



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ



ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΕΚΤΑΤΙΚΟ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗ

MECHANICAL STRESSES ANALYSIS OF ECTATIC CORNEA

Φοιτήτρια ΠΜΣ «Οπτική & Όραση» :

Π. Κουτσογιαννακοπούλου

Επιβλέπων Καθηγητής :

Χ. Γκίνης

Τριμελής Επιτροπή :

Μ. Τσιλιμπάρης, Χ. Σιγανός, Σ. Δετοράκης

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος Οπτική και Όραση, κατατέθηκε στο τμήμα Ιατρικής του Πανεπιστημίου Κρήτης από την Παναγιώτα Κουτσογιαννακοπούλου τον Φεβρουάριο του 2018. Επιβλέπων καθηγητής ήταν ο Χαρίλαος Γκίνης. Την επιτροπή αξιολόγησης αποτέλεσαν οι Μιλτιάδης Τσιλιμπάρης, Χαράλαμπος Σιγανός, Ευστάθιος Δετοράκης.

Πίνακας περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

(ΑΓΓΛΙΚΑ).....σελ.5

(ΕΛΛΗΝΙΚΑ).....σελ.6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 Ανατομία κερατοειδή.....σελ.8

1.2 Ιστολογία κερατοειδή.....σελ.9

1.3 Δυστροφίες του κερατοειδή.....σελ.11

1.4 Ο κερατοειδής ως οπτικό στοιχείο.....σελ.12

1.5 Τοπογραφία του κερατοειδή.....σελ.13

1.6 Τοπογραφική μελέτη του κερατοκωνικού κερατοειδή.....σελ.19

1.7 Sheimpflug camera.....σελ.19

1.8 Κερατεκτασία.....σελ.22

1.9 Κερατόκωνοςσελ.22

1.10 Δείκτες εξέλιξης προόδου.....σελ.25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 Μηχανικές ιδιότητες του κερατοειδή (corneal biomechanics)σελ.25

2.2 Ο ρόλος των στιβάδων του κερατοειδή στη μηχανική του σταθερότητα.....σελ.26

2.3 Λεπτότοιχα δοχεία πίεσης.....σελ.27

2.4 Stress Factor στον κερατοειδή (ορισμοί)σελ.30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 Υπολογισμός stress factor από την καμπυλότητα και την παχυμετρία- Προεπεξεργασία δεδομένων.....σελ.31

3.2 Χαρακτηριστικά μελέτης και δείγματος.....σελ.36

3.3 Αποτελέσματα.....σελ.38

3.4 Συμπεράσματα.....σελ.49

INTRODUCTION

Keratoconus is a corneal disease in which the cornea gradually becomes thinner, resulting in the form of a cone. This deformation distorts the image formed in the retina and turbidity is observed in the region where the cone has appeared. Keratoconus initially exhibits abnormal astigmatism and progressively causes partial or total loss of vision which can not be corrected with glasses.

1 out of 2,000 people in the general population suffer from keratoconus. About 1 in 10 keratoconus patients have members in their family suffering from the same disease. Keratoconus has not been associated with any social, cultural or geographical distribution.

In mild cases of keratoconus, correction of vision can be achieved with glasses or contact lenses that compensate for the conical shape that the cornea has acquired. A new method of treatment of the keratoconus is Corneal Cross Linking (CXL) which aims to stop keratoconus progression. In severe cases, it is advised to proceed in corneal transplant surgery. Only 10% of patients suffering from keratoconus will need a transplant. The remaining 90% have adequate eyesight with the other methods. The success of corneal transplantation in keratoconus has a high rate of 95%.

The etiology of keratoconus remains unknown. It has generally hereditary nature and many factors are implicated in the appearance of keratokonus, which are mainly abnormalities in the structure or metabolism of various corneal parts. Thus, the prognosis of keratoconus progression becomes difficult.

There is also a theory that eye rubbing is another cause for keratoconus. It is believed that, although eye rubbing is not necessarily sufficient to generate keratoconus in all patients who rub, repeated eye rubbing episodes constitute the necessary ingredient to develop keratoconic changes in the cornea.

In this thesis, the problem of prognosis of disease progression will be approximated by calculating a stress factor which is associated with the mechanical stress that the cornea receives internally. That is, it has been evaluated whether the keratoconus progression is affected in relation to the values of stress and whether there is a range of the index values in which the disease-induced deformation appears to be stabilized.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κερατόκωνος είναι μια νόσος του κερατοειδή κατά την οποία σταδιακά λεπταίνει ο κερατοειδής με αποτέλεσμα να παίρνει τη μορφή κώνου. Η παραμόρφωση αυτή επιδεινώνει το είδωλο που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή και παρατηρείται θολερότητα στη περιοχή που έχει εμφανιστεί ο κώνος. Ο κερατόκωνος αρχικά εμφανίζει ανώμαλο αστιγματισμό και προοδευτικά προκαλεί μερική ή και ολική μείωση της οπτικής οξύτητας, η οποία δεν βελτιώνεται με γυαλιά και μπορεί να καταλήξει σε τύφλωση.

1 στους 2000 ανθρώπους στο γενικό πληθυσμό πάσχει από κερατόκωνο. Περίπου 1 στους 10 ασθενείς με κερατόκωνο, έχουν μέλη στην οικογένεια τους που πάσχουν από την ίδια νόσο. Φαίνεται ότι η νόσος έχει οικογενή χαρακτήρα. Η κατάσταση δεν έχει συσχετισθεί με κάποια κοινωνική, μορφωτική ή γεωγραφική κατανομή.

Σε ήπιες περιπτώσεις κερατοκώνου η διόρθωση της όρασης μπορεί να γίνει με γυαλιά ή ειδικούς φακούς επαφής που αντισταθμίζουν το κωνικό σχήμα που απέκτησε ο κερατοειδής. Μια μέθοδος αντιμετώπισης του κερατόκωνου είναι η Διασύνδεση του Κερατοειδικού Κολλαγόνου (Corneal Collagen Cross Linking (CXL)) με στόχο να σταματήσει την εξέλιξη του κερατόκωνου. Σε σοβαρές περιπτώσεις, υπάρχει ένδειξη χειρουργικής επέμβασης μεταμόσχευσης του κερατοειδούς. Μόνο το 10% των ασθενών που πάσχουν από κερατόκωνο, θα χρειαστούν μεταμόσχευση. Το υπόλοιπο 90% έχει ικανοποιητική όραση με τις άλλες μεθόδους. Η μεταμόσχευση του κερατοειδούς στον κερατόκωνο έχει μεγάλο ποσοστό επιτυχίας που φθάνει το 95%.

Η αιτιολογία του κερατόκωνου παραμένει άγνωστη. Θεωρείται γενικά κληρονομική ασθένεια και ενοχοποιούνται για την εμφάνισή της πολλοί παράγοντες, κυρίως ανωμαλίες της δομής ή του μεταβολισμού των διαφόρων τμημάτων του κερατοειδούς. Έτσι η πρόβλεψη της εξέλιξης του κερατόκωνου καθίσταται δύσκολη.

Υπάρχει, επίσης, μια θεωρία ότι το τρίψιμο των οφθαλμών είναι άλλη μια αιτία για τον κερατόκωνο. Πιστεύεται ότι παρόλο που το τρίψιμο των οφθαλμών δεν είναι απαραίτητα επαρκές ώστε να δημιουργηθεί κερατόκωνος σε όλους τους ασθενείς με αυτή τη συνήθεια, το επανειλημμένο τρίψιμο των οφθαλμών αποτελεί το απαραίτητο συστατικό για την ανάπτυξη κερατοκωνικών αλλαγών στον κερατοειδή χιτώνα.

Σε αυτή την εργασία θα προσεγγιστεί το πρόβλημα της πρόβλεψης της εξέλιξης της νόσου, υπολογίζοντας ένα νέο δείκτη (stress factor) που σχετίζεται με τη μηχανική τάση που δέχεται εσωτερικά ο κερατοειδής. Δηλαδή, αξιολογήθηκε κατά πόσο σχετίζεται η εξέλιξη του κερατόκωνου σε σχέση με τις τιμές των τάσεων και αν υπάρχει ένα εύρος τιμών του δείκτη στο οποίο φαίνεται να σταθεροποιείται η παραμόρφωση που προκαλεί η ασθένεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

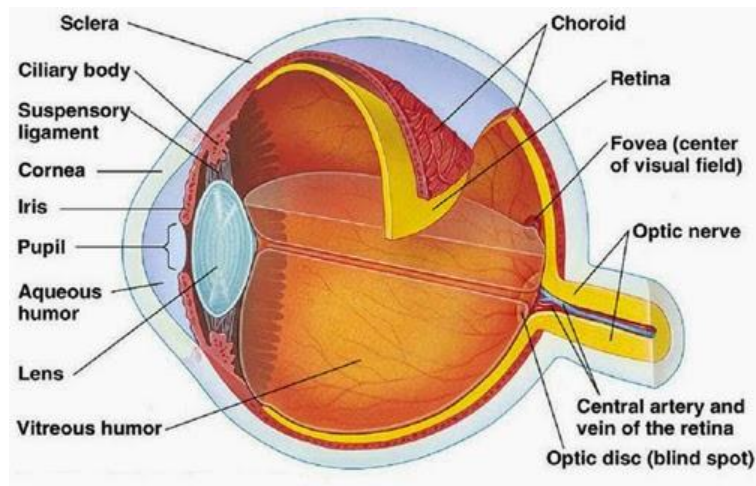
1.1 ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗ

Ο κερατοειδής μαζί με τον σκληρό αποτελούν το εξωτερικό τοίχωμα του οφθαλμού. Η δομή του κερατοειδή επιτρέπει τη διάδοση και τη διάθλαση του φωτός, καθώς επίσης προστατεύει το εσωτερικό του οφθαλμού από τη διείσδυση μικροοργανισμών.

Ο κερατοειδής είναι διαφανής, ανάγγειος, έχει λίγα κύτταρα και κυρτό σχήμα, το στρώμα του αποτελεί το 90% του πάχους του και είναι ένα μείγμα κολλαγόνου και εξωκυττάριας ουσίας. Το πάχος του κερατοειδή είναι περίπου 500-600μm στο κέντρο και 600-800μm στη περιφέρεια, έχει διάμετρο περίπου 11,5-12mm στον οριζόντιο άξονα και 10,5-11mm στον κατακόρυφο και ο δείκτης διάθλασης του είναι 1,376. Η διαθλαστική του ισχύς είναι 45 διοπτρίες και λόγω της διαφάνειάς του επιτρέπει της ακτίνες του φωτός να εισέλθουν στον οφθαλμό και να καταλήξουν στον αμφιβληστροειδή.

Οι διαστάσεις του πλησιάζουν τις φυσιολογικές τιμές ενός ενήλικα κατά τον έκτο μήνα αλλά αναπτύσσεται μέχρι και τον έκτο χρόνο ζωής.

Ο κερατοειδής παρουσιάζει ευαισθησία στην αφή, δέχεται νευρικές ίνες από τον οφθαλμικό κλάδο του τρίδυμου νεύρου, οι οποίες εκτίθενται σε περίπτωση απώλειας του επιθηλίου προκαλώντας πόνο. Ο κερατοειδής τρέφεται με διάχυση από τα αγγεία του σκληροκερατοειδούς ορίου, το υδατοειδές υγρό και τα δάκρυα και οξυγονώνεται από τον αέρα.



Εικόνα 1.1.1 : Ανατομία οφθαλμού

1.2 ΙΣΤΟΛΟΓΙΑ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗ

Ο κερατοειδής αποτελείται από τις εξής στοιβάδες (από έξω προς τα μέσα):

- Επιθήλιο
- Βασική μεμβράνη
- Στιβάδα του Bowman
- Στρώμα
- Δεσκεμέτειος μεμβράνη
- Ενδοθήλιο

Το επιθήλιο είναι πολύστοιβο, με 5-6 στιβάδες κυττάρων στο κέντρο και περίπου 10 στιβάδες στη περιφέρεια. Το πάχος του επιθηλίου είναι 50μm στο κέντρο και 80μm στη περιφέρεια.

Το επιθήλιο αποτελείται από τρία είδη κυττάρων : τα βασικά επιθηλιακά κύτταρα, τα πτερυγοειδή πολυγωνικά και τα επιφανειακά.

Τα βασικά επιθηλιακά κύτταρα είναι ψηλά, κυλινδρικά, με στρογγυλό πυρήνα που βρίσκεται στη κορυφή του κυττάρου. Από τη βασική στοιβάδα προέρχονται τα νέα επιθηλιακά κύτταρα. Ο χρόνος που απαιτείται για να αναγεννηθεί πλήρως το επιθήλιο είναι 7 ημέρες.

Τα πτερυγοειδή πολυγωνικά κύτταρα αποτελούν τη μέση στιβάδα του επιθηλίου. Η πρόσθια επιφάνεια τους είναι κυρτή και η οπίσθια κοίλη. Επίσης έχουν μικρές προεκβολές ώστε να συνδέονται με παρακείμενα κύτταρα.

Τα επιφανειακά κύτταρα είναι πεπλατυσμένα και δημιουργούν 2-3 στιβάδες. Στη πρόσθια επιφάνειά τους εμφανίζονται μικρολάχνες που συμμετέχουν στη συγκράτηση της δακρυϊκής στοιβάδας. Τα γερασμένα επιφανειακά κύτταρα αποπίπτουν στη προκεράτιο δακρυϊκή στοιβάδα και τη θέση τους παίρνουν νέα κύτταρα από τη βασική στιβάδα του επιθηλίου.

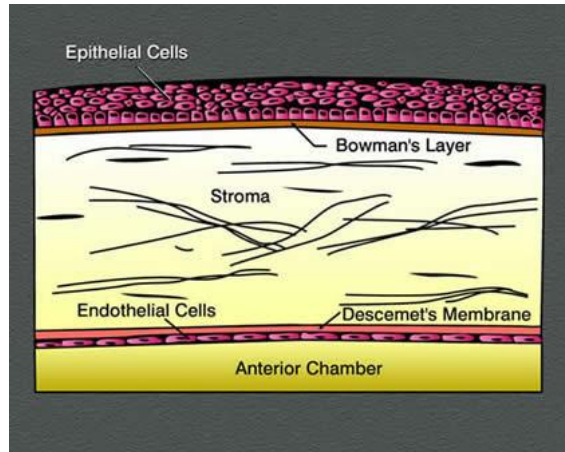
Η βασική μεμβράνη φαίνεται σαν λεπτή ταινία και εκκρίνεται από τα βασικά κύτταρα της βασικής στοιβάδας και συνδέεται στερεά με τη μεμβράνη του Bowman.

Η στιβάδα του Bowman δεν έχει κύτταρα, αποτελείται από κολλαγόνο και θεμέλιο ουσία. Το πάχος της κυμαίνεται από 8 έως 12 μm , με τη πρόσθια επιφάνεια της λεία και ομαλή, ενώ η οπίσθια δεν είναι σαφής. Εικάζεται ότι η μεμβράνη του Bowman βοηθά στην στερεότητα και την αντοχή του κερατοειδή.

Το στρώμα του κερατοειδή αποτελείται από κύτταρα, θεμέλιο ουσία και ελάσματα ινιδίων του κολλαγόνου. Τα ινίδια του κολλαγόνου είναι παράλληλα διατεταγμένα και περιβάλλονται από θεμέλιο ουσία. Η διαφάνεια του κερατοειδή οφείλεται κυρίως σε αυτή την ομαλή διάταξη. Τα κύτταρα του στρώματος είναι δύο ειδών μόνιμα και μεταναστευτικά. Τέλος, η θεμέλιος ουσία αποτελείται από πρωτεογλυκάνες και γλυκοζαμινογλυκάνες.

Η βασική μεμβράνη του ενδοθηλίου, η Δεσκεμέτειος μεμβράνη, είναι ομοιογενής και μπορεί να αποχωριστεί εύκολα το ενδοθήλιο. Αποτελείται από ινίδια του κολλαγόνου σε ομοιόμορφη διάταξη.

Το ενδοθήλιο αποτελείται από ένα στρώμα εξαγωνικών επίπεδων κυττάρων, περίπου 400.000 σε πλήθος. Τα κύτταρα του ενδοθηλίου δεν ανανεώνονται, έτσι με τη πάροδο του χρόνου η πυκνότητα τους μειώνεται. Για να καλυφθούν τα κενά που δημιουργούνται από τα νεκρά κύτταρα, τα εναπομείναντα πλαταίνουν και μετακινούνται. Ωστόσο το ενδοθήλιο δεν μπορεί να λειτουργήσει φυσιολογικά, αν η πυκνότητα των κυττάρων είναι κάτω των 400-700 κύτταρα/ mm^2 .



Εικόνα 1.2.1 : Ιστολογία κερατοειδή

1.3 ΔΥΣΤΡΟΦΙΕΣ ΤΟΥ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗ

Οι δυστροφίες του κερατοειδή είναι κληρονομικές, αμφοτερόπλευρες αλλοιώσεις του κερατοειδή. Συνήθως κληρονομούνται κατά τον αυτοσωματικό επικρατούντα χαρακτήρα και εμφανίζονται τις πρώτες δεκαετίες της ζωής. Μπορεί να είναι είτε εξελίξιμες είτε στάσιμες. Κάποιες από τις δυστροφίες του κερατοειδή μπορεί να οφείλονται σε εναποθέσεις παθολογικών προϊόντων στον κερατοειδή.

Οι κυριότερες δυστροφίες του κερατοειδή είναι οι εξής:

- Προσθιες δυστροφίες, δηλαδή δυστροφίες του επιθηλίου και της μεμβράνης του Bowman
 - Δυστροφία της βασικής μεμβράνης του επιθηλίου
 - Υποτροπιάζουσα επιθηλιακή διάβρωση
- Δυστροφίες του στρώματος
 - Κοκκώδης δυστροφία
 - Κηλιδώδης δυστροφία
 - Δκτυωτή δυστροφία
 - Οπίσθιες δυστροφίες, δηλαδή δυστροφίες του ενδοθηλίου και της Δεσκεμετείου μεμβράνης

- Σταγονοειδής δυστροφία
- Δυστροφία του Fuchs
- Εκτατικές δυστροφίες
 - Κερατόκωνος
 - Εκτασία μετά από Laser διαθλαστική επέμβαση (Ιατρογενής κερατεκτασία)

1.4 Ο ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗΣ ΩΣ ΟΠΤΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

Η βασική διαθλαστική επιφάνεια του οφθαλμού είναι η πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή έχει τη μέγιστη διαφορά δεικτών διάθλασης από τον αέρα ($n=1$) και από το υδατοειδές υγρό ($n=1,336$). Έτσι, η ποιότητα του ειδώλου που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την συμμετρία της επιφάνειας του κερατοειδή.

Η εξωτερική επιφάνεια του κερατοειδή έχει ελλειψοειδές σχήμα, το οποίο μειώνει την σφαιρική εκτροπή σε τέτοιο βαθμό ώστε να μειώνει κατά πολύ την αρνητική σφαιρική εκτροπή που οφείλεται στον κρυσταλλοειδή φακό. Αν ο φυσιολογικός κερατοειδής ήταν σφαιρικός οι ακτίνες φωτός εισερχόμενες δεν θα εστιάζονταν στο ίδιο σημείο και θα δημιουργούσαν μία θαμπή εικόνα στον αμφιβληστροειδή λόγω των σφαιρικών εκτροπών. Επειδή όμως ο φυσιολογικός κερατοειδής είναι ασφαιρικός, τα σφάλματα λόγω των σφαιρικών εκτροπών μειώνονται και οι εισερχόμενες ακτίνες εστιάζονται σχεδόν στο ίδιο σημείο δίνοντας έτσι καλύτερη ποιότητα ειδώλου.

Με βάση τις μέσες τιμές των μετρήσεων που έχουν γίνει σε φυσιολογικούς οφθαλμούς, η μέση ακτίνα καμπυλότητας είναι 7.72 χιλ. και η κωνική σταθερά $q=-0.26$. Ο κερατοειδής για κάθε άνθρωπο διαφέρει αρκετά από τον προαναφερθέντα μέσο όρο και της ακτίνας καμπυλότητας και της ασφαιρικότητας.

Επίσης, επειδή δεν υπάρχει εκ περιστροφής συμμετρία στην εξωτερική επιφάνεια του κερατοειδούς το οπτικό σύστημα μπορεί να έχει διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας κατά μήκος διαφορετικών μεσημβρινών και να εμφανίζει από αστιγματισμό.

1.5 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗ

Η τοπογραφία περιγράφει και αναπαριστά τα χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης επιφάνειας με μεγάλη λεπτομέρεια. Η τοπογραφία του κερατοειδούς είναι η μέτρηση, η ανάλυση και η απεικόνιση της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδή με τοπογραφικά κριτήρια. Επειδή η πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή καλύπτεται από τη δακρυϊκή στιβάδα, με την τοπογραφία του κερατοειδή περιγράφεται η μορφολογία της πρόσθιας προκετοειδικής δακρυϊκής στιβάδας.

Η τοπογραφία εκτός από μια μέθοδος λεπτομερούς απεικόνισης της επιφάνειας του κερατοειδούς είναι συγχρόνως και μέθοδος διάγνωσης για διάφορες ασθένειες, μεταξύ αυτών και ο κερατόκωνος, οι οποίες προέρχονται εξαιτίας ανωμαλιών που υπάρχουν σε αυτή την διαθλαστική επιφάνεια του οφθαλμού. Κατά τη διάρκεια των περασμένων ετών έγιναν πολλές βελτιώσεις στην τοπογραφία του κερατοειδούς που ανταποκρίνονταν στη διαρκώς αυξημένη ανάγκη για καλύτερη κλινική διάγνωση και παρακολούθηση. Οι βελτιώσεις αυτές αφορούσαν την επαναληψιμότητα και την ακρίβεια των μετρήσεων.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος τοπογραφίας κερατοειδούς είναι αυτή που βασίζεται στην απεικόνιση του ειδώλου ομόκεντρων εναλλασσόμενων φωτεινών και σκοτεινών δακτυλίων (placido disk) που σχηματίζονται στην πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς μέσω ανάκλαση, οι ανωμαλίες της επιφάνειας του κερατοειδή προκαλούν παραμόρφωση του ειδώλου των δακτυλίων του placido δίσκου. Η

ανάλυση του σχήματος των δακτυλίων οδηγεί στον υπολογισμό του σχήματος του κερατοειδή.

Η ανακλώμενη εικόνα καταγράφεται από μία ψηφιακή κάμερα. Η κάμερα αυτή βρίσκεται στο κέντρο των δακτυλίων, έτσι ώστε να είναι στο ίδιο οπτικό άξονα που γίνεται και η πραγματική προβολή.

Η εικόνα που καταγράφεται από την κάμερα αναλύεται και επεξεργάζεται από ειδικό λογισμικό, δίνει γεωμετρικές πληροφορίες για την επιφάνεια του κερατοειδούς και παρουσιάζει τα αποτελέσματα σε διάφορες μορφές. Εκτός από τον χάρτη της κατανομής της διαθλαστικής ισχύος στην επιφάνεια του κερατοειδούς, με την μορφή χρωματικού χάρτη, όπου τα πιο θερμά χρώματα αντιστοιχούν σε πιο κυρτές περιοχές, πολλά από τα τοπογραφικά συστήματα υπολογίζουν και δείκτες αξιολόγησης της ποιότητας του μετρούμενου κερατοειδούς ως οπτικό μέσο, όπως η σφαιρικότητα, η εκκεντρότητα, η ομοιογένεια και η αντιστοιχούσα θεωρητικά προσεγγιζόμενη κερατοειδική οπτική οξύτητα.

Το πλήθος των δακτυλίων που απεικονίζονται, προσδιορίζει και την ακρίβεια με την οποία προσεγγίζεται το σχήμα της επιφάνειας. Η υπόθεση που γίνεται για το σχήμα του κερατοειδούς στην μέθοδο απεικόνισης με τον δίσκο του placido με ομόκεντρους δακτυλίους, είναι ότι χρησιμοποιείται ένα σχήμα αναφοράς για την βαθμονόμηση. Το σχήμα αναφοράς είναι μία σφαιρική επιφάνεια με ακτίνα καμπυλότητας 7.8 χιλιοστά και προσεγγίζει την μέση καμπυλότητα για έναν φυσιολογικό οφθαλμό.

Η τοπογραφία κερατοειδούς με αρχή λειτουργίας placido δεν μετράει απευθείας τις συντεταγμένες x, y και z από τα σημεία του κερατοειδούς για τρισδιάστατη απεικόνιση. Στην πραγματικότητα μετράει την απόκλιση των ανακλασμένων δακτυλίων και υπολογίζει την ακτίνα της καμπυλότητας των σημείων του κερατοειδούς κατά μεσημβρινούς από 0 έως 360° . Η καμπυλότητα του κερατοειδούς εκφράζεται με την ακτίνα καμπυλότητας σε χιλιοστά (mm).

Η αξονική καμπυλότητα (sagittal curvature) είναι μια μέτρηση, σε χιλιοστόμετρα ή μικρά, της απόστασης μεταξύ του γεωμετρικού κέντρου του κερατοειδούς και της τομής μιας χορδής με καθορισμένο μήκος.

Η υψομετρική διαφορά ενός σημείου της επιφάνειας του κερατοειδούς απεικονίζει το ύψος αυτού του σημείου σε σχέση με μία σφαιρική επιφάνεια αναφοράς. Η καλύτερη μαθηματικά προσέγγιση της πραγματικής επιφάνειας κερατοειδούς ονομάζεται Best-Fitted Sphere (BSF).

Στην διαθλαστική χειρουργική η διαθλαστική δύναμη του οφθαλμού αλλάζει με την αφαίρεση κερατοειδικού ιστού και έτσι οι χάρτες που δείχνουν υψομετρικές διαφορές είναι σημαντικοί και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του βάθους αποδόμησης καθώς και της διαμέτρου της ζώνης εκτομής.

Μια άλλη μέθοδος ανάλυσης των οπτικών του οφθαλμού είναι η διαθλασιμετρία μετώπου κύματος. Με αυτήν, η χαρτογράφηση των οπτικών σφαλμάτων και η διαθλαστική ισχύ του οφθαλμού γίνεται χρησιμοποιώντας εξελιγμένα όργανα που ονομάζονται διαθλασίμετρα μετώπου κύματος ή αλλιώς αναλυτές μετώπου κύματος (Wavefront Analyzers) ή εκτροπόμετρα. Η απεικόνιση γίνεται με τη μορφή χρωματικού χάρτη.

Υπάρχουν τρεις βασικές αρχές που εφαρμόζονται για την μέτρηση των σφαλμάτων μετώπου κύματος.

- Αρχή Hartmann-Shack
- Αρχή Tschering
- Αρχή Ray tracing

Μέθοδος Hartmann-Shack:

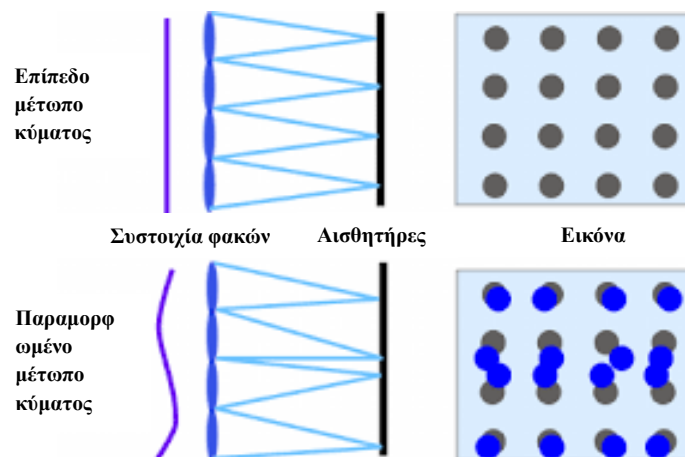
Η μέθοδος αυτή είναι η πιο διαδεδομένη για την ανάλυση μετώπου κύματος. Χρησιμοποιεί μια φωτοδίοδο (SLD Super Luminance Photodiode), υψηλής λαμπρότητας η οποία εισέρχεται στον οφθαλμό από το άνοιγμα της κόρης. Η ακτίνα αυτή ανακλάται από τον αμφιβλιστροειδή, και σαν δεύτερη πηγή φωτός εξέρχεται του οφθαλμού. Η ακτίνα στην πορεία της μέσα από το μάτι, υπόκειται σε παραμόρφωση από τα σφάλματα και τις ατέλειες των μέσων που διέρχεται, και

καταλήγει σε μία συστοιχία φακών (lenslet array). Η συστοιχία των φακών μέσα από την οποία περνάει η εξερχόμενη δέσμη, αποτελείται από ένα πλέγμα μικρών φακών, καθένας από τους οποίους εστιάζει ένα μικρό κομμάτι από το μέτωπο κύματος, πάνω σε έναν αισθητήρα (CCD imaging chip).

Η απόκλιση κάθε σημείου από το ιδανικό σημείο εστίασης κάθε φακού πάνω στο CCD είναι αντίστοιχα μία ένδειξη της κλίσης του μετώπου κύματος στο συγκεκριμένο σημείο. Οι κλίσεις αυτές αντιστοιχούν στις αποκλίσεις από το ιδανικό μέτωπο κύματος και απεικονίζονται σε μορφή χρωματικού χάρτη.

Πιο αναλυτικά, έστω μία χωρικά εκτεταμένη δέσμη φωτός. Αν απεικονίσουμε ένα επίπεδο το οποίο είναι κάθετο στην κατεύθυνση μετάδοσης κάθε κύματος, η κυματομορφή που σχηματίζεται αντιπροσωπεύει το μέτωπο κύματος.

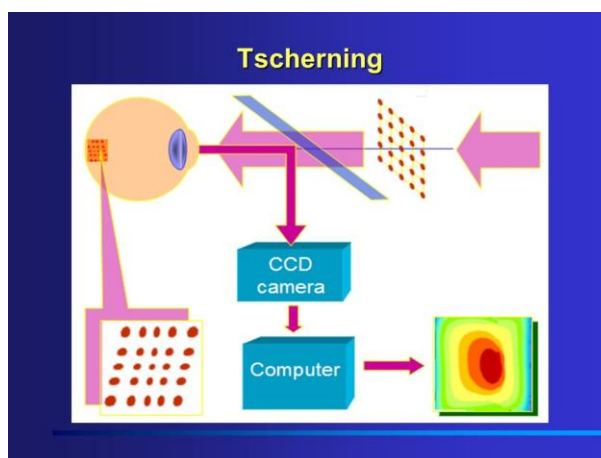
Μια δέσμη φωτός η οποία δεν έχει υποστεί καμία εκτροπή και ταξιδεύει παράλληλα με ένα συγκεκριμένο άξονα έχει σαν μέτωπο κύματος ένα επίπεδο που ταξιδεύει κάθετα σε αυτόν τον άξονα. Κάθε οπτική διαταραχή κατά την διαδρομή του φωτός μέσα από το μάτι, οδηγεί σε μία εκτροπή του μετώπου κύματος που εξέρχεται από το μάτι. Το εκτρεπόμενο μέτωπο κύματος απεικονίζεται στον ανιχνευτή με κάποιες αποκλίσεις από το ιδανικό. Οι αποκλίσεις απεικονίζονται σε μορφή χρωματικού χάρτη, και αντιστοιχούν στις εκτροπές του οφθαλμού όταν αυτές έχουν αναχθεί στο επίπεδο της κόρης του οφθαλμού.



Εικόνα 1.5.1 : Μέθοδος Hartmann Shack. Οι αποκλίσεις από τα ιδανικά σημεία εστίασης των φακών αντιστοιχούν στις αποκλίσεις του παραμορφωμένου μετώπου κύματος από το επίπεδο.

Μέθοδος Tscherning:

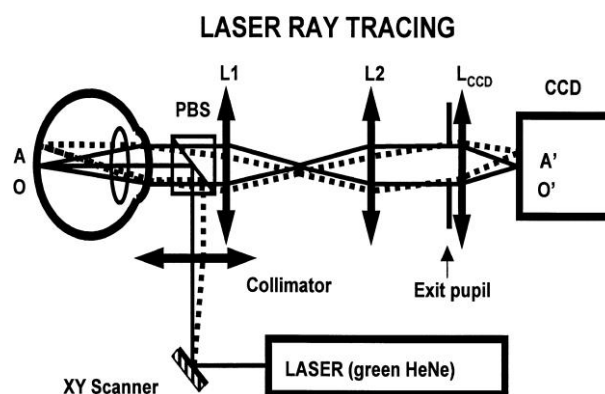
Με την μέθοδο αυτή, το φως με την μορφή τετράγωνου πλέγματος, δηλαδή πολλές δέσμες παράλληλες μεταξύ τους, οι οποίες είναι διατεταγμένες σε μπρφή τετράγωνου πλέγματος, προβάλλεται κάθετα μέσα από το άνοιγμα της κόρης και εστιάζεται πάνω στον αμφιβληστροειδή. Το εστιασμένο πλέγμα έχει παραμορφωθεί από τις εκτροπές που υπέστη στην διαδρομή του μέσα στον οφθαλμό, λόγω των ανωμαλιών που συνάντησε στην πορεία του. Στον αμφιβληστροειδή προβάλλεται μία εικόνα η οποία έχει τις παραμορφώσεις που υπέστη το αρχικό πλέγμα από το οπτικό σύστημα στο οποίο εισήλθε. Η εικόνα διαβάζεται από μία ψηφιακή CCD κάμερα υψηλής ευαισθησίας και στην συνέχεια υποβάλλεται σε μία σειρά ψηφιακών επεξεργασιών για να αξιολογηθούν οι αποκλίσεις της αρχικής εικόνας του πλέγματος, από αυτήν που διαμορφώθηκε μετά την διαδρομή του από τα μέσα του οφθαλμού. Οι αποκλίσεις αυτές παρουσιάζονται με την μορφή χρωματικών χαρτών.



Εικόνα 1.5.2 : Μέθοδος Tscherning. Το φως με μορφή τετράγωνου πλέγματος παραμορφώνεται και το είδωλο που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή διαβάζεται από τη κάμερα.

Μέθοδος Ray tracing Refractometry:

Με αυτή τη μέθοδο, μία δέσμη φωτός (διοδικό Laser) σαρώνει τον οφθαλμό με διαδοχικές βολές από διαφορετικά σημεία εισόδου σε χρόνο μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου. Η κάθε διαμορφωμένη δέσμη συναντά τον αμφιβληστροειδή σε κάποιο σημείο δημιουργώντας μια δευτερογενή πηγή σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία επιστρέφει και η κατεύθυνση διάδοσης του επιστρέφοντος μετώπου κύματος εξαρτάται από την θέση της δευτερογενούς πηγής. Η απόκλιση της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας από την αρχική απεικονίζεται σε ένα ανιχνευτή θέσης, με χρήση ενός συστήματος φακών. Στην συνέχεια το σήμα από τον ανιχνευτή θέσης μεταφράζεται σε ψηφιακή πληροφορία και οι αποκλίσεις από όλες τις δέσμες σχηματίζουν τον χρωματικό χάρτη του μετώπου κύματος.



Εικόνα 1.5.3 : Μέθοδος Ray Tracing. Η σάρωση του οφθαλμού γίνεται από διαφορετικά σημεία εισόδου. Η απόκλιση της επιστρεφόμενης ακτίνας ανιχνεύεται από το σύστημα φακών.

Πηγή: <http://iovs.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2162653>

1.6 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΕΡΑΤΟΚΩΝΙΚΟΥ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗ

Παθήσεις όπως ο κερατόκωνος μπορούν να παρουσιάσουν ανώμαλη επιφάνεια προτού να γίνουν εμφανή τα σημεία που μπορεί να διαγνώσει κλινικά ο οφθαλμίατρος. Στον κερατόκωνο η απλή τοπογραφική απεικόνιση μας δίνει την θέση, δηλαδή, το ύψος και το πλάτος, της κερατοειδικής ανωμαλίας, το εύρος της καμπυλομετρικής παρέκκλισης, της καμπυλότητας της κορυφής του και με συχνές εξετάσεις την σταθερότητα της ανωμαλίας στον χρόνο.

Τα νεότερα συστήματα τοπογραφίας μπορούν να ελέγξουν ταυτόχρονα και την καμπυλότητα της οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς της οποίας οι ανωμαλίες φαίνεται ότι προηγούνται της πρόσθιας επιφάνειας. Ταυτόχρονα με την ίδια εξέταση μπορούμε να ελέγξουμε με μεγάλη ακρίβεια το πάχος του κερατοειδή σε κάθε του σημείο του.

1.7 SCHEIMPFLUG CAMERA

Η αρχή Scheimpflug βασίζεται σε ένα γεωμετρικό κανόνα που περιγράφει τον προσανατολισμό του επιπέδου εστίασης ενός οπτικού συστήματος όταν το επίπεδο του φακού δεν είναι παράλληλο με το επίπεδο απεικόνισης του ειδώλου. Με μια συνηθισμένη κάμερα, όταν το αντικείμενο δεν είναι παράλληλο με το επίπεδο του ειδώλου τότε μια μικρή περιοχή είναι εστιασμένη. Με την τεχνική αυτή κατορθώνεται το επίπεδο του αντικειμένου, του φακού και του ειδώλου να είναι πλήρως εστιασμένο κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής που ονομάζεται γραμμή Scheimpflug .

Ένα σύστημα Scheimpflug απεικονίζει το εσωτερικό τμήμα με μια κάμερα κάθετη σε μια δέσμη, δημιουργώντας μία εγκάρσια τομή του κερατοειδή και του φακού. Οι πληροφορίες των εικόνων που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της εξέτασης μεταφέρονται σε έναν υπολογιστή. Στο τέλος της εξέτασης, τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται από τον υπολογιστή για να δημιουργηθεί μια τρισδιάστατη εικόνα

του εσωτερικού τμήματος του κερατοειδή. Έτσι, υπολογίζεται τοπογραφικά η κερατοειδική παχυμετρία, η καμπυλότητα του κερατοειδή, η γωνία πρόσθιου θαλάμου, ο όγκος και το ύψος, δηλαδή η διάφορα της ακτίνας του κερατοειδή από την ακτίνα μιας σφαίρας, αν υποθέταμε ότι ο κερατοειδής είχε σφαιρικό σχήμα. Η παχυμετρία και η τοπογραφία της πρόσθιας και της οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδή υπολογίζεται και απεικονίζονται σε μορφή χρωματικών χαρτών.

Στο Pentacam (Oculus GmbH, Germany), μια Scheimpflug κάμερα περιστρέφεται και παίρνει εικόνες από το πρόσθιο τμήμα, αξιολογώντας διαφορετικούς μεσημβρινούς. Οποιαδήποτε κίνηση του οφθαλμού ανιχνεύεται από μια δεύτερη κάμερα και διορθώνεται στη συνέχεια. Η τρισδιάστατη απεικόνιση της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδή υπολογίζεται από σχεδόν 25.000 πραγματικά σημεία ανύψωσης.

Υπάρχουν διάφοροι χρωματικοί χάρτες, οι οποίοι δίνουν διαφορετικές πληροφορίες για τον κερατοειδή.

Ο tangential curvature χάρτης υπολογίζει την ακτίνα καμπυλότητας που προσδιορίζεται λαμβάνοντας μια κάθετη διαδρομή μέσω του εν λόγω σημείου από ένα επίπεδο το οποίο τέμνει το σημείο και τον οπτικό άξονα, αλλά επιτρέποντας στην ακτίνα να είναι το μήκος που είναι απαραίτητο για να αντιστοιχεί σε μια σφαίρα με την ίδια καμπυλότητα στο σημείο αυτό. Η ακτίνα καμπυλότητας, υπολογίζεται με τη διαφορά μεταξύ του δείκτη διάθλασης κερατοειδούς και του 1,000 που διαιρείται με αυτή την εφαπτομενικά προσδιορισμένη ακτίνα. Ο tangential curvature χάρτης εμφανίζει συνήθως καλύτερη ευαισθησία στις περιφερειακές αλλαγές με λιγότερη "εξομάλυνση" της καμπυλότητας από τους αξονικούς χάρτες

Ο sagittal χάρτης αποτελεί τον πιο απλό απεικονιστικό χάρτη και παρέχει πληροφορίες για την καμπυλότητα του κερατοειδούς. Σύμφωνα με την χρωματική κλίμακα τα ζεστά χρώματα προσδιορίζουν τις πιο κυρτές περιοχές ενώ τα ψυχρά τις πιο επίπεδες. Αυτός ο χάρτης χρησιμοποιείται συχνά λόγω της ευκολίας του στην ανάγνωση. Ωστόσο, ενώ παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την καμπυλότητα του

κερατοειδούς στο σύνολό του, αδυνατεί να εντοπίσει μικρές αλλαγές καμπυλότητας καθώς και να απεικονίσει με ακρίβεια την περιφέρεια του κερατοειδή.

Ο elevation χάρτης δίνει πληροφορίες για την ανύψωση της πρόσθιας ή της οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδή. Στην πραγματικότητα είναι χάρτες που απεικονίζουν την υψομετρική διαφορά της επιφάνειας του κερατοειδούς σε σχέση με μια επιφάνεια αναφοράς είτε σφαιρική είτε ασφαιρική και τορική μετρούμενη σε μικρόμετρα (μm). Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την διαφορά από την επιφάνεια αναφοράς, με ζεστά χρώματα υποδηλώνεται η επιφάνεια που είναι πιο κυρτή από την επιφάνεια αναφοράς και με ψυχρά όταν η επιφάνεια είναι πιο επίπεδη.

Ο χάρτης παχυμετρίας του κερατοειδούς απεικονίζει το πάχος του κερατοειδούς σε όλη του την έκταση του υπολογισμένο σε μικρόμετρα.



Εικόνα 1.7.1 : Pentacam, Oculus GmbH, Germany

Πηγή: <https://visionequipmentinc.com/product/oculus-pentacam/>

1.8 ΚΕΡΑΤΕΚΤΑΣΙΑ

Η κερατεκτασία είναι μια σοβαρή μακροπρόθεσμη επιπλοκή της διαθλαστικής χειρουργικής, κατά την οποία ο κερατοειδής αποδυναμώνεται, υποχωρεί και κάνει μια εκτάνυση που έχει σαν συνέπεια υψηλό και ανώμαλο αστιγματισμό και πτώση της οπτικής οξύτητας. Είναι σημαντικό να διαγνωσθεί έγκαιρα για να μπορεί να αντιμετωπιστεί. Υπάρχουν τρόποι αντιμετώπισης σήμερα όπως το cross linking όπου με την χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας σταματά την εξέλιξη της παθολογικής αυτής κατάστασης.

1.9 ΚΕΡΑΤΟΚΩΝΟΣ

Ο κερατόκωνος είναι μια νόσος του κερατοειδή κατά την οποία σταδιακά λεπταίνει ο κερατοειδής με αποτέλεσμα να αλλάζει το φυσιολογικό σχήμα του, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κωνικού σχήματος.

Εμφανίζεται συχνά κατά την εφηβεία και έχει προοδευτική εξέλιξη, ώσπου σταθεροποιείται. Η νόσος εμφανίζεται και στους δύο οφθαλμούς, σε μεγάλο ποσοστό, αν και η βαρύτητα της νόσου μπορεί να διαφέρει ανάμεσα στους δύο οφθαλμούς. Σε προχωρημένο στάδιο μπορεί να εντοπιστεί και με γυμνό μάτι. Σε κάποιους ασθενείς η κληρονομικότητα παίζει σημαντικό ρόλο. Έχει συνδεθεί με διάφορες παθήσεις, όπως σύνδρομο Down, σύνδρομο Marfan, εαρίνη επιπεφυκίτιδα, μελαχρωστική αμφιβληστροειδοπάθεια.

Φαίνεται πως οι μηχανικοί παράγοντες παίζουν ρόλο στην εκδήλωση της νόσου.

Το κυριότερο σύμπτωμα είναι η μείωση της όρασης λόγω του ανώμαλου αστιγματισμού που δημιουργείται. Σε αυτή τη πρόιμη φάση, όπου η εκτασία δεν είναι εμφανής, η διάγνωση μπορεί να γίνει με μια τοπογραφική εξέταση, όπου και φαίνεται ο ανώμαλος αστιγματισμός και οι μεταβολές της καμπυλότητας του κερατοειδή, όπως επίσης παρατηρείται αδυναμία παραλληλισμού κατοπτρικών ειδώλων, μέσω της εξέτασης στο οφθαλμόμετρο του Javal. Αυτή η αδυναμία αποτελεί χαρακτηριστικό πρόιμο αντικειμενικό εύρημα του κερατόκωνου. Στη σχισμοειδή λυχνία παρατηρούνται λεπτές κατακόρυφες πτυχές στο επίπεδο του εν τω βάθει στρώματος και της Δεσκεμέτειου μεμβράνης. Αυτές οι πτυχές, οι οποίες ονομάζονται γραμμές του Vogt, οφείλονται στην έκταση της κεντρικής περιοχής του κερατοειδή.

Στην όσιμη φάση της νόσου, ο κερατοειδής παραμορφώνεται, ο αστιγματισμός αυξάνεται και επιπλέον εμφανίζεται μυωπία. Ο κώνος που έχει δημιουργηθεί στην επιφάνεια του κερατοειδή, πιέζει το κάτω βλέφαρο, όταν ο ασθενής στρέφει το βλέμμα του προς τα κάτω και παίρνει τη μορφή του σχήματος V, το οποίο ονομάζεται σημείου του Munson. Η λέπτυνση του κερατοειδή φαίνεται εύκολα στη σχισμοειδή λυχνία. Σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρούνται εναποθέσεις αιμοσιδηρίνης, η οποία μεταφέρεται με τα δάκρυα και εναποτίθεται γύρω από τη βάση του κώνου, μέσα στο επιθήλιο και στη μεμβράνη του Bowman. Επίσης, παρατηρούνται ουλές από ρήξεις της μεμβράνης του Bowman. Αυτές οι ουλές οφείλονται στη θόλωση του κερατοειδή.

Σε προχωρημένα στάδια μπορεί να δημιουργηθεί οξύ οίδημα του κερατοειδή, εξαιτίας των ρήξεων της Δεσκεμέτειου μεμβράνης. Οι ρήξεις αυτές επουλώνονται σε έξι με δέκα εβδομάδες και το οίδημα υποχωρεί, παρ' όλα αυτά αναπτύσσεται στο στρώμα ουλώδης ιστός. Συνήθως ο οξύς κερατόκωνος εμφανίζεται σε ενήλικα άτομα με σύνδρομο Down.

Στα πρώτα στάδια της νόσου χορηγούνται στον ασθενή γυαλιά για τη διόρθωση του αστιγματισμού. Σε πιο προχωρημένα στάδια αντιμετωπίζεται με εφαρμογή σκληρών φακών επαφής. Μια μέθοδος αντιμετώπισης του κερατόκωνου είναι η Διασύνδεση του Κερατοειδικού Κολλαγόνου (Corneal Collagen Cross Linking (CXL)), στην οποία χρησιμοποιείται ριβοφλαβίνη και

υπεριώδης ακτινοβολία με σκοπό να αυξηθεί η αντίσταση και η ακαμψία του κερατοειδούς και να σταματήσει την εξέλιξη της νόσου. Στον οξύ κερατόκωνο, ο οφθαλμός καλύπτεται με επίδεσμο ή μαλακό θεραπευτικό φακό επαφής και χορηγείται ακεταζολαμίδη, για ελάττωση της ενδοφθάλμιας πίεσης, και ένα ήπιο αντιφλεγμονώδες κολλύριο. Η νόσος μπορεί να αντιμετωπιστεί πλήρως με μεταμόσχευση ολικού πάχους του κερατοειδή.



Εικόνα 1.9.1 : Οφθαλμός με κερατόκωνο

Πηγή:

<http://www.tsioumas.gr/page.asp?pid=26&lng=1>



Εικόνα 1.9.2 : Δεξιά: Φυσιολογική όραση.Αριστερά: Όραση με κερατόκωνο

Πηγή: <http://kcvision.org/wp-content/uploads/2015/08/KC-Vision-Lake.jpg>

1.10 ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΠΡΟΟΔΟΥ

Η υγεία των ματιών σχετίζεται με τη συνολική υγεία του σώματος. Μελέτες έχουν δείξει πως οι ασθενείς με άπνοια ύπνου και άσθμα παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης κερατόκωνου, ενώ οι ασθενείς με διαβήτη παρουσιάζουν μειωμένο κίνδυνο. Τα άτομα με αγγειακή νόσο του κολλαγόνου φαίνεται να έχουν 35% χαμηλότερες πιθανότητες εμφάνισης κερατόκωνου και δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ κερατόκωνου και αλλεργικής ρινίτιδας, διαταραχής της μιτροειδούς βαλβίδας, ανευρύσματος αορτής ή κατάθλιψης. Ασθενείς με σύνδρομο Down έχουν έξι φορές περισσότερες πιθανότητες να εμφανίσουν κερατόκωνο.

Άλλοι παράγοντες εμφάνισης κερατόκωνου είναι το έντονο τρίψιμο των ματιών, η μακροχρόνια χρήση σκληρών φακών επαφής, η γενετική προδιάθεση και το οικογενειακό ιστορικό, μιας και θεωρείται κληρονομική νόσος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗ

Οι ιδιότητες του υλικού του κερατοειδούς είναι υπεύθυνες για τη λειτουργικότητά του. Ο κερατοειδής εμφανίζει ελαστικές και ιζωδοελαστικές ιδιότητες. Η ελαστικότητα αναφέρεται στην ικανότητα μιας ουσίας να παραμορφώνεται, όταν ασκείται τάση σε αυτήν, και να επιστρέφει στην αρχική της

κατάσταση. Τα ιξώδη υλικά, από την άλλη πλευρά, ρέουν όταν εφαρμόζεται εξωτερική δύναμη διάτμησης και δεν ανακτούν το αρχικό τους σχήμα όταν αφαιρείται η δύναμη. Τα ιξωδοελαστικά υλικά παρουσιάζουν χαρακτηριστικά τόσο ιξώδους όσο και ελαστικότητας, με αποτέλεσμα την εξουδετέρωση της ενέργειας όταν εφαρμόζεται τάση.

Η εμβιομηχανική του κερατοειδούς επηρεάζει τις λειτουργικές αντιδράσεις του και επηρεάζει σημαντικά την όραση. Η φυσική σύνθεση του κερατοειδούς δίδει ιξωδοελαστικές ιδιότητες, που σημαίνει ότι παρουσιάζει στοιχεία ελαστικότητας και ιξώδους. Ενώ έχουν σχεδιαστεί διάφορες μέθοδοι για να μελετηθεί η εμβιομηχανική του κερατοειδούς, ο Αναλυτής Οφθαλμικής Απόκρισης (Ocular Response Analyzer) επιτρέπει την ανάλυση των βιομηχανικών ιδιοτήτων του κερατοειδούς στην κλινική. Η κατανόηση της βιομηχανικής του κερατοειδούς είναι σημαντική στην περιγραφή καταστάσεων ασθένειας όπως ο κερατόκωνος και η εκτασία. Επιπροσθέτως, οι επιτυχείς θεραπείες του κερατοειδούς εξαρτώνται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ βιολογικών και βιο-μηχανικών παραγόντων και την επίδρασή τους στους περιβάλλοντες οφθαλμικούς ιστούς.

2.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΣΤΙΒΑΔΩΝ ΤΟΥ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΥ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ

Η Δεσκεμέτειος μεμβράνη, το στρώμα του κερατοειδή και η στιβάδα του Bowman έχουν σημαντικό ρόλο στη μηχανική σταθερότητα του κερατοειδή.

Αν καταστραφεί η μεμβράνη του Bowman, για παράδειγμα λόγω τραυματισμού, η τυπική δομή της δεν αποκαθιστάται, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ούλες και ανωμαλίες στο σχήμα του κερατοειδή. Αυτές οι ανωμαλίες προκαλούν ανώμαλο αστιγματισμό.

Η Δεσκεμέτειος μεμβράνη μπορεί να αναγεννηθεί και έχει μεγάλη ανθεκτικότητα στους τραυματισμούς. Συνδέεται με δεσμοσωμάτια με το ενδοθήλιο, όμως δεν συνδέεται με το στρώμα και έτσι είναι εύκολο να αποκολληθεί από αυτό.

Το στρώμα καταλαμβάνει το 90% του πάχους του κερατοειδή, οπότε το πάχος του κερατοειδή εξαρτάται κυρίως από το στρώμα του.

Η μεμβράνη του Bowman στους ενήλικες συμβάλει στη διατήρηση του σχήματος του κερατοειδή. Δεν έχει τη δυνατότητα αναγέννησης, αλλά φαίνεται πως ο ρόλος της μεμβράνης του Bowman είναι η διατήρηση της ακεραιότητας του κερατοειδή και η παρεμπόδιση εισβολής ιών.

2.3 ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΑ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ

Στη μηχανική λεπτότοιχο δοχείο πίεσης ορίζεται εκείνο που η ακτίνα του είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από το πάχος του. Τα λεπτότοιχα δοχεία είναι συνήθως σφαιρικά, κυλινδρικά ή κωνικά και περιέχουν αέρια ή υγρά. Το περιεχόμενό τους ασκεί πίεση στα δοχεία με αποτέλεσμα να παραμορφώνονται.

Οι μορφές της τάσης που μπορεί να υποστεί ένα υλικό είναι ο εφελκυσμός, η θλίψη, η διάτμηση και η στρέψη.

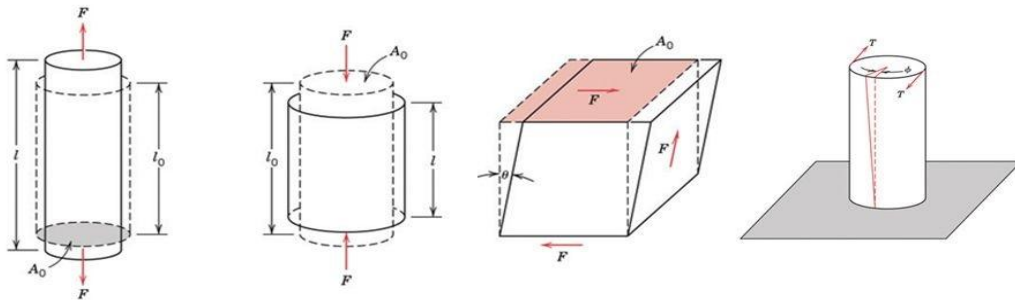
Δύο αντίθετες δυνάμεις, δηλαδή δυνάμεις ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς, δρουν σε ένα υλικό με αποτέλεσμα να το παραμορφώνουν προκαλώντας του επιμήκυνση, ονομάζεται εφελκυσμός. Όταν οι αντίθετες δυνάμεις που δρουν σε έναν άξονα του υλικού τείνουν να το συμπιέσουν, η τάση ονομάζεται θλίψη. Στη περίπτωση της διατμητικής τάσης, οι δυνάμεις δρουν κάθετα στον άξονα του υλικού με αποτέλεσμα το υλικό να μετατοπίζεται, διατηρώντας σταθερή τη βάση του. Τέλος, ένα υλικό υπόκειται σε στρέψη όταν μια ροπή, δηλαδή δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα από μια απόσταση από τον άξονα του, δρα στον άξονα του και τείνει να το στρέψει.

ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

ΘΛΙΨΗ

ΔΙΑΤΜΗΣΗ

ΣΤΡΕΨΗ



Εικόνα 2.3.1 : Παραδείγματα μηχανικών τάσεων σε υλικά

Πηγή:

<http://slideplayer.com/slide/8280524/>

Όταν ασκηθούν δυνάμεις αντίθετες σε ένα λεπτότοιχο δοχείο πίεσης, αυτό υπόκειται σε εφελκύσμο, λόγω του μικρού πάχους του τοιχώματος του σε σχέση με την ακτίνα του.

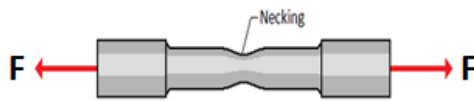
Η μηχανική τάση (stress) ορίζεται ως η δύναμη που ασκείται σε ένα υλικό ανά μονάδα επιφάνειας ($\sigma = \frac{F}{A}$), σε μονάδες πίεσης.

Θεωρώντας μια κατάλληλα μικρή επιφάνεια ενός λεπτότοιχου δοχείου πίεσης, μπορούμε να ορίσουμε δυο τα δυο stress ως εξής :

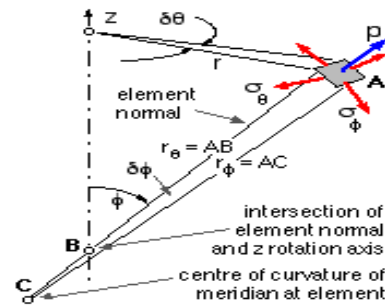
$$\frac{\sigma_{\mu}}{r_{\theta}} + \frac{\sigma_z}{r_{\varphi}} = \frac{p}{t}$$

$$\text{Meridional stress : } \sigma_m = \frac{pr\theta}{2t}$$

$$\text{Zonal stress : } \sigma_z = \sigma_m \left(2 - \frac{r\theta}{r_\phi}\right)$$



Εικόνα 2.3.2 : Εφελκυσμός σε μικρή επιφάνεια



Εικόνα2 .3.3 : Stress

Ορίζουμε δύο stress , το μεσημβρινό (παράλληλο στο Μεσημβρινό, meridional) και το παράλληλο (παράλληλο στον Ισημερινό, zonal).Στα σφαιρικά λεπτότοιχα δοχεία πίεσης τα δύο stress ταυτίζονται .

$$F_1 = p(\pi r^2)$$

$$F_2 = F_1$$

$$\sigma_z = p \left(\frac{\pi r^2}{2\pi r t} \right)$$

$$\sigma_m = \sigma_z$$

όπου F_1, F_2 είναι οι δυνάμεις που ασκούνται, p είναι η πίεση, r ακτίνα, t το πάχος.

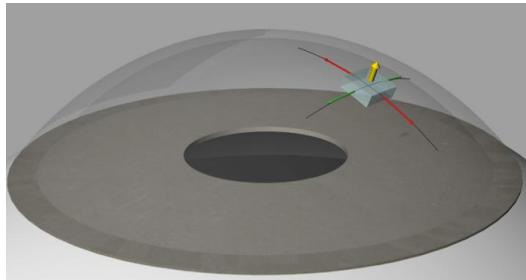
2.4 STRESS FACTOR ΣΤΟΝ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο κερατοειδής έχει κεντρικό πάχος περίπου 500-600μm και ακτίνα 5,5-6mm, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ως λεπτότοιχο δοχείο. Επίσης, ο κερατοειδής έχει σφαιρικό σχήμα και λόγω της ενδοφθάλμιας πίεσης δημιουργούνται μηχανικές τάσεις.

ΟΡΙΣΜΟΙ:

Ορίζουμε ως stress factor (SF) το λόγο της ακτίνας καμπυλότητας του κερατοειδή προς δύο φορές το πάχος του ($SF = \frac{r}{2t}$).

Η τάση στον οφθαλμό ορίζεται ως το γινόμενο του stress factor επί τη τιμή της ενδοφθάλμιας πίεσης, η οποία διαφέρει σε κάθε ασθενή.



Εικόνα 2.4.1 :

Meridional stress : $\sigma_m = \frac{IOP r_\theta}{2t}$, IOP=ενδοφθάλμια πίεση

Zonal stress : $\sigma_z = \sigma_m \left(2 - \frac{r_\theta}{r_\phi}\right)$

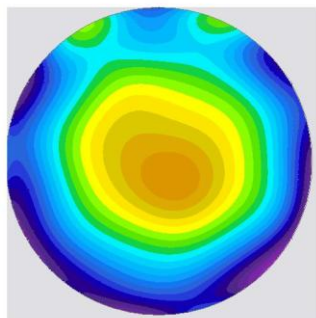
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 Υπολογισμός stress factor από την καμπυλότητα και την παχυμετρία

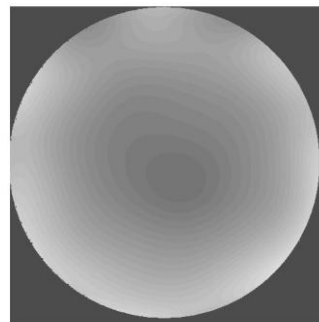
Από το Oculus Pentacam συλλέχθηκαν τοπογραφίες ασθενών με κερατόκωνο. Οι τοπογραφίες αφορούσαν τη καμπυλότητα του κερατοειδή και στους δύο άξονες, το πάχος του και η ανύψωση (elevation). Αναπτύχθηκε κώδικας Matlab, με τον οποίο επεξεργάστηκαν οι χρωματικοί χάρτες ώστε να δημιουργηθούν πίνακες με τις αριθμητικές τιμές των καμπυλοτήτων και του πάχους σε κάθε σημείου του κερατοειδούς. Με τη σειρά τους χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί το stress factor.

Προεπεξεργασία δεδομένων

Αρχικά, η επεξεργασία κάθε χρωματικού χάρτη έγινε αναπτύσσοντας κώδικα Matlab, και αντιστοιχίζοντας τα δεδομένα σε έναν πίνακα τιμών σύμφωνα με την κλίμακα που δίνεται σε κάθε τοπογραφία. Η διάμετρος του κερατοειδή που επιλέχθηκε να επεξεργαστεί είναι 6mm και η εικόνα που τελικά απεικονίζει αυτό το τμήμα είναι 491x491 pixels. Στη συνέχεια, επιλέγεται ένα πολυώνυμο, ώστε να προσεγγίσουμε πολυωνυμικά τα δεδομένα. Δηλαδή, σε κάθε διάμετρο του πίνακα με τις αντίστοιχες τιμές της εκάστοτε τοπογραφίας επιλέγεται ένα πολυώνυμο τέτοιου βαθμού ώστε οι τιμές του πολυώνυμου στα διάφορα σημεία του χάρτη να είναι αρκετά κοντά στα δεδομένα.



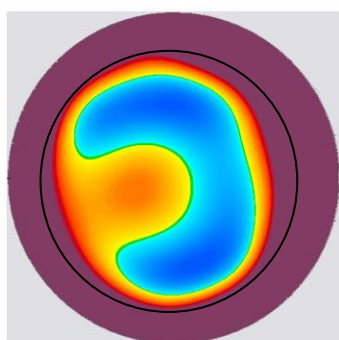
Εικόνα 3.1.1 : Χάρτης παχυμετρίας



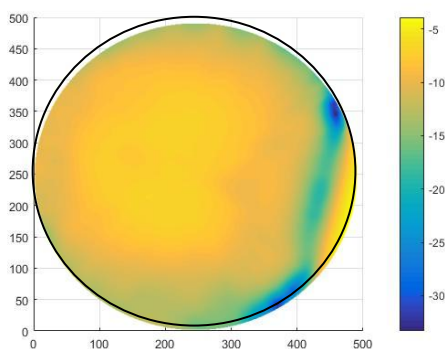
Εικόνα 3.1.2 : Επεξεργασμένος χάρτης παχυμετρίας

Με τον ίδιο τρόπο επεξεργάστηκαν και οι χάρτες της καμπυλότητας.

Η πολυωνυμική προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για να μην υπάρχουν απότομες μεταβολές των τιμών σε γειτονικά σημεία. Μια τέτοια προσέγγιση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ώστε να υπολογιστεί η καμπυλότητα του κερατοειδή εφαρμόζοντας την στις τοπογραφίες που δίνουν πληροφορίες για την υψομετρία του κερατοειδή.

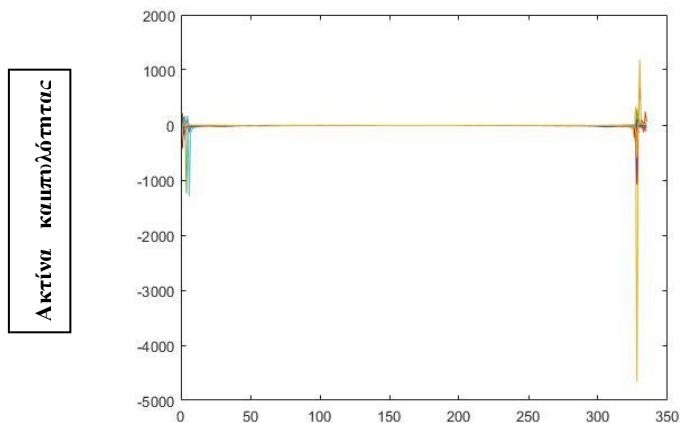


Εικόνα 3.1.3 : Υψομετρικός χάρτης. Επιλέχθηκε διάμετρος 6mm.



Εικόνα 3.1.4 : Χάρτης καμπυλότητας υπολογισμένος από τον υψομετρικό χάρτη. Η περιοχή ανάλυσης είναι 6mm

Παρόλο που η μέθοδος αυτή δίνει μια καλή προσέγγιση της καμπυλότητας του κερατοειδή δεν χρησιμοποιήθηκε διότι φάνηκε ότι όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο του χάρτη και προσεγγίζοντας με πολυώνυμα αρκετά μεγάλου βαθμού, για βέλτιστη προσέγγιση, οι αποκλίσεις του πολυώνυμου με τα δεδομένα των χαρτών ήταν μεγάλες. Στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε ότι ενώ στο κέντρο έχουμε μια καλή προσέγγιση της καμπυλότητας, στη περιφέρεια οι τιμές δείχνουν να αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό.

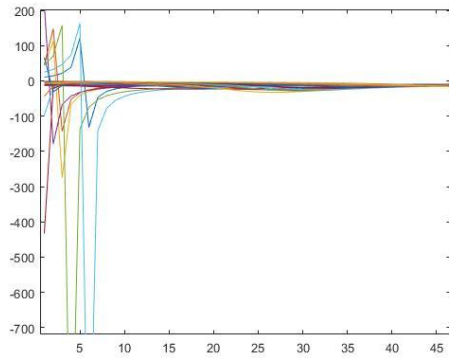


Διάγραμμα 3.1.1. : Προσέγγιση της καμπυλότητας του κερατοειδή με πολώνυμο 6^{ου} βαθμού

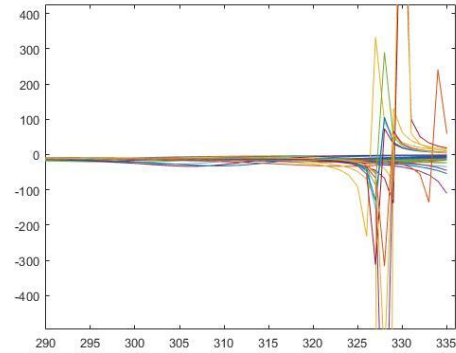
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η πολωνυμική προσέγγιση της καμπυλότητας σε κάθε σημείο του κερατοειδή. Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε μια διάμετρο του κερατοειδή και ο οριζόντιος άξονας δείχνει τη θέση του κάθε σημείου πάνω στην εκάστοτε διάμετρο. Δηλαδή, στρέφοντας τη τοπογραφία κατά αρκετά μικρή γωνία, παίρνουμε τα δεδομένα της καμπυλότητας σε κάθε διάμετρο του κερατοειδή και εφαρμόζουμε το πολώνυμο που θα προσεγγίσει τα αντιστοίχα δεδομένα. Ο βαθμός του πολωνύμου που χρησιμοποιήθηκε είναι 12. Παρατηρούμε ότι ενώ κεντρικά του κερατοειδή έχουμε μια καλή προσέγγιση, περιφερικά οι τιμές του πολωνύμου απέχουν πολύ από τα πραγματικά δεδομένα.

Στα διαγράμματα 3.1.2 και 3.1.3 φαίνεται η πολωνυμική προσέγγιση για τα περιφερικά και στο διάγραμμα 3.1.4 τα κεντρικά σημεία αντίστοιχα. Ενώ, λοιπόν, στα κεντρικά σημεία η προσέγγιση με πολώνυμο βαθμού 12 φαίνεται να έχει μικρά σφάλματα σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα, περιφερικά τα σφάλματα μεγαλώνουν αρκετά. Τα μικρότερου βαθμού πολώνυμα δεν αποτελούν καλή προσέγγιση για τα δεδομένα μας, γι' αυτό και δεν χρησιμοποιήθηκαν.

Ακτίνα καμπυλότητας

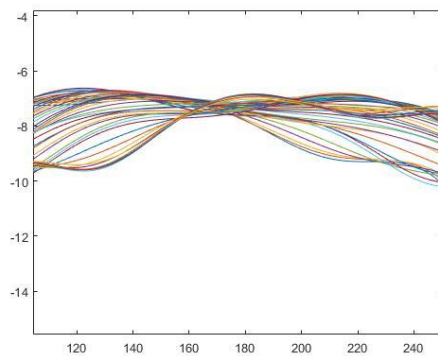


Διάγραμμα 3.1.2 : Πολυωνυμική προσέγγιση καμπυλότητας στη



Διάγραμμα 3.1.3 : Πολυωνυμική προσέγγιση καμπυλότητας στη περιφέρεια

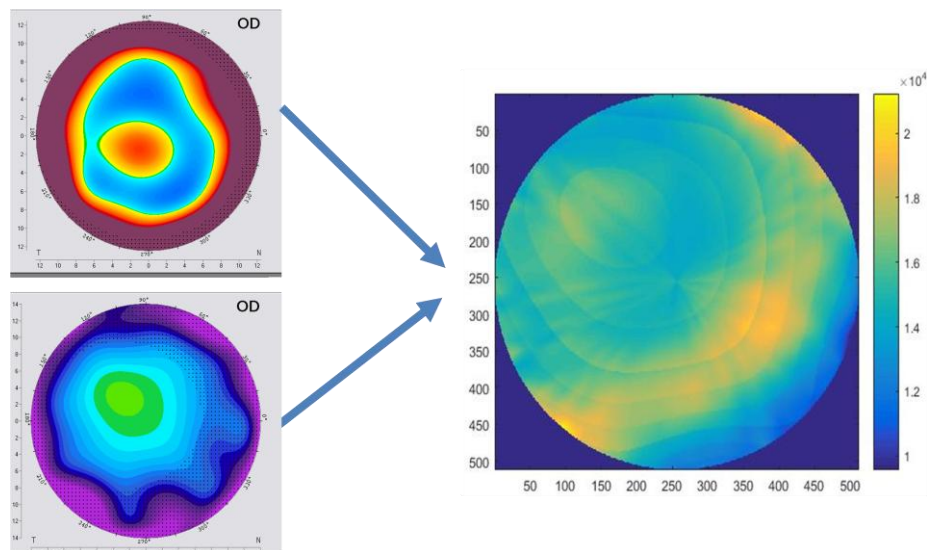
Ακτίνα καμπυλότητας



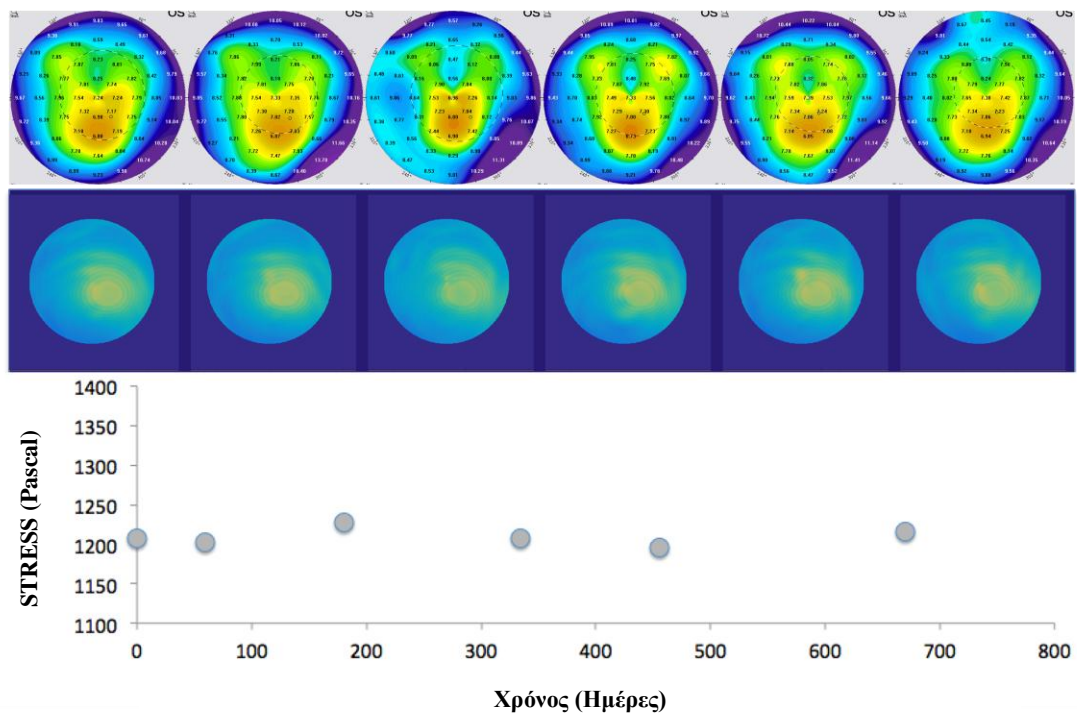
Διάγραμμα 3.1.4 : Κάθε γραμμή απεικονίζει μια οριζόντια τομή του κεντρικού κερατοειδή. Στον κάθετο άξονα φαίνεται η ακτίνα καμπυλότητας ενώ στον οριζόντιο η αντίστοιχη θέση. Το πολώνυμο που χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση των δεδομένων είναι $12^{οο}$ βαθμού.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τους επεξεργασμένους χάρτες της παχυμετρίας και της καμπυλότητας για κάθε ασθενή, υπολογίστηκε το SF. Η τάση που ασκείται στα λεπτότοιχα δοχεία είναι το γινόμενο της πίεσης επί το SF. Ο κερατοειδής ικανοποιεί την συνθήκη για να θεωρηθεί ως λεπτότοιχο δοχείο, δηλαδή η ακτίνα καμπυλότητας του κερατοειδή είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από το πάχος του. Ωστόσο, λόγω του ότι η ενδοφθάλμια πίεση διαφέρει από ασθενή σε ασθενή και επίσης οι μετρήσεις της ενδοφθάλμιας πίεσης πιθανόν να επηρεάζονται από τις παραμορφώσεις που συμβαίνουν σε έναν κερατοκωνικό κερατοειδή, με αποτέλεσμα να δίνουν εσφαλμένες τιμές, προτιμήθηκε να εξεταστεί η τάση ανά μονάδα ενδοφθάλμιας

πίεσης. Το SF, λοιπόν, για κάθε ασθενή, απεικονίστηκε σε χρωματικούς χάρτες ανά εξέταση, ώστε να εξετάσουμε πως σχετίζονται οι μεταβολές του SF καθώς εξελίσσεται ο κερατόκωνος.



Εικόνα 3.1.5: Δεξιά της εικόνας είναι ο χρωματικός χάρτης του SF, ο οποίος προήλθε από τους χρωματικούς χάρτες της παχυμετρίας και της καμπυλότητας (αριστερά).

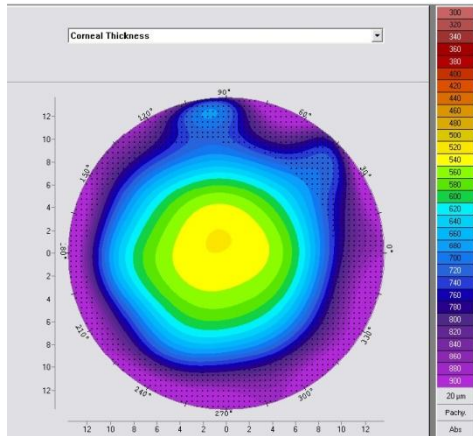


Εικόνα 3.1.6: Στην εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα για την εξέλιξη του SF και τις μεταβολές της καμπυλότητας με τη πάροδο του χρόνου. Η πίεση έχει μετατραπεί σε Pascal (1 mmHg=133,322 Pa)

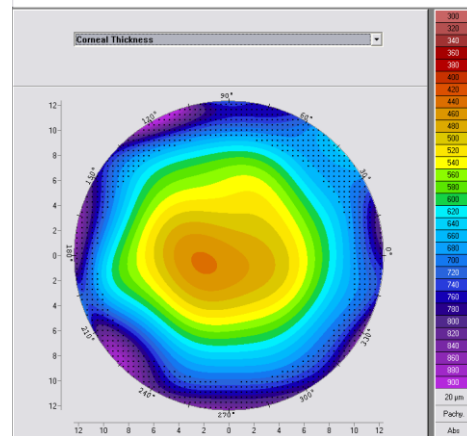
3.2 Χαρακτηριστικά μελέτης και δείγματος.

Οι τοπογραφίες που αξιολογήθηκαν αφορούσαν 30 ασθενείς και συνολικά 41 οφθαλμούς. Οι ηλικίες των ασθενών με κερατόκωνο κυμαίνονταν από 15 έως 69 έτη. Το διάστημα παρακολούθησης των ασθενών κυμένεται από 3 έως 60 μήνες.

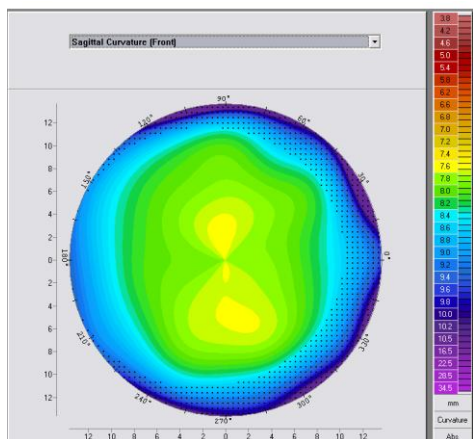
Εξαιρέθηκαν ασθενείς που έχουν υποβληθεί σε CXL ή άλλες επεμβάσεις του κερατοειδή κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Άλλο ένα κριτήριο για την επιλογή ασθενών ήταν και η κεντρική παχυμετρία του κερατοειδή, ασθενείς με κεντρική παχυμετρία μικρότερη από 300 μm αποκλείστηκαν.



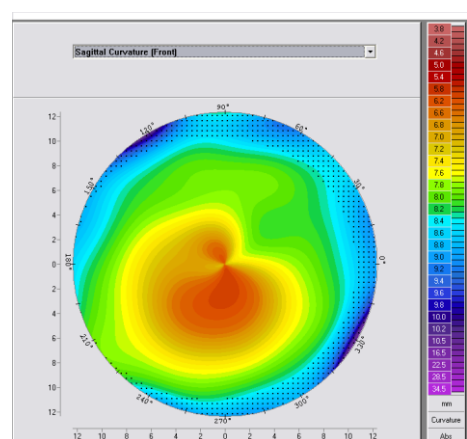
Εικόνα 3.2.1: Παχυμετρία φυσιολογικού κερατοειδή



Εικόνα 3.2.2: Παχυμετρία κερατοκωνικού κερατοειδή



Εικόνα 3.2.3: Καμπυλότητα φυσιολογικού κερατοειδή



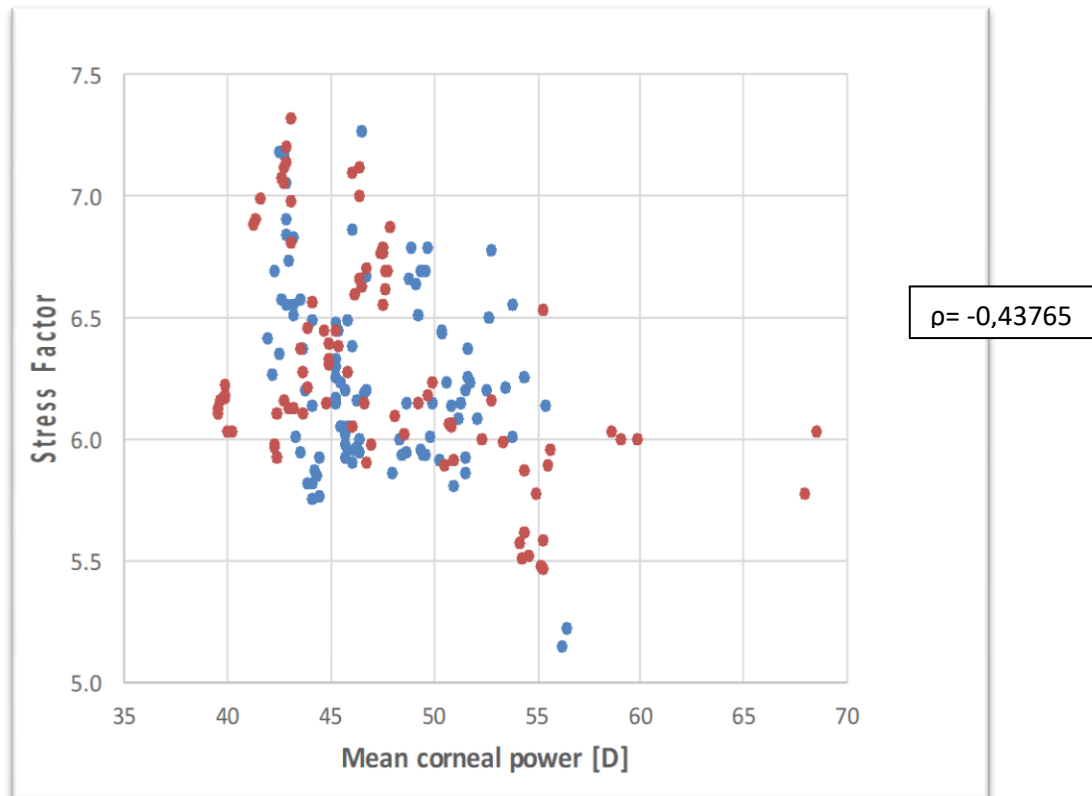
Εικόνα 3.2.4: Καμπυλότητα κερατοκωνικού κερατοειδή

Οι παραπάνω τοπογραφίες απεικονίζουν την παχυμετρία και τη καμπυλότητα ενός υγιούς και ενός κερατοκωνικού οφθαλμού. Το πάχος στα κεντρικά σημεία του

κερατοειδή στον φυσιολογικό οφθαλμό κυμαίνεται από 520 μm με 600 μm και ο χάρτης της καμπυλότητας δείχνει κεντρικά του φυσιολογικού κερατοειδή την καμπυλότητα με εύρος 7,4mm ως 8,2mm. Σε αντίθεση, παρατηρούμε ότι ο κερατοκωνικός οφθαλμός έχει κεντρικά πάχος 480 μm με 500 μm και η καμπυλότητα του κυμαίνεται από 6,8mm έως 7,4mm περίπου.

3.3 Αποτελέσματα

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι τιμές του SF σε σχέση με τη μέση τιμή της ισχύς του κερατοειδή, δηλαδή η ακτίνα καμπυλότητας του κερατοειδή εκπεφρασμένη σε διοπτρίες μέσω της σχέσης . Με κόκκινο απεικονίζονται οι αριστεροί οφθαλμοί και με μπλε οι δεξιοί.

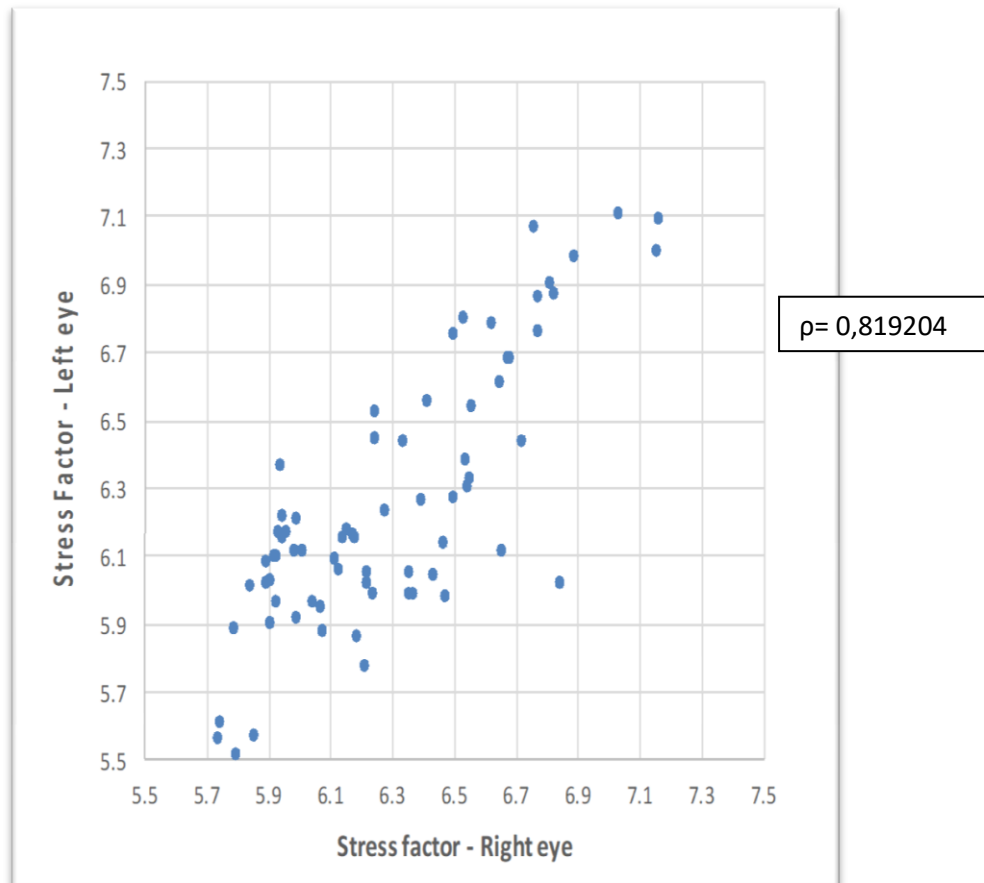


Διάγραμμα 3.3.1: Τιμές SF σε σχέση με τη μέση ισχύ του κερατοειδή. Με κόκκινο απεικονίζονται οι αριστεροί οφθαλμοί και με μπλε οι δεξιοί. Η ισχύς του κερατοειδή είναι η ακτίνα καμπυλότητας σε διοπτρίες (D) και δίνεται από το λόγο προς την ακτίνα καμπυλότητας

$$P = \frac{337,5}{R}$$

Η μέση τιμή της ισχύς του κερατοειδή δεν φαίνεται να σχετίζεται με τις τιμές του SF. Ο συντελεστής της γραμμικής συσχέτισης είναι αρνητικός με τιμή $\rho=-0,43765$, αυτό σημαίνει ότι η μέση τιμή της ισχύος έχει ασθενή, αρνητική συσχέτιση με τις τιμές του SF.

Στο επόμενο διάγραμμα παρατηρείται η συμμετρία των SF μεταξύ δεξιού και αριστερού οφθαλμού.

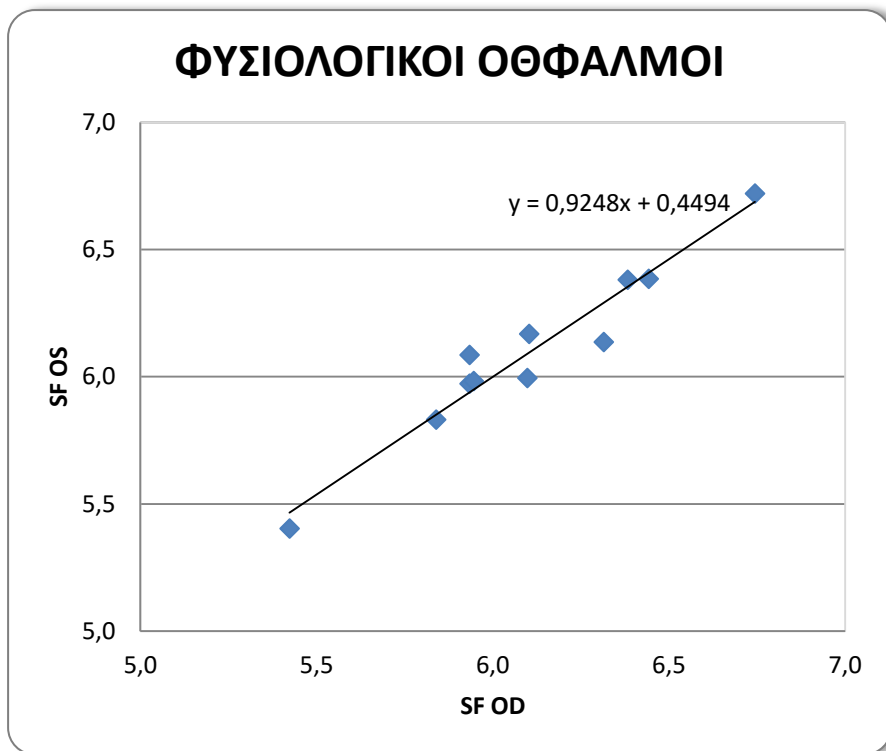


Διάγραμμα 3.3.2: Τιμές SF μεταξύ δεξιού και αριστερού οφθαλμού

Παρατηρείται ότι οι τιμές του SF είναι παρόμοιες για τους δύο οφθαλμούς. Ο συντελεστής της γραμμικής συσχέτισης έχει θετική τιμή ίση με 0,819204, δηλαδή υπάρχει θετική, ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των τιμών του SF για τους δεξιούς και τους αριστερούς οφθαλμούς.

Γενικά, ο κερατοκόνος δεν προσβάλλει απαραίτητα και τους δυο οφθαλμούς στον ίδιο βαθμό, στη παρούσα εργασία οι ασθενείς είχαν παρόμοιο βαθμό εκτασίας και στους δύο κερατοειδείς, έτσι το SF δείχνει να είναι σχεδόν ίδιο για τους δυο οφθαλμούς.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι τιμές του SF που υπολογίστηκαν από φυσιολογικούς οφθαλμούς ηλικίας μεταξύ 29 έως 54 ετών.

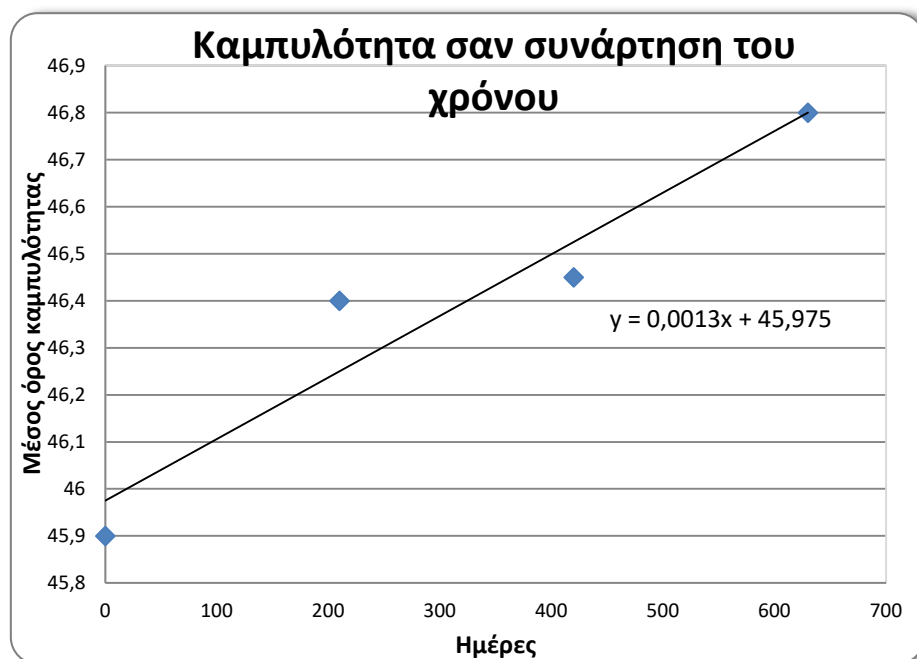


Διάγραμμα 3.3.3 : Τιμές SF δεξιού και αριστερού οφθαλμού σε φυσιολογικούς οφθαλμούς.

Οι τιμές του SF στους φυσιολογικούς οφθαλμούς κυμαίνονται σε μια ζώνη 5,5 με 6,5. Επίσης, οι τιμές του SF στους δεξιούς οφθαλμούς είναι σχεδόν ίδιες με αυτές των αριστερών οφθαλμών.

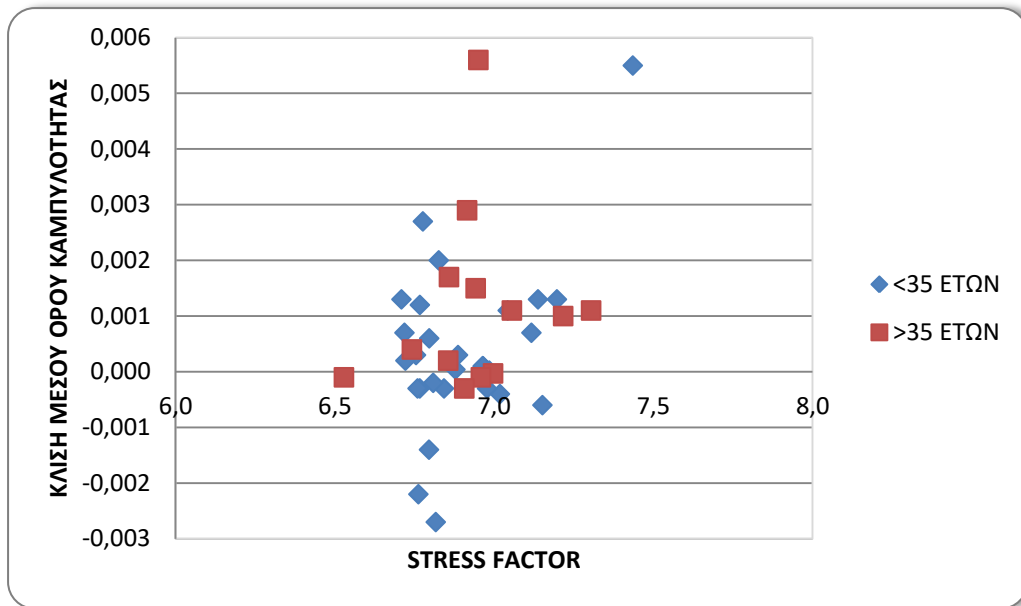
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπολογίστηκε ο ρυθμός μεταβολής σε σχέση με το χρόνο ή αλλιώς η κλίση του μέσου όρου της καμπύλότητας. Αυτό σημαίνει πως υπολογίστηκε το πόσο γρήγορα μεταβάλλεται η καμπύλότητα με τη πάροδο του χρόνου.

Στο διάγραμμα φαίνεται ένα παράδειγμα, στο οποίο σύμφωνα με τα δεδομένα η κλίση της ευθείας έχει υπολογιστεί 0,0013, δηλαδή κάθε ημέρα ο μέσος όρος της καμπυλότητας του κερατοειδή αυξάνεται κατά 0,0013D.



Διάγραμμα 3.3.4: Παράδειγμα ρυθμού μεταβολής μέσου όρου καμπυλότητας ως προς το χρόνο. Η κλίση της καμπυλότητας είναι 0,0013D/ημέρα.

Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση του SF και του ρυθμού μεταβολής του μέσου όρου της καμπυλότητας για δυο κατηγορίες ασθενών, για ασθενείς άνω των 35 ετών και ασθενείς κάτω των 35 ετών.

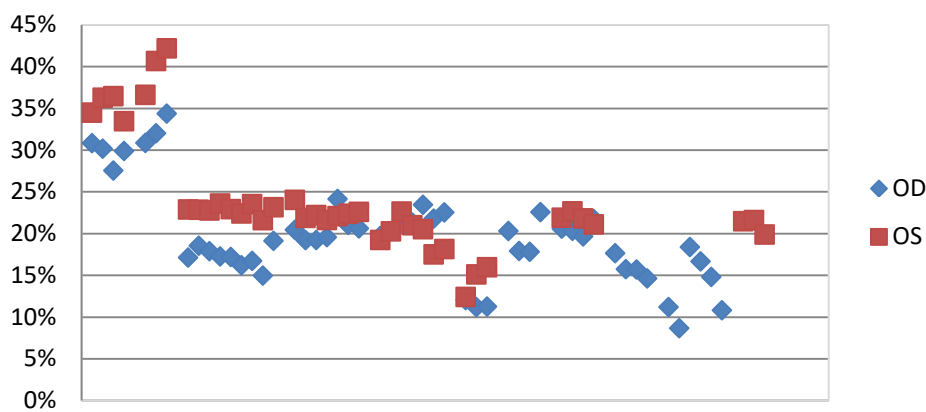


Διάγραμμα 3.3.5: Τιμές SF σε σχέση με το ρυθμό μεταβολής του μέσου όρου της ακτίνας της καμπυλότητας.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως κατά απόλυτη τιμή, ο ρυθμός μεταβολής του μέσου όρου της ακτίνας της καμπυλότητας του κερατοκωνικού κερατοειδή, και στις δύο κατηγορίες ασθενών, δεν ξεπερνάει τη τιμή των 0,003mm/ημέρα. Δηλαδή, στο διάστημα παρακολούθησης των ασθενών, ο μέσος όρος της ακτίνας της καμπυλότητας μεταβάλλεται το πολύ κατά 0,003mm κάθε μέρα.

Υπολογίστηκε, επίσης, το ποσοστό επιφάνειας του κερατοειδή, σε διάμετρο 6mm, όπου οι τιμές του SF ξεπερνούν τη τιμή 6. Η μέση τιμή του δείγματος είναι 21,6%, με τυπική απόκλιση 0,0658. Το ποσοστό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ώστε να διαπιστωθεί, αν αυξάνεται καθώς εξελίσσεται ο κερατόκωνος και αν τελικά η καταπόνηση που υπόκειται ο κερατοειδής είναι μεγαλύτερη σε μια περιοχή του κερατοειδή. Αυτή η περιοχή αναμένεται να είναι σε γειτονικά σημεία του κώνου. Η τιμή 6 επιλέχθηκε, αφού παρατηρήθηκε ότι τα δεδομένα δίνουν μέσο όρο SF περίπου 6,8.

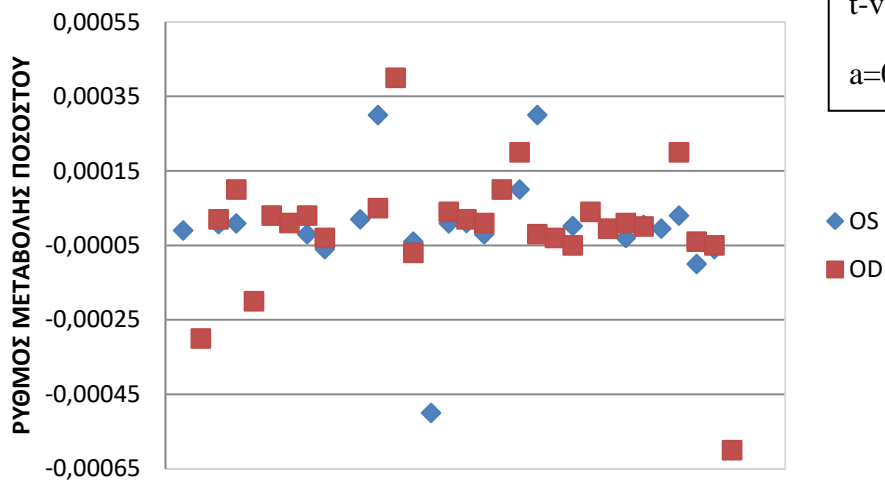
ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗ ΜΕ ΤΙΜΕΣ SF > 6



Διάγραμμα 3.3.6: Ποσοστό της επιφάνειας του κερατοειδή με τιμές SF μεγαλύτερες του 6, για τον κάθε ασθενή.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο ρυθμός μεταβολής του ποσοστού της επιφάνειας του κερατοειδή που έχει τιμή SF μεγαλύτερη του 6, στο χρονικό διάστημα παρακολούθησης του κάθε ασθενή. Έτσι, όπως φαίνεται και παρακάτω, στους περισσότερους ασθενείς υπάρχει μία πολύ μικρή αύξηση του ποσοστού. Σε ένα διάστημα εμπιστοσύνης 95%, η κατανομή student δίνει πιθανότητα περίπου 0,03 οι μέσοι όροι των δύο δειγμάτων να διαφέρουν, άρα δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων όρων των ποσοστών της επιφάνειας του κερατοειδή με τιμές SF μεγαλύτερες του 6 για τους δεξιούς και τους αριστερούς οφθαλμούς.

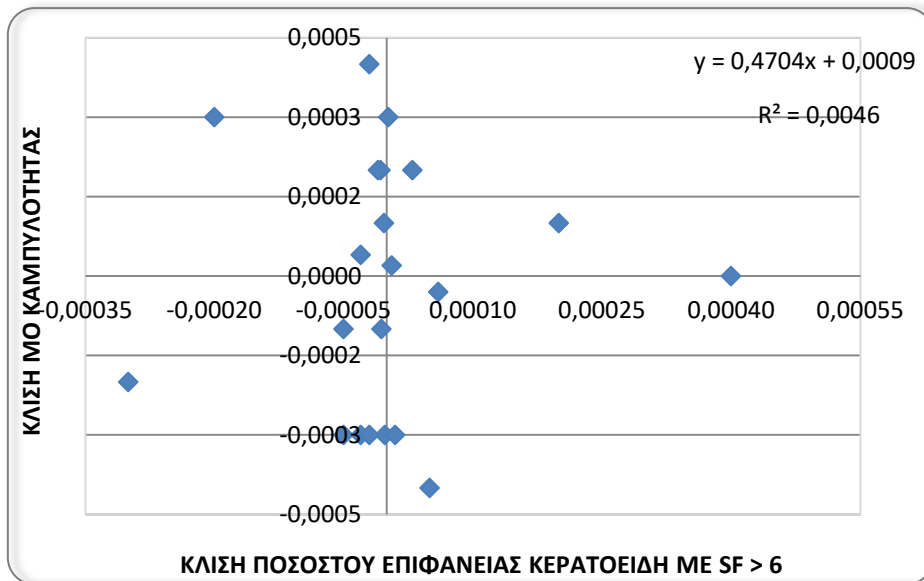
ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗ ΜΕ ΤΙΜΕΣ SF ΠΑΝΩ ΑΠΟ 6



Διάγραμμα 3.3.7: Ρυθμός μεταβολής, ως προς το χρόνο, του ποσοστού της επιφάνειας του κερατοειδή με τιμές SF μεγαλύτερες του 6 για τον εκάστοτε ασθενή.

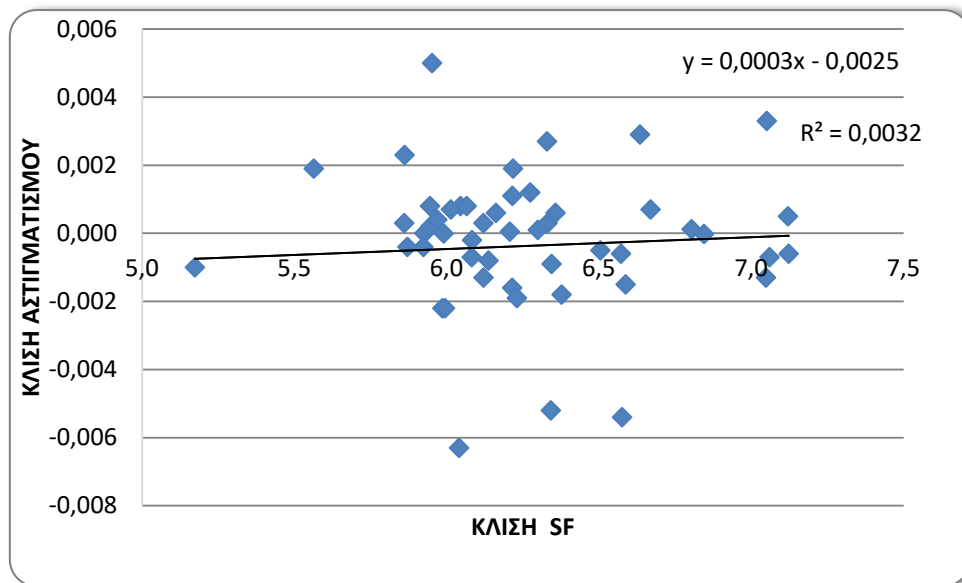
Παρακάτω, παρουσιάζεται ο ρυθμός μεταβολής του μέσου όρου της καμπυλότητας κάθε κερατοκωνικού οφθαλμού σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό μεταβολής του ποσοστού της επιφάνειας του κερατοειδή με τιμή SF πάνω από 6.

Το 0,46% της διασποράς της κλίσης του μέσου όρου της καμπυλότητας εξηγείται από τη διασπορά της μεταβολή του ποσοστού που προαναφέρθηκε. Η συσχέτιση των δυο μεταβλητών δεν είναι ισχυρή.



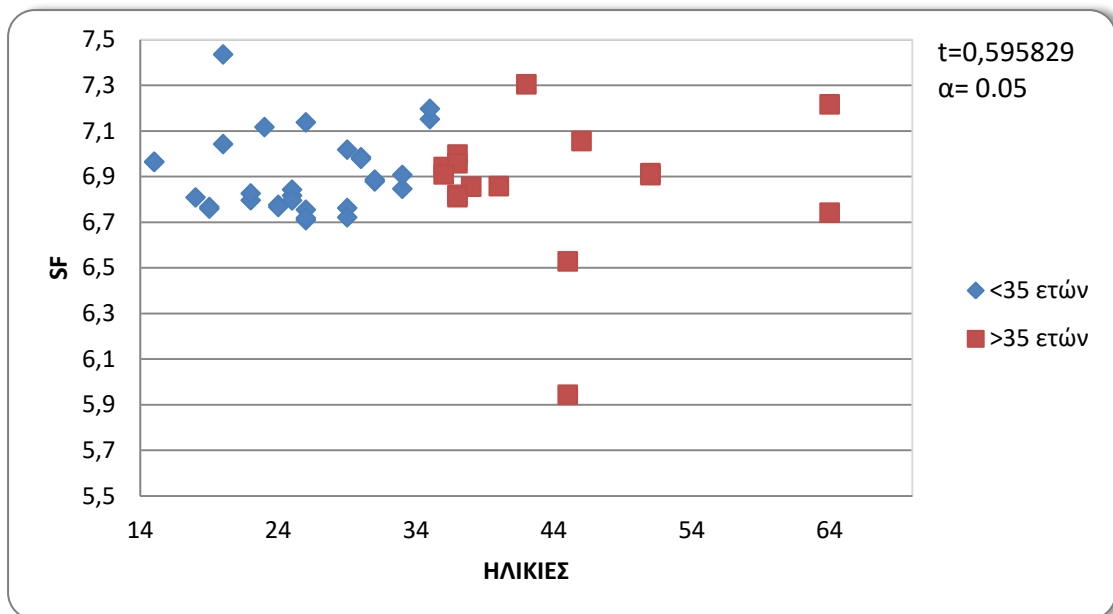
Διάγραμμα 3.3.8: Ρυθμός μεταβολής ως προς τον χρόνο, του μέσου όρου της καμπυλότητας σε σχέση με το ρυθμό μεταβολής του ποσοστού της επιφάνειας του κερατοειδή με τιμές SF πάνω από 6.

Ο αστιγματισμός που δημιουργείται στους κερατοκωνικούς οφθαλμούς του δείγματος μεταβάλλεται μέσο όρο κατά απόλυτη τιμή 0,15% με τη πάροδο του χρόνου. Αυτός ο ρυθμός, όπως φαίνεται παρακάτω, δεν σχετίζεται με το ρυθμό μεταβολής του SF.



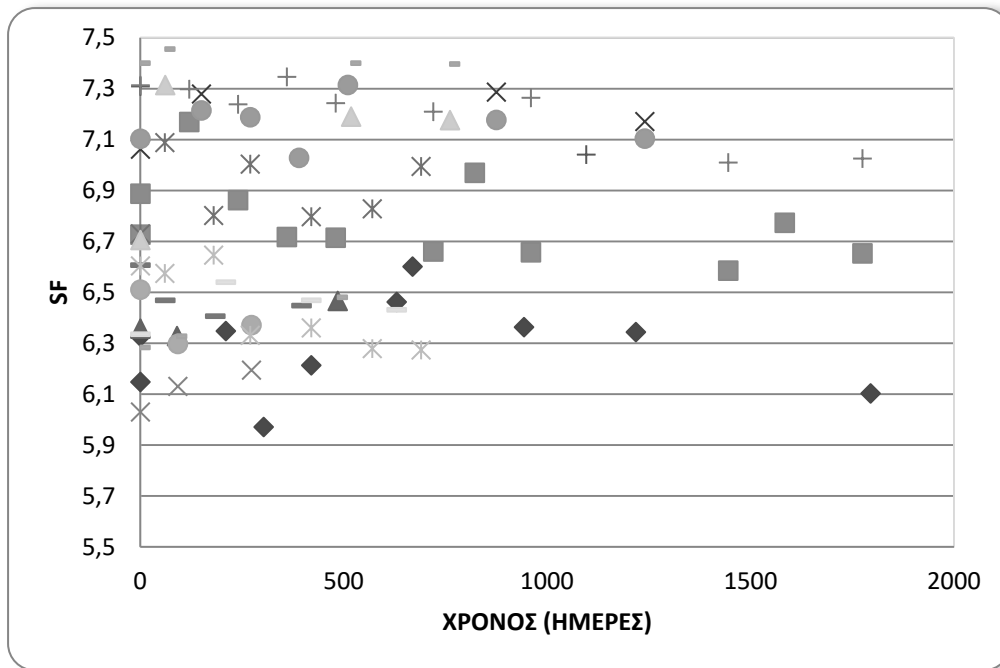
Διάγραμμα 3.3.9: Ρυθμός μεταβολής SF σε σχέση με ο ρυθμό μεταβολής του αστιγματισμού.

Στη συνέχεια συγκρίνουμε δύο κατηγορίες ασθενών ανάλογα την ηλικία τους. Η πρώτη κατηγορία αφορά ασθενείς με λιγότερα από 35 έτη ζωής και η δεύτερη ασθενείς άνω των 35 ετών. Η συσχέτιση φαίνεται να είναι ασθενής ($R^2 = 0,0032$).



Διάγραμμα 3.3.10 : Τιμές SF σε σχέση με την ηλικία. Δύο κατηγορίες ασθενών, ασθενείς άνω των 35 ετών και ασθενείς κάτω των 35 ετών.

Το παραπάνω διάγραμμα αναπαριστά τις τιμές του SF σε σχέση με την ηλικία του κάθε ασθενή. Χρησιμοποιώντας στα δεδομένα μας την κατανομή student, παρατηρούμε ότι σε επίπεδο σημαντικότητας 95% δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις τιμές του SF ανάμεσα στους ασθενείς με ηλικία άνω των 35 ετών και σε αυτούς κάτω των 35 ετών. Αυτό σημαίνει πως για τις δυο κατηγορίες ασθενών, κατά μέσο όρο, οι τιμές των SF είναι ίδιες.



Διάγραμμα 3.3.11: Τιμές SF σε συνάρτηση με το χρόνο για όλους τους ασθενείς.

Στο διάγραμμα 3.3.11 απεικονίζονται οι τιμές του SF σε σχέση με τον χρόνο, για κάθε ασθενή.

3.4 Συμπεράσματα

Μεταξύ των ασθενών που εξετάσαμε παρατηρήσαμε ότι το εύρος stress factor είναι μεταξύ 5 με 8, δηλαδή οι διαφορές του stress factor είναι της τάξης του 60%. Αυτό θα σήμαινε ότι αναμένουμε αντίστοιχο εύρος στο μηχανικό φορτίο που καλείται ο κερατοειδής να αντιμετωπίσει, μόνο αν η ενδοφθάλμια πίεση και οι διακυμάνσεις της ήταν ίδιες σε όλο τον πληθυσμό. Στη πραγματικότητα, όμως, η

ενδοφθάλμια πίεση αλλάζει από ασθενή σε ασθενή, οπότε επηρεάζει και το εύρος της μηχανικής τάσης.

Έτσι, η ίδια η μηχανική καταπόνηση (τάση) μπορεί να είναι μεγαλύτερη σε κάποιον που έχει stress ανάμεσα στις χαμηλότερες τιμές αυτού του εύρους, αν έχει πολύ υψηλή πίεση ή αν έχει συνήθειες που καταπονούν τον κερατοειδή (π.χ. αν τρίβει τα μάτια του).

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, συμπεραίνουμε ότι το Stress Factor ποσοτικοποιεί το μηχανικό stress στον εκτατικό κερατοειδή. Φαίνεται πως το SF μειώνεται καθώς αυξάνεται η καμπυλότητα, κατά την εξέλιξη του κερατόκωνου. Έτσι, θα μπορούσε να αποτελεί έναν δείκτη για τη πρόβλεψη της εξέλιξης του κερατόκωνου.

Παρόλο που το SF ποσοτικοποιεί τη μηχανική τάση του κερατοειδή σε σχέση με το σχήμα του, το πραγματικό μηχανικό φορτίο εξαρτάται από την πραγματική ενδοφθάλμια πίεση και τις διακυμάνσεις της. Θα ήταν πιθανό, λοιπόν, εξετάζοντας τη τάση που δέχεται ο κερατοειδής, δηλαδή, το γινόμενο του SF επί τη πραγματική πίεση του κάθε ασθενή, να παρατηρηθεί ένα άνω φράγμα για τις τιμές των τάσεων στους κερατοκωνικούς κερατοειδείς. Δηλαδή, μια τιμή της τάσης πάνω από την οποία ο κερατόκωνος να σταθεροποιείται.

Η μελέτη έχει χαρακτήρα retrospective, υπό την έννοια ότι αναλύθηκαν υφιστάμενα αρχεία. Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν ήταν δυνατό να διαπιστωθεί αν ο ασθενής έκανε χρήση σκληρών φακών επαφής και αν αυτός επηρέαζε είτε την τοπογραφική εικόνα είτε την εξέλιξη του κερατόκωνου.