



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ



‘ Μέτρηση της διαφάνειας του κερατοειδή μετά από  
διαθλαστικές επεμβάσεις με Excimer laser. ‘

ΠΕΝΤΑΡΗ ΗΡΩ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΡΙΛΑΟΣ ΓΚΙΝΗΣ

ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ 2007-2008





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ



‘ Μέτρηση της διαφάνειας του κερατοειδή μετά από διαθλαστικές επεμβάσεις με Excimer laser. ‘

ΠΕΝΤΑΡΗ ΗΡΩ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΡΙΛΑΟΣ ΓΚΙΝΗΣ

Η παρούσα εργασία υπεβλήθη ως μέρος των υποχρεώσεων για την απονομή του μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος ‘Οπτική & Όραση ’ και παρουσιάστηκε στην Τριμελή Επιτροπή αποτελούμενη από τους

1. Γκίνη Χαρίλαο
2. Τσιλιμπάρη Μιλτιάδη
3. Παλλήκαρη Ιωάννη

ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ 2007-2008



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστές  
Περίληψη  
Abstract  
Εισαγωγή

## Κεφάλαιο I

- 1.1 Ανατομία του οφθαλμού
- 1.2 Οπτικό σύστημα του οφθαλμού

## Κεφάλαιο II

- 2.1 Ο κερατοειδής χιτώνας
- 2.2 Ιστολογική δομή του κερατοειδή
- 2.3 Ο κερατοειδής χιτώνας σαν οπτικό στοιχείο
- 2.4 Η διαφάνεια του κερατοειδή.

## Κεφάλαιο III

- 3.1 Σκέδαση του φωτός
- 3.2 Η σκέδαση της H/M ακτινοβολίας
- 3.3 Η σκέδαση στον κερατοειδή
- 3.4 Μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό.
  - 3.4.1 Οπτικές μέθοδοι
  - 3.4.2 Ψυχοφυσικές μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης

## Κεφάλαιο IV

- 4.1 Φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή – PRK
- 4.2 Εφαρμογή φωτοδιαθλαστικής κερατεκτομής σε οφθαλμούς κουνελιών.
- 4.3 Θυσία ζώων – Λήψη κερατοειδών

## Κεφάλαιο V

- 5.1 Μετρήσεις απλής διέλευσης
- 5.2 Οπτική διάταξη απλής διέλευσης
- 5.3 Βαθμονόμηση κάμερας

## Κεφάλαιο VI

- 6.1 Συνάρτηση διασποράς σημείου (PSF)
- 6.2 Συνέλιξη
  - 6.2.1 Ορισμός της συνέλιξης
  - 6.2.2 Ορισμός του μετασχηματισμού Fourier
  - 6.2.3 Σχέση μεταξύ συνέλιξης και μετασχηματισμού Fourier.

- 6.2.4 Συνέλιξη – Συνάρτηση διασποράς σημείου
- 6.3 Υπολογισμός της έντασης της σκεδαζόμενης Η/Μ ακτινοβολίας, των κερατοειδών – SR.
- 6.4 Scatter Ratio – Πάχος ουλώδους στοιβάδας

## Κεφάλαιο VII

- 7.1 Μορφόκλασμα (Fractal)
- 7.2 Κατασκευή μαθηματικού μοντέλου – fractal της υποεπιθηλιακής στοιβάδας του κερατοειδή.
- 7.3 Ανάπτυξη φυσικών μοντέλων σκέδασης.

Γενικά συμπεράσματα  
Βιβλιογραφία  
Παραρτήματα



## Ευχαριστίες

Όταν ολοκληρώνεις ένα μεγάλο μέρος ενός στόχου και κοιτάς πίσω, μόνο τότε συνηδαιοποιείς την συνολική σου πορεία και τους ανθρώπους που την επηρέασαν. Σε αυτούς θέλω να αναφερθώ και να τους ευχαριστήσω θερμά για την σημαντική βοήθεια που μου πρόσφεραν στα διάφορα στάδια αυτής της πορείας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Χ.Γκίνη για την εκπόνηση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας. Είναι ο άνθρωπος ο οποίος στάθηκε αφορμή να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα δείχνοντας εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου και κατανόηση στις δυσκολίες που αντιμετώπισα, στηρίζοντάς με σε διάφορες στιγμές κατά την διάρκεια αυτής της πορείας. Σημαντικότερα εφόδια στην εξέλιξή μου ως άνθρωπο και στην συνέχεια των σπουδών μου αποτέλεσαν οι γνώσεις και οι εμπειρίες που αποκόμισα από αυτήν την συνεργασία.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν άμεσα ή έμμεσα για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας Dirk De Brouwere και Δ.Τσατσαρώνη επιστημονικοί συνεργάτες της ερευνητικής ομάδας του Β.Ε.Μ.Μ.Ο, Δ.Μπουζούκη και Ε.Ναομίδα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κ. Ιωάννη Παλλήκαρη, διευθυντή στο Βαρδινογιάνειο Εργαστήριο Μεταμοσχεύσεων και Μικροχειρουργικής Οφθαλμού. Με την ευγενική συγκατάθεση του, έκανα χρήση του τεχνολογικού εξοπλισμού των εργαστηρίων του Β.Ε.Μ.Μ.Ο, για την πραγματοποίηση του πειραματικού μέρους αυτής της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μεταπτυχιακούς φοιτητές και φίλους για το ευχάριστο κλίμα που είχε δημιουργηθεί, για τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις που είχαμε καθώς και για τις μικρές στιγμές χαλάρωσης που μου προσέφεραν σε δύσκολες στιγμές.

## Περίληψη

Σύνηθες αποτέλεσμα των επεμβάσεων διαθλαστικής χειρουργικής στον ανθρώπινο οφθαλμό αποτελεί η σκέδαση, η οποία οφείλεται στην μετεγχειρητική επουλωτική δραστηριότητα που αναπτύσσει ο κερατοειδής. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η ποσοτικοποίηση του φαινομένου της σκέδασης στον κερατοειδή μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής με Excimer laser και η συσχέτιση αυτού με κλινικές ιστολογικές παρατηρήσεις καθώς και η ανάπτυξη φυσικών και μαθηματικών μοντέλων σκέδασης που προσομοιώνουν το φαινόμενο της σκέδασης στον οφθαλμό.

Για την ποσοτικοποίηση του φαινομένου της σκέδασης των κερατοειδών καθώς και φυσικών μοντέλων σκέδασης που αναπτύχθηκαν με χρήση μικροσφαιριδίων, χρησιμοποιήθηκαν κουνέλια τα οποία υποβλήθηκαν σε PRK (-6D, 6mm OZ). Στο χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από την ημέρα της ακτινοβολήσης των κερατοειδών των κουνελιών, μέχρι την επανεπιθηλιοποίηση τους, πραγματοποιήθηκε ενστάλαξη οφθαλμικών σταγόνων. Η οπτική διάταξη που αναπτύχθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων αποτελείται από μια CCD κάμερα, μια τριπλέτα οπτικών φακών και μια φωτεινή πηγή. Το ποσό της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας καταγράφηκε με την μέθοδος της απλής διέλευσης.

Οι μετρήσεις της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας μετά από απλή διέλευση της από τα υπό εξέταση δείγματα, έδειξαν ότι το ποσοστό της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, μετά από διαθλαστική χειρουργική αυξάνεται για μικρές γωνίες σκέδασης. Παράλληλα οι ιστολογικές εικόνες των κερατοειδικών δειγμάτων έδωσαν σαφή εικόνα του ουλώδη ιστού που αναπτύσσεται υποεπιθηλιακά καθώς και το πάχος του και την συσχέτιση αυτών με το ποσό της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Τέλος μέσω των εικόνων από συνεστιακό μικροσκόπιο έγινε αντιληπτό το μέγεθος των δομών του ουλώδη ιστού που προκαλούν το φαινόμενο της σκέδασης.

Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις απλής διέλευσης οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο της σκέδασης στον οφθαλμό μετά από διαθλαστικές επεμβάσεις οφείλεται κατά κύριο λόγο στον ουλώδη ιστό που αναπτύσσεται. Επιπλέον η ανάπτυξη φυσικών μοντέλων σκέδασης επιβεβαίωσε την συσχέτιση του μεγέθους των σκεδαστών με την κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας αλλά και των άμεσων συνεπειών του φαινομένου της σκέδασης στην ποιότητα της όρασης.

## **Abstract:**

### **Purpose:**

Corneal haze is an adverse effect after photorefractive keratectomy (PRK) and is associated with morphological changes in the cornea. The purpose of this study was to employ optical and image processing techniques to calculate the intensity and angular distribution of scattered light in a series of post-PRK rabbit corneas and to correlate these findings with clinical and histopathological observations.

### **Methods:**

Eight pigmented rabbits underwent PRK (-6D, 6mm OZ). All eyes received local antibiotic drops until their reepithelialization. The animals were treated in accordance to the Statement for the Use of Animals in Ophthalmic and Vision Research. A specialized physician assessed subjective haze of all eyes on a weekly basis, while central corneal thickness (CCT) was also recorded. Animals were sacrificed at the tenth postoperative week. The intensity (and angular distribution) of scattered light was measured for all corneas by means of a purposely-developed camera lens that incorporated excised rabbit corneas between its glass elements. This lens was used with a CCD camera to record images projected on a computer screen. The power ratio of scattered light (SR=Scatter Ratio) was calculated by measuring the intensity of a dark disk on a uniform bright background. Based on images of a bright semiplane, the angular distribution of scatter was calculated. After the scatter measurement, the corneas were prepared for histological examination.

### **Results:**

All measured parameters exhibited symmetry between fellow eyes. Maximum subjective haze grade ( $2.18 \pm 0.99$ ) was observed at week 4 and minimum ( $0.92 \pm 0.93$ ) at week 10. CCT did not change significantly postoperatively. SR was increased in all eyes in respect to previously measured intact corneas while ten eyes exhibited no subjective haze. Histology revealed a characteristic subepithelial irregular layer similar to scar tissue. SR was correlated to the thickness of this layer. The angular distribution of scattered light was characterized by a narrow forward peak (1.5 degrees FWHM).

### **Conclusions:**

Forward scatter following PRK can be attributed mainly to the subepithelial irregular layer. The angular distribution of scatter is in accordance to the size of structures

observed microscopically in this layer. The optical technique was more sensitive than the subjective. The presented methodology may prove useful for the evaluation of different treatment schemes in terms of postoperative corneal haze.

**(ARVO 2008)**

## Εισαγωγή

Η αίσθηση της όρασης αποτελεί αποτέλεσμα πολύπλοκων διεργασιών καθώς και συνεργασία των διαφορετικών δομών του ανθρώπινου οφθαλμού και του εγκεφάλου. Για την επίτευξη ενός ευκρινούς ειδώλου απαιτείται η συνολική διοπτρική ισχύς του οφθαλμού να προκαλεί την κατάλληλη σύγκλιση ακτίνων, έτσι ώστε αυτές να εστιάζονται πάνω στον αμφιβληστροειδή. Η ασυμβατότητα της διοπτρικής ισχύος του οπτικού συστήματος του οφθαλμού με το αξονικό του μήκος ονομάζεται μυωπία στην περίπτωση που το αξονικό μήκος είναι τέτοιο ώστε ο αμφιβληστροειδής να βρίσκεται μακρύτερα από την εστία του οπτικού συστήματος, ενώ υπερμετρωπία στην αντίθετη. Τα σφάλματα αυτά ονομάζονται διαθλαστικά. Η παρουσία τέτοιων διαθλαστικών σφαλμάτων οδηγούν στην δημιουργία μη ευκρινούς ειδώλου.

Για τη χειρουργική διόρθωση των προαναφερθέντων διαθλαστικών σφαλμάτων συνήθως πραγματοποιείται επέμβαση στην πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς, καθώς αυτή είναι η βασική διαθλαστική επιφάνεια του οφθαλμού. Στην διαθλαστική χειρουργική γίνεται μορφοποίηση του κερατοειδούς με σκοπό την αλλαγή της ακτίνας καμπυλότητας της πρόσθιας επιφάνειας και την επακόλουθη αντιστάθμιση του διαθλαστικού σφάλματος. Μετά την πραγματοποίηση αυτής η ποιότητα του ειδώλου καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά και την ποιότητα του κερατοειδή. Η σκέδαση της εισερχόμενης στον οφθαλμό Η/Μ ακτινοβολίας αποτελεί βασικός παράγοντας στην αλλοίωση της ποιότητας της όρασης μετά την διαθλαστική χειρουργική, και εμφανίζεται λόγω της μετεγχειρητικής επουλωτικής δραστηριότητας που αναπτύσσει ο κερατοειδής.

Η θολερότητα του κερατοειδή σήμερα, υπολογίζεται υποκειμενικά μέσω παρατήρησης με χρήση σχισμοειδούς λυχνίας, του φωτός που σκεδάζεται προς τα πίσω από τον κερατοειδή. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου της σκέδασης στον κερατοειδή μετά από διαθλαστική χειρουργική - PRK. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου σκέδασης, το οποίο προσομοιώνει την σκέδαση στον κερατοειδή.

# Κεφάλαιο I

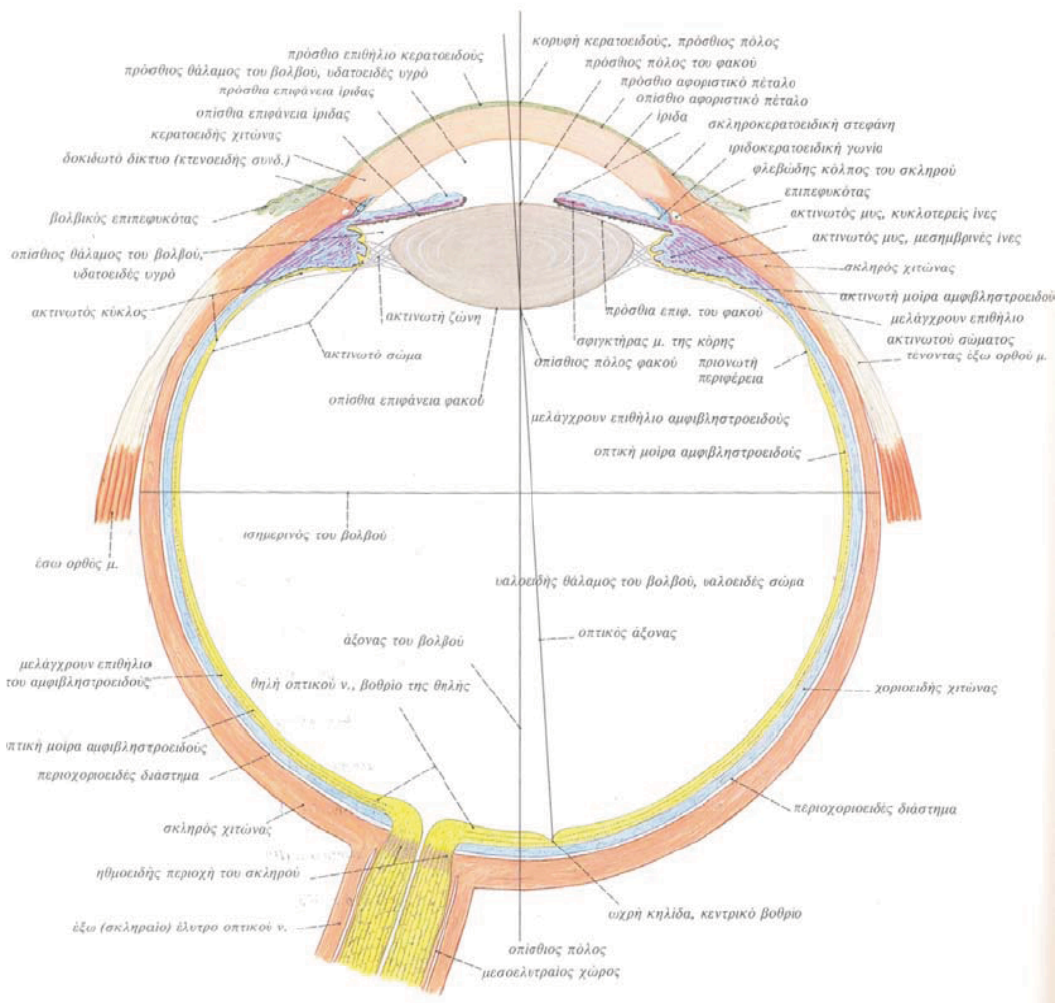
## 1.1 Ανατομία του οφθαλμού

Το αισθητήριο όργανο της όρασης είναι ο οφθαλμός. Οι οφθαλμοί βρίσκονται μέσα στους οφθαλμικούς κόγχους του κρανίου, μια θέση «επιτελική», αφού το κρανίο βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο του σώματος, επιτρέποντας έτσι την καλύτερη εποπτεία του χώρου.

Ο οφθαλμός αποτελείται από τον βολβό και το οπτικό νεύρο. Ο οφθαλμικός βολβός, σφαιρικού σχήματος καταλαμβάνει τα 2/5 της κοιλότητας του οφθαλμικού κόγχου. Ο κόγχος αυτός περιέχει επιπλέον, τους μύες που κινούν τον οφθαλμό.

Σε κάθε οφθαλμικό βολβό διακρίνουμε τον πρόσθιο πόλο, που αντιστοιχεί στο κέντρο του κερατοειδούς, και τον οπίσθιο πόλο, στην διαμετρικά αντίθετη θέση. Η γραμμή που ενώνει τους δύο πόλους αποτελεί τον οπτικό άξονα του οφθαλμικού βολβού. Οι διαστάσεις του οφθαλμικού βολβού είναι 24mm για την προσθοπίσθια και εγκάρσια διάμετρο και 23mm για την κάθετη διάμετρο.

Είναι κοίλος και εμφανίζει τοίχωμα και περιεχόμενο. Το τοίχωμα του βολβού αποτελείται από τρεις χιτώνες, οι οποίοι από έξω προς τα μέσα είναι, ο ινώδης χιτώνας, ο αγγειώδης χιτώνας και ο αμφιβληστροειδής χιτώνας. Το περιεχόμενο αποτελείται από τον κρυσταλλοειδή φακό, το υδατοειδές υγρό και το υαλοειδές σώμα. Στον σκληρό χιτώνα προσφύονται οι μύες που κινούν τον οφθαλμό, ενώ λόγω της σκληρότητάς του στηρίζει και προστατεύει τους υπόλοιπους χιτώνες.



**Εικόνα1.1: Ανατομία του οφθαλμού**

Ο κερατοειδής, αποτελεί το πρόσθιο 1/6 του βολβού και είναι διαυγής, διάφανος, άχρωμος. Παρατηρούμενος από μπροστά φαίνεται ελαφρά ελλειπτικός, με οριζόντια διάμετρο 12mm και κάθετη διάμετρο 11mm. Παρατηρούμενος από πίσω είναι κυκλικός και η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι ο σκληρός χιτώνας επικαλύπτει την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς προς τα πάνω και προς τα κάτω, λίγο περισσότερο από ότι προς τα έξω και προς τα έσω. Σημαντικό χαρακτηριστικό του κερατοειδή είναι ότι δεν έχει αγγεία, ενώ αντίθετα από την αιμάτωση έχει πλούσια νεύρωση.

Πίσω από τον κερατοειδή υπάρχει μια κοιλότητα, ο πρόσθιος θάλαμος, ο οποίος είναι γεμάτος, από ένα άχρωμο διαφανές υγρό, το υδατοειδές υγρό. Παράγεται από τις ακτινοειδείς προβολές του ακτινωτού σώματος και αποχετεύεται από το

αποχετευτικό σύστημα της γωνίας του πρόσθιου θαλάμου. Η ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της αποχέτευσης του υδατοειδούς υγρού έχει σαν αποτέλεσμα την διατήρηση της ενδοφθάλμιας πίεσης σε φυσιολογικά επίπεδα. Κύρια λειτουργία του υδατοειδούς υγρού είναι η στήριξη του τοιχώματος του βολβού ενώ παράλληλα διατρέφει τον φακό, ο οποίος στερείται αγγείων, και συμμετέχει στην απομάκρυνση άχρηστων προϊόντων του μεταβολισμού.

Ο σκληρός χιτώνας αποτελεί το υπόλοιπο τμήμα του ινώδους χιτώνα. Αποτελείται από πυκνό ινώδη συνδετικό ιστό, είναι αδιαφανής και πάνω του προσφύονται οι τένοντες των μυών του οφθαλμικού βολβού.

Ο αγγειώδης χιτώνας, εμφανίζεται από πίσω προς τα εμπρός τρεις μοίρες. Τον χοριοειδή χιτώνα, ο οποίος περιέχει τα κυριότερα αιμοφόρα αγγεία του οφθαλμού και είναι υπεύθυνος για την θρέψη της έξω κυρίως μοίρας του αμφιβληστροειδούς. Το ακτινωτό σώμα περιέχει τον ακτινωτό μυ, όπου οι συσπάσεις αυτού διαμορφώνουν το σχήμα του φακού και την ίριδα, η οποία στο κέντρο της εμφανίζει μια οπή την κόρη. Παράλληλα είναι υπεύθυνο για την παράγωγή του υδατοειδούς υγρού. Τέλος η ίριδα, δίνει το χρώμα των ματιών και περιέχει δύο μύες που ρυθμίζουν το μέγεθος της κόρης και συνεπώς συναποτελούν το διάφραγμα του οφθαλμού μέσω του οποίου με μεταβολή της διαμέτρου της κόρης, με την μυϊκή λειτουργία της ίριδας εισέρχεται περισσότερο ή λιγότερο φως στον οφθαλμό.

Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας είναι το μέρος του οφθαλμού που μετατρέπει το φωτεινό ερέθισμα σε νευρική ώση, με αποτέλεσμα, μετά από επεξεργασία στον εγκέφαλο να παρέχει στον άνθρωπο την αίσθηση της όρασης. Μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί ότι όλα τα υπόλοιπα μέρη του οφθαλμού εξυπηρετούν τον σκοπό της υποβοήθησης του αμφιβληστροειδούς για την πραγματοποίηση της πολύ εξειδικευμένης λειτουργίας του. Καλύπτει όλη την έσω επιφάνεια του χοριοειδούς, ενώ στο οπίσθιο μέρος της εσωτερικής επιφάνειας, την οπτική μοίρα, φέρει τα οπτικά κύτταρα, τα οποία είναι ιδιόμορφα νευρικά κύτταρα και ονομάζονται φωτοϋποδοχείς. Τέλος στον αμφιβληστροειδή διακρίνονται η οπτική θηλή και η ωχρά κηλίδα.

Στη υφή του οπτικού αμφιβληστροειδούς συμμετέχουν οι νευρώνες, τα νευρογλοιακά κύτταρα και αιμοφόρα αγγεία. Στους νευρώνες περιλαμβάνονται οι φωτοϋποδοχείς (ραβδία και κωνία), οι συνδετικοί νευρώνες και τελικά διαβιβαστικά κύτταρα, τα γαγγλιακά, όπου βρίσκονται κοντά στην έσω επιφάνεια του οπτικού αμφιβληστροειδούς ενώ οι νευροάξονές τους αποτελούν το οπτικό νεύρο. Τα ραβδία θεωρείται ότι είναι ευαίσθητα στο αμυδρό φως και την νύκτα. Φέρουν μια



φωτοευαίσθητη ουσία, την ροδοψίνη, η οποία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στο ιώδες, οπότε διασπάται και έτσι ξεκινάει ένα ηλεκτρικό δυναμικό που εξελίσσεται σε νευρική ώση. Τα κωνία είναι πιο ευμεγέθη από τα ραβδία και περιέχουν και αυτά φωτοχρωστική ουσία, την ιωδοψίνη. Τα κωνία είναι περισσότερα στην ωχρά κηλίδα και χρησιμεύουν για την όραση στο άπλετο φως και για την αντίληψη των χρωμάτων. Υπάρχουν τρία είδη οψίνης, καθένα ευαίσθητο σε διαφορετικό χρώμα: πράσινο, ερυθρό και κυανό. Σε κάθε περίπτωση, τα ερεθίσματα των ραβδίων και των κωνίων, μεταδίδονται σε άλλα νευρικά κύτταρα, μέσω συνάψεων. Οι ίνες των κυττάρων αυτών σχηματίζουν το οπτικό νεύρο, το οποίο εμφύεται από την οπίσθια επιφάνεια του αμφιβληστροειδούς και του οφθαλμού.

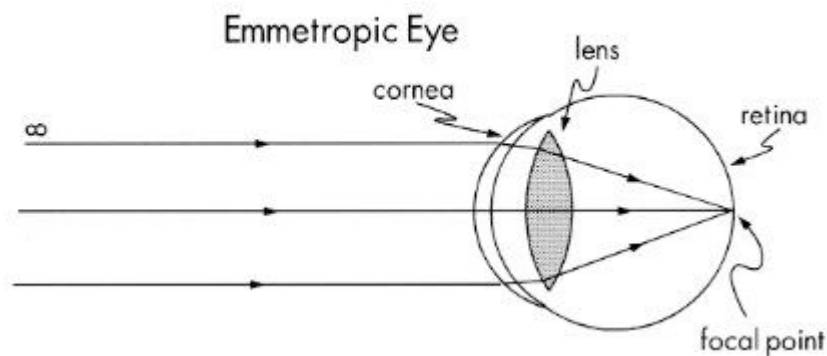
Το περιεχόμενο του οφθαλμικού βολβού αποτελείται, όπως προαναφέρθηκε, από μπροστά προς τα πίσω από το υδατοειδές υγρό, τον κρυσταλλοειδή φακό και το υαλοειδές σώμα.

Ο κρυσταλλοειδής φακός ένα είναι αμφίκυρτο διαφανές σώμα που περιβάλλεται από μια διαφανή κάψα. Βρίσκεται πίσω από την ίριδα και μπροστά από το υαλοειδές σώμα και στηρίζεται στην περιφέρεια του από τις ίνες της ακτινωτής ζώνης του Zinn. Κύριο χαρακτηριστικό του φακού είναι ότι το σχήμα του αλλάζει κατά την προσαρμογή. Είναι δηλαδή ελαστικός και η σύστασή του ακτινωτού μυός επιτρέπει εντός ορίων την αυξομείωση της κυρτότητάς του ώστε να προσαρμόζεται σε μακρινή και κοντινή όραση.

Πίσω από τον φακό, βρίσκεται το υαλοειδές σώμα. Είναι διαυγής και άχρωμη ουσία η οποία γεμίζει τον χώρο μεταξύ της οπίσθιας επιφάνειας του φακού και του αμφιβληστροειδούς. Εκτός από την δίοδο του φωτός, θρέφει τον φακό ενώ παράλληλα τον στηρίζει από πίσω και διατηρεί τους υπόλοιπους χιτώνες στην θέση τους, αφού γεμίζει όλη την κοιλότητα του βολβού.

## 1.2 Οπτικό σύστημα του οφθαλμού

Ο οφθαλμός αποτελεί ένα πολύπλοκο όργανο το οποίο βρίσκεται σε συνεχή επικοινωνία με τον εγκέφαλο. Η δομή αυτού αλλά και η λειτουργία του οφείλεται στην οργάνωση και στην γεωμετρία των οπτικών μέσων του, τα οποία είναι με τέτοιο τρόπο οργανωμένα ώστε να επιτρέπουν τη διάδοση του φωτός με πολύ χαμηλά επίπεδα σκέδασης<sup>1</sup> και τον σχηματισμό ενός ευκρινούς ειδώλου στον αμφιβληστροειδή με σχετικά χαμηλές οπτικές εκτροπές<sup>2</sup>. Το τυπικό αξονικό μήκος του οφθαλμού είναι 24mm ενώ η δομή του αποτελείται από τέσσερις διαθλαστικές επιφάνειες (σχήμα 1.2.1)

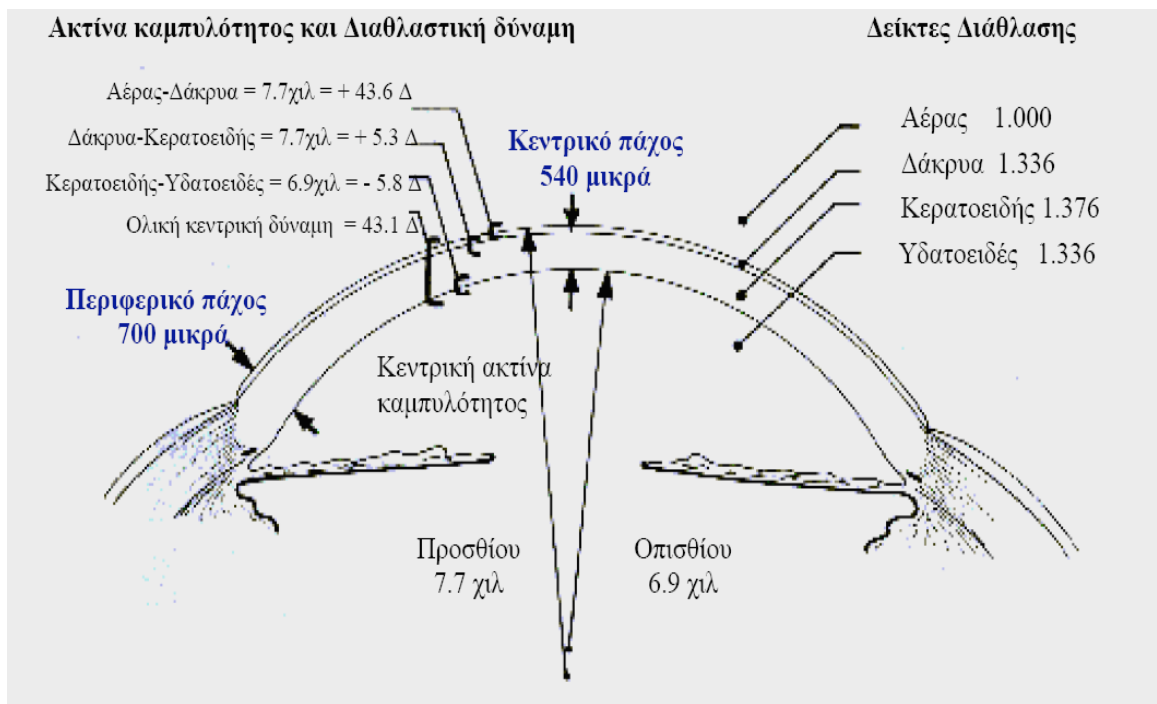


**Σχήμα1.2: Σχηματική απεικόνιση του οπτικού συστήματος του οφθαλμού.**

Στο πρόσθιο μέρος του οφθαλμού υπάρχει ο κερατοειδής χιτώνας, ο οποίος είναι το πρώτο διαθλαστικό μέσο που συναντούν οι φωτεινές ακτίνες που προσπίπτουν στον οφθαλμό. Λόγω της καμυλότητάς του και της διαφάνειάς του επιτελεί με την σημαντική -αλλά μικρότερη του φακού του ματιού- το έργο εστίασης των οπτικών ερεθισμάτων πάνω στους ευαίσθητους φωτοϋποδοχείς του ματιού, που βρίσκονται μέσα στο μάτι στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Η επιφάνεια του παρουσιάζει μια κυρτότητα ακτίνας 8mm, στην οποία οφείλεται η διάθλαση του φωτός που προσπίπτει πάνω στον φακό, ο οποίος με την σειρά του στρέφει το φως πάνω στον αμφιβληστροειδή. Το πάχος του κερατοειδή είναι 550μm, ενώ ο δείκτης διάθλασης του είναι  $n=1.3771$ .

Πίσω από τον κερατοειδή χιτώνα υπάρχει ο πρόσθιος θάλαμος ο οποίος περιέχει το υδατοειδές υγρό με δείκτη διάθλασης  $n=1.336$ , το οποίο χρησιμεύει στην θρέψη του κερατοειδούς χιτώνα αλλά και του φακού. Ακολουθεί η ίριδα, η οποία στο κέντρο της εμφανίζει μία οπή την κόρη. Περιέχει δύο μυς που ρυθμίζουν το μέγεθος της κόρης και συνεπώς αποτελεί βασικό παράγοντα στον έλεγχο της εισόδου του φωτός προς τον αμφιβληστροειδή. Η διάμετρος της ίριδας αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με το προσπίπτον φως, αποτελώντας έτσι το διάφραγμα του οπτικού συστήματος.

Πίσω από την ίριδα βρίσκεται ο κρυσταλλοειδής φακός ο οποίος είναι διαφανής και ελαστικός με δυνατότητα αλλαγής του σχήματός του και συνεπώς της εστιακής απόστασης του συστήματος, απαραίτητη για την μετάβαση από την κοντινή στην μακρινή παρατήρηση<sup>3</sup>. Ο μεταβλητός δείκτης διάθλασης του κρυσταλλοειδή φακού,  $n=1.42$  καθώς και το σχήμα του είναι τέτοιο ώστε να αντισταθμίζεται σε κάποιο βαθμό η σφαιρική εκτροπή που εισάγεται από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή<sup>4</sup>. Βασικός ρόλος του κρυσταλλοειδή φακού είναι να διαθλάσει το εισερχόμενο φως και η στρέψη αυτού επάνω στον αμφιβληστροειδή, καθώς και η ρύθμιση της συνολικής διοπτρικής ισχύος του οφθαλμού.

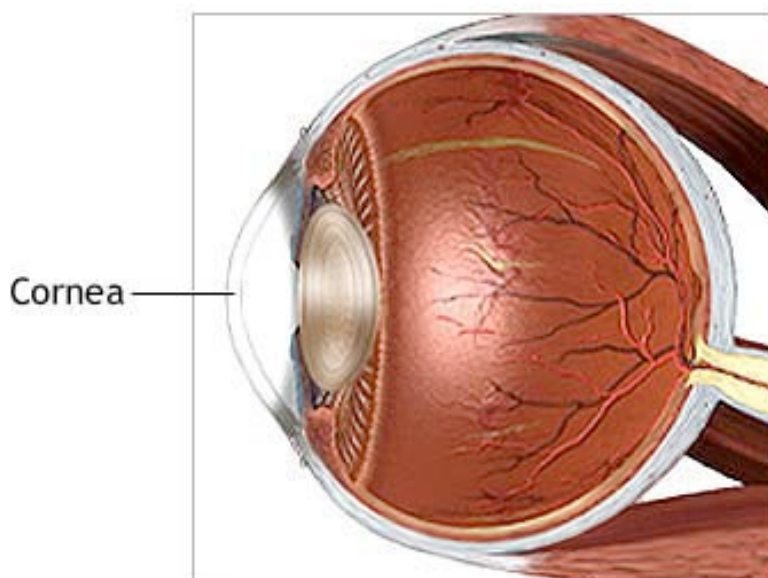


**Εικόνα1.3: Δείκτες διάθλασης και ακτίνες καμπυλότητας των οπτικών στοιχείων του οφθαλμού<sup>5</sup>. (Διδακτορική διατριβή, Σοφία Ι. Παναγοπούλου, Ηράκλειο 2005)**

Τέλος αφού οι ακτίνες φωτός συγκεντρωθούν πίσω από τον κρυσταλλοειδή φακό, διατηρώντας την πορεία τους, περνούν το υαλώδες σώμα, το οποίο έχει τον ίδιο περίπου δείκτη διάθλασης με τον φακό ( $n=1.337$ ), και συναντούν τον αμφιβληστροειδή. Ο αμφιβληστροειδής είναι μία λεπτή στοιβάδα νευρικού ιστού με ακτίνα καμπυλότητας 12mm, η οποία βρίσκεται στο πίσω τμήμα της εσωτερικής επιφάνειας του οφθαλμού. Περιέχει φωτοαισθητήρες, τα κωνία και τα ραβδία, καθώς επίσης και πέντε τύπους νευρώνων, των οποίων τα ερεθίσματα μεταδίδονται σε άλλα νευρικά κύτταρα μέσω συνάψεων. Τα κωνία και τα ραβδία αντιδρούν στο φως με κλιμακωτές αλλαγές του δυναμικού της μεμβράνης τους. Μια περιοχή που καλείται ωχρά εξυπηρετεί την κεντρική όραση, ενώ στο κέντρο της υπάρχει μια υπερεξειδικευμένη περιοχή, το κεντρικό βοθρίο, που εξυπηρετεί την ευκρινή όραση. Το υπόλοιπο του αμφιβληστροειδούς χρησιμεύει για την περιφερική όραση.

### 2.1 Ο κερατοειδής χιτώνας

Ο κερατοειδής χιτώνας καταλαμβάνει το πρόσθιο και διαφανές τμήμα του ινώδη χιτώνα του οφθαλμικού βολβού, αποτελώντας το 1/6 του εξωτερικού στρώματος του οφθαλμού. Είναι κυρτός, διαυγής και διάφανος ιστός, με διάμετρο 12mm. Παρέχει το 65% της συνολικής οπτικής ισχύς του οφθαλμού η οποία κατανέμεται κυρίως στο κεντρικό κομμάτι του κερατοειδή το οποίο είναι περισσότερο καμπύλο. Το πάχος του κερατοειδή in vivo είναι κατά προσέγγιση 550μm ενώ στην περιφέρεια το πάχος αυτού αυξάνεται και φτάνει τα 650μm έως και 1000μm περίπου, καθιστώντας αυτόν ιδιαίτερα διαθλαστικό.

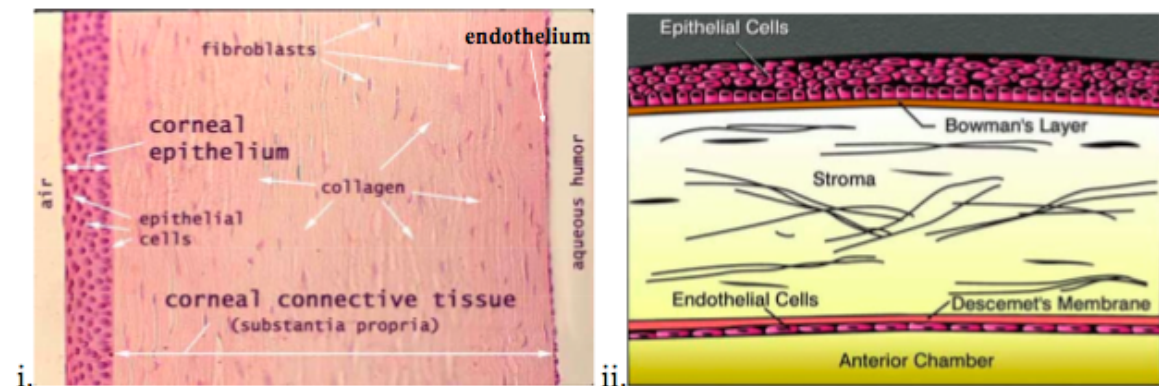


© ADAM, Inc.

**Εικόνα 2.1: Ο κερατοειδής χιτώνας**

## 2.2 Ιστολογική δομή του κερατοειδή

Ο κερατοειδής είναι μία οργανωμένη ομάδα κυττάρων και πρωτεΐνης, η οποία αποτελείται από τρία κύρια στρώματα και δύο βοηθητικά. Τα κύρια στρώματα από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του οφθαλμού είναι το επιθήλιο, το στρώμα και το ενδοθήλιο.



Εικόνα 2.2: i. Ο κερατοειδής από οπτικό μικροσκόπιο, ii. Σχηματική αναπαράσταση των δομών του κερατοειδή.

Στην εξωτερική πλευρά υπάρχει το επιθήλιο το οποίο αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία βρίσκεται η δακρυϊκή στοιβάδα. Η δακρυϊκή στοιβάδα είναι η εξώτατη διαθλαστική επιφάνεια του οφθαλμού και αποτελείται από τρία στρώματα, το στρώμα βλεννίνης, το υδατοειδές και λιπιδικό στρώμα. Το στρώμα βλεννίνης βρίσκεται σε επαφή με τα κύτταρα του επιθηλίου και βασικός ρόλος του είναι να ομαλοποιεί την επιφάνεια του κερατοειδή, μετατρέποντάς την έτσι σε μία λεία διαθλαστική επιφάνεια. Το επιθήλιο αποτελείται από 5-7 στρώσεις επιθηλιακών κυττάρων. Στην περιφέρεια έχει πάχος 80μm και φτάνει τις 10 στοιβάδες, αντίστοιχα προς το σκληροκερατοειδές όριο, όπου μεταπίπτει στο επιθήλιο του επιπεφυκότα. Αποτελείται από 3 είδη κυττάρων, τα βασικά επιθηλιακά, τα περυγοειδή πολυγωνικά και τα επιφανειακά κύτταρα. Τα κύτταρα στη βάση του επιθηλίου έχουν κυλινδρικό σχήμα ενώ τα επιφανειακά είναι πεπλατυσμένα. Η βασική στοιβάδα είναι η παραγωγική στοιβάδα, από την οποία προέρχονται τα νέα επιθηλιακά κύτταρα. Τα βασικά κύτταρα είναι τα μόνα επιθηλιακά κύτταρα που υφίστανται μίτωση. Μετά από κάθε κυτταρική διαίρεση, το ένα από τα δύο θυγατρικά κύτταρα παραμένει στη βασική στοιβάδα για να χρησιμεύσει σαν παραγωγικό κύτταρο για την επόμενη κυτταρική διαίρεση, ενώ το άλλο μεταναστεύει προς τα πάνω, διαφοροποιούμενο

σταδιακά. Επομένως σκοπός τους είναι η γρήγορη αναπαραγωγή τους, σε περίπτωση τραυματισμού του κερατοειδούς, η οποία πραγματοποιείται κυρίως στην περιφέρεια του κερατοειδή και συγκεκριμένα στο σκληροκερατοειδικό όριο. Ο χρόνος που απαιτείται για μία πλήρη αναγέννηση του επιθηλίου είναι 7 μέρες, ενώ ο πολλαπλασιασμός αυτών των κυττάρων πραγματοποιείται κυρίως στην περιφέρεια του κερατοειδή και πιο συγκεκριμένα στο σκληροκερατοειδικό όριο. Η πορεία των επιθηλιακών κυττάρων από την μίτωση έως την απόπτωση συνοδεύεται από μετακίνηση από την περιφέρεια προς το κέντρο και από την βάση του επιθηλίου προς την επιφάνεια. Επιπλέον εμποδίζει τη μετάβαση κάποιου ξένου υλικού στο μάτι και στα άλλα στρώματα του κερατοειδή και παρέχει μια ομαλή επιφάνεια που απορροφά το οξυγόνο και άλλες αναγκαίες θρεπτικές ουσίες των κυττάρων.

Μεταξύ της βασικής στοιβάδας των επιθηλιακών κυττάρων και της μεμβράνης του Bowman είναι τοποθετημένη η βασική μεμβράνη. Εκκρίνεται από ειδικά κύτταρα της βασικής στιβάδας και αποτελείται από ίνες κολλαγόνου τύπου IV.

Η μεμβράνη Bowman είναι μία πολύ σκληρή στοιβάδα, η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από το επιθήλιο. Ουσιαστικά είναι συνέχεια του στρώματος, πάχους 8-10μm, δεν περιέχει κύτταρα αλλά αποτελείται από διαπλεγμένες ίνες κολλαγόνου και θεμέλιο ουσία. Η πρόσθια επιφάνεια της μεμβράνης του Bowman είναι λεία και ομαλή, σε αντίθεση με την οπίσθια, η οποία είναι ασαφής και συγγέεται με το δίκτυο των κολλαγόνων ινιδίων του πρόσθιου στρώματος. Θεωρείται ότι προσδίδει στον κερατοειδή μηχανική σταθερότητα και αντοχή ενώ παράλληλα τον προστατεύει από τραυματισμό.

Το στρώμα του κερατοειδούς αποτελεί το 90% του συνολικού πάχους αυτού και βρίσκεται ακριβώς κάτω από την μεμβράνη Bowman. Σχηματίζεται από ελάσματα κολλαγόνων ινιδίων, κύτταρα και θεμέλιο ουσία. Τα ελάσματα από κολλαγόνο, 200-250 συνολικά στον αριθμό, επικάθονται το ένα επί του άλλου και διατάσσονται παράλληλα τόσο μεταξύ τους όσο και προς την επιφάνεια του κερατοειδή. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η μηχανική ισοτροπία στις κάθετες στον οπτικό άξονα κατευθύνσεις, καθώς επίσης εξασφαλίζεται ότι η μέση απόσταση μεταξύ των δομικών στοιχείων του στρώματος είναι πολύ μικρότερη από το από το μήκος κύματος του ορατού φωτός του οποίου καλείται να υποστηρίξει τη διάδοση. Κάθε έλασμα αποτελείται από κολλαγόνα ινίδια, που περιβάλλονται από θεμέλια ουσία, και είναι παράλληλα μεταξύ τους και αρμονικά διατεταγμένα. Η διάταξη αυτή αποτελεί την κύρια αιτία της διαφάνειας του κερατοειδούς. Τα κύτταρα του στρώματος

διακρίνονται σε μόνιμα (κερατοκύτταρα) και μεταναστευτικά (λεμφοκύτταρα, πολυμορφοπύρρηνα, λευκοκύτταρα και μακροφάγα). Η εξωκυττάρια ουσία που περιβάλλει τα κολλαγόνα ινίδια αποτελείται από πρωτεογλυκάνες και γλυκοζαμινογλυκάνες στις οποίες δεσμεύεται νερό μέσω δεσμών υδρογόνου, καθώς επίσης και διάσπαρτα κερατοκύτταρα των οποίων ο ρόλος είναι η επουλωτική δραστηριότητα σε περίπτωση τραυματισμού του κερατοειδή.

Στην εσωτερική πλευρά του κερατοειδή βρίσκεται η μεμβράνη του Descemet, η οποία είναι η βασική μεμβράνη του ενδοθηλίου του κερατοειδή. Είναι ομοιογενής μεμβράνη η οποία εύκολα μπορεί να αποχωριστεί από το στρώμα και το ενδοθήλιο. Αποτελείται από λεπτά κολλαγόνα ινίδια με ομοιόμορφη κατανομή, διαφορετικά όμως από αυτά του στρώματος.

Το ενδοθήλιο αποτελεί το ενδότερο στρώμα του κερατοειδούς χιτώνα, το οποίο ιστολογικά είναι τυπικό πλακώδες επιθήλιο. Η άμεση όμως επαφή του με το υδατοειδές υγρό καθώς και ύπαρξη στα κύτταρά του οργανιδίων χαρακτηριστικών για κύτταρα που παίρνουν μέρος σε ενεργητική μεταφορά και πρωτεϊνική σύνθεση για έκκριση, το καθιστούν εξαιρετικής λειτουργικής σπουδαιότητας ιστό για τον μεταβολισμό του κερατοειδούς καθώς και τη διατήρηση της διαφάνειας αυτού. Αποτελείται από μία μονοκυτταρική στρώση εξαγωνικών κυττάρων, πλούσια σε μιτοχόνδριο τα οποία συμβάλλουν σημαντικά στην μεταφορά ρευστού από τον κερατοειδή προς τον πρόσθιο θάλαμο και στην διατήρηση του κερατοειδή, ελαφρώς αφυδατωμένο, γεγονός που απαιτείται για την οπτική διαύγεια. Με την λειτουργία τους αυτή εξασφαλίζουν την πυκνή διάταξη των κολλαγόνων ινών του στρώματος σε διαφορετικές στρώσεις.



## 2.3 Ο κερατοειδής χιτώνας σαν οπτικό στοιχείο

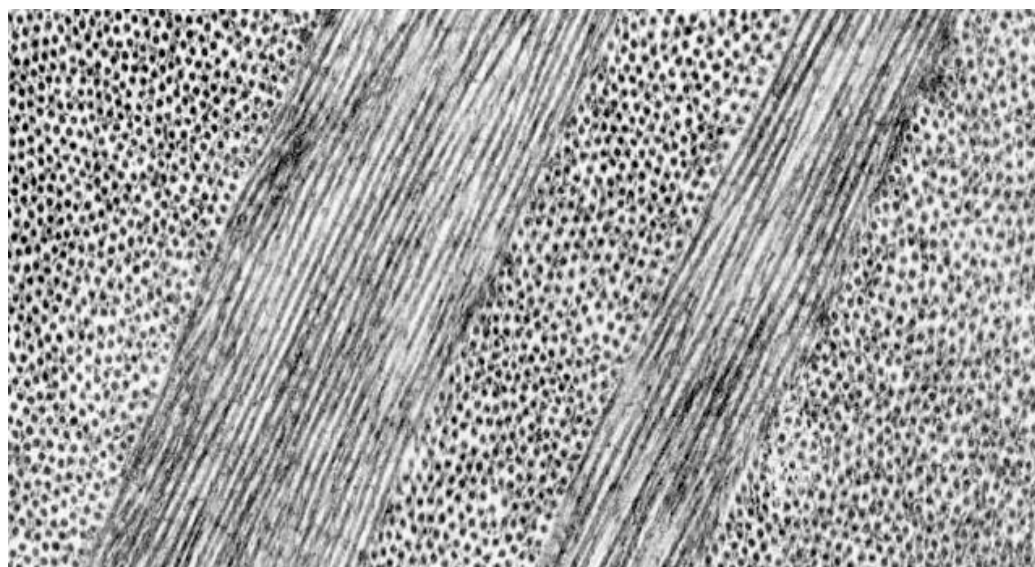
Ο κερατοειδής χιτώνας αποτελεί την ισχυρότερη διαθλαστική δομή, ιδιότητα την οποία οφείλει στην καμπυλότητά του<sup>6</sup> και στην θέση του στον βολβό του οφθαλμού. Επιπλέον αποτελεί την πρώτη διαθλαστική επιφάνεια την οποία συναντούν οι εισερχόμενες στον οφθαλμό ακτίνες. Η ίριδα αποτελεί το διάφραγμα του οπτικού συστήματος του οφθαλμού, το οποίο ρυθμίζει την ποσότητα του φωτός που φτάνει στον αμφιβληστροειδή, ενώ ο κρυσταλλοειδής φακός λειτουργεί ως μέσο ρύθμισης της συνολικής διοπτρικής ισχύος του οφθαλμού, προκειμένου να καθίσταται δυνατή η ευκρινής απεικόνιση των μακρινών και κοντινών αντικειμένων.

Η διαθλαστική ισχύς του κερατοειδή εξαρτάται από τον δείκτη διάθλασης ( $n=1.376$ ) και την κυρτότητα αυτού, και ανέρχεται περίπου σε 45 διοπτρίες ( $D = 1/F(m)$ ). Παρουσιάζει δύο επιφάνειες, όπου η ακτίνα καμπυλότητας της πρόσθιας επιφάνειας είναι κατά μέσο όρο 7,8mm ενώ της οπίσθιας επιφάνειας του είναι 6,5mm. Η πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς είναι ένα από τα κύρια διαθλαστικά μέσα του οφθαλμού όπου αντιστοιχεί στα 2/3 της διοπτρικής του ισχύος και αποτελεί την διεπιφάνεια με τη μέγιστη διαφορά δεικτών διάθλασής εκατέρωθεν της. Για τον λόγο αυτό η συμμετρία και η ομοιομορφία της επιφάνειας του κερατοειδή καθώς και η διαφάνειά του είναι καθοριστικής σημασίας για την ποιότητα του ειδώλου που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του οφθαλμού και γενικότερα της όρασης. Η οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδή παρουσιάζει μεγαλύτερη καμπυλότητα, ενώ το κεντρικό 1/3 του κερατοειδούς είναι σχεδόν σφαιρικό και έχει διάμετρο 4mm στον φυσιολογικό οφθαλμό.

Ο κερατοειδής λειτουργεί ως ένα κυρτό κάτοπτρο. Ο φυσιολογικός κερατοειδής είναι πιο κρημνώδης στο κέντρο, ενώ επιπεδώνεται προχωρώντας στην περιφέρεια, εξασφαλίζοντας ελαχιστοποίηση των σφαιρικών εκτροπών. Οι διάφορες ανωμαλίες στην επιφάνεια του κερατοειδή μπορούν να εισάγουν εκτροπές στο οπτικό σύστημα του οφθαλμού με αποτέλεσμα να επηρεάσουν την λειτουργία της όρασης.

## 2.4 Η διαφάνεια του κερατοειδή.

Η διαφάνεια του κερατοειδή κατά κύριο λόγο, οφείλεται στις ίνες κολλαγόνου που τον αποτελούν, των οποίων βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η ομοιόμορφη διάμετρος τους και η συνοχή τους, εξαιτίας των διαμοριακών δεσμών. Η ομοιόμορφη δομή των ιών κολλαγόνου και κατά συνέπεια η διαφάνεια του κερατοειδή, επηρεάζεται άμεσα από την αλλαγή σε περιεκτικότητα νερού στο κερατοειδή<sup>7</sup>. Το ενδοθήλιο, που βρίσκεται ανάμεσα στο στρώμα και στο υδατοειδές υγρό, διαδραματίζει ένα ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο σε αυτήν την λειτουργία. Κύρια λειτουργία του ενδοθηλίου είναι να αντλεί νερό από το στρώμα του κερατοειδή προς τον πρόσθιο θάλαμο, διατηρώντας σταθερή την κατάσταση ενυδάτωσής του.



**Εικόνα 2.3: Ομοιόμορφη δομή – διαφορετική κατεύθυνση ιών κολλαγόνου.**

Οι υβριδικές ινώδεις αυτές δομές κολλαγόνου του κερατοειδή είναι μίγμα από μόρια κολλαγόνου τύπου I, III και V. Αυτοί οι τύποι κολλαγόνου διαφέρουν μεταξύ τους στο αμινοξύ και καθορίζουν το μέγεθος των δομών ιών κολλαγόνου καθώς και το κατά πόσο μπορούν οι δομές αυτές να αυξηθούν πλευρικά. Επιπλέον ο κερατοειδής περιέχει σε μεγάλο ποσοστό κολλαγόνο τύπου IV, το οποίο διαμορφώνει διάφορες δομές, όπου ο ρόλος τους είναι καθοριστικός στην τροποποίηση της δομής και της λειτουργίας των ιών κολλαγόνου.

Οι ίνες κολλαγόνου είναι διατεταγμένες σχηματίζοντας ένα πλέγμα, όπου η μέση απόσταση μεταξύ αυτών είναι τέτοια ώστε η καταστρεπτική συμβολή του φωτός που σκεδάζεται, να συμβαίνει προς όλες τις κατευθύνσεις πέραν της κατεύθυνσης διάδοσης<sup>8</sup>. Παράλληλα οι διαστάσεις των ινών κολλαγόνου είναι αρκετά μικρότερες από το μήκος κύματος, με αποτέλεσμα να συνεισφέρουν στην διαφάνεια του κερατοειδή.

Στον κερατοειδή την αντοχή στην συμπίεση και την πλήρωση των χώρων ανάμεσα στα κύτταρα, εξυπηρετεί μια εντελώς διαφορετική ομάδα μακρομορίων του στρώματος, οι πρωτεογλυκάνες. Οι πρωτεογλυκάνες είναι υβριδικά μακρομόρια τα οποία αποτελούνται από έναν πρωτεϊνικό πυρήνα, όπου συνδέονται με τα μόρια μίας ειδικής κατηγορίας πολύπλοκων, αρνητικά φορτισμένων πολυσακχαριτών, γνωστών ως γλυκοζαμινογλυκάνες. Οι γλυκοζαμινογλυκάνες είναι πολύ υδρόφιλες και εκπτώσσονται πολύ, με συνέπεια να καταλαμβάνουν τεράστιο όγκο σε σχέση με την μάζα τους. Σχηματίζουν πηκτές ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ τα πολλαπλά αρνητικά φορτία τους προσελκύουν ένα νέφος κατιόντων, όπως τα κατιόντα του  $\text{Na}^+$ , που είναι ωσμωτικά δραστικά και προσροφούν μεγάλες ποσότητες νερού μέσα στο στρώμα. Αυτό δημιουργεί μια πίεση διόγκωσης, η οποία αντισταθμίζεται από την τάση των ινών του κολλαγόνου που διαπλέκονται με τις πρωτεογλυκάνες.

Τέλος είναι καθοριστικές στο να προσδιορίζουν ιξωδοελαστικές ιδιότητες του κερατοειδή καθώς και τις μηχανικές παραμορφώσεις που υφίστανται. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μορίων πρωτεογλυκάνης και του κολλαγόνου έχει ρόλο κλειδί στην δημιουργία ινών κολλαγόνου, στην οργάνωση αυτών και τελικά στην διαφάνεια του κερατοειδή. Η οποιαδήποτε τροποποίηση στα μόρια της πρωτεογλυκάνης συνδέεται με την απώλεια της κερατοειδούς διαφάνειας. Τέλος πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι η διόγκωση του κερατοειδούς από την άμεση βύθιση του σε διαλύματα αποσταγμένου νερού προκαλούν μία σημαντική απώλεια πρωτεογλυκάνης από το στρώμα.

## Κεφάλαιο III

### 3.1 Σκέδαση του φωτός

Με τον όρο “σκέδαση του φωτός” περιγράφεται η τυχαία αλλαγή της κατεύθυνσης διάδοσης του φωτός, λόγω των ανομοιογενών του μέσου στο οποίο διαδίδονται.

Ο όρος είναι εξαιρετικά γενικός και περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές φυσικές διεργασίες. Ένα γενικός διαχωρισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση το εάν το φωτόνιο διατηρεί την ενέργειά του ή όχι. Στην ελαστική σκέδαση κατά την οποία το φωτόνιο υφίσταται μηδενική ή πολύ μικρή ανταλλαγή ενέργειας και στην ανελαστική σκέδαση, η οποία περιλαμβάνει μεταβολή της ενέργειας του φωτονίου. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η σκέδαση Rayleigh και Mie, ενώ στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν η σκέδαση Brillouin, Raman, ανελαστική σκέδαση ακτίνων X και σκέδαση Compton.

Τα είδη των ανομοιογενειών που μπορούν να προκαλέσουν σκέδαση, γνωστά ως σκεδαστές ή ως κέντρα σκέδασης, είναι πολυάριθμα για να αναφερθούν και να κατηγοριοποιηθούν, αλλά ένα μικρό δείγμα περιλαμβάνει σωματίδια, σταγονίδια, ατέλειες σε στερεά με κρυσταλλική δομή και κύτταρα σε ιστούς.

### 3.2 Η σκέδαση της H/M ακτινοβολίας

Όπως προαναφέρθηκε η σκέδαση της ακτινοβολίας μπορεί να είναι ελαστική ή ανελαστική, όπου στην περίπτωση της H/M ακτινοβολίας, η ελαστική σκέδαση οδηγεί στην διατήρηση του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Οι κύριες μορφές ελαστικής σκέδασης είναι η σκέδαση Rayleigh και η σκέδαση Mie.

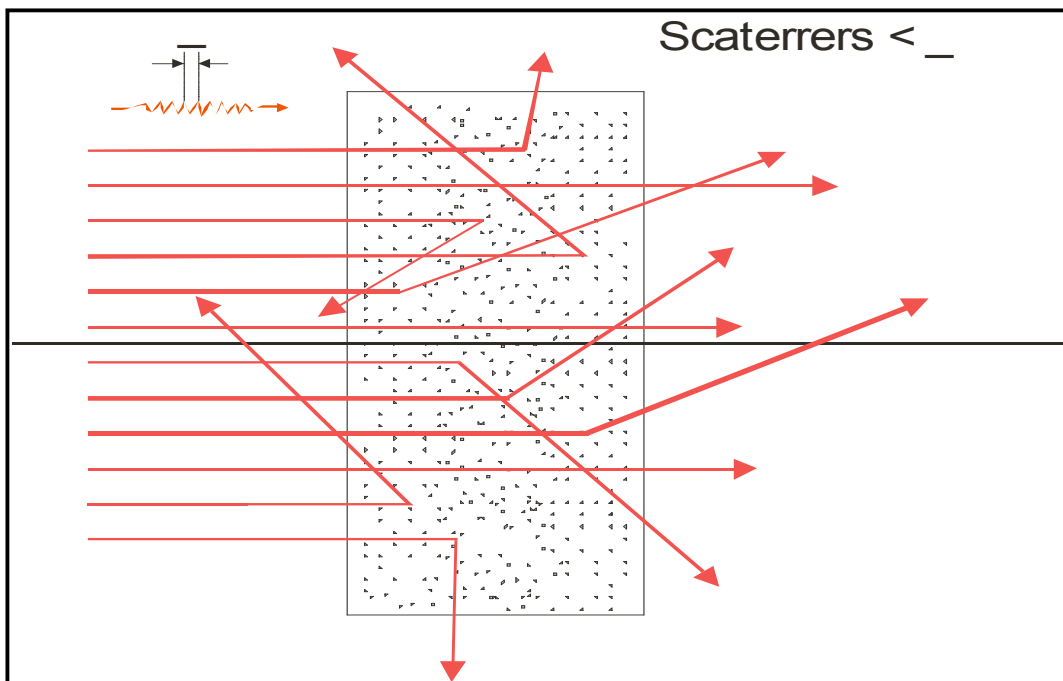
Η σκέδαση Rayleigh περιλαμβάνει την σκέδαση της H/M ακτινοβολίας, μήκους κύματος  $\lambda$ , από μικρό σφαιρικό όγκο διαμέτρου  $d$  και δείκτη διάθλασης  $n$ . Σε αυτό το μοντέλο σκέδασης η σφαίρα είναι μικρότερη σε διάμετρο από το μήκος κύματος  $\lambda$  του σκεδαζόμενου φωτός. Ο συντελεστής σκέδασης και κατ' επέκταση η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός είναι αντιστρόφως ανάλογος με την  $4^n$  δύναμη του

μήκους κύματος. Συγκεκριμένα, η ένταση  $I$  του σκεδαζόμενου φωτός με μήκος κύματος  $\lambda$  και ένταση  $I_0$  δίνεται από την σχέση:

$$I = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2R^2} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left( \frac{d}{2} \right)^6$$

όπου  $R$ : η απόσταση από το σωματίδιο,  $\theta$ : η γωνία σκέδασης,  $n$ : ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου και  $d$ : η διάμετρος του σωματιδίου.

Ο όρος  $(1 + \cos^2\theta)$  καθορίζει την γωνιακή κατανομή της σκέδασης, η οποία είναι συμμετρική ως προς το επίπεδο που είναι κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, οπότε η κατανομή είναι ίδια στην διεύθυνση της διάδοσης και αντίθετα σε αυτήν.



**Εικόνα3.1: Σχηματική παράσταση της σκέδασης Rayleigh**

Η σκέδαση Mie περιγράφει την σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας από σωματίδια με διάμετρο συγκρίσιμη με το μήκος κύματος.

Το μοντέλο αποτελείται από ένα ομοιογενές μέσο μέσα στο οποίο βρίσκεται ένα διαφανές σωματίδιο ελαφρά διαφορετικού δείκτη διάθλασης από το περιβάλλον μέσο, όπως για παράδειγμα ένα κερατοκύτταρο μέσα στον κερατοειδή. Το διαδιδόμενο κύμα θα υποστεί μια τοπική καθυστέρηση φάσης ίση με τη διαφορά του οπτικού δρόμου που αντιστοιχεί στη διάδοση μέσω του σωματιδίου.

Συνολικά ένα μέτωπο κύματος επιδέχεται πολλές τέτοιες τυχαίες αλλαγές στη φάση του και σε όλη του την έκταση, με αποτέλεσμα στο μακρινό πεδίο ένα κλάσμα της αρχικής προσπίπτουσας ισχύος να κατανέμεται σε έναν κώνο γύρω από την ευθύγραμμη διάδοση.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η κατανομή και η ένταση του φωτός που σκεδάζεται, εξαρτώνται από το είδος και την πυκνότητα των σκεδαστών αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, η γωνιακή κατανομή της σκέδασης εξαρτάται από τους παράγοντες, οι οποίοι αφορούν το μέγεθος και το σχήμα των σκεδαστών, την διαφορά στο δείκτη διάθλασης των σκεδαστών από το μέσο στο οποίο βρίσκονται καθώς και το μήκος κύματος.

Η 'θεωρία της ανώμαλης περίθλασης' είναι μια υπό-περίπτωση της σκέδασης Mie, και είναι ένα μοντέλο που προσεγγίζει ικανοποιητικά την σκέδαση του φωτός στον κερατοειδή μετά από επέμβαση διαθλαστικής χειρουργικής.

Στην σκέδαση H/M ακτινοβολίας από σωματίδια πολύ μεγάλα σε σχέση με το μήκος κύματος, το προσπίπτον επίπεδο μέτωπο κύματος μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από οπτικές ακτίνες που χτυπούν το σωματίδιο και περνούν κατά μήκος αυτού, δημιουργώντας δύο διαφορετικά φαινόμενα:

### I. Ανάκλαση & Διάθλαση

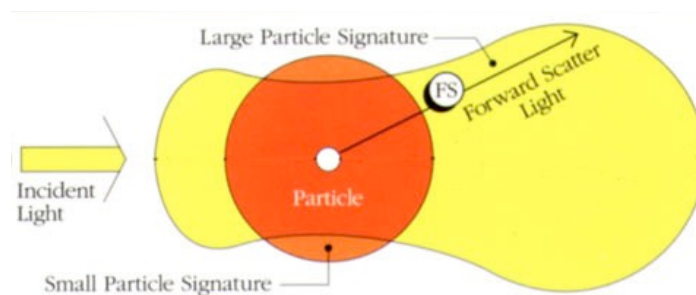
### II. Περίθλαση

Στο φαινόμενο της ανάκλασης και διάθλασης οι ακτίνες προσπίπτουν στην επιφάνεια του σωματιδίου, ανακλώνται και διαθλώνται. Το φως που διαθλάται εξέρχεται από το σωματίδιο μετά από μία ακόμα διάθλαση. Έτσι το φως που ανακλάται από την επιφάνεια του σωματιδίου και αυτό που εξέρχεται έχοντας διέλθει από το εσωτερικό του, συνεισφέρουν στην συνολική κατανομή της έντασης στο μακρινό

πεδίο από το κέντρο σκέδασης. Το ποσοστό της ενέργειας που απορροφάται ή σκεδάζεται καθώς και η γωνιακή κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, εξαρτάται από την μορφή, την σύνθεση του σωματιδίου και την κατάσταση της επιφάνειάς του.

Κατά το φαινόμενο της περίθλασης οι ακτίνες που περνούν κατά μήκος του σωματιδίου σχηματίζουν ένα ημιτελές επίπεδο μέτωπο κύματος, το οποίο δημιουργεί φαινόμενα περίθλασης της οποίας η κατανομή εξαρτάται από το μέγεθος και την μορφή του σκεδαστή.

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος του σωματιδίου και μειώνοντας το μήκος κύματος η συνολική κατανομή της έντασης θα αποτελείται από δύο μέρη, ένα πολύ στενό και έντονο λοβό λόγω περίθλασης και μία λιγότερη έντονη ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις. Απεναντίας αυξάνοντας το μήκος κύματος φτάνουμε σε ένα στάδιο όπου οι δύο κατανομές είναι συγκρίσιμες σε ένταση και γωνιακή έκταση. Η 'θεωρία της ανώμαλης περίθλασης' περιγράφει το εύρος των μεγεθών όπου οι δύο κατανομές έχουν συγκρίσιμη ένταση.



**Εικόνα3.2: Σχηματική απεικόνιση της σκέδασης από μεγάλο σωματίο (κίτρινη περιοχή), και από μικρό σωματίδιο (κόκκινη περιοχή).**

### 3.3 Η σκέδαση στον κερατοειδή

Κατά την διάδοση της Η/Μ ακτινοβολίας μέσα από τα οπτικά στοιχεία του οφθαλμού, η Η/Μ ακτινοβολία προσπίπτει στα ανατομικά χαρακτηριστικά των δομών του. Η αλληλεπίδραση αυτής με κύτταρα και κυτταρικές δομές που έχουν διαστάσεις συγκρίσιμες ή και μεγαλύτερες από το μήκος κύματος προκαλεί την σκέδασή της. Οι δύο κύριες πηγές σκέδασης στον οφθαλμό είναι ο κερατοειδής και ο κρυσταλλοειδής φακός.

Ο κερατοειδής είναι ένας διαφανής ιστός που επιτρέπει την ελεύθερη διάδοση της Η/Μ ακτινοβολίας στην περιοχή του ορατού. Η καλή διάταξη των δομών του κερατοειδή έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της σκέδασης του φωτός, ενώ οι ατέλειες της διάταξης των ινών κολλαγόνου και τα κερατοκύτταρα είναι κύρια πηγή σκέδασης. Παθολογικές καταστάσεις του κερατοειδή ωστόσο, όπως η απώλεια μεγάλου αριθμού ενδοθηλιακών κυττάρων<sup>9</sup> καθώς και συνθήκες αυξημένης ενδοφθάλμιας πίεσης<sup>10</sup> μπορούν να αλλοιώσουν την διαφάνεια του κερατοειδή, ενισχύοντας φαινόμενα σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας.

Επιπλέον παράγοντας που συντελεί στην αυξημένη σκέδαση στον κερατοειδή αποτελούν οι επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής. Οι μέθοδοι PRK, LASIK, EPI-LASIK που ακολουθούνται για την διόρθωση του διαθλαστικού σφάλματος, οδηγούν σε αυξημένη μετεγχειρητική σκέδαση στον κερατοειδή κατά τα πρώτα στάδια αποκατάστασης της όρασης των ασθενών, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται άμεσα η ποιότητα της όρασής τους.

Η επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή<sup>11</sup> (Photorefractive Keratectomy – PRK) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την διόρθωση διαθλαστικών ανωμαλιών με την εφαρμογή του Excimer laser μήκους κύματος 193nm (Argon-fluoride). Στην τεχνική αυτή το επιθήλιο του κερατοειδή αφαιρείται μηχανικά με απόξεση και στη συνέχεια το στρώμα του κερατοειδή υπόκειται σε κατανομή φωτοεκτομής με αποτέλεσμα την επιλεκτική αποδόμηση ιστού και σκοπό τον ανασχηματισμό της κυρτότητάς του. Επιπλέον χρήση αυτού του laser αποτελεί η πραγματοποίηση επιφανειακής κερατεκτομής σε οφθαλμούς με επιφανειακές θολερότητες. Η παραπάνω τεχνική ονομάζεται φωτοθεραπευτική κερατεκτομή (PTK), ενώ σύμφωνα με αυτήν εφαρμόζεται στον κερατοειδή μία ομοιογενής

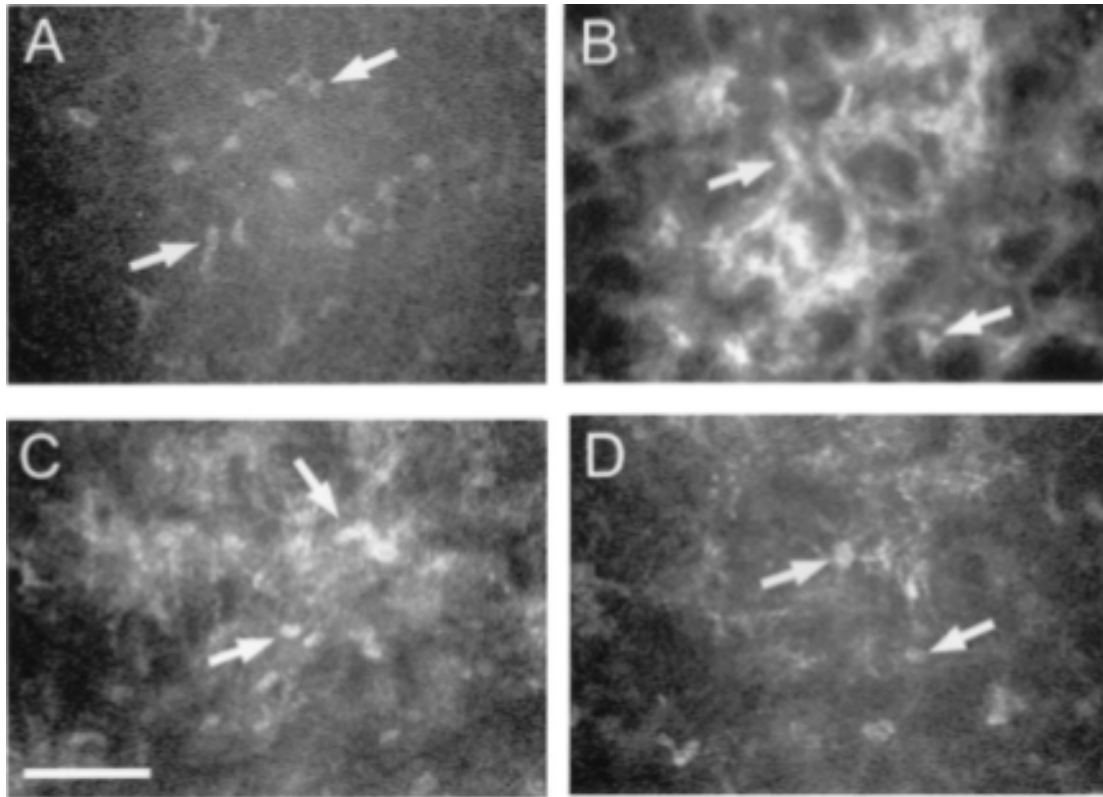


κερατεκτομή με σκοπό την αφαίρεση του παθολογικού ιστού, όταν αυτός βρίσκεται επιφανειακά.

Σημαντικές αλλαγές στην μορφολογία του κερατοειδή παρατηρούνται μετά από τέτοιου είδους επεμβάσεις, τόσο στο άμεσο διάστημα epούλωσης, όσο και σε βάθος χρόνου<sup>12</sup>. Έχει αναφερθεί στην βιβλιογραφία ότι μετά από διαθλαστική επέμβαση 88% των ασθενών παρουσίασαν μια βαθμιαία αύξηση της σκέδασης στον κερατοειδή έως και τον τρίτο μήνα<sup>13</sup>. Έπειτα παρατηρήθηκε σταδιακή υποχώρηση της θόλωσης του κερατοειδή και σταθεροποίηση αυτής μετά από ένα χρόνο, ενώ τα επίπεδα σκέδασης ήταν υψηλότερα από αυτά που οι ασθενείς παρουσίαζαν προεγχειρητικά. Παράλληλα μετά από μελέτη της σχέσης της θόλωσης του κερατοειδή με το βάθος αποδόμησης του στρώματος, βρέθηκε ισχυρή συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών, αναδεικνύοντας το γεγονός ότι η διόρθωση υψηλών διαθλαστικών σφαλμάτων, συνδέεται με την ανάπτυξη μεγαλύτερης θόλωσης στον κερατοειδή.

Έρευνες έχουν συνδέσει την θόλωση του κερατοειδή με μηχανισμούς epούλωσης που αναπτύσσονται μετά από διαθλαστικές επεμβάσεις. Κύριες πηγές σκέδασης στον κερατοειδή μετά από μια επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή αποτελεί ένας αυξημένος αριθμός κερατοκυττάρων, με έντονη κυτταρική δραστηριότητα, στο εμπρόσθιο στρώμα του κερατοειδή. Η πρωτεΐνη κολλαγόνου που παράγεται στην επιφάνεια οδηγεί σε διάφορα επίπεδα θολότητας (haze), τα οποία μπορεί να οδηγήσουν στη φαινομενική ελάττωση της οξύτητας της όρασης του ασθενούς.

Το συνεστιακό μικροσκόπιο δίνει κατά μέτωπο εικόνες των κερατοειδικών δομών σε εικόνες στις οποίες διακρίνονται δομές με πολύ καλή διαφορά αντίθεσης μεταξύ τους. Εικόνες από κερατοειδείς προεγχειρητικά δείχνουν φυσιολογικά, αδρανή κερατοκύτταρα, με χαμηλή ανακλαστικότητα των πυρήνων τους και μη ορατές κυτταρικές διεργασίες. Ένα μήνα μετά από φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή, στο εμπρόσθιο τμήμα του στρώματος, παρουσιάζεται αυξημένη πυκνότητα κερατοκυττάρων, με αυξημένη ανακλαστικότητα τόσο στον πυρήνα όσο και στο κυτταρικό σώμα. Η πυκνότητα των κερατοκυττάρων παραμένει αυξημένη, συγκριτικά με αυτήν προεγχειρητικά για χρονικό διάστημα έξι μηνών, ενώ ένα χρόνο μετά επιστρέφει στα φυσιολογικά επίπεδα.



**Εικόνα 3.3:** Μορφολογικά χαρακτηριστικά πρόσθιου στρώματος κερατοειδή πριν και μετά από διαθλαστική κερατεκτομή. Α. Προεγχειρητικά φυσιολογικοί πυρήνες κερατοκυττάρων, Β. Ένα μήνα μετά από PRK ενεργοποιημένα κερατοκύτταρα με αυξημένη ανακλαστικότητα του πυρήνα και του κυτταρικού σώματος, C. Έξι μήνες μετά από PRK αυξημένη πυκνότητα ενεργοποιημένων κερατοκυττάρων, D. Ένα χρόνο μετά από PRK λιγότεροι ανακλαστικοί και αδρανείς πυρήνες κερατοκυττάρων, οι οποίοι περιβάλλονται από ανακλαστικές εναποθέσεις.

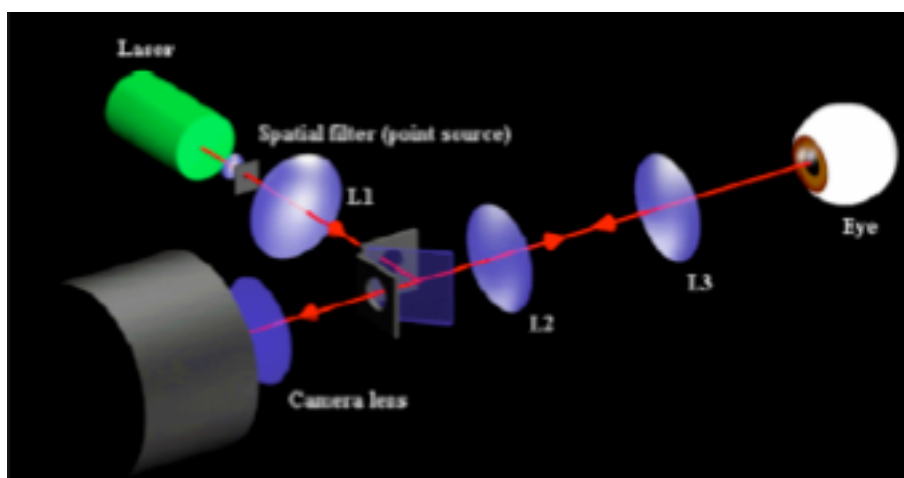
### 3.4 Μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό.

Οι οπτικές ιδιότητες του ανθρώπινου οφθαλμού, καθώς και οι ατέλειες του οπτικού συστήματος περιορίζουν την ποιότητα της όρασης. Το φαινόμενο της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό οδηγεί στην μείωση τόσο της φωτεινότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου, όσο και της ποιότητας αυτού, επηρεάζοντας τις μετρήσεις συστημάτων αξιολόγησης της όρασης<sup>14</sup>. Η εκτίμηση της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό και η δυνατότητα ποσοτικοποίησης αυτής, αποτελεί κυρίαρχο στόχο.

Οι μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις οπτικές και τις ψυχοφυσικές. Οι πρώτες αφορούν την άμεση μέτρηση της H/M ακτινοβολίας που σκεδάζεται για παράδειγμα με κάμερες ή άλλους αισθητήρες φωτός, ενώ στις δεύτερες η μέτρηση επιτυγχάνεται έμμεσα αφού ποσοτικοποιείται το αποτέλεσμα της παρουσίας (διάχυτου) σκεδαζόμενου φωτός (veiling glare) το οποίο μειώνει την αντίθεση (contrast) του αμφιβληστροειδικού ειδώλου.

### 3.4.1 Οπτικές μέθοδοι

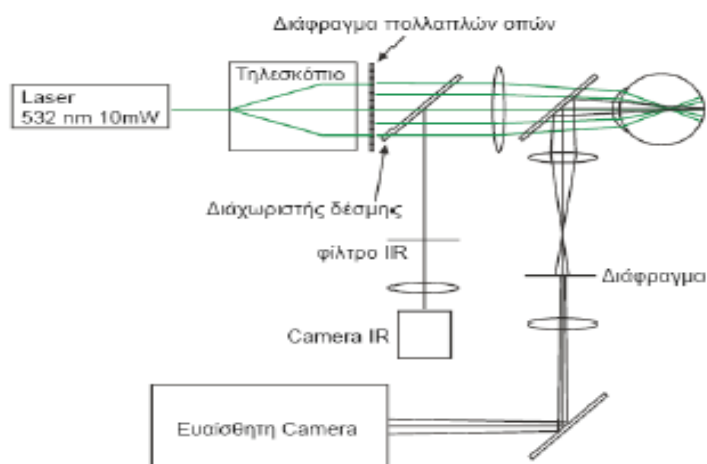
Η αρχή της διπλής διέλευσης (P.Artal, J.Santamaria)<sup>15,16</sup>, αξιοποιείται για την εκτίμηση της ποιότητας της όρασης, δέσμη laser φιλτράρεται χωρικά και με την βοήθεια ενός συστήματος φακών (L1, L2 & L3) και του οπτικού συστήματος του οφθαλμού εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή. Η εστιασμένη αυτή κατανομή λειτουργεί ως δευτερογενής πηγή ακτινοβολίας και έτσι η H/M ακτινοβολία που ανιχνεύει έχει διέλθει – αλληλεπιδράσει με τις δομές του οφθαλμού δύο φορές από το οπτικό σύστημα του οφθαλμού. Η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας εκτιμάται αναλύοντας περιφερικά τμήματα της PSF (τόσο περιφερικά ώστε οι εκτροπές να μην έχουν συμμετοχή, π.χ. γωνίες > 1°) και συγκρίνοντας τη φωτεινότητα στις περιοχές αυτές σε σχέση με το κέντρο της PSF.



### Σχήμα3.4.: Πειραματική διάταξη διπλής διέλευσης.

Η αρχή της διπλής διέλευσης ως πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε και από τους Gerald Westheimer και Jonzhing Liang για την εκτίμηση της διάχυσης του φωτός στον ανθρώπινο οφθαλμό in vivo με αντικειμενικό τρόπο, ορίζοντας ως δείκτη διάχυσης των λόγω των εντάσεων, στο κέντρο και την περιφέρεια του προφίλ της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

Παραλλαγή της μεθόδου, και βασιζόμενοι στην αρχή λειτουργίας της εκτροπομετρίας Tscherning<sup>17</sup> είναι η μέθοδος που έχει αναπτυχθεί στο Πανεπιστήμιο Κρήτης (D.De Brouwere, X. Γκίνης, I. Παλλήκαρης<sup>18</sup>) με χρήση πολλαπλών δεσμών με σκοπό τη μέτρηση της σκέδασης καθώς και τη "χαρτογράφησή" αυτής, όπου διαφορετικές δέσμες διερχόμενες από διαφορετικά τμήματα του οπτικού συστήματος υπόκεινται σε διαφορετική σκέδαση.

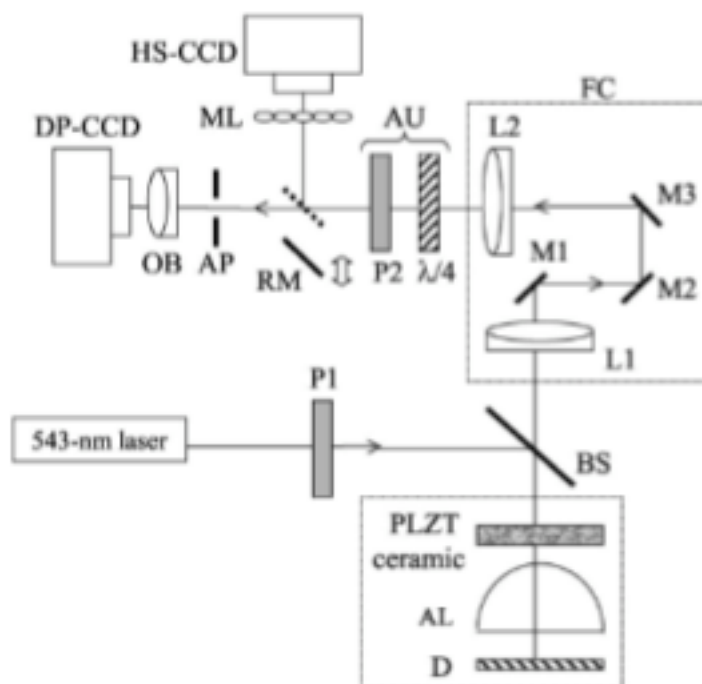


Σχήμα3.5: Πειραματική διάταξη εκτροπομέτρου Tscherning

Σύμφωνα με αυτήν την αρχή, ένα διάφραγμα πολλών οπών τοποθετείται μπροστά από ένα τηλεσκόπιο, το οποίο κάνει την δέσμη του laser παράλληλη, δημιουργώντας ένα αριθμό παράλληλων δεσμών που εισέρχονται στο υπό εξέταση οπτικό σύστημα (Tscherning). Προκειμένου να είναι σαφής η αντιστοιχία των σημείων τομής των δεσμών εισόδου με τις κηλίδες στον αμφιβληστροειδή, οι δέσμες εστιάζονται πριν τον αμφιβληστροειδή με την χρήση ενός φακού. Το σύνολο των κηλίδων στον αμφιβληστροειδή απεικονίζεται σε μια camera υψηλής ευαισθησίας.

Ο Juan M. Bueno<sup>19</sup> και οι συνεργάτες του, χρησιμοποίησαν την πόλωση της Η/Μ ακτινοβολίας ως παράμετρο για την εκτίμηση της σκέδασης. Στην τεχνική αυτή

χρησιμοποιείται πολωμένη ακτινοβολία σε μία διάταξη διπλής διέλευσης και η σκέδαση ποσοτικοποιείται με βάση την απώλεια της πόλωσης μετά τη διέλευση.



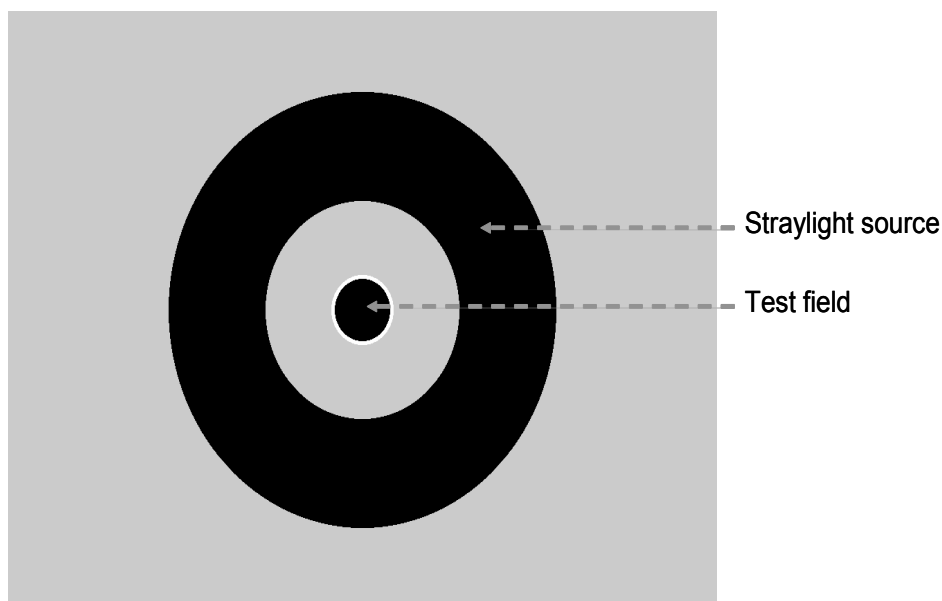
**Εικόνα3.6:** Πειραματική διάταξη των J.M. Bueno et al, για την αντικειμενική μέτρηση της σκέδασης, που βασίζεται στην αρχή της διπλής διέλευσης.

### 3.4.2 Ψυχοφυσικές μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε αυτές τις μεθόδους εκτιμάται το αποτέλεσμα της σκέδασης στην ποιότητα της όρασης, και ειδικότερα η μείωση της φωτεινότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου.

Η σημαντικότερη, αναπτύχθηκε το 1992 οι Thomas J.T.P van den Berg και Jan Kees IJspeert ανέπτυξαν μια συσκευή για κλινική χρήση<sup>20</sup>, η οποία είχε την δυνατότητα μέτρησης της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό, με μια ψυχοφυσική διαδικασία ‘άμεσης αντιστάθμισης’ όπως οι ίδιοι την χαρακτήρισαν. Σε αυτήν την συσκευή, ο εξεταζόμενος καλείται να παρατηρήσει με έναν οφθαλμό μέσα σε ένα

σωλήνα, διαμέτρου 5cm, όπου βλέπει ένα σκοτεινό δίσκο (πεδίο εξέτασης), ο οποίος περιβάλλεται από ένα φωτεινό δακτύλιο. Το πεδίο εξέτασης και ο φωτεινός δακτύλιος διαμορφώνονται (flicker) σε αντίθετη φάση, με συχνότητα 8 Hz. Όταν το πεδίο εξέτασης είναι σκοτεινό, εμφανίζεται να αναβοσβήνει λόγω σκέδασης από τον οφθαλμό του εξεταζόμενου, του φωτός που προέρχεται από την πηγή σκέδασης που αναβοσβήνει. Αυξάνοντας την φωτεινότητα του πεδίου εξέτασης για κάποια τιμή φωτεινότητας ο εξεταζόμενος θα το αντιλαμβάνεται ως διαρκώς φωτισμένο. Με τον τρόπο αυτό το ποσό της φωτεινότητας του εσωτερικού δίσκου θα ισούται με το ποσό του φωτός που σκεδάστηκε.



**Σχήμα3.6: Οπτικό πεδίο, όπως το αντιλαμβάνεται ο εξεταζόμενος στην συσκευή που παρουσίασαν οι Van den Berg & K.I.Jspeert. Ένα σκοτεινό πεδίο εξέτασης ακτίνας 1 μοίρας, περιβάλλεται από ένα φωτεινό δακτύλιο με ακτίνα 2.5 μοίρες.**

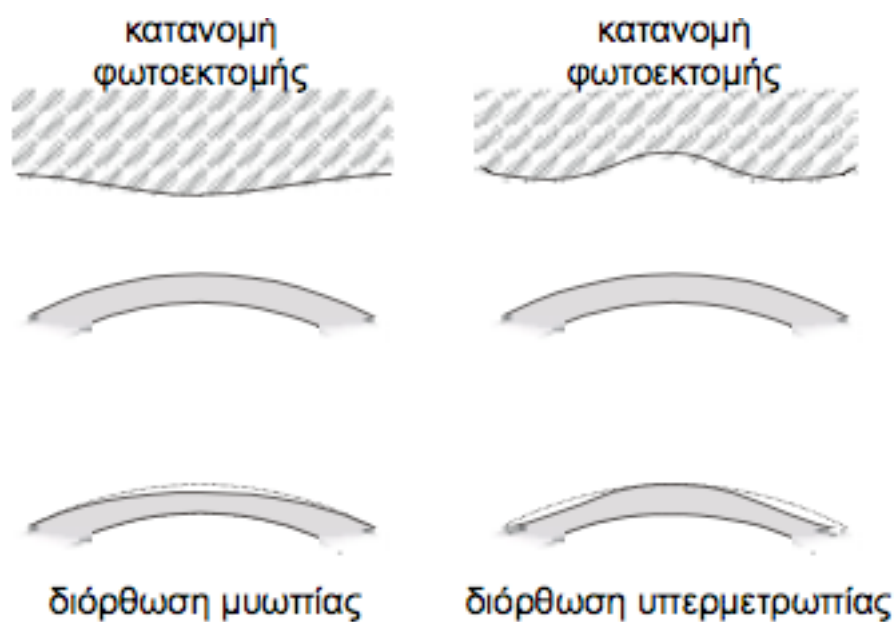
Η μέθοδος αυτή είναι τροποποίηση παλαιότερης μεθόδου που βασιζόταν στην εκτίμηση της φωτεινότητας ενός ομοιογενώς φωτισμένου στόχου παρουσία φωτεινής πηγής σε συγκεκριμένη γωνία ως προς τη γραμμή όρασης. Στην συμβατική αυτή μέθοδο η φωτεινή πηγή, λόγω της σκέδασης, δημιουργεί μια κατανομή έντασης στον αμφιβληστροειδή. Παρουσία της φωτεινής πηγής, η ένταση της φωτεινότητας του

στόχου αυξάνεται έτσι ώστε μόλις να γίνεται αντιληπτός από τον εξεταζόμενο (μέτρηση threshold φωτεινότητας). Στην συνέχεια, σβήνοντας την φωτεινή πηγή και μεταβάλλοντας την φωτεινότητα στο φόντο του στόχου, στο οποίο προσηλώνει ο εξεταζόμενος, ελέγχεται για ποια τιμή φωτεινότητας του φόντου, ο φωτεινός στόχος έχει το ίδιο threshold φωτεινότητας, προκειμένου να γίνει ξανά αντιληπτός από τον εξεταζόμενο.

## Κεφάλαιο IV

### 4.1 Φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή – PRK

Όπως έχει προαναφερθεί, κάθε παλμός του ArF Excimer laser επιφέρει την δημιουργία ενός κρατήρα στην επιφάνεια του κερατοειδή, με βάθος της τάξης των 0.3μm και διατομή αντίστοιχη της διατομής της δέσμης που τον προκάλεσε. Η κατάλληλη υπέρθεση ενός αριθμού τέτοιων κρατήρων μπορεί να οδηγήσει σε μία κατανομή φωτοεκτομής η οποία να εκτείνεται σε μεγάλο τμήμα της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδή και να οδηγήσει σε αλλαγή της καμπυλότητάς του.



**Εικόνα4.1: Κατανομές φωτοεκτομής που οδηγούν σε αλλαγή της καμπυλότητας του κερατοειδή. Αριστερά η κατανομή φωτοεκτομής οδηγεί σε επιπέδωση της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδή με σκοπό την διόρθωση της μυωπίας. Δεξιά, αύξηση της καμπυλότητας της κεντρικής ζώνης του κερατοειδή για την διόρθωση υπερμετρωπίας.**

Η αλλαγή της καμπυλότητας πραγματοποιείται σε μια ζώνη η οποία είναι κατά τον δυνατόν μέγιστη προκειμένου να είναι μεγαλύτερη από την φαινόμενη διάμετρο της κόρης σε όλες τις συνθήκες φωτισμού. Για την περίπτωση της διόρθωσης της μυωπίας το κεντρικό βάθος της εκτομής δίνεται προσεγγιστικά από την εξίσωση του Munnerlyn<sup>21</sup>:



$$KB = \frac{\Delta\Phi}{3} \delta^2$$

όπου KB το κεντρικό βάθος σε  $\mu\text{m}$ ,  $\Delta\Phi$  η επιθυμητή αλλαγή της καμπυλότητας της διαθλαστικής ισχύος του κερατοειδή σε διοπτρίες και  $\delta$  η διάμετρος της ζώνης φωτοεκτομής σε mm.

Στην τεχνική PRK (Photorefractive Keratectomy), το επιθήλιο του κερατοειδή αφαιρείται μηχανικά με απόξεση και στη συνέχεια η στοιβάδα του Bowman και το στρώμα του κερατοειδή υπόκεινται σε κατανομή φωτοεκτομής προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή διόρθωση. Κατά τις επόμενες μέρες μετά την επέμβαση το επιθήλιο του κερατοειδή υπόκεινται σε μία διαδικασία ανάπλασης με σκοπό την κάλυψη της ακτινοβολούμενης περιοχής, ακολουθώντας το νέο σχήμα επιφάνειας. Η τεχνική PRK θεωρείται ασφαλής και αποτελεσματική μέθοδος για την διόρθωση χαμηλών και μέσων διαθλαστικών σφαλμάτων<sup>22</sup>.

## 4.2 Εφαρμογή φωτοδιαθλαστικής κερατεκτομής σε οφθαλμούς κουνελιών.

Για την πραγματοποίηση του πειράματος, χρησιμοποιήθηκαν οφθαλμοί από δώδεκα κουνέλια. Πριν από την επέμβαση έγινε ολική αναισθησία σε κάθε κουνέλι με υποδόρια ένεση αποτελούμενη από 3ml Rompun (20mg/ml xylazium hydrochloride) και 1ml Imaglène 1000 (100mg/ml ketamine hydrochloride), καθώς επίσης και τοπική αναισθησία στους κερατοειδείς αυτών με ενστάλαξη κολλύριου προπαρακαΐνης (Alcaine 0.5%).

Το επιθήλιο του κάθε κερατοειδή αφαιρέθηκε με χρήση πεπλατυσμένης σπάτουλας και η επιφάνεια καθαρίστηκε από τυχόν υπολείμματα επιθηλίου με χρήση στεγνού χειρουργικού σπόγγου. Το χειρουργικό ArF Excimer laser – Meditec MEL – 60 χρησιμοποιήθηκε για να σαρώσει ομογενώς μια ζώνη διαμέτρου 6mm με προγραμματισμένο βάθος εκτομής 63μm. Μετά το πέρας της ακτινοβολήσης οι κερατοειδείς ξεβγάλθηκαν με διάλυμα BSS.

Στο χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από την ημέρα της ακτινοβολήσης των κερατοειδών των κουνελιών, μέχρι την επανεπιθηλιοποίηση τους, πραγματοποιήθηκε ενστάλαξη οφθαλμικών σταγόνων με σκοπό την αποφυγή βακτηριακής μόλυνσης. Στους δεξιούς οφθαλμούς έγινε χρήση οφθαλμικής αλοιφής Tobradex (δεξαμεθαζόνη 1mg/gr & τομπραμυκίνη 3mg/gr), ενώ στους αριστερούς οφθαλμούς έγινε χρήση οφθαλμικών σταγόνων Tobrex (Tobramycin 3mg/ml) και Treatment I (6 οφθαλμοί) / Treatment II (6 οφθαλμοί), με δοσολογία τέσσερις φορές ημερησίως.

Η λήψη των κερατοειδών πραγματοποιήθηκε την δέκατη εβδομάδα μετά την φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή. Το κλινικό θάμβος των κερατοειδών εξετάστηκε σε εβδομαδιαία βάση από έναν διαθλαστικό χειρουργό (Μπουζούκης Δημήτρης), με χρήση σχισμοειδούς λάμπας.

### 4.3 Θυσία ζώων – Λήψη κερατοειδών

Από τα δώδεκα κουνέλια (24 κερατοειδείς), τέσσερις κερατοειδείς δεν συμπεριλήφθηκαν στη μελέτη λόγω θανάτου των ζώων από αίτια μη σχετιζόμενα με το πρωτόκολλο πριν την προγραμματισμένη ημερομηνία θυσίας.

Το κεντρικό πάχος του κερατοειδή μετρήθηκε πριν την ακτινοβόληση αυτού, καθώς επίσης και πριν την θανάτωση των κουνελιών, με την βοήθεια ενός παχύμετρου (Sonogage Corneo – Gage<sup>TM</sup> Plus).

Στην συνέχεια, τα ζώα θυσιάστηκαν και μετά την εξόρυξη των οφθαλμών, έγινε εκτομή του κερατοειδή από τον σκληρό στο ύψος του σκληροκερατοειδικού ορίου. Ακολούθησε η ποσοτικοποίηση του φαινομένου της σκέδασης του εκάστοτε κερατοειδή. Τέλος για τη μονιμοποίηση των δειγμάτων, ακολουθήθηκε τυποποιημένη διαδικασία αφυδάτωσης μέσω διαδοχικής εμβάπτισης σε διαλύματα αλκοόλης. Πριν την αφυδάτωση πραγματοποιήθηκε εμβάπτιση για 24 ώρες σε διάλυμα γλουταραλδεΐδης. Κατά τη διαδικασία της μονιμοποίησης με γλουταραλδεΐδη και στη συνέχεια με αλκοόλη οι κερατοειδείς είχαν τοποθετηθεί σε ειδική γυάλινη βάση η οποία απέτρεπε τη μακροσκοπική τους παραμόρφωση. Η διαδικασία προετοιμασίας και μονιμοποίησης των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε από εξειδικευμένο προσωπικό σύμφωνα με τυποποιημένες διαδικασίες.

Πριν από την λήψη της οπτικής μικροσκοπίας των παραπάνω δειγμάτων, οι κερατοειδείς τεμαχίστηκαν σε λεπτά κατακόρυφα τεμάχια και έπειτα τοποθετήθηκαν πάνω σ' αυτά χρωστικές. Οι χρωστικές χρησιμοποιήθηκαν για τον ευκολότερο διαχωρισμό των δύο στιβάδων (επιθήλιο, στρώμα) στην εξέταση τους με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

## Κεφάλαιο V

### 5.1 Μετρήσεις απλής διέλευσης

Για την αντικειμενική μέτρηση της σκέδασης, έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα πειραματικές διατάξεις που βασίζονται στην αρχή της διπλής διέλευσης, και οι οποίες περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια πειραματική διάταξη, για την διεξαγωγή μετρήσεων της σκέδασης της H/M ακτινοβολίας, με σκοπό την μέτρηση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας μετά από απλή διέλευση αυτής από το σκεδάζον μέσο. Για την εκτίμηση της σκέδασης ποσοτικά, χρησιμοποιήθηκε ως μετρική το Scatter Ratio (SR), που ορίστηκε από την σχέση:

$$SR = 1 - BR$$

όπου BR ορίζεται ως το ποσοστό της προσπίπτουσας H/M ακτινοβολίας που δεν συναντά κανένα σκεδαστή στον οπτικό του δρόμο.

Μετρήσεις απλής διέλευσης διεξήχθησαν στους κερατοειδείς των κουνελιών, με σκοπό τόσο την μελέτη της εξάρτησης του SR από το μέγεθος των σκεδαστών, όσο και του προφίλ έντασης της σκεδαζόμενης H/M ακτινοβολίας.

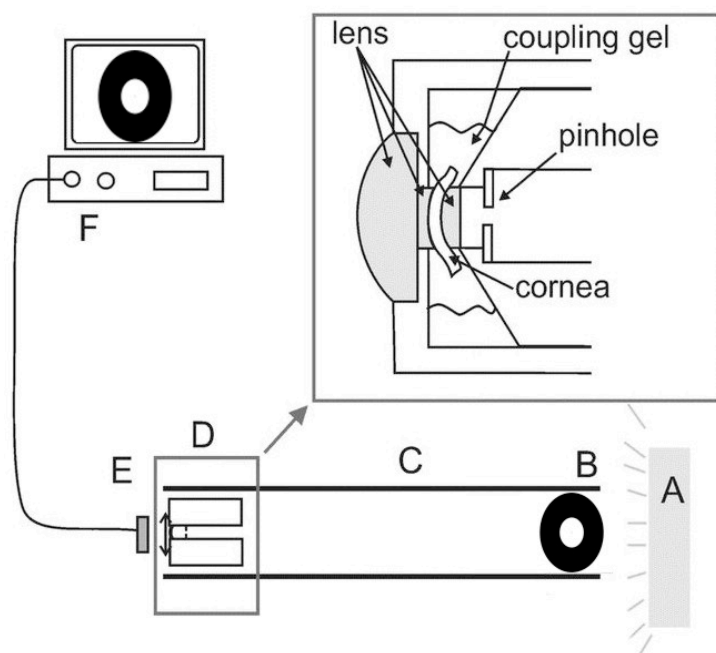
### 5.2 Οπτική διάταξη απλής διέλευσης

Η οπτική διάταξη που αναπτύχθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων παρίσταται σχηματικά στο σχήμα 5.2.1 που ακολουθεί. Αποτελείται από μια CCD κάμερα (Sony XCD – X700), μια τριπλέτα οπτικών φακών και μια φωτεινή πηγή, σε απόσταση 56cm από το σύστημα φακών, η οποία λειτουργεί ως αντικείμενο.

Η τριπλέτα των οπτικών φακών αποτελείται από έναν επιπεδόκυρτο και έναν επιπεδόκυκλο φακό, με ακτίνες καμπυλότητας παρόμοιες με την πρόσθια και οπίσθια ακτίνα καμπυλότητας του κερατοειδή χιτώνα, αντίστοιχα. Ο κερατοειδής καταλαμβάνει το διάστημα μεταξύ των φακών, ενώ γέλη 0.3% Carbomer (Thilogel,

ALCON Hellas AEBE), χρησιμοποιήθηκε για να διευκολύνει την οπτική επαφή μεταξύ αυτών των τριών στοιχείων. Ένας πρόσθετος επιπεδόκυρτος φακός χρησιμοποιήθηκε για την ρύθμιση της συνολικής διοπτρικής δύναμης του φακού, στις 35 διοπτρίες. Το σύστημα των φακών είναι τοποθετημένο σε ειδική βάση, εξασφαλίζοντας την ευθυγράμμιση των κύριων οπτικών αξόνων των φακών.

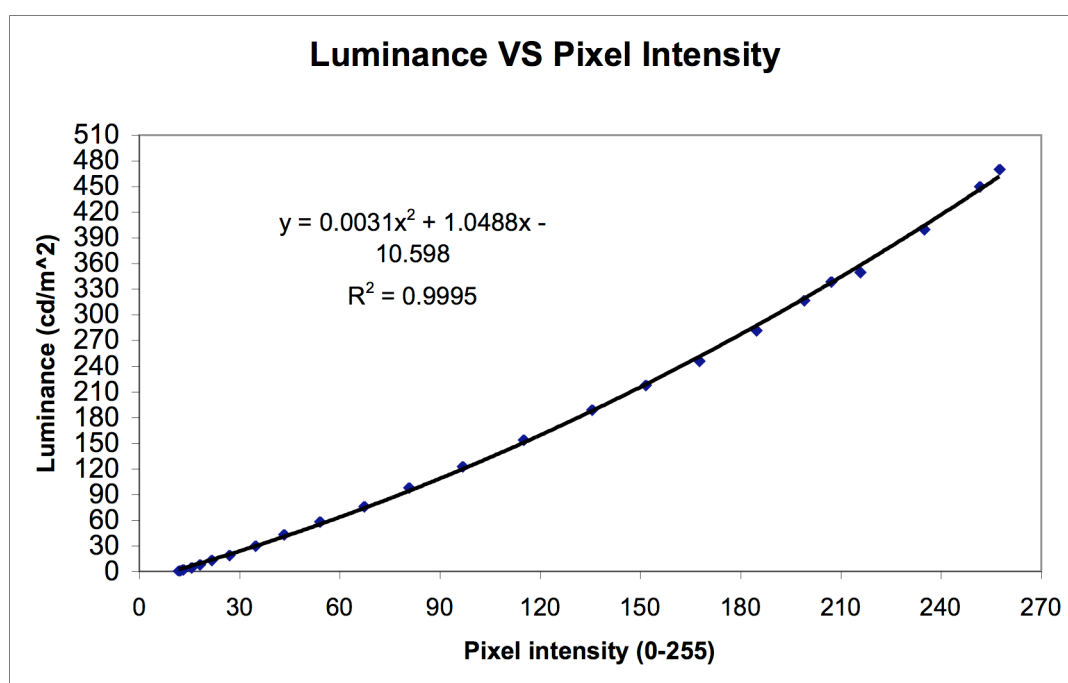
Στο σύνολο των εικόνων που λειτουργούν ως αντικείμενο, κάθε εικόνα αποτελείται από ένα σκοτεινό δίσκο, ο οποίος περιβάλλεται από ένα φωτεινό δακτύλιο αυξανόμενης γωνίας τόξου, και χρησιμοποιείται με σκοπό τον υπολογισμό της γωνιακής κατανομής της έντασης του σκεδαζόμενου φωτός. Η φωτεινότητα της εκάστοτε εικόνας διορθώθηκε σύμφωνα με μία συγκεκριμένη συνάρτηση δευτέρου βαθμού, η οποία καθορίστηκε σε ξεχωριστό πείραμα, ενώ ο έλεγχος του χρόνου έκθεσης έδωσε την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η πλήρης δυναμική περιοχή της κάμερας.



**Εικόνα5.1: Πειραματική διάταξη, όπου A.CCD κάμερα, D.σύστημα φακών, F.φωτεινή πηγή-απεικόνιση εικόνων.**

### 5.3 Βαθμονόμηση κάμερας

Η βαθμονόμηση της κάμερας αναφέρεται στη διαδικασία του υπολογισμού ενός συνόλου παραμέτρων που απαιτούνται για την λήψη μετρήσεων με μία κάμερα, με σκοπό η οθόνη να έρθει σε συμφωνία με ένα προκαθορισμένο πρότυπο, το οποίο θα προβλέπει τις βέλτιστες ρυθμίσεις φωτεινότητας και αντίθεσης. Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης της κάμερας, χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο εικόνων διαφορετικής φωτεινότητας. Για κάθε εικόνα, μέσω κατάλληλου αλγόριθμου MATLAB (Παράρτημα 1), υπολογίστηκε η ένταση που ανιχνεύεται από την κάμερα για την κάθε εικόνα, ενώ παράλληλα με την βοήθεια κατάλληλου οργάνου (SpectraScan<sup>PR</sup>650) μετρήθηκε η φωτεινότητα αυτής. Οι τιμές φωτεινότητας της οθόνης συναρτήσει της έντασης αυτής, δίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



**Γράφημα 5.2:** Η μετρούμενη φωτεινότητα της οθόνης σαν συνάρτηση της πραγματικής φωτεινότητας αυτής.

Από το διάγραμμα αυτό, γίνεται αντιληπτό ότι η απόκριση της κάμερας δεν είναι γραμμική. Αντίθετα, συμπίπτει τις τιμές για μεγάλες εντάσεις, και είναι περισσότερο γραμμική στην περιοχή των μικρών εντάσεων. Παράλληλα η στάθμη θορύβου (στο

σκοτάδι) και με τις παραμέτρους λειτουργίας (gain, exposure time) που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη σειρά μετρήσεων ήταν τέτοια που να αντιστοιχεί σε καταγραφή των pixel ίση με 11.

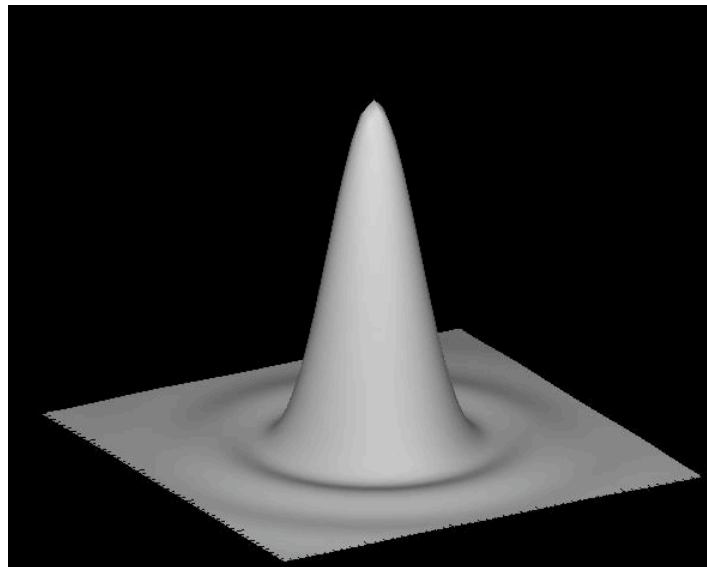
Σε κάθε περίπτωση, πριν πραγματοποιηθεί ανάλυση των εικόνων όπως περιγράφεται στη συνέχεια, οι εικόνες υπόκειντο τον μηθγραμμικό μετασχηματισμό έντασης που περιγράφεται από την δευτεροβάθμια εξίσωση που φαίνεται στο γράφημα 5.2.

## Κεφάλαιο VI

### 6.1 Συνάρτηση διασποράς σημείου (PSF)

Η συνάρτηση διασποράς σημείου (PSF) περιγράφει την κατανομή φωτεινότητας στο αμφιβληστροειδικό είδωλο που προέρχεται από μία σημειακή πηγή. Η PSF δίνει μία άμεση εποπτική εικόνα για το πιο είναι το είδωλο από ένα αντικείμενο – σημείο μέσα από ένα συγκεκριμένο οπτικό σύστημα, όπως ο οφθαλμός.

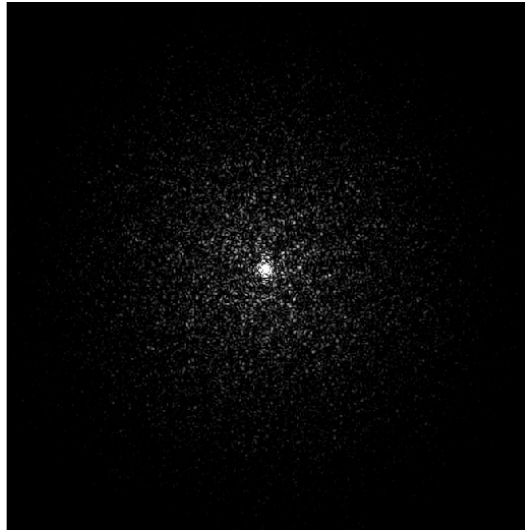
Σε ένα ιδανικό σύστημα απεικόνισης, δηλαδή αυτό που περιορίζεται μόνο από την περίθλαση, η PSF αντιστοιχεί στο δίσκο του Airy. Ο πρώτος δίσκος μηδενισμού σχηματίζει με τον οπτικό άξονα γωνία, σε  $rad = 1.22 \times \lambda/D$ , όπου  $D$  η κορική διάμετρος. Το πλήρες πλάτος της συνάρτησης διασποράς σημείου στο μισό μέγιστο του ύψος δίνεται από την σχέση:  $FWHM = 1.029 \times \lambda/D(rad)$ .



**Εικόνα 6.1: PSF για ιδανικό σύστημα απεικόνισης (μόνο περίθλαση)**

Η σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας σε ένα οπτικό σύστημα επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης διασποράς σημείου (PSF) του, συγκεκριμένα αφαιρεί ενέργεια από την κεντρική περιοχή της PSF και την κατανέμει στην περιφέρεια, δημιουργώντας άλω.





**Εικόνα 6.2: PSF παρουσία σκέδασης (προσομοίωση σε MATLAB)**

## 6.2 Συνέλιξη

### 6.2.1 Ορισμός της συνέλιξης

Η συνέλιξη είναι ένας γραμμικός τελεστής, ορίσματα του οποίου είναι δύο συναρτήσεις. Στην περίπτωση συνεχών ορισμένων, η συνέλιξη  $h(x,y)$  των συναρτήσεων  $f(x,y)$  και  $g(k,l)$  ορίζεται ως:

$$h(x,y) = f * g = \iint_{R^2} f(x-k, y-l)g(k,l)dkdl$$

Στην περίπτωση ψηφιακών εικόνων, τόσο η συνάρτηση της εικόνας  $f$  όσο και ο πίνακας της συνέλιξης  $g$  είναι διακριτές συναρτήσεις, οι οποίες δεν ορίζονται σε όλο το  $R^2$ , αλλά μόνο επί του πίνακα των αρχικών τους διαστάσεων. Έτσι ο νέος ορισμός της συνέλιξης μίας διακριτής εικόνας με ένα δισδιάστατο πίνακα, διαστάσεων  $M \times N$  απλώς αντικαθιστά τα ολοκληρώματα του προηγούμενου τύπου με διακριτά αθροίσματα.

## 6.2.2 Ορισμός του μετασχηματισμού Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier αποτελεί τον πιο χρησιμοποιούμενο μετασχηματισμό εικόνων, με μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

Ο μετασχηματισμός Fourier,  $F(x,y)$ , διδιάστατης συνεχώς ορισμένης συνάρτησης  $f(x,y)$  ορίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$F(u,v) = \iint_{R^2} f(x,y) \exp(-j2\pi(ux + vy)) dx dy$$

Όπου  $j$  συμβολίζει τη μιγαδική μονάδα ( $j = \sqrt{-1}$ ). Οι μεταβλητές  $u$  και  $v$  από το χώρο των χωρικών συχνοτήτων. Στην περίπτωση μίας ψηφιακής εικόνας  $f(x,y)$  η οποία είναι διακριτά ορισμένη σε ένα πίνακα  $N \times M$ , ο ορισμός του διακριτού μετασχηματισμού Fourier φέρει διακριτά αθροίσματα στη θέση των ολοκληρωμάτων του ορισμού του μετασχηματισμού Fourier.

## 6.2.3 Σχέση μεταξύ συνέλιξης και μετασχηματισμού Fourier.

Ο τελεστής της συνέλιξης μπορεί να οριστεί αποτελεσματικά στο χώρο των χωρικών συχνοτήτων, όπως προκύπτει από το θεώρημα της συνέλιξης:

$$FT(g(x,y) * h(x,y)) = G(u,v)H(u,v)$$

όπου  $G=FT(g)$  και  $H=FT(h)$ , με  $FT$  να παριστάνει τον τελεστή του μετασχηματισμού Fourier. Το θεώρημα της συνέλιξης μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: το φάσμα της συνέλιξης δύο συναρτήσεων ισούται με το γινόμενο των φασμάτων τους.

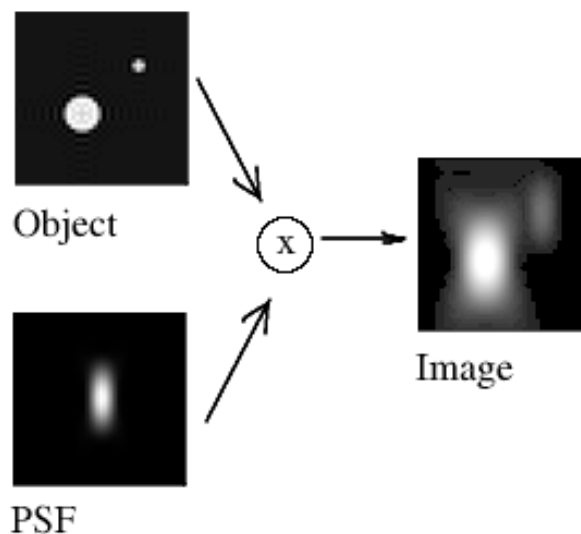
## 6.2.4 Συνέλιξη – Συνάρτηση διασποράς σημείου

Η συνάρτηση διασποράς σημείου είναι το είδωλο από ένα σημειακό αντικείμενο, το οποίο μπορεί να επεκταθεί σε ένα πραγματικό αντικείμενο, δηλαδή πολλά γειτονικά σημεία. Το είδωλο από πολλά γειτονικά σημεία προκύπτει παραθέτοντας τα είδωλα από όλα τα σημεία τα οποία απαρτίζουν το αντικείμενο.

Μαθηματικά, αυτό εκφράζεται με την συνάρτηση της συνέλιξης, η οποία, όπως προαναφέρθηκε περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f(x) \otimes g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot g(x - u) du$$

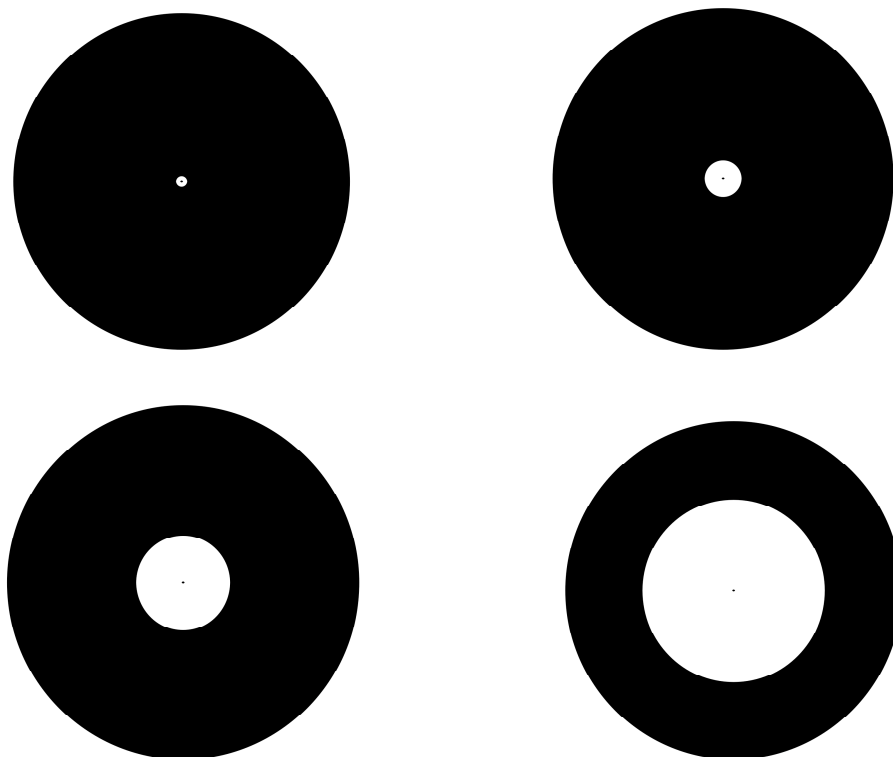
Όσο πιο διευρυμένη είναι η συνάρτηση διασποράς σημείου τόσο πιο ασαφές θα είναι το είδωλο. Γραφικά το αποτέλεσμα της συνέλιξης προκύπτει κρατώντας την μία συνάρτηση “ακίνητη” και σύροντας την άλλη προς την κατεύθυνση +u. Η επιφάνεια που προκύπτει από την επικάλυψή τους είναι η σύνελιξη. Συμπερασματικά η κατανομή φωτεινότητας ενός ειδώλου, μπορεί να προκύψει από συνέλιξη της PSF του οπτικού συστήματος με την κατανομή φωτεινότητας του αντικειμένου.



**Εικόνα6.2:** Σχηματισμός ειδώλου ως συνέλιξη των συναρτήσεων PSF και αντικειμέν

### 6.3 Υπολογισμός της έντασης της σκαδαζόμενης H/M ακτινοβολίας, των κερατοειδών – SR.

Όπως έχει προαναφερθεί για τον υπολογισμό της σκέδασης των κερατοειδών, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες αποτελούμενες από δακτύλους αυξανόμενης γωνίας.

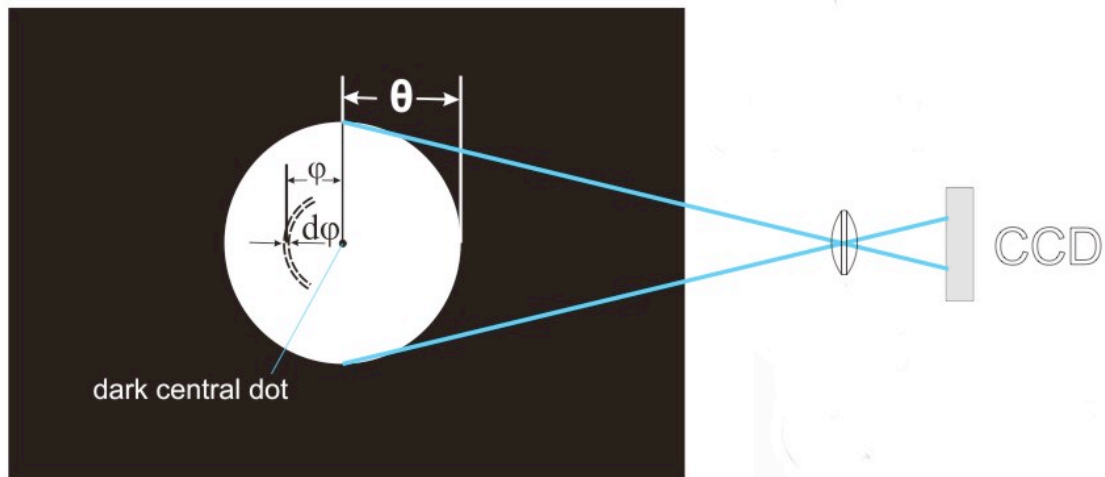


**Εικόνα6.3:** Δακτύλιοι αυξανόμενης γωνίας.

Για κάθε κερατοειδή ξεχωριστά, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σύνολο εικόνων με σκοπό τον υπολογισμό της έντασης της σκαδαζόμενης ακτινοβολίας από τον σκεδάζοντα κερατοειδή για γωνίες σκέδασης από 0deg έως και 3.5deg. Η ένταση της σκαδαζόμενης H/M ακτινοβολίας για την εκάστοτε εικόνα, προκύπτει από την ακτινική ολοκλήρωση του προφίλ της κατανομής της έντασης για διαφορετικές γωνίες σκέδασης  $\theta$ , γύρω από το κέντρο της κατανομής, και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

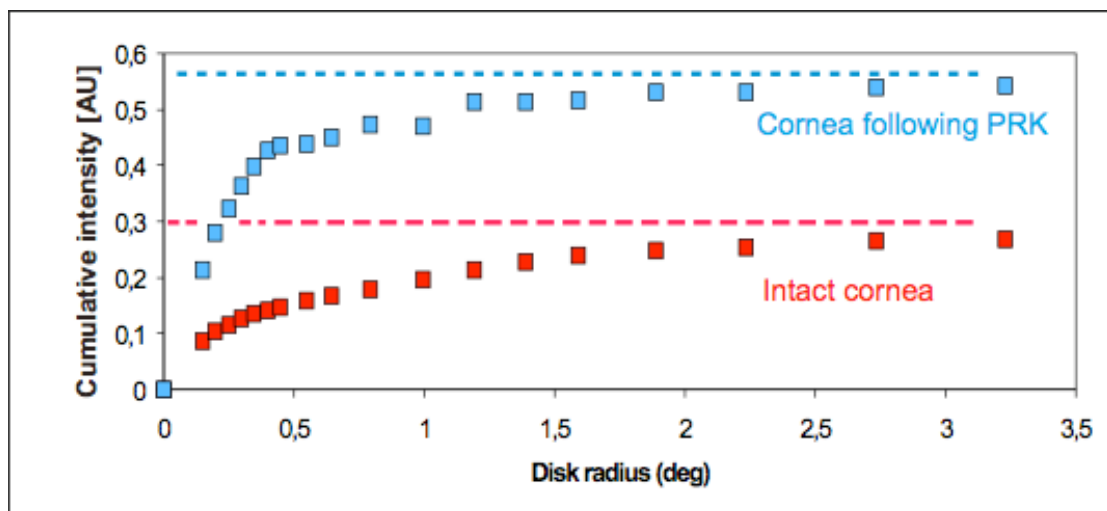
$$I_{CUM} = \int_{\theta_0}^{\theta} PSF(\varphi) \cdot 2\pi\varphi \cdot d\varphi$$

όπου  $I_{\text{CUM}}$  είναι η ένταση της σκεδαζόμενης Η/Μ ακτινοβολίας και θεωρούμε  $\theta_0 = 0$ , ως την γωνία τόξου του κεντρικού σκοτεινού δίσκου.



**Εικόνα 6.4:** Γεωμετρία της ακτινικής ολοκλήρωσης του προφίλ που προκύπτει για διαφορετικές γωνίες σκέδασης  $\theta$ .

Τα αποτελέσματα του υπολογισμού, με χρήση αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στην MATLAB (Παράρτημα 2), της έντασης της σκεδαζόμενης Η/Μ ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας τόξου δίνονται στο παρακάτω γράφημα.



**Γράφημα 6.5:** Συγκεντρωτική ένταση της Η/Μ ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας, για κερατοειδή μετά από φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή – PRK (μπλε) και για άθικτο κερατοειδή (κόκκινο).

Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας παρουσιάζει μία βαθμιαία αύξηση για γωνίες από 0 έως 1deg, για γωνίες τόξου μεγαλύτερες από 1deg είναι σταθερή. Παράλληλα, η οριζόντια ασύμπτωτη των τιμών της έντασης αυτής, για κερατοειδή που έχει υποστεί φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το ποσό της ακτινοβολίας που σκεδάζεται είναι σχεδόν διπλάσιο σε τιμή από την αντίστοιχη ενός μη ακτινοβολημένου κερατοειδή.

Στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι στην παρούσα μελέτη δεν λαμβάνεται υπόψη η οπισθοσκέδαση της H/M ακτινοβολίας που πιθανότατα λαμβάνει χώρα. Παρόλο που η ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι πολύ μικρή σε σχέση με την σκέδαση σε μικρές γωνίες, δεν παύει ενδεχομένως να αντιπροσωπεύει ένα μετρήσιμο κλάσμα της συνολικής ισχύος.

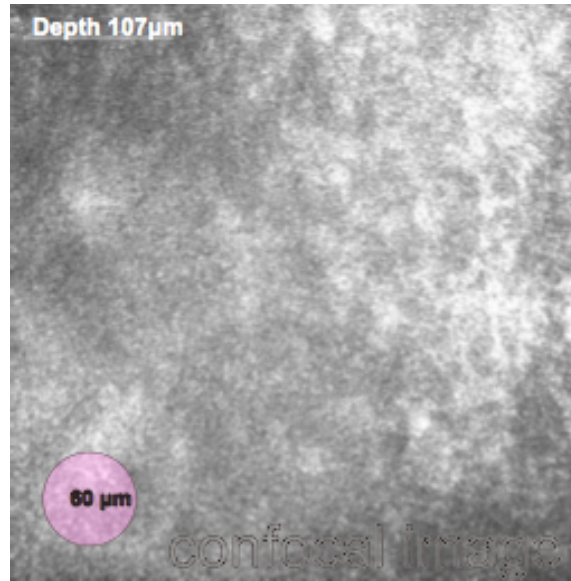
Η ένταση του σκεδαζόμενου και του βαλλιστικού μέρους της ακτινοβολίας, δίνει την δυνατότητα υπολογισμού του Scatter Ratio για τον υπό εξέταση κερατοειδή σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$SR = 1 - BR$$

όπου BR ορίζεται ως το ποσοστό της προσπίπτουσας H/M ακτινοβολίας που δεν συναντά κανένα σκεδαστή στον οπτικό του δρόμο.

## 6.4 Scatter Ratio – Πάχος ουλώδους στοιβάδας

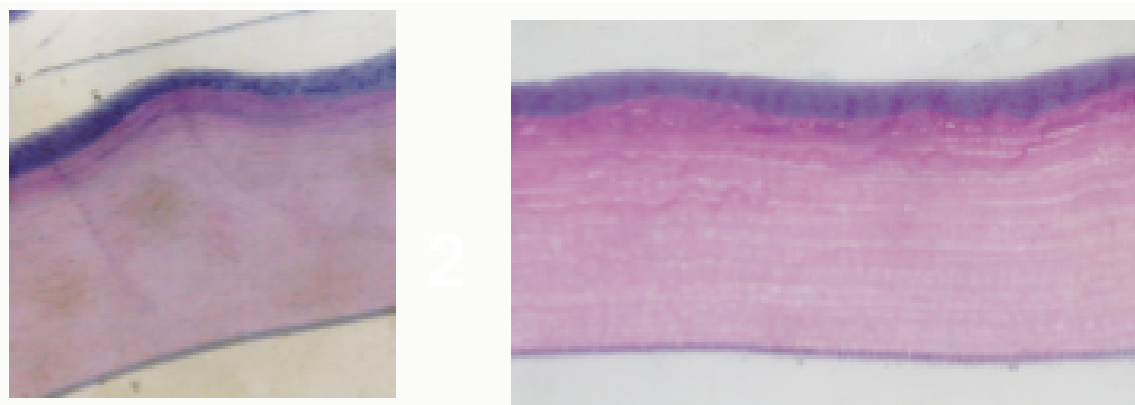
Η απεικόνιση του κερατοειδή με το συνεστιακό μικροσκόπιο, καθώς επίσης και οι εικόνες οπτικής μικροσκοπίας έδωσαν σαφή εικόνα της υποεπιθηλιακής στοιβάδας του κερατοειδή, στην οποία οφείλεται η θολερότητα αυτού. Οι μορφολογικές αλλαγές που παρατηρούνται κατά την ανάπτυξη της επουλωτικής δραστηριότητας του κερατοειδούς, προκαλούνται από την ενεργοποίηση των κερατοκυττάρων. Τα ενεργοποιημένα κερατοκύτταρα αναπτύσσουν ένα στρώμα νέων ινών κολλαγόνου, διατεταγμένων με τυχαίο προσανατολισμό διαφορετικό από τον αρχικό, δημιουργώντας ένα στρώμα ουλώδους ιστού. Το πάχος της ουλώδους στοιβάδας που προκαλεί την σκέδαση στον κερατοειδή μετρήθηκε μέσω των εικόνων οπτικής μικροσκοπίας και κατάλληλου αλγόριθμου MATLAB (Παράρτημα 3).



**Εικόνα 6.6:** Απεικόνιση της υποεπιθηλιακής στοιβάδας με το συνεστιακό μικροσκόπιο.

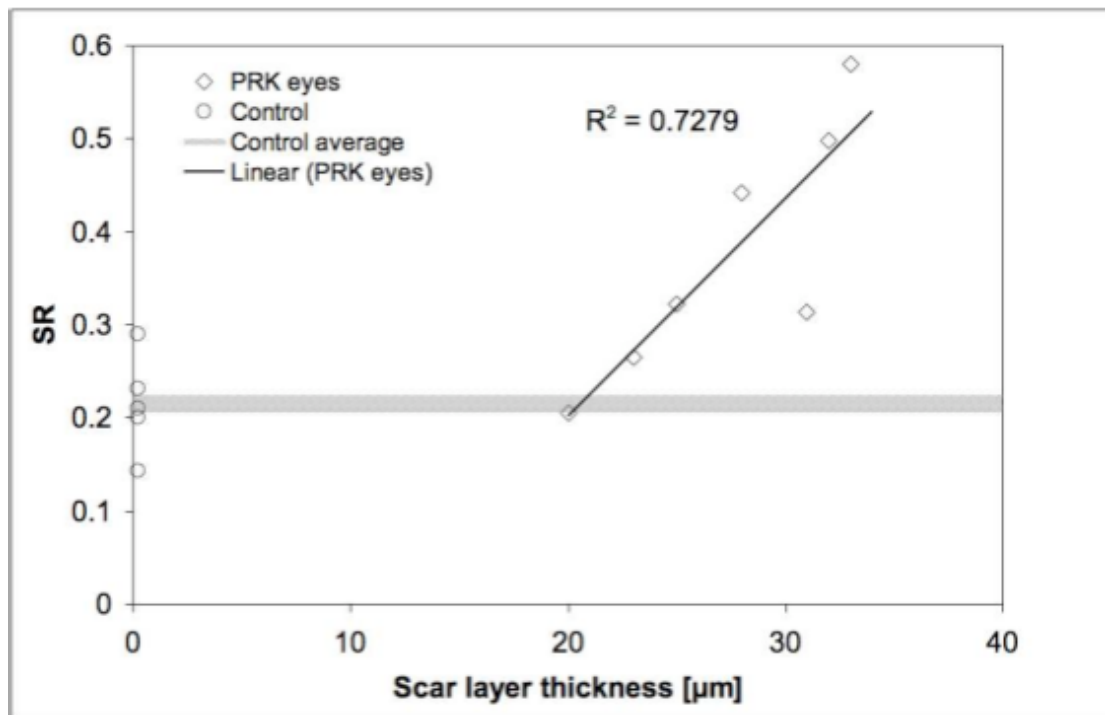
Η έντονη αντίθεση φωτεινότητας που παρατηρείται στις εικόνες από συνεστιακό μικροσκόπιο, οφείλεται στην διαφορά του δείκτη διάθλασης των δομών που αναπτύσσονται μετεγχειρητικά σε σχέση με το στρώμα του κερατοειδή.

Παράλληλα το σχετικό πάχος της υποεπιθηλιακής στοιβάδας, το οποίο μετρήθηκε μέσω των εικόνων οπτικής μικροσκοπίας, κυμαίνεται από 20µm έως 35µm.



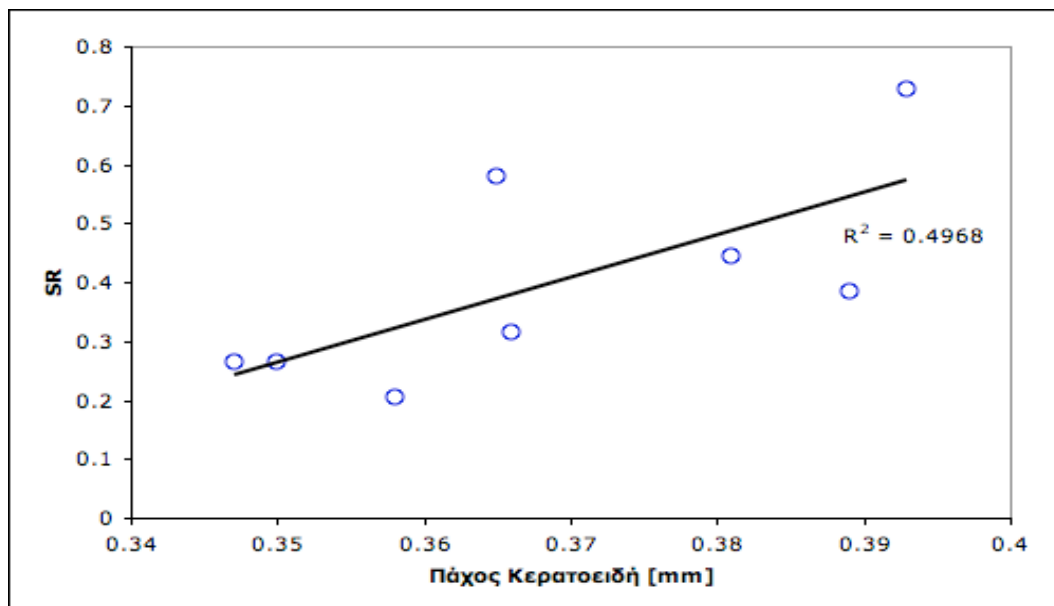
**Εικόνα 6.7:** Εικόνα οπτικής μικροσκοπίας του κερατοειδή μετά από PRK.

Το ποσοστό της Η/Μ ακτινοβολίας που σκεδάζεται παρατηρείται να αυξάνεται γραμμικά, όσο αυξάνεται το πάχος του κερατοειδή, καθώς επίσης παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το πάχος της υποεπιθηλιακής στοιβάδας – foam layer σαν συνάρτηση του ποσοστού της Η/Μ ακτινοβολίας.



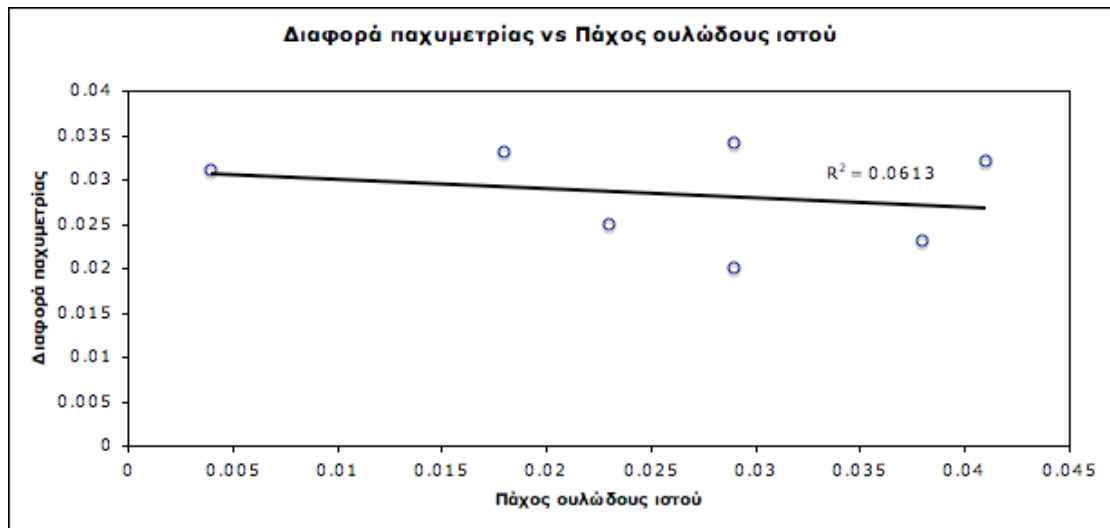
**Γράφημα6.9: Scatter Ratio συναρτήσει του πάχους της υποεπιθηλιακής στοιβάδας.**

Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζεται το ποσοστό σκέδασης για φυσιολογικό κερατοειδή, το οποίο κυμαίνεται από 20% έως 32%, παράλληλα ενισχύεται η υπόθεση ότι το ποσό σκέδασης εξαρτάται άμεσα από το σχετικό πάχος του ουλώδους ιστού, ο οποίος αποτελεί την κύρια πηγή σκέδασης.



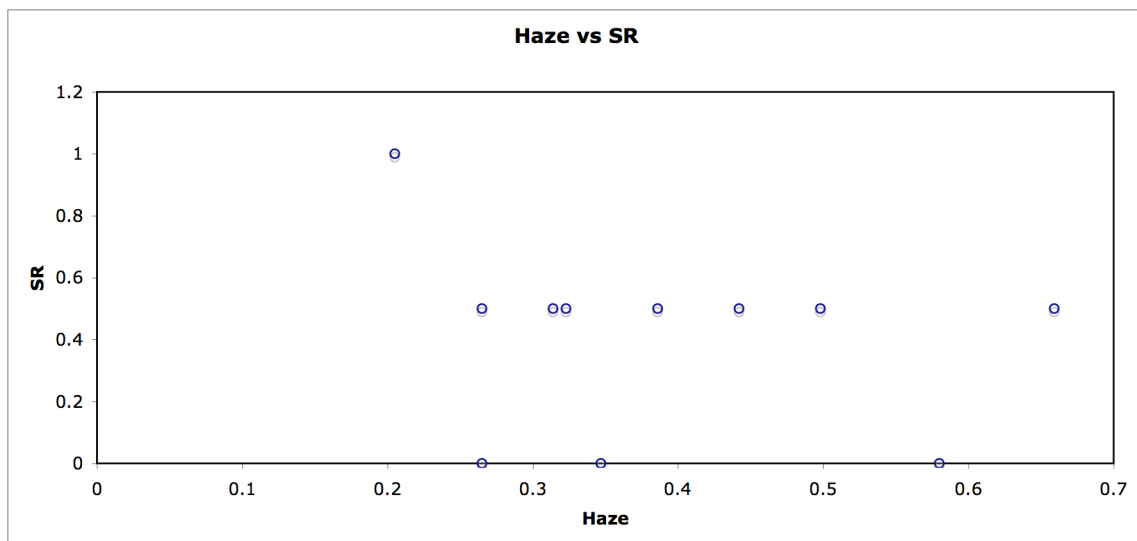
**Γράφημα6.10: Scatter Ratio συναρτήσει του πάχους του κερατοειδή μετά από PRK.**





**Γράφημα 6.11:** Διαφορά τελικής με αρχική ταχυμετρία συναρτήσει του πάχους του ουλώδη ιστού.

Τα παραπάνω γραφήματα δείχνουν την σχέση του σχετικού πάχους της ουλώδους στοιβάδας με την διαφορά ταχυμετρίας όπως αυτή μετρήθηκε την τέταρτη εβδομάδα μετεγχειρητικά, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η ουλώδης στοιβάδα αναπτύσσεται στην ακτινοβοληθείσα περιοχή του κερατοειδή χωρίς ουσιαστικά να προσδίδει πάχος σε αυτόν. Το γεγονός αυτό ενεχόμενες σημαίνει ότι ο ουλώδης ιστός δεν αποτελείται εξ ολοκλήρου από νέο κολλαγόνο αλλά περιλαμβάνει και μέρος του ακτινοβολημένου κολλαγόνου το οποίο έχει χάσει την φυσιολογική του οργάνωση.



**Γράφημα 6.12:** Κλινικό Haze συναρτήσει του συντελεστή σκέδασης.

Η οπίσθια σκέδαση στον κερατοειδή είναι αυτή που παρατηρείται από τον κλινικό και αναφέρεται ως haze. Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει την σχέση μεταξύ της εμπρός και οπίσθιας σκέδασης του κερατοειδή, όπου προκύπτει ότι η αυξημένη

εμπρός σκέδαση στον κερατοειδή δεν παρουσιάζει συσχέτιση με την οπισθοσκέδαση. Το εύρημα αυτό είναι σημαντικό καθώς δείχνει ότι η κλινικά παρατηρούμενη απώλεια της διαφάνειας του κερατοειδή δεν είναι κατ' ανάγκη ενδεικτική της πρόσθιας σκέδασης η οποία είναι και σημαντικότερη για την ποιότητα της αμφιβληστροειδικού ειδώλου.

## Κεφάλαιο VII

### 7.1 Μορφόκλασμα (Fractal)

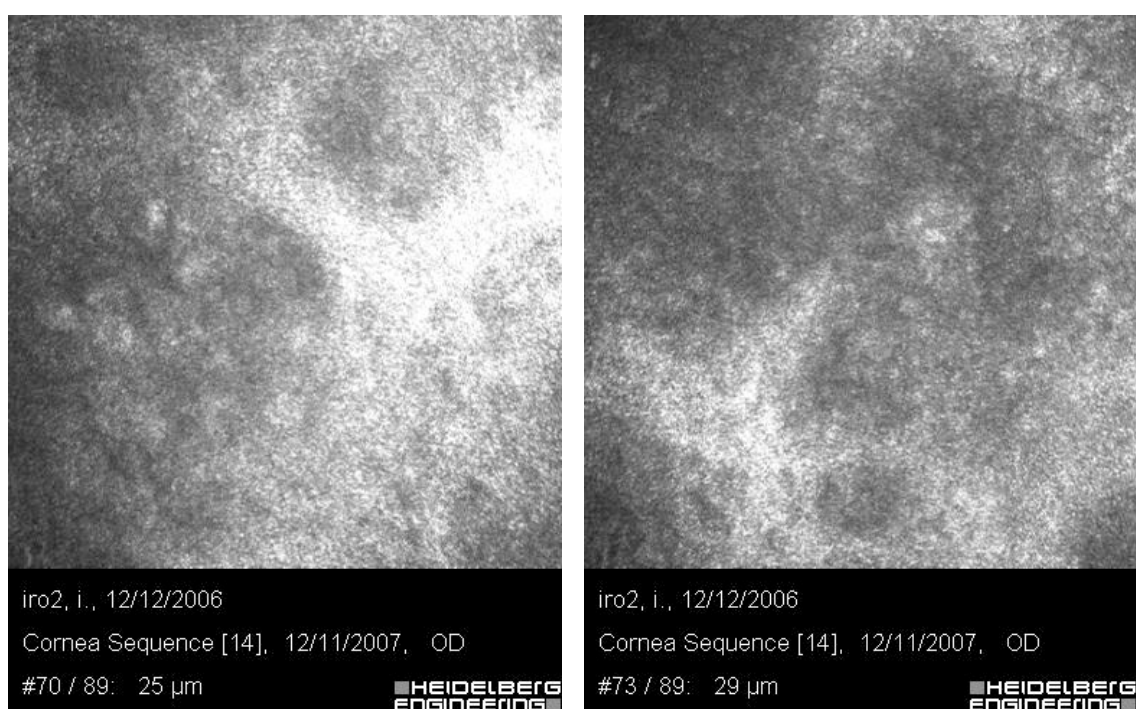
Με τον όρο fractal ή μορφόκλασμα αποκαλούμε κάθε γεωμετρικό σχήμα που επαναλαμβάνεται αυτούσιο σε άπειρο βαθμό μεγέθυνσης, και έτσι συχνά περιγράφεται σαν απείρως περίπλοκο σχήμα. Fractal είναι ένα μαθηματικά παραγόμενο μοτίβο, που μπορεί να αναπαραχθεί σε οποιαδήποτε μεγέθυνση ή σμίκρυνση, παρουσιάζοντας ένα σχέδιο με μερική ή ολική επανάληψη του αρχικού. Χαρακτηριστικό επομένως των fractal είναι η αυτομοιότητα σε κάποιες δομές τους, η οποία εμφανίζεται σε διαφορετικά επίπεδα μεγένθυσης.

Εικόνες fractal μπορούν να παραχθούν με χρήση αναδρομικά καλούμενων συναρτήσεων, μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας, που σε κάθε βήμα επαναλαμβάνεται οι ίδιοι μαθηματικοί μετασχηματισμοί. Δεδομένου ότι η κλασματική διάσταση είναι ένας μη ακέραιος αριθμός, η επανάληψη σε διαφορετικές κλίμακες του ίδιου σχήματος, δημιουργεί ένα αντικείμενο, δηλαδή ένα fractal, τα μέρη του οποίου είναι πάντα όμοια με το όλο. Η ποιότητα αυτής της αυτομοιότητας είναι το βασικό χαρακτηριστικό ενός αντικειμένου fractal, σε οποιαδήποτε κλασματική διάσταση.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα φυσικού αντικειμένου, όπου εκδηλώνεται η αυτομοιότητα, δίνεται από τον B.Mandelbort. Ο αριθμός των διαστάσεων που έχει ένα κουβάρι σχοινί, εξαρτάται από την απόσταση ή την προοπτική κλίμακας του παρατηρητή. Σε άπειρη απόσταση το κουβάρι αποτελεί ένα σημείο στο χώρο, δηλαδή δεν έχει διάσταση. Όσο μειώνεται η απόσταση αυτή το κουβάρι φαίνεται σφαιρικό, δηλαδή έχει τρεις διαστάσεις, ενώ σε ακόμα μικρότερη απόσταση παρατήρησης, εικόνα αποτελεί μόνο το σχοινί, και κατά συνέπεια το αντικείμενο έχει μία μόνο διάσταση, τη γραμμική, που όμως είναι αναδιπλωμένη στον εαυτό της με τέτοιο τρόπο που χρησιμοποιεί ένα τρισδιάστατο χώρο. Τέλος σε μικροσκοπική παρατήρηση, οι διαστάσεις του κουβαριού εναλλάσσονται ξανά και εξαρτώνται από την κλίμακα με την οποία πραγματοποιείται η παρατήρηση.

## 7.2 Κατασκευή μαθηματικού μοντέλου – fractal της υποεπιθηλιακής στοιβάδας του κερατοειδή.

Η κατασκευή μαθηματικού μοντέλου βασίστηκε στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των δομών του κερατοειδή, τα οποία διακρίνονται μέσω μίας εικόνας από συνεστιακό μικροσκόπιο. Η δομή της υποεπιθηλιακής στοιβάδας του κερατοειδή προσομοιώνει τη δομή ενός fractal, καθώς οι δομές του κερατοειδή που εμφανίζονται ως πηγές σκέδασης στον κερατοειδή μετά από διαθλαστική χειρουργική παρουσιάζουν ομοιότητα σε βάθος του κερατοειδή. Οι ακόλουθες εικόνες ενισχύουν την υπόθεση αυτή.



**Εικόνα7.1: Εικόνες υποεπιθηλιακής στοιβάδας κερατοειδή από συνεστιακό μικροσκόπιο (βάθος 27 $\mu$ m, περιοχή ανάλυσης 400 $\mu$ m).**

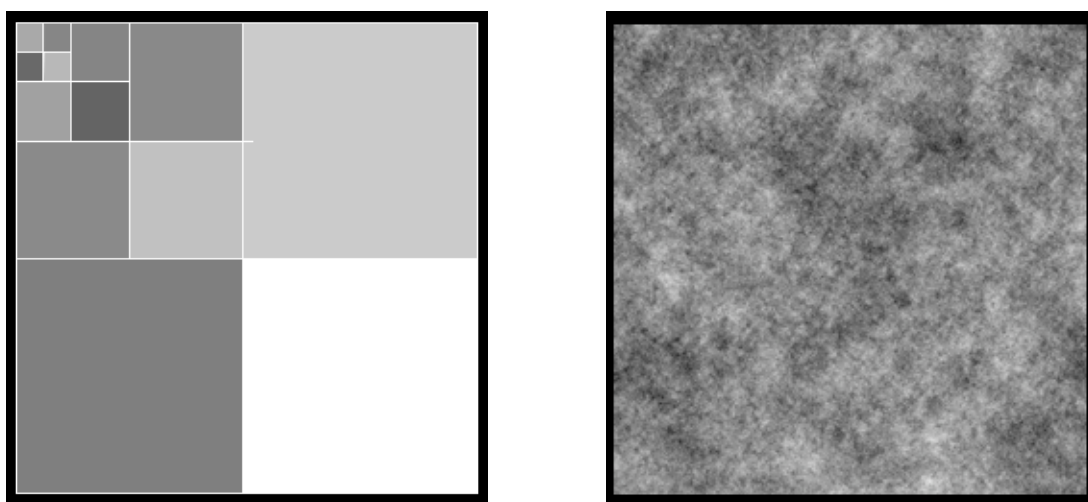
Από τις εικόνες της υποεπιθηλιακής στοιβάδας του κερατοειδή που λαμβάνουμε με χρήση συνεστιακού μικροσκόπιου, παρατηρούμε το βαθμό τυχαιότητας και το βαθμό επανάληψης, στο μέγεθος των δομών που προκαλούν το φαινόμενο της σκέδασης. Μέχρι σήμερα, δεν είναι ακόμα διαθέσιμες λεπτομερείς εικόνες της ακριβούς δομής και μεγέθους αυτών, αλλά πειραματικά με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού MATLAB στην παρούσα μελέτη διαπιστώθηκε ότι οι διαστάσεις των δομών αυτών είναι 40-120 $\mu$ m.

Η μέθοδος κατασκευής του fractal μοντέλου της υποεπιθηλιακής στοιβάδας του κερατοειδή πραγματοποιήθηκε με χρήση κατάλληλου λογισμικού MATLAB (Παράρτημα 4), ενώ τα αποτελέσματα του μοντέλου φαίνεται να έχουν αρκετά μεγάλη ομοιότητα σε μορφολογικά χαρακτηριστικά με τα πραγματικά δεδομένα από το συνεστιακό μικροσκόπιο, καθώς παρουσιάζουν τις ίδιες χωρικές συχνότητες και σε αντίστοιχη αναλογία.

Η κατασκευή του μοντέλου ξεκινά εκφράζοντας αναλυτικά τη συνάρτηση εισόδου, δηλαδή τη χωρική κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στη είσοδο

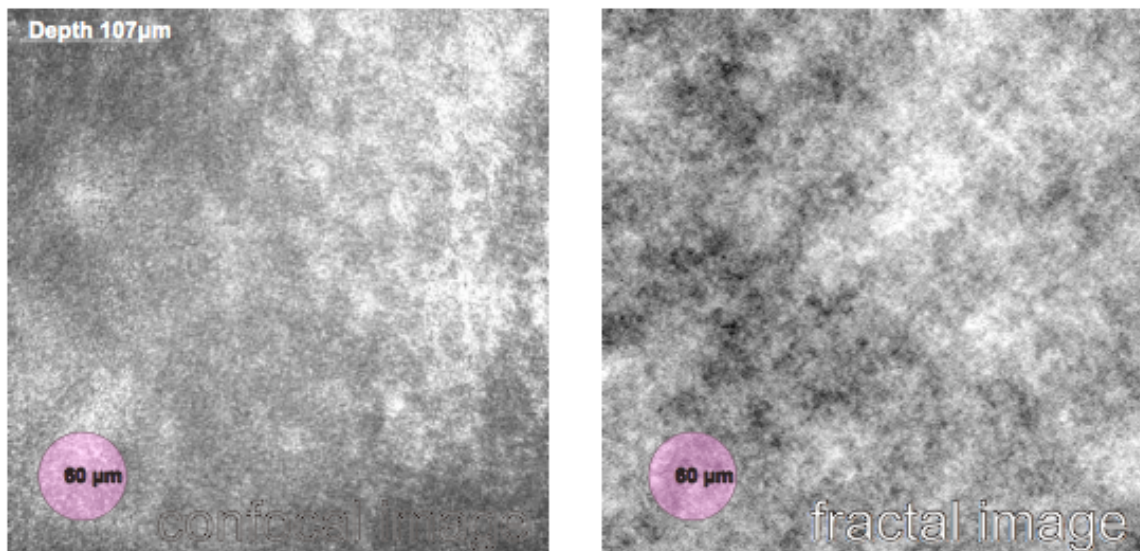
$$E(x_1, y_1) = E_o(x_1, y_1) \times \exp i\varphi_o(x_1, y_1)$$

με σκοπό την δημιουργία μίας εικόνας – επιπέδου, η οποία περιλαμβάνει όλες τις χωρικές συχνότητες.



**Εικόνα7.2: Δημιουργία μίας Fractal εικόνας (αριστερά: σχηματικά, δεξιά: μετά από 11 διαιρέσεις - εικόνα  $2^{11} \times 2^{11}$ )**

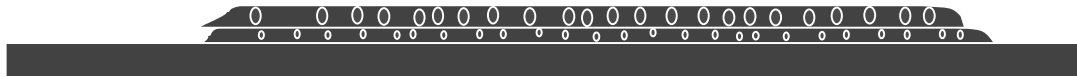
Ο μετασχηματισμός Fourier αυτής της διδιάστατης χωρικής συνάρτησης, μας δίνει την έκφραση στις χωρικές συχνότητες της, δηλαδή το φάσμα της. Η χρήση ενός φίλτρου χωρικών συχνοτήτων δίνει την δυνατότητα αποκοπής διαφορετικών χωρικών συχνοτήτων. Τέλος ο υπολογισμός του “φάσματος” του ειδώλου, οδηγεί στην έκφραση της χωρικής κατανομής φωτεινότητας στο είδωλο με ένα αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier.



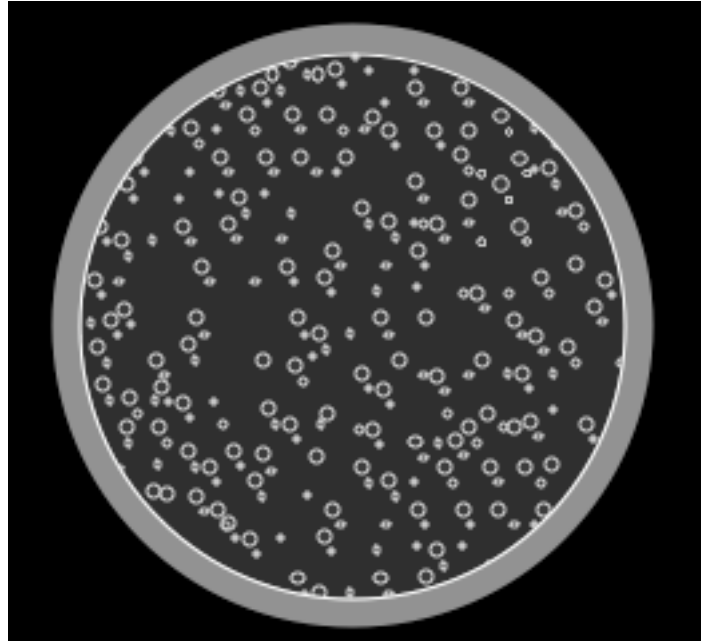
**Εικόνα 7.2:** Αριστερά εικόνα από συνεστιακό μικροσκόπιο της υποεπιθηλιακής στοιβάδας του κερατοειδή (Βάθος 94μm, μέγεθος σκεδαστών ~90μm). Δεξιά fractal μοντέλο της υποεπιθηλιακής στοιβάδας.

### **7.3 Ανάπτυξη φυσικών μοντέλων σκέδασης.**

Η κατασκευή φυσικού μοντέλου σκέδασης, βασίστηκε στο μέγεθος και στην κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας των δομών του κερατοειδή, που εμφανίζονται στον κερατοειδή μετά από μια διαθλαστική χειρουργική. Περιλαμβάνει την δημιουργία πολλαπλών στρώσεων γυάλινων μικροσφαιριδίων, μεγέθους 1-150μm. Για την κατασκευή αυτών των φυσικών μοντέλων σκέδασης χρησιμοποιήθηκαν καλυπτρίδες μικροσκοπίου (ESCO) πάχους 1mm. Το χώρο ανάμεσα σε αυτές πληρούσε στρώμα μείγματος φωτοπολυμεριζόμενης κόλλας (NORLAND OPTICAL ADHESIVE) με γυάλινα μικροσφαιρίδια. Τα δείγματα διαφοροποιούνταν ως προς την συγκέντρωση των γυάλινων μικροσφαιριδίων και το μέγεθός τους.

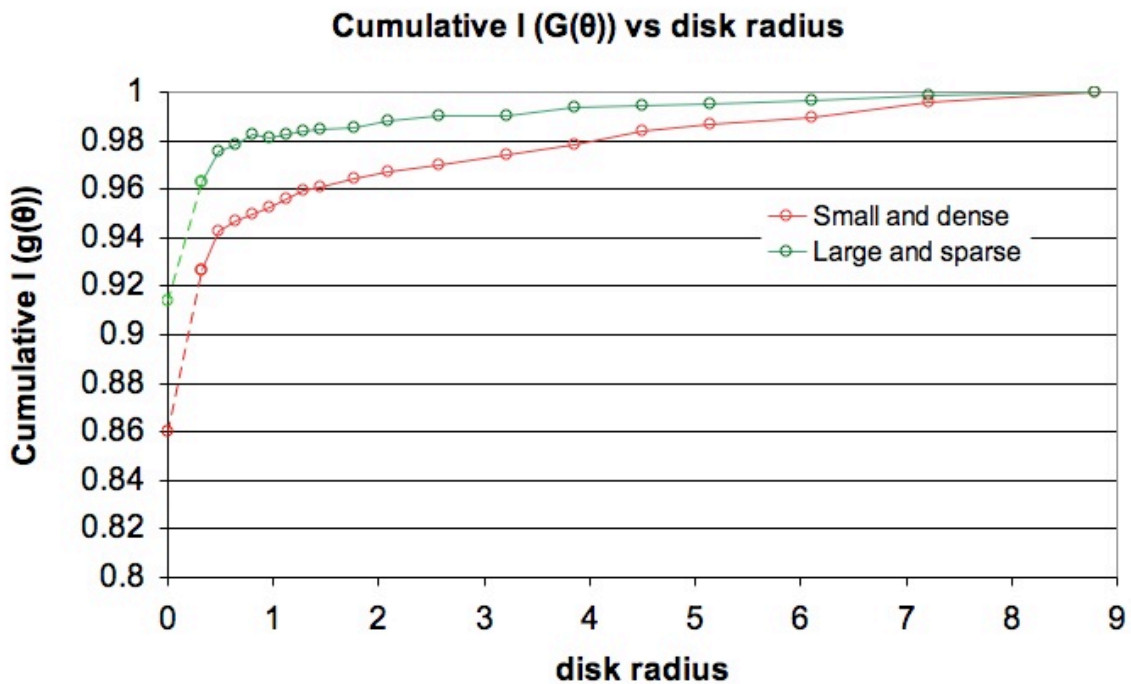


**Εικόνα7.3: Πρόσψη πολλαπλών στρώσεων σκεδαστών**



**Εικόνα7.4: Σχηματική αναπαράσταση κάτοψης πολλαπλών στρώσεων σκεδαστών**

Το ποσοστό σκέδασης της H/M ακτινοβολίας για το κάθε δείγμα καταγράφηκε μέσω της μεθόδου απλής διέλευσης, και υπολογίστηκε σύμφωνα με την διαδικασία υπολογισμού του ποσοστού σκέδασης των κερατοειδών, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 6.2. Το αντίστοιχο γράφημα της έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας σκέδασης παρατίθεται παρακάτω.



**Γράφημα 7.5:** Ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας σκέδασης για μικρούς σκεδαστές, πυκνής επιφανειακής κατανομής (πράσινο), και για μεγάλους σκεδαστές, αραιής επιφανειακής κατανομής.

Το ποσοστό της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας για μικρούς σε μέγεθος σκεδαστές, πυκνής επιφανειακής κατανομής είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με αυτό των μεγάλων σε μέγεθος σκεδαστών, γεγονός που ενισχύει την υπόθεση ότι μικροί σε μέγεθος σκεδαστές σκεδάζουν σε μεγαλύτερες γωνίες, συγκριτικά με τους μεγάλους σε μέγεθος σκεδαστές.

Το είδωλο ενός αντικειμένου μέσα από ένα οπτικό σύστημα το οποίο περιλαμβάνει ένα φυσικό μοντέλο σκέδασης, θα είναι ασαφές, λόγω διαταραχών του μετώπου κύματος που προσπίπτει σε αυτό, με αποτέλεσμα την μείωση της αντίθεσης και την συμμετρική ανακατανομή του φωτός. Η άμεση επίπτωση στην όραση θα είναι η εμφάνιση θάμβους γύρω από τις φωτεινές πηγές, η μείωση της ευαισθησίας αντίθεσης και ενδεχομένως η μείωση της διακριτική ικανότητας (οπτικής οξύτητας).





**Εικόνα 7.6: Εικόνα ειδώλου ενός τοπίου με και χωρίς την παρουσία σκέδασης.**

## Γενικά συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, αναπτύχθηκε μία βελτιωμένη πειραματική διάταξη οπτικής μέτρησης της σκέδασης με μεγάλη ευαισθησία (κατάλληλη για σχετικά διαφανή δείγματα) και με δυνατότητα εύκολου υπολογισμού της γωνιακής κατανομής της σκεδαζόμενης έντασης σε πολύ μικρές γωνίες. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της σκέδασης σε κερατοειδείς κουνελιών μετά από διαθλαστική κερατεκτομή.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η σκέδαση στους κερατοειδείς των κουνελιών παρουσίασαν σχεδόν διπλάσια σκέδαση από τους υγιείς κερατοειδείς που εξετάστηκαν παράλληλα. Η αυξημένη σκέδαση που παρατηρήθηκε στους υγιείς κερατοειδείς ενεχόμενες οφείλεται σε οίδημα κατά τους χειρισμούς εκτομής του κερατοειδή και τοποθέτησης στη συσκευή μέτρησης. Σε κάθε περίπτωση, το ενδεχόμενο αυτό συστηματικό σφάλμα υπήρχε στον ίδιο βαθμό τόσο στους πειραματικούς κερατοειδείς όσο και στους μάρτυρες. Οι μετρήσεις της γωνιακής κατανομής της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας έδειξαν ότι οι υποεπιθηλιακές θολερότητες προκαλού σκέδαση πολύ μικρής γωνίας (της τάξης των  $\pm 0.5^\circ$ ), γεγονός που υποδηλώνει ότι πρακτικά όλο το σκεδαζόμενο φως από τα παρατηρούμενα αντικείμενα οδηγείται στην ωχρά κηλίδα μειώνοντας ακόμη περισσότερο την αντίθεση (contrast) των εικόνων σε σχέση με τη μείωση που θα επέφερε αντίστοιχο ποσοστό σκέδασης σε ευρύτερες γωνίες. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την έντονη εξάρτηση της γωνιακής κατανομής από τη μορφολογία (και ειδικά το μέγεθος) των σκεδαστών του υποεπιθηλιακού ουλώδους ιστού, μπορεί ενδεχομένως να ερμηνεύσει τον ιδιαίτερα υποκειμενικό (και εξατομικευμένο) χαρακτήρα των επιπτώσεων του μετεγχειρητικού haze στην όραση.

Το μαθηματικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε μπορεί όχι μόνο να προβλέψει με ακρίβεια τη γωνιακή κατανομή της έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας αλλά προσομοιώνει και χωρικά τις παρατηρούμενες (μικροσκοπικά) δομές στον κερατοειδή.

Η τεχνική για τη μέτρηση της σκέδασης όπως βελτιστοποιήθηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή και το χαρακτηρισμό φυσικών μοντέλων σκεδαστών. Τα φυσικά αυτά μοντέλα, μπορούν μελλοντικά να

χρησιμοποιηθούν τόσο για ψυχοφυσικές μετρήσεις όσο και ως πρότυπα για τη βαθμονόμηση άλλων οργάνων (λιγότερο άμεσων) όπως για παράδειγμα μεθόδων διπλής διέλευσης όπου η μέτρηση της σκέδασης πραγματοποιείται με έμμεσο τρόπο.

## Βιβλιογραφία

1. Daxer A, Misof K, Grabner B, Ettl A, Fratzl P.  
**Collagen fibrils in the human corneal stroma: Structure and aging.**  
Invest Ophthalmol Vis Sci. 1998 Mar;39(3):644-8
2. Thibos LN, Hong X, Bradley A, Cheng X.  
**Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes.**  
J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis. 2002 Dec;19(12):2329-48
3. Heron G, Charman WN, Gray LS.  
**Accommodation dynamics as a function of age.**  
Ophthalmic Physiol Opt. 2002 Sep;22(5):389-96
4. Artal P, Guirao A, Berrio E, Wolliams DR  
**Compensation of corneal aberrations by the internal optics of the human eye.**  
J Vis. 2001;1(1):1-8
5. Σοφία Ι. Παναγοπούλου  
**Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου για τον ανασχηματισμό του κερατοειδούς κατά την φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή του οφθαλμού με Excimer laser.**  
Ηράκλειο 2005
6. Douthwaite WA.  
**The asphericity, curvature and tilt of the human cornea measured using a videokeratoscope.**  
Ophthalmic Physiol Opt. 2003 Mar;23(2):141-50
7. Oksana Kostyuk.  
**Transparency of the bovine corneal stroma at physiological hydration and its dependence on concentration of the ambient anion.**  
J. Physiol. 2002;543;633-642;
8. Maurice, D. M. 1957.  
**The structure and transparency of the corneal stroma.**  
J. Physiol. 136:263–286
9. Young L Kim.  
**Variation of corneal refractive index with hydration**

- Phys. Med. Biol. 49 (2004) 859–868
10. Maurice, D. M. 1957.  
**The structure and transparency of the corneal stroma.**  
J. Physiol. 136:263–286
11. X. Γκίνης,  
**‘Αλληλεπίδραση laser – κερατοειδή και εισαγωγικές έννοιες της διαθλαστικής χειρουργικής.’**  
Σημειώσεις από το μάθημα Φυσιολογική Οπτική & Εφαρμογές II, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Οπτική & Όραση
12. Jukka A. O. Moilanen .  
**Long-Term Corneal Morphology after PRK by In Vivo Confocal Microscopy.**  
Investigative Ophthalmology & Visual Science, March 2003, Vol. 44, No. 3
13. Torben Møller-Pedersen,  
**Stromal Wound Healing Explains Refractive Instability and Haze Development after Photorefractive Keratectomy**  
Ophthalmology 2000;107:1235–1245
14. Fernando Diaz Douton .  
**Comparison of the Retinal Image Quality with a Hartmann-Shack Wavefront Sensor and a Double-Pass Instrument.**  
Invest Ophthalmol Vis Sci. 2006;47:1710–1716
15. J. Santamaria, P. Artal, and J. Bescos  
**Determination of the point-spread function of human eyes using a hybrid optical-digital method.**  
J. Opt. Soc. Am. A 4, 1109–1114(1987).
16. P. Artal, I. Iglesias, N. Lopez-Gil, and P. G. Green  
**Double-pass measurements of the retinal-image quality with unequal entrance and exit pupil sizes and the reversibility of the eye’s optical system.**  
J. Opt. Soc. Am. A 12, 2358–2366 (1995).
17. Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke HE, Seiler T.  
**Principles of Tscherning aberrometry.**  
J Refract Surg. 2000 Sep-Oct;16(5):S570-1.
18. De Brouwere D, Ginis H, Kymionis G, Naoumidi I, Pallikaris I.G.

**Forward scattering properties of corneal haze.**

Optom Vis Sci. 2008 Sep;85(9):843-8.

19. Juan M. Bueno

**Degree of polarization as an objective method of estimating scattering.**

J. Opt. Soc. Am. A/Vol. 21, No. 7/July 2004, & references therein.

20. Thomas J. T. P. van den Berg and Jan Kees IJspeert

**Clinical assessment of intraocular stray light**

APPLIED OPTICS / Vol. 31, No. 19 / 1 July 1992

21. Colliac JP, Shammas HJ.

**Optics for photorefractive keratectomy.**

J Cataract Refract Surg. 1993 May;19(3):356-63.

22. Seiler T, McDonnell PJ.

**Excimer laser photorefractive keratectomy.**

Surv Ophthalmol. 1995 Sep-Oct;40(2):89-118. Review.

## Παραρτήματα (MATLAB SCRIPTS)

### Παράρτημα 1 (Βαθμονόμηση οθόνης)

```
clear all;
close all;

cropsiz=512;

[filename,path]=uigetfile('*.asc');
cd(path);
I1=load([path filename]);
I1=double(I1);

x=round(0.5*size(I1,1));
y=round(0.5*size(I1,2));

I1=imcrop(I1,[x-cropsiz/2 y-cropsiz/2 cropsiz cropsiz]);
I=I1;

if length(I)>cropsiz;
    I=I(2:end, 2:end);
end

figure(1);
imshow(I,[]);

dotsiz=15;

mask=zeros(cropsiz);
dot=fspecial('disk',dotsiz);
mask(cropsiz/2-dotsiz:cropsiz/2+dotsiz, cropsiz/2-
dotsiz:cropsiz/2+dotsiz)=dot;
maskimage=I.*mask;
figure(2);
imshow(maskimage,[0 255]);

intensity=sum(sum(maskimage))
```

## Παράρτημα 2 (Μέτρηση φωτεινότητας στο κέντρο δίσκου)

```
clear all;
close all;
w=120;
w1=60;

[filename,path]=uigetfile('*.png');
cd(path);
I=imread([path filename]);
I=double(I);

max(max(I))
y=I;

alpha=0.0031;
bita=1.0488;
gama=-10.598-y;
d=sqrt(((bita)^2)-(4*alpha*gama));
x=(-bita+d)/(2*alpha);
gama=-10.598-255;
d=sqrt(((bita)^2)-(4*alpha*gama));
maxlum=(-bita+d)/(2*alpha);

I2=x/maxlum;
I=I2;

w2=0.5*size(I,1);
w3=0.5*size(I,2);

figure(1);
imshow(I,[]);
[x,y]=ginput(1);
I2=I(y-w:y+w,x-w:x+w);
imshow(I2,[])

[x,y]=ginput(1);
I3=I2(y-w1:y+w1,x-w1:x+w1);
imshow(I3,[])

mask=zeros(size(I3));
dot=fspecial('disk',3);
dot=dot/max(max(dot));
mask(w1+1-3:w1+1+3,w1+1-3:w1+1+3)=dot;

maskimage=I3.*mask;
figure(2);
imshow(maskimage,[0 255]);
```



```

allpixels=sum(sum(mask));
totallight=sum(sum(maskimage));

intensity1=totallight/allpixels
save intensity1 intensity1

clear all;
close all;
w=120;
w1=60;
pause

[filename,path]=uigetfile('*.png');
cd(path);
I=imread([path filename]);
I=double(I);

max(max(I))
y=I;

alpha=0.0031;
bita=1.0488;
gama=-10.598-y;
d=sqrt(((bita)^2)-(4*alpha*gama));
x=(-bita+d)/(2*alpha);
gama=-10.598-255;
d=sqrt(((bita)^2)-(4*alpha*gama));
maxlum=(-bita+d)/(2*alpha);

I2=x/maxlum;
I=I2;

w2=0.5*size(I,1);
w3=0.5*size(I,2);

figure(1);
imshow(I,[]);

[x,y]=ginput(1);
I2=I(y-w:y+w,x-w:x+w);
imshow(I2,[])
[x,y]=ginput(1);
I3=I2(y-w1:y+w1,x-w1:x+w1);
imshow(I3,[])
mask=zeros(size(I3));
dot=fspecial('disk',3);
dot=dot/max(max(dot));
mask(w1+1-3:w1+1+3,w1+1-3:w1+1+3)=dot;

```

```
maskimage=I3.*mask;
figure(2);
imshow(maskimage,[0 255]);

allpixels=sum(sum(mask));
totallight=sum(sum(maskimage));
intensity2=totallight/allpixels

load intensity1;
intensity=0.5*(intensity1+intensity2)
```

### Παράρτημα 3 (Μέτρηση παχους foam layer απόιστολογικές εικόνες)

```
clear all;
close all;

[filename,path]=uigetfile('* .jpg');
cd(path);
I=imread([path filename]);
% I=double(I);

figure(1);
imshow(I,[]);
drawnow;

pach=input('Pachymetria?');
[x y]=ginput(2);
length=sqrt((x(2)-x(1))^2 + (y(2)-y(1))^2);

micronsperpixel=pach/length;
%field=400;
% numofpixels=size(I,2);
% micronsperpixel=field/numofpixels;

[x1 y1]=ginput(2);
length1=sqrt((x1(2)-x1(1))^2 + (y1(2)-y1(1))^2);
foamlayer=length1*micronsperpixel
```

## Παράρτημα 4 (Κατασκευή fractal δομής)

```
clear all;
close all;
numoflevels=11;

image=zeros(2^numoflevels);

for k=1:numoflevels
    temp=randn(2^k);
    temp=imresize(temp, 2^(numoflevels-k), 'bicubic');
    image=image+temp;
    figure(1);
    imshow(temp,[])
    figure(2);
    imshow(image,[])
end

figure(3);
imshow(image,[])

noisy=image;
noisy=noisy/max(max(noisy));
save noisy noisy
```

## Παράρτημα 5 (Χωρικό φιλτράρισμα fractal δομής)

```
clear all;
close all;

load noisy
numofpoints=length(noisy);
fieldsize=6;
I=noisy;

figure(2);
imshow(I,[]);

fI=fft2(I);
figure(1);
pspec=fI.*conj(fI);
imshow(log(fftshift(pspec)), []);
mask=zeros(size(fI));

j=1;
% for j=1:1

centfreq=52-j;
sigmafreq=0.00021; %0.021-0.002*j;
a=1;

centfreq2=0;
sigmafreq2=10.1;
a2=1;

maxfreq=1/(fieldsize/length(I));
freqperpixel=maxfreq/length(fI);
maskarray = linspace(-maxfreq/2,maxfreq/2,length(fI));
[X,Y] = meshgrid(maskarray);
norm_array = sqrt(X.*X+Y.*Y);

mask = a*exp(-sigmafreq*(norm_array-centfreq).^2);
mask2 = a2*exp(-sigmafreq2*(norm_array-centfreq2).^2);
mask2 = mask2/(max(max(mask2)));
mask2 = 1-mask2;

% mask=mask+mask2;
figure(3);
imshow(mask,[]);

ffI=mask2.*mask.*fftshift(fI);
ffI=fftshift(ffI);
```

```

% figure(17);
% imshow(log(fftshift(ffl*conj(ffl))), []);

filtered=ifft2(ffl);
filtered=real(filtered);
filtered=filtered/sum(sum(filtered));
% filtered=filtered.^2;
filtered=filtered-min(min(filtered));
filtered=filtered/max(max(filtered));

mask3 = norm_array<0.5*maxfreq;
filtered=filtered.*mask3;
figure(4);
imshow(filtered,[])

% concat=[mask filtered];
% figure(5);
% imshow(concat,[])
% f(j)=getframe;

% end

wavefront=filtered;
save wavefront wavefront;

```

## Παράρτημα 6 (Διάδοση μετώπου κυματος μέσα από φιλτράρισμένη δομή fractal)

```
clear all;
close all;

field_size=32;
pupil_diam=0.1;
imagemm=8;
modeldiopters=60;

padfactor=16;
wavelength=0.6;

load wavefront;

wavefront=wavefront(1:size(wavefront,2), 1:size(wavefront,2));
figure(4); hist(wavefront,255);

wavefront=imresize(wavefront, field_size/length(wavefront),'bicubic');
micronsperpixel=imagemm*1000/field_size;

wavefront=0*wavefront;

wavefront=0+1.911*wavefront;

spataxis=linspace(-imagemm/2, imagemm/2, field_size);
[x,y]=meshgrid(spataxis,spataxis);
mask=zeros(field_size);
mask=sqrt(x.^2+y.^2);
mask=(2/(sqrt(2)*imagemm))*msk;
mask2=im2bw(mask,pupil_diam/(1*(sqrt(2)*imagemm)));
mask2=1-mask2;

wavefront=mask2.*wavefront;
figure(1);
imshow(wavefront,[]);

backscatter=0;
transparency=1+(1-backscatter)*wavefront;
pupilfunc = transparency.*exp(-i*2*pi*wavefront/wavelength);

Hamp=fft2(pupilfunc, padfactor*field_size,padfactor*field_size);
Hint=(Hamp .* conj(Hamp));
PSF = fftshift(Hint);

PSF = PSF/sum(sum(PSF));
max(max(PSF))

plotdimension = field_size*(180/pi)*wavelength*0.001/(2*imagemm);
```

```
axisPSF = linspace(-plotdimension/2,plotdimension/2,padfactor*field_size);  
[x,y] = find(PSF==max(max(PSF)));  
step = axisPSF(2)-axisPSF(1);  
axisPSF = axisPSF-0.5*step;  
axisPSF(0.5*(padfactor*field_size)+1) = 0;
```

```
figure(2)  
plot(axisPSF,PSF((length(PSF)/2),:))
```

```
figure(34);  
imshow(PSF,[0 0.0001*max(max(PSF))])
```

```
save PSF PSF  
save axisPSF axisPSF
```