics*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.corneal-biomechanics.com/en/biomechanics/>

Sahu, J., 2022. *Corneal Topography : Sirius*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/358473133_Corneal_Topography_Sirius

Sridhar, U. & Tripathy , K., 2023. *Corneal Topography*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK585055/>

Tăbăcaru, B., Ionescu, A. & Davila, C., 2020. *Corneal topography in preoperative evaluation for laser*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://rjo.ro/wp-content/uploads/2020/12/3.Tabacaru-Bogdana_RJO_2020.pdf

University of Bristol, 2024. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.bristol.ac.uk/media-library/sites/wolfson-bioimaging/documents/confocal8guide.pdf>
[Πρόσβαση 2024].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κερατόκωνος (Keratoconus)

Ο κερατόκωνος είναι μία αμφοτερόπλευρη ασύμμετρη μη φλεγμονώδης προοδευτική κωνικού σχήματος κερατοειδική εκτασία. Ο κερατόκωνος προκαλεί ανώμαλη λέπτυνση των ινών του κολλαγόνου στο σημείο του κώνου και αύξηση της καμπυλότητας, γεγονός που προκαλεί μεγάλης διοπτρικής ισχύος ανώμαλο αστιγματισμό. Η κορυφή του κώνου συνήθως βρίσκεται στο κατώτερο ημιμόριο του κερατοειδούς. Η έναρξη της νόσου τοποθετείται χρονικά στην εφηβεία με σταθεροποίηση στην τέταρτη δεκαετία της ζωής. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων και οι δύο οφθαλμοί θα προσβληθούν, αν και η εξέλιξη της νόσου στον κάθε οφθαλμού ενδέχεται να διαφέρει. Φαίνεται ότι υπάρχει και κληρονομική επιβάρυνση σε λιγότερο από το ένα δέκατο των ασθενών, ενώ υπάρχει σημαντική συσχέτιση του κερατοκώνου με το άσθμα, τις ατοπικές νόσους και τον “πυρετό εκ χόρτου”, τις ορμονικές διαταραχές, διάφορα σύνδρομα (πχ. Down σε ποσοστό 0,5-15%, Marfan, ατελής οστεογένεση) και το χρόνιο τρίψιμο ματιών. Σε ορισμένους ασθενείς που επιμένουν στο τρίψιμο των ματιών και φορούν σκληρούς φακούς επαφής, ενδέχεται να προκληθεί τραύμα στον κερατοειδή. Ακόμη, στην προσπάθεια των κερατοκυττάρων να επουλώσουν τη βλάβη, είναι πιθανό να αλλάξει περαιτέρω η τοπογραφία του κερατοειδούς. Σε υποκλινικό στάδιο ο κερατόκωνος μπορεί να μείνει αδιάγνωστος, με αποτέλεσμα μία ήπια μορφολογική ασυμμετρία να αποδοθεί σε ελαφρώς ασύμμετρο λοξό αστιγματισμό. Στον αρχόμενο κερατόκωνο, προσβάλλεται εντονότερα ο πρόσθιος και κεντρικός κερατοειδής, το επιθήλιο, η μεμβράνη του Bowman και το στρώμα. Το επιθήλιο λεπταίνει λόγω των αποπτώσεων των κυττάρων και γίνεται ανομοιόμορφο εξαιτίας της ακανόνιστης διάταξης βασικών κυττάρων. Οι ασθενείς χρησιμοποιούν γυαλιά οράσεως έως ότου αυτά είναι βοηθητικά. Καθώς αυξάνεται η βαρύτητα του κερατοκώνου μπορεί να προστεθούν ραβδώσεις στο στρώμα λόγω της παθολογικής διάταξης των ινιδίων κολλαγόνου και εκφυλιστικοί ινοβλάστες στο στρώμα του κερατοειδούς, ρήξεις και διηθήσεις των βασικών επιθηλιακών κυττάρων στην- φυσιολογικά ακυτταρική- μεμβράνη του Bowman. Θολρότητα και ουλοποίηση στην κωνική προεξοχή είναι επίσης πιθανές επιπλοκές. Αν προκύψει ύδρωπας κερατοειδούς (με ρήξη της δεσκεμετείου μεμβράνης και είσοδο του υδατοειδούς υγρού στο επιθήλιο και στο στρώμα) απαιτείται χειρουργική επέμβαση. Η μεταβαλλόμενη μείωση της οπτικής οξύτητας λόγω του ανώμαλου αστιγματισμού, της αύξησης της μυωπίας και της παραμόρφωσης των ειδώλων δεν βελτιώνονται ιδιαίτερα με γυαλιά οράσεως, αλλά με φακούς επαφής. Περισσότερο διαδεδομένοι είναι οι άκαμπτοι αεροδιαπερατοί -RGP, με τους οποίους το δάκρυ

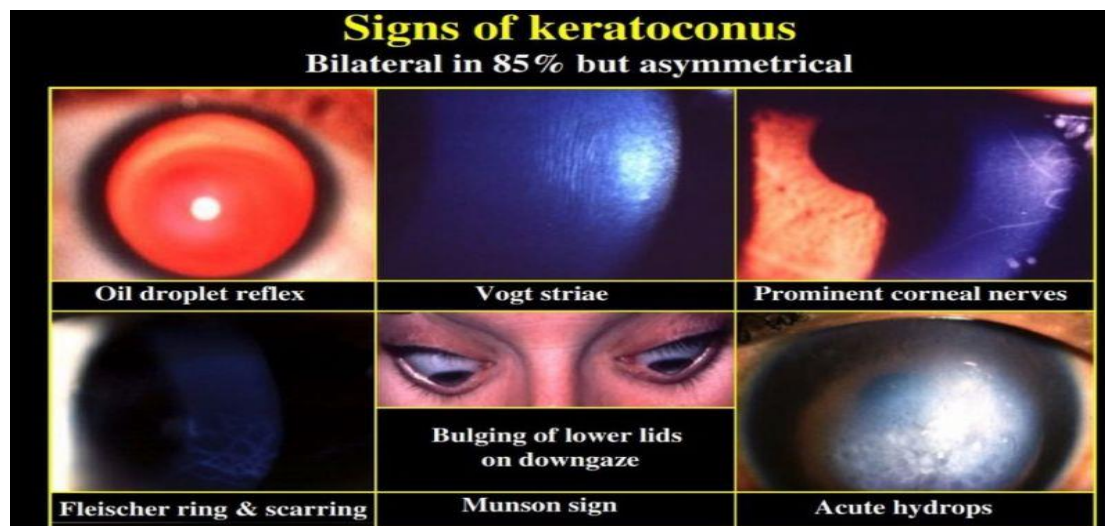
συγκεντρώνεται πίσω από τον φακό, εξομαλύνοντας τον κερατοειδικό αστιγματισμό. Εκτός από τους RGP φακούς, χρησιμοποιούνται οι υβριδικοί, σκληρικοί, riggyback, δηλαδή RGP φακός επαφής πάνω από μαλακό φακό επαφής με διευρυμένη κεντρική ζώνη. Οι σκληρικοί φακοί επαφής εφαρμόζονται σε σοβαρό κερατόκωνο και γενικά είναι πιο εύχρηστοι. Οι φακοί επαφής, αν και βελτιώνουν την ποιότητα της όρασης, δεν σταθεροποιούν τον κερατόκωνο και ενδέχεται να μην γίνονται καλά ανεκτοί από τον χρήστη.

Η σύγχρονη διάγνωση του κερατόκωνου επιτυγχάνεται με σκιασκοπία (ψαλιδοειδής κίνηση), τοπογραφία και τομογραφία κερατοειδούς. Τυπικό γνώρισμα των κερατοκωνικών ασθενών, οι επαναλαμβανόμενες αλλαγές στη διάθλαση που προκαλούν έλλειψη άνετης όρασης με τα γυαλιά ή τους φακούς. Βασικές ενδείξεις κερατόκωνου γίνονται αντιληπτές και στη σχισμοειδή λυχνία, συγκεκριμένα:

-Σημάδι Münson. Σε προχωρημένα στάδια παρατηρείται μία εσοχή του κάτω βλεφάρου σε σχήμα V στην κάτω βλεμματική θέση, εξαιτίας του κώνου.

Εικόνα 40. Κλινικά σημεία κερατόκωνου

https://media.licdn.com/dms/image/D4E22AQFZ4u8DlcbDLw/feedshare-shrink_800/0/1712592655666?e=2147483647&v=beta&t=PQR9JWvS74kt6SvKVw8nC_n-bio2qT76J99aEEyAN/



-Δακτύλιος Fleisher: Καφέ εναποθέσεις σιδήρου στο δακρυϊκό φιλμ στην περιοχή του κώνου στο ύψος της δεσκεμετίου μεμβράνης στον πρώιμο κερατόκωνο. Απεικονίζονται καλύτερα με μπλε του κοβαλτίου. Ορατός και στην τοπογραφία και τομογραφία κερατοειδούς.

- *Vogt striae*: Ως επί το πλείστον κατακόρυφες γραμμές στην οπίσθια επιφάνεια της δεσκεμετίου μεμβράνης. Εμφανίζονται στη λεπτότερη περιοχή του κερατοειδούς και εξαφανίζονται με εφαρμογή ήπιας πίεσης. Παρατηρούνται, εντούτοις και σε υγιείς οφθαλμούς. Τα Vogt Striae είναι ορατά και στην τοπογραφία και τομογραφία κερατοειδούς.

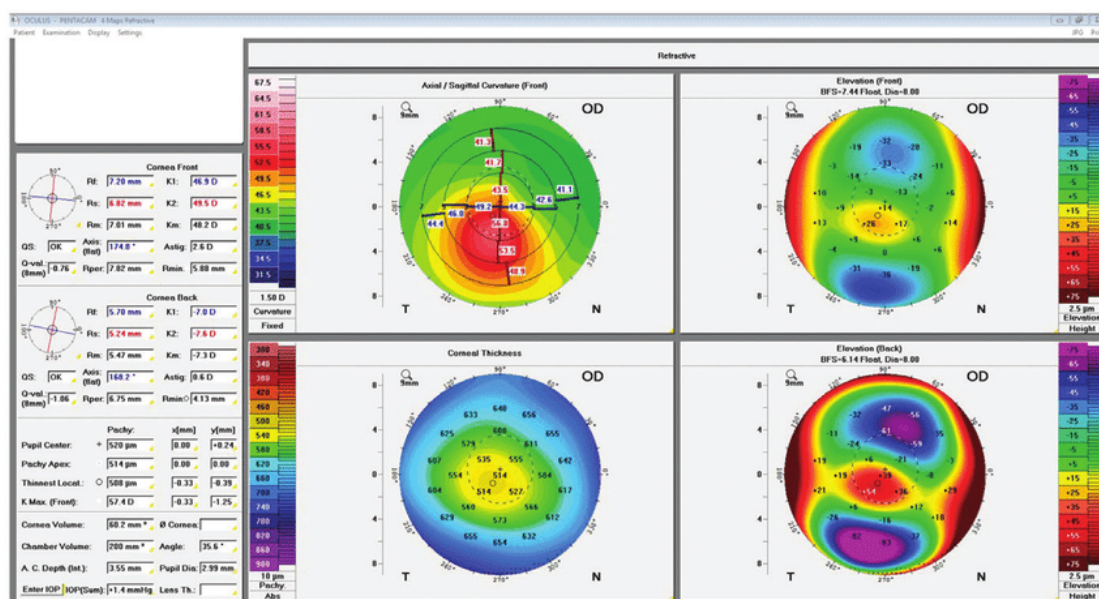
- Σημείο Rizutti: Εκδηλώνεται ως φωτεινή αντανάκλαση ρινικά του άκρου, όταν το φως έχει κατεύθυνση προς κροταφικά του άκρου.
 - Ουλές: Θραύσματα στο πρόσθιο έλασμα λόγω της λέπτυνσης του κερατοειδούς.
 - Εμφανή νεύρα στον κερατοειδή: Η παρουσία κερατοειδικών νεύρων στην εξέταση στη σχισμοειδή λυχνία είναι σημείο κερατόκωνου. Μείωση της αίσθησης των ερεθισμάτων στον κερατοειδή αποδίδεται σε προχωρημένα στάδια κερατόκωνου.
- Υφίστανται διάφορα κριτήρια για την ταξινόμηση του κερατόκωνου :

- Μορφολογική ταξινόμηση κερατόκωνου/ Ταξινόμηση Buxton. Ταξινόμηση του κερατόκωνου σύμφωνα με τη μορφολογία και τη θέση του κώνου.
 - *Οβάλ κερατόκωνος (Oval/ sagging cone keratoconus).* Προσβάλλει συχνότερα περιοχές στο κατώτερο τεταρτημόριο.
 - *Κερατόκωνος σχήματος θηλής (Nipple cone keratoconus).* Ο κώνος έχει διάμετρο μικρότερη ή ίση με 5mm και βρίσκεται κεντρικά ή ελαφρώς παρακεντρικά.
 - *Κώνος σχήματος σφαίρας (Round cone keratoconus).* Ο κώνος καταλαμβάνει περισσότερο από το 75% της επιφάνειας του κερατοειδή.
- Διοπτρική ταξινόμηση κερατόκωνου. Ταξινόμηση με βάση την κεντρική δύναμη του κερατοειδούς.
 - *Ήπιος κερατόκωνος: < 45Δ*
 - *Μέτριος κερατόκωνος: 46-52Δ*
 - *Προχωρημένος κερατόκωνος: 53-59Δ*
 - *Σοβαρός κερατόκωνος: > 59Δ.*
- Σύστημα ταξινόμησης Amsler-Krumeich. Το σύστημα αυτό είναι χρονικά το παλαιότερο. Συνδυάζει μορφολογικά, κερατομετρικά, παχυμετρικά και διαθλαστικά δεδομένα. Με εναρκτήριο το στάδιο 1, το στάδιο 4 κρίνεται το πιο σοβαρό.
 - *Στάδιο 1.* Περιλαμβάνει έκκεντρη αύξηση της κυρτότητας, μυωπία και αστιγματισμό μεγαλύτερο των 5 διοπτριών, μέσες κεντρικές κερατομετρικές ενδείξεις μικρότερες των 48 διοπτριών.

- *Στάδιο 2.* Περιλαμβάνει ύπαρξη μυωπίας και αστιγματισμού από 5 έως 8 διοπτρίες, μέσες κεντρικές κερατομετρικές ενδείξεις μικρότερες των 53 διοπτριών, ελάχιστο πάχος κερατοειδή μεγαλύτερο από 400μ και απουσία ουλών.
- *Στάδιο 3.* Περιλαμβάνει ύπαρξη μυωπίας και αστιγματισμού από 8 έως 10 διοπτρίες, μέσες κεντρικές κερατομετρικές ενδείξεις μεγαλύτερες των 53 διοπτριών, ελάχιστο πάχος κερατοειδή 300- 400μ και απουσία ουλών.
- *Στάδιο 4.* Περιλαμβάνει αδυναμία ακριβούς υπολογισμού του διαθλαστικού σφάλματος, μέσες κεντρικές κερατομετρικές ενδείξεις μεγαλύτερες των 55 διοπτριών, ελάχιστο πάχος κερατοειδή 200μ και ουλοποίηση του κεντρικού κερατοειδή.
- *Σύστημα ταξινόμησης κερατόκωνου Belin ABCD.* Το σύστημα αυτό ταξινομεί το στάδιο του κερατόκωνου βάση των ακόλουθων παραγόντων:
 - *A:* Η πρόσθια και η οπίσθια ακτίνα καμπυλότητας του κερατοειδούς.
 - *B:* Η καμπυλότητα του λεπτότερου σημείου της ζώνης των κεντρικών 3mm.
 - *C:* Παχυμετρία λεπτότερου σημείου του κερατοειδούς.
 - *D:* Καλύτερη διορθωμένη μακρινή οπτική οξύτητα.
- *Σύστημα ταξινόμησης Hom.* Κατηγοριοποίηση κερατόκωνου με βάση τα κλινικά συμπτώματα.
 - *Προκλινικός κερατόκωνος.* Απουσία κλινικών συμπτωμάτων.
 - *Ήπιος κερατόκωνος.* Ήπια λέπτυνση του κερατοειδούς και ψαλιδοειδής κίνηση ανιχνεύσιμη με το σκιασκόπιο.
 - *Μέτριος κερατόκωνος.* Μείωση ποιότητας όρασης και εντονότερη λέπτυνση του κερατοειδούς.
 - *Σοβαρός κερατόκωνος.* Σοβαρή μείωση οπτικής οξύτητας, μεταβαλλόμενη διάθλαση και σημαντική λέπτυνση του κερατοειδούς.

Εικόνα 41. Τοπογραφία Pentacam σε κερατόκωνο.

<https://www.researchgate.net/publication/321952298/figure/fig5/AS:640052971438080@1529611928531/Pentacam-depicting-inferior-corneal-steepening-and-posterior-corneal-elevation-in.png>



Ακρογωνιαίος λίθος στην αντιμετώπιση του κερατόκωνου είναι η έγκαιρη διάγνωση, η συχνή παρακολούθηση της οπτικής οξύτητας και πρώιμες παρεμβάσεις όπως η διασύνδεση κολλαγόνου με στόχο τη σταθεροποίηση ή ανάσχεση της εκτασίας. Ιδιαίτερης βαρύτητας είναι, επίσης, η συμμόρφωση του ασθενή για την αποφυγή τριψίματος των και όλες τις εξατομικευμένες θεραπευτικές οδηγίες. Το 10-20% θα χρειαστεί μεταμόσχευση κερατοειδούς, σύμφωνα με τις τρέχουσες μελέτες.

Η διασύνδεση κολλαγόνου περιλαμβάνει την αφαίρεση των κεντρικών 6 χιλιοστών περίπου του επιθηλίου, την έγχυση διαλύματος ριβοφλαβίνης και έκθεση σε συγκεκριμένου μήκους κύματος υπεριώδη ακτινοβολία για τον σχηματισμό δεσμών στο στρώμα του κερατοειδούς. Είναι κρίσιμη η έγκαιρη εφαρμογή της θεραπείας για τα βέλτιστα αποτελέσματα σε κερατοκωνικούς ασθενείς που πληρούν, βέβαια, τις προϋποθέσεις. Δηλαδή, κερατοειδείς με κεντρικό πάχος μεγαλύτερο των 400μm, χωρίς ύδρωπα και ιστορικό ερπητικής κερατίτιδας. Ορισμένες επιπλοκές της διασύνδεσης κολλαγόνου είναι ο πόνος, το οίδημα κερατοειδούς, η θολή όραση και η κερατίτιδα. (Asimellis & Kaufman, 2024)