

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ



Ένα φυσικό μοντέλο που προσομοιώνει την σκέδαση στον κερατοειδή μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής βασισμένο σε μικροσφαιρίδια γυαλιού εμποτισμένα σε διάλυμα κολλαγόνου.'

ΓΙΑΝΝΗΣ ΣΓΟΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΡΙΛΑΟΣ ΓΚΙΝΗΣ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ 2005-2006







ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ



Ένα φυσικό μοντέλο που προσομοιώνει την σκέδαση στον κερατοειδή μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής βασισμένο σε μικροσφαιρίδια γυαλιού εμποτισμένα σε διάλυμα κολλαγόνου.'

### ΓΙΑΝΝΗΣ ΣΓΟΥΡΟΣ

### 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. Ζαχαράκη Ιωάννη
- 3. Ταρουδάκη Μιχαήλ

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ 2005-2006



#### Περίληψη

Η ποιότητα της όρασης, καθορίζει σε ένα μεγάλο βαθμό και την ποιότητα ζωής κάθε ανθρώπου. Το οπτικό σύστημα του οφθαλμού είναι υπεύθυνο για την λήψη της οπτικής πληροφορίας και η ποιότητα του, θέτει ένα κατώφλι στην ποιότητα όρασης κάθε ανθρώπου. Σε νέους και υγιείς οφθαλμούς τα οπτικά στοιχεία του οφθαλμού είναι διάφανα στην ορατή Η/Μ ακτινοβολία, και η ποιότητα του σχηματιζόμενου στον αμφιβληστροειδή ειδώλου, περιορίζεται από τις εκτροπές που αυτά εισάγουν. Πιθανοί τραυματισμοί και ηλικιακές μεταβολές των δομών του οφθαλμού, οδηγούν σε απώλεια της διαύγειας τους και κατ' επέκταση στην σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας. Η σκέδαση, αποτελεί επίσης ένα αναπόφευκτο επακόλουθο των διαθλαστικών επεμβάσεων, που πραγματοποιούνται στις μέρες μας για την διόρθωση των διαθλαστικών σφαλμάτων (και πρόσφατα των οπτικών εκτροπών υψηλής τάξης) του ανθρώπινου οφθαλμού. Η κατανόηση των μηχανισμών σκέδασης, είναι ένα θέμα που συγκεντρώνει το ενδιαφέρον της παγκόσμιας ερευνητικής κοινότητας.

Σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι η μελέτη του φαινομένου της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό. Ειδικότερα, προτείνεται ένα νέο φυσικό μοντέλο, που προσομοιώνει την σκέδαση στον ανθρώπινο οφθαλμό, μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής. Το μοντέλο, αποτελείται από μικροσφαιρίδια γυαλιού εμποτισμένα σε διάλυμα υδρογέλης, η οποία αποτελείται από κολλαγόνο δέρματος χοίρου και πολυσακχαρίτη (κ-καραγινάνη). Στα πλαίσια της μελέτης του φαινομένου της σκέδασης που το εν λόγω μοντέλο παράγει, αναπτύχθηκαν διατάξεις για την αντικειμενική μέτρηση της σκέδασης, διατάξεις για την μέτρηση της *in vivo* στον ανθρώπινο οφθαλμό, ενώ τέλος πραγματοποιηθήκαν και υποκειμενικές μετρήσεις που βασίζονται σε ψυχοφυσικές μεθόδους.

Η αντικειμενική μέτρηση της σκέδασης βασίστηκε σε πειραματικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν, και αφορούσαν μετρήσεις της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας μετά από απλή διέλευση της από το υπό εξέταση δείγμα. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις που βασίζονται στην αρχή της διπλής διέλευσης, τροποποιώντας οπτική διάταξη (αναλυτής μετώπου κύματος Wavelight Allegretto) που υπήρχε ήδη στο εργαστήριο του B.Ε.Μ.Μ.Ο για κλινική χρήση. Παράλληλα, αναπτύχθηκε πειραματική διάταξη για την μέτρηση της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό *in vivo*, η αρχή της οποίας βασίζεται

3

στην ανάλυση της εικόνας που δημιουργείται από την ανάκλασης της Η/Μ ακτινοβολίας από την οπίσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού. Τέλος, με την συσκευή C-Quant 80000 (Tom van den Berg, Oculus), πραγματοποιήθηκαν υποκειμενικές μετρήσεις της σκέδασης σε εξεταζόμενους, που φορούσαν φακούς επαφής που περιείχαν μικροσφαιρίδια γυαλιού, και οι οποίοι αναπτύχθηκαν με την βοήθεια της Menicon για τους σκοπούς της εργασίας αυτής.

Μια γραμμική σχέση βρέθηκε να συνδέει το BR (ποσοστό της Η/Μ ακτινοβολίας που δεν συναντά κανένα σκεδαστή κατά την διέλευση της από το σκεδάζον μέσο), με την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων στα υπό εξέταση δείγματα. Η σχέση αυτή επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με μια δεύτερη πειραματική διάταξη, και η οποία έδινε την δυνατότητα μελέτης του προφίλ της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Οι μετρήσεις διπλής διέλευσης, έδειξαν μια επίσης γραμμική σχέση του BR με την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων. Οι διαφορές στα αποτελέσματα των μετρήσεων απλής και διπλής διέλευσης δεν ξεφεύγουν από την αναμενόμενη απόκλιση των τιμών λόγω διαφορετικής προσέγγισης και αντιμετώπισης του φαινομένου της σκέδασης. Οι φακοί επαφής που περιείχαν μικροσφαιρίδια γυαλιού, χαρακτηρίστηκαν με πειράματα απλής διέλευσης, και βρέθηκαν να αναπαράγουν μικρά ποσοστά σκέδασης. Οι ψυγοφυσικές μετρήσεις, ανέδειξαν επίσης τα μικρά αυτά ποσοστά σκέδασης που οι φακοί επαφής εισάγουν στο οπτικό σύστημα του ανθρώπινου οφθαλμού. Η σύγκριση αντικειμενικών και υποκειμενικών μετρήσεων ήταν ποιοτική και όχι ποσοτική λόγω διαφορετικών μετρικών που οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν για την εκτίμηση της σκέδασης. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν in vivo στον ανθρώπινο οφθαλμό, έδειξαν ότι με μικρές τροποποιήσεις της διάταξης που αναπτύχθηκε, μπορεί η προτεινόμενη μέθοδος να χρησιμοποιηθεί ως μια νέα τεχνική εκτίμησης της σκέδασης in vivo.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, έδειξαν ότι το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο, με τις κατάλληλες συγκεντρώσεις μικροσφαιριδίων, μπορεί να αναπαραγάγει ποιοτικά και ποσοτικά, σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας, αντίστοιχη με αυτή που εμφανίζεται στον ανθρώπινο οφθαλμό μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής. Επιπλέον τα αποτελέσματα των μετρήσεων στους φακούς επαφής, έδειξαν ότι αναπαράγουν ποσοστά σκέδασης, αντίστοιχα με αυτά που εμφανίζονται στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης παθολογικών καταστάσεων του οφθαλμού. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται ποιοτικά και από τις υποκειμενικές μετρήσεις. Τέλος, τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν *in vivo*, άφησαν ενθαρρυντικά στοιχεία, για την χρήση της εν λόγω μεθόδου ως μια νέα τεχνική εκτίμησης της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό.

#### Summary

Decreased quality of vision, may be detrimental for the quality of life. The optical system of the eye, is responsible for the formation of the retinal image, and the quality of the optical system of the eye, determines the quality of vision. In young and healthy eyes, cornea and crystalline lens are practically transparent and the image formed in the retina, is mainly affected by aberrations and diffraction from the pupil. Pathologies, injuries and age related changes in the optical system of the eye can raise scatter phenomena, that possibly have an impact on visual performance. Light scatter, is also an outcome of the refractive surgery, which in our days is often used for the correction of refractive errors of the eye Light-tissue interaction is an interesting subject for scientific community in vision science.

Aim of this thesis, is the study of light scatter in the human eye. A new physical model is proposed, based on glass microspheres (Jaygo Co.) dissolved in 20% collagen solution. Collagen solution consists of collagen from porcine skin and Carraggeenan Kappa. Objective single pass measurements were performed on scatter samples of the new model, with optical setups that were developed for the purpose of this thesis. Analyzing the 4<sup>th</sup> Purkinje image, is considered to be a new promising method, that was developed for scatter measurement *in vivo*. In addition psychophysics measurements of light scatter were performed, in contact lenses containing microspheres, developed by Menicon Co. This model may be used for the calibration of scatter-measuring systems as well as for future psychophysical measurements.

Objective scatter measurements were performed based on optical setups that were developed, and scattered light was measured after a single pass from the scattering medium. Scattering samples of different thickness, consisted of glass microspheres, dissolved in collagen solution, in different concentrations. Scatter contact lenses were also developed from Menicon Co., containing glass microspheres. Double pass measurements performed, using a modified commercial wavefront analyzer, *Wavelight Allegretto* available in the V.E.I.C (Vardinogianion Eye Institute of Crete) for clinical use. At the same time, a new setup was developed, in order to measure light scatter in the human eye in vivo, based on analyzing 4<sup>th</sup> Purkinje image. The final step of scatter measurements was to perform psychophysics measurements of light scatter in healthy eyes, wearing scatter contact lenses with the commercial straylight meter C-Quant 80000, Oculus, kindly granted from Tom van den Berg.

A linear relation was found between BR (part of the light that does not meet any scatterer on its optical path) and microspheres concentration. This relation was validated from a second setup developed for the study of scatter profile, based on single pass measurements as well. A small deviation was found between the BR estimated from single and double pass experiments. This difference may be attributed to the different assumptions in the calculations employed in the two methods. Low scatter levels were produced from the scatter contact lenses measured by means of single pass experiments, and the results were validated from the psychophysics measurements. Objective and subjective measurements could be only qualitative and not quantitative related, due to the different metrics used. The results from *in vivo* scatter measurements showed that small modifications in the developed setup, can lead the analysis of the 4<sup>th</sup> Purkinje to a new promising method for scatter measurements in the human eye.

The results of this study showed that the proposed physical model can reproduce light scatter that is usually measured in human eyes, the first period after refractive surgery. Scatter contact lenses, reproduced light scatter that clinical often expect in the early stages in pathology eyes. These results were validated from psychophysics measurements performed with C-Quant Straylight meter. At the end, analyzing 4<sup>th</sup> Purkinje showed up to be a new promising method for the *in vivo* scatter measurement in human eyes.

## Ευχαριστίες.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, είχα την τύχη να συνεργαστώ με ανθρώπους, των οποίων η συνεισφορά και η υποστήριξη ήταν ιδιαίτερα σημαντική. Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολλούς φίλους, συναδέλφους και καθηγητές, που με βοήθησαν στην εκπόνηση της εργασίας που παρουσιάζεται σε αυτήν την διατριβή.

Αρχικά, 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..

Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω, τον Κ. Χαρίλαο Γκίνη, επιβλέποντα καθηγητή μου, σε αυτήν την εργασία. Είναι ο άνθρωπος με τον οποίο συνεργάστηκα στενά κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής διατριβής μου. Πρώτα, θα ήθελα να εκφράσω την συμπάθεια και τον θαυμασμό μου στο πρόσωπο του ως άνθρωπο, και στην συνέχεια ως επιστήμονα. Στην συνεργασία μας, ήταν πάντα πρόθυμος να με συμβουλέψει και να με καθοδηγήσει. Μέσα από τις συζητήσεις μας κατάφερε να μου διεγείρει ακόμα περισσότερο το ενδιαφέρον μου για την επιστήμη της όρασης. Οι γνώσεις που αποκόμισα από αυτήν την συνεργασία, ήταν πολλές, και πολύτιμες για την συνέχεια των σπουδών μου. Μεγάλη ήταν και η κατανόηση που έδειξε, στις δυσκολίες που αντιμετώπισα περνώντας ως μεταπτυχιακός φοιτητής, στην διαδικασία της ερευνητικής δραστηριότητας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης, τον Dirk De Brouwere, επιστημονικό συνεργάτη της ερευνητικής ομάδας του Β.Ε.Μ.Μ.Ο και οποίος εκπονεί την διδακτορική του διατριβή με θέμα την σκέδαση στον ανθρώπινο οφθαλμό. Η συνεργασία μας ήταν ιδιαίτερα εποικοδομητική ενώ η βοήθεια και οι συμβουλές του καθοριστικές για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Τέλος τους μεταπτυχιακούς φοιτητές και φίλους, που εθελοντικά συμμετείχαν σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο ολοκλήρωσης της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

## Περιεχόμενα

αγωγή9
--------

## Α. Γενικό Μέρος

## Κεφάλαιο Ι

1.1	Η σκέδαση στον ανθρώπινο οφθαλμό	
1.2	Ο κρυσταλλοειδής φακός	13
	1.2.1 Ανατομία και ιστολογία κρυσταλλοειδή φακού	14
	1.2.2 Ηλικιακές μεταβολές του φακού και σκέδαση	15
1.3	Ο κερατοειδής	18
	1.3.1 Ανατομία και ιστολογία του κερατοειδή	19
	1.3.2 Η διαφάνεια του κερατοειδή	21
	1.3.3 Η σκέδαση στον κερατοειδή	23

## Κεφάλαιο II

2.1	Η σκέδαση ως φυσική διεργασία	
2.2	Η σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας	
2.3	Η σκέδαση Mie	
2.4	Anomalous Diffraction Theory	
	2.4.1 Αριθμητικά αποτελέσματα της λύσης του μοντέλου	
2.5	Μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό	49
	2.5.1 Αντικειμενικές μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης	51
	2.5.2 Υποκειμενικές μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης	56

## Β. Γενικό Μέρος

## Κεφάλαιο ΙΙΙ

3.1	Το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο σκέδασης	61
3.2	Χαρακτηριστικά δειγμάτων	64
	3.2.1 Δείγματα υδρογέλης	64
	3.2.1.1 Δείκτης διάθλασης υδρογέλης	66

3.2.2	Δείγματα οφθαλμικής γέλης	.69
3.2.3	Φακοί επαφής	70
3.3 Μετρήσ	εις απλής διέλευσης	.72
3.3.1	Ballistic Ratio και συγκέντρωση μικροσφαιριδίων	.73
	3.3.1.1 Μετρήσεις σε δείγματα υδρογέλης	.73
	3.3.1.2 Μετρήσεις σε φακούς επαφής	.81
3.3.2	Προφίλ έντασης της σκεδαζόμενης Η/Μ ακτινοβολίας	.92

## Κεφάλαιο IV

4.1	Μετρήσεις διπλής διέλευσης	101
4.2	Η εκτροπομετρία Tscherning	101
	4.2.1 Μετρήσεις σε δείγματα υδρογέλης	103
4.3	Μετρήσεις της σκέδασης In vivo	112

## Κεφάλαιο V

5.1 Υποκειμενικές μετρήσεις της σκέδασης	
Γενικά συμπεράσματα	
Βιβλιογραφικές αναφορές	

# Εισαγωγή

Η αίσθησης της όρασης, είναι αποτέλεσμα μιας πολύπλοκης διεργασίας, που απαιτεί την συνεργασία διαφορετικών δομών του ανθρώπινου οφθαλμού και του εγκεφάλου (σχήμα 1). Στα πρώτα στάδια επεξεργασίας της οπτικής πληροφορίας, το οπτικό σύστημα του οφθαλμού, αναλαμβάνει την δημιουργία ενός ευκρινούς ειδώλου στον αμφιβληστροειδή. Η ποιότητα του ειδώλου καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά και την ποιότητα των οπτικών στοιχείων του οφθαλμού. Σε υγιείς και νέους οφθαλμούς όπου η ποιότητα των οπτικών στοιχείων είναι υψηλή, η περίθλαση και οι εκτροπές είναι αυτές που περιορίζουν την ποιότητα του ειδώλου.



Σχήμα 1: Το οπτικό μονοπάτι

Σε παθολογικές καταστάσεις του οφθαλμού, η σκέδαση της εισερχόμενης στο οφθαλμό Η/Μ ακτινοβολίας από ανατομικά χαρακτηριστικά τού, είναι ένας επιπλέον παράγοντας που αλλοιώνει την ποιότητα της όρασης. Οι παθολογικές αυτές καταστάσεις αφορούν αλλαγές της δομής των οπτικών στοιχειών, που αναπτύσσονται ως αντίδραση του οργανισμού σε ένα τραύμα είτε με την πάροδο της ηλικίας.

Σκοπός της εργασίας αυτής, είναι η μελέτη του φαινομένου της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό. Ειδικότερα, η μελέτη της σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας από τον κερατοειδή, και η ανάπτυξη ενός φυσικού μοντέλου, που να προσομοιώνει την σκέδαση στον μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής. Επιπλέον, στόχος της είναι η ανάπτυξη νέων αντικειμενικών μεθόδων μέτρησης της σκέδασης *in vitro*, σε μοντέλα σκεδαστών και *in vivo* στον ανθρώπινο οφθαλμό. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις αντικειμενικές μετρήσεις, με υποκειμενικές, που πραγματοποιήθηκαν βασιζόμενες σε ψυχοφυσικές μεθόδους μέτρησης της σκέδασης.

Α. Γενικό Μέρος

# Κεφάλαιο Ι

### 1.1 Η σκέδαση στον ανθρώπινο οφθαλμό

Το οπτικό σύστημα του οφθαλμού, όπως και κάθε οπτικό σύστημα απεικόνισης, δεν είναι τέλειο. Εισάγει εκτροπές και η ποιότητα του αμφιβληστροειδικού ειδώλου περιορίζεται από το φαινόμενο της περίθλασης. Στην πορεία διάδοσης της μέσα από τα οπτικά στοιχεία του οφθαλμού (σχήμα 1.1), η Η/Μ ακτινοβολία διασταυρώνεται με ανατομικά χαρακτηριστικά των δομών του. Η αλληλεπίδραση της με κύτταρα και κυτταρικές δομές, που έχουν διαστάσεις συγκρίσιμες ή ακόμα και μεγαλύτερες από το μήκος κύματος, προκαλεί την σκέδαση της. Οι δύο κύριες πηγές σκέδασης στο ανθρώπινο οφθαλμό, είναι ο κερατοειδής και ο κρυσταλλοειδής φακός.



Σχήμα 1.1: Το οπτικό σύστημα του ανθρώπινου οφθαλμού

### 1.2 Ο κρυσταλλοειδής φακός

Ο κρυσταλλοειδής φακός είναι ένας διάφανος ιστός του ανθρώπινου οφθαλμού. Έχοντας την δυνατότητα αλλαγής του σχήματος του, μέσα από την διαδικασίας της προσαρμογής<sup>1,2</sup>, δίνει την δυνατότητα στο ορατό φως να διαδίδεται μέσα στον ανθρώπινο οφθαλμό και να εστιάζεται<sup>3</sup> στον αμφιβληστροειδή.

### 1.2.1 Ανατομία και ιστολογία κρυσταλλοειδή φακού.

Ιστολογικά, αποτελείται από ένα μόνο είδος ιστού, τα επιθηλιακά κύτταρα. Οι ίνες του κρυσταλλοειδή φακού (φακικές ίνες) (σχήμα 1.2) που δεν αντικαθίστανται αλλά συνεχώς αυξάνονται, είναι απόγονοι αυτών των επιθηλιακών κυττάρων. Η απουσία μηχανισμού αναγέννησης των κυττάρων δεν αλλοιώνει την διαύγεια του, καθιστώντας τον οπτικά διάφανο στο ορατό φως για πολλές δεκαετίες. Αποτελείται<sup>4</sup> κατά 65% από νερό, 34% από στερεά συστατικά, διαλυτές κρυσταλλίνες & αδιάλυτα λευκωματινοειδή, και 1% από στερεά συστατικά όπως λιπίδια, ανόργανα ιόντα, υδατάνθρακες και αμινοξέα, ενώ στερείται νεύρων και αγγείων.



Σχήμα 1.2: Βασικές δομές του κρυσταλλοειδή φακού

Αναφορικά με τα οπτικά χαρακτηριστικά του, αποτελεί ένα αμφίκυρτο φακό με εμπρόσθια και οπίσθια επιφάνεια που προσεγγίζονται από παρεμβολές. Συγκριτικά με την εμπρόσθια επιφάνεια, η οπίσθια έχει μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας τόσο σε κατάσταση προσαρμογής όσο και σε κατάσταση χαλάρωσης. Η διάμετρος του ισημερινού είναι περίπου 10mm, και το πάχος του κατά μήκος του οπτικού άξονα κυμαίνεται μεταξύ των 3.5mm & 5mm, ανάλογα με την ηλικία και την κατάσταση προσαρμογής. Ένα ιδιαίτερης σημασίας χαρακτηριστικό του φακού<sup>5</sup>, είναι ο μεταβλητός δείκτης διάθλασης. Είναι μεγαλύτερος στο κέντρο με τιμή 1.406 και ελαττώνεται βαθμιαία προς την περιφέρεια για να φτάσει τελικά την τιμή 1.386. Έτσι ως οπτικό στοιχείο δεν εισάγει σφαιρική εκτροπή, συμβάλλοντας στην δημιουργία ενός ευκρινούς αμφιβληστροειδικού ειδώλου. Όσο αναφορά την διάδοση της Η/Μ ακτινοβολίας (στην περιοχή του ορατού φάσματος) μέσα από τον κρυσταλλοειδή φακό σε υγιείς και νέους ηλικιακά οφθαλμούς, αυτή γίνεται ανεμπόδιστα λόγω της εξαιρετικής διαφάνειας του<sup>6,7</sup>. Διαφάνεια που εξασφαλίζεται από την διάταξη και την διαφάνεια των φακικών ινών, το κατάλληλο ισοζύγιο αλάτων και ύδατος μεταξύ πρωτοπλάσματος των ινών και του εξωκυττάριου χώρου και την απουσία αγγείωσης.

### 1.2.2 Ηλικιακές μεταβολές του φακού και σκέδαση

Ωστόσο, τα ιστολογικά και οπτικά χαρακτηριστικά του φακού δεν παραμένουν αναλλοίωτα στον χρόνο. Έχει αναφερθεί στην διεθνή βιβλιογραφία<sup>8,9,10,11</sup> η αλλαγή της ακτίνας καμπυλότητας (εμπρόσθιας & οπίσθιας επιφάνειας), του πάχους, και του δείκτη διάθλασης του κρυσταλλοειδή φακού (σχήμα 1.3). Επιπλέον, αλλαγές σημειώνονται στην ελαστικότητα και την ευκαμψία του, επηρεάζοντας την δυνατότητα προσαρμογής, με αποτέλεσμα την εμφάνιση πρεσβυωπίας<sup>12,13,14</sup> με τις γνωστές επιπτώσεις για την ανθρώπινη όραση.





Σχήμα 1.3: i,ii) Αλλαγές στις ακτίνες καμπυλότητας (Dubbelman et al. 2001), iii) το πάχος (Dubbelman et al. 2001), iv) και το βάρος (Glasser et al. 1998) του κρυσταλλοειδή φακού με την ηλικία.

Η αυξημένη σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας ωστόσο συνδέεται είτε με αλλαγές στην ιστοχημεία του φακού λόγω ηλικίας είτε λόγω παθολογικών καταστάσεων. Κύρια πηγή σκέδασης είναι ο καταρράκτης<sup>15</sup> (σχήμα 1.4), που μπορεί να εμφανιστεί λόγω ηλικίας (π.χ μεταβολή της ιστοχημείας του φακού), παθολογικών καταστάσεων (διαβήτης, μεταβολικές παθήσεις, κληρονομικά σύνδρομα κ.α.) είτε μετά από τραύμα. Ανεξάρτητα από το είδος του καταρράκτη (πυρηνικός, φλοιώδης, οπίσθιος υποκαψικός κ.α.) ο κρυσταλλοειδής φακός χάνει την διαφάνεια του, αυξάνεται η οπτική του πυκνότητα και γίνεται θολερός και σκληρός. Η επιρροή της σκέδασης, της Η/Μ ακτινοβολίας στον φακό λόγω καταρράκτη, έχει μελετηθεί<sup>16</sup>, και έχει αναφερθεί μείωση στην φωτεινότητα (contrast) και στην ανάλυση του αμφιβληστροειδικού ειδώλου.



Σχήμα 1.4: i) Πάνω: υγιείς φακός, κάτω: θολερός φακός λόγω καταρράκτη, ii) δημιουργία θολερού ειδώλου λόγω καταρράκτη.

Από φυσικής πλευράς, οι τοπικές μεταβολές του δείκτη διάθλασης είναι η πηγή σκέδασης σε ένα οπτικό μέσο. Στον κρυσταλλοειδή φακό<sup>17</sup>, οι κρυσταλλίνες του κυτταροπλάσματος των φακικών ινών και οι μεμβράνες τους, είναι οι δύο κύριες πηγές σκέδασης. Ο μέσος δείκτης διάθλασης σε ένα ζωντανό κύτταρο εξαρτάται κυρίως από την συγκέντρωση των πρωτεϊνών. Η συγκέντρωση των πρωτεϊνών στο κέντρο του φακού είναι περίπου 32% κατά όγκο, αποδίδοντας του έναν δείκτη διάθλασης με τιμή 1.41. Οι μεμβράνες των φακικών ινών, που αποτελούνται κυρίως από φωσφολιπίδια, έχουν δείκτη διάθλασης στα 1.48. Η μορφολογία της μεμβράνης<sup>18</sup> των φακικών ινών αλλάζει δραματικά από τον φλοιό του φακού προς τον πυρήνα<sup>19</sup> (σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Σχέση χωρικής κατανομής των ινών του φακού και της σκέδασης του φωτός λόγω διαφορετικού δείκτη διάθλασης μεταξύ των μεμβρανών των ινών στην περιφέρεια και το κέντρο του φακού. Εικόνες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης (A,D) και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (B,E) των ινών του κρυσταλλοειδή φακού στην περιφέρεια (A,B) και στον πυρήνα (D,E). Σχηματικό διάγραμμα σκέδασης του ορατού φωτός, από ομοιόμορφα (C) και άτακτα κατανεμημένα (F) κέντρα σκέδασης. Η κλίμακα είναι 5μm. (*Ralph Michael et al. 2003*).

Η ομοιόμορφη διάταξη των φακικών ινών στην περιφέρεια του φακού, και η μικρή διαφορά στον δείκτη διάθλασης, μεταξύ του κυτταροπλάσματος και της μεμβράνης τους στον πυρήνα, εξηγεί την μικρή σκέδαση σε υγιής και νέους οφθαλμούς. Η ωρίμανση του φακού με την πάροδο της ηλικίας εισάγει αλλαγές τόσο στον δείκτη διάθλασης του φακού (σχήμα 1.6), όσο και στην διάταξη των φακικών ινών, ενισχύοντας φαινόμενα σκέδασης<sup>20,21</sup>.



Σχήμα 1.6: Αλλαγή του δείκτη διάθλασης του φακού με την πάροδο της ηλικίας (Dubbelman et al. 2001)

Η ποιότητα της όρασης μειώνεται, ανάλογα με την ηλικία και την έκταση των 'αλλοιώσεων' στον κρυσταλλοειδή φακό. Επιπλέον, το φαινόμενο της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό, εισάγει την πιθανότητα λανθασμένης εκτίμησης των εκτροπών του οφθαλμού<sup>22</sup>, καθώς αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά του αμφιβληστροειδικού ειδώλου (*Point Spread Function*), που κυρίως διαμορφώνονται από την περίθλαση και τις εκτροπές του οπτικού συστήματος.

### 1.3 Ο κερατοειδής

Ο κερατοειδής είναι ένας επίσης διάφανος ιστός, που καλύπτει το εμπρόσθιο τμήμα του ανθρώπινου οφθαλμού. Είναι λείος και καθαρός σαν γυαλί, αλλά ταυτόχρονα σταθερός και ανθεκτικός σαν πλαστικό. Έχει ρόλο προστατευτικό, εμποδίζοντας την είσοδο σκόνης, μικροβίων και άλλων επιβλαβών στοιχείων στο εσωτερικό του ματιού, ενώ αποτελεί το πρώτο και ισχυρότερο οπτικό στοιχείο του ανθρώπινου οφθαλμού. Παρέχει το 65% της συνολικής οπτικής ισχύς του ματιού, ισχύς που κατανέμεται κυρίως στο κεντρικό κομμάτι του κερατοειδή, το οποίο είναι περισσότερο καμπύλο και πιο λεπτό από ότι το περιφερειακό τμήμα του, καθιστώντας το έτσι, ιδιαίτερα διαθλαστικό.

Ο κερατοειδής είναι ένα θεμελιώδες οπτικό στοιχείο για καλή όραση. Φιλτράρει την επικίνδυνη για το μάτι υπεριώδη (UV) ακτινοβολία, αποτρέποντας πιθανές βλάβες του αμφιβληστροειδή και του κρυσταλλοειδή φακού. Επιπλέον τα οπτικά χαρακτηριστικά του κερατοειδή (ακτίνα καμπυλότητας, αστιγματισμός κ.α.) καθορίζουν κατά κύριο λόγω της εκτροπές του ματιού και κατ' επέκταση την ποιότητα του αμφιβληστροειδικού ειδώλου.

### 1.3.1 Ανατομία και ιστολογία του κερατοειδή.

Ο κερατοειδής είναι ένα σύνολο καλά οργανωμένων κυττάρων και πρωτεϊνών. Θρέφεται από την δακρυϊκή στοιβάδα και το υδατοειδές υγρό που γεμίζει τον εμπρόσθιο θάλαμο του οφθαλμού. Σε αντίθεση με του περισσότερους ιστούς στον ανθρώπινο σώμα, δεν έχει αιμοφόρα αγγεία για να τον θρέφουν και να τον προστατεύουν από μόλυνση. Πρέπει να παραμένει διαυγείς, έτσι ώστε να επιτρέπει την ελεύθερη διάθλαση και διάδοση της Η/Μ ακτινοβολίας και η παρουσία έστω και μικροσκοπικών τριχοειδών αγγείων θα εμπόδιζε αυτήν την διαδικασία. Ιστολογικά απαρτίζεται από τρία κυρίως στρώματα (σχήμα 1.7), το επιθήλιο, το κυρίως στρώμα και το ενδοθήλιο.



Σχήμα 1.7: i) Κερατοειδής από οπτικό μικροσκόπιο, ii) σχηματική αναπαράσταση δομών του κερατοειδή.

Επιθήλιο: Αποτελεί το 10% του συνολικού πάχους του κερατοειδή, και βρίσκεται πάνω στην βασική μεμβράνη η οποία αποτελείται από ίνες κολλαγόνου τύπου IV και προσφύεται σε αυτήν με ημι-δεσμοσώματα. Απαρτίζεται από 5-7 στρώματα επιθηλιακών κυττάρων, ανάμεσα στα οποία βρίσκονται χιλιάδες νευρικές απολήξεις<sup>23</sup>, καθιστώντας

τον κερατοειδή εξαιρετικά ευαίσθητο στον πόνο όταν υφίσταται απόξεση ή γδάρσιμο. Τα επιθηλιακά κύτταρα στην βάση του επιθηλίου έχουν κυλινδρικό σχήμα ενώ τα επιφανειακά είναι πεπλατυσμένα. Το σύνολο των επιθηλιακών κυττάρων αναγεννώνται περίπου κάθε επτά ημέρες. Ο πολλαπλασιασμός αυτών των κυττάρων πραγματοποιείται κυρίως στην περιφέρεια του κερατοειδή και πιο συγκεκριμένα στο σκληροκερατοειδικό όριο, όπου βρίσκονται τα αρχέγονα κύτταρα (STEM cells). Η πορεία των επιθηλιακών κυττάρων από την μίτωση ως την απόπτωση συνοδεύεται από μετακίνηση από την περιφέρεια προς το κέντρο και από την βάση του επιθηλίου προς την επιφάνεια. Λειτουργικά, εμποδίζει την είσοδο ξένων στοιχείων, όπως είναι η σκόνη και το νερό, στο μάτι και κατ' επέκταση στα ενδώτερα στρώματα του κερατοειδή. Παράλληλα παρέχει μια λεία επιφάνεια που απορροφά οξυγόνο και άλλα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά που περιέχονται στα δάκρυα.

**Μεμβράνη του Bowman:** Ανατομικά βρίσκεται κάτω από την βασική μεμβράνη, και θεωρείται ότι η λειτουργία του περιορίζεται στην μηχανική υποστήριξη του κερατοειδή.

**Στρώμα:** Αντιπροσωπεύει περίπου το 90% του συνολικού πάχους του κερατοειδή. Η ακαμψία του εμπρόσθιου τμήματος του στρώματος διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο στην διατήρηση της καμπυλότητας του κερατοειδή<sup>24</sup>. Αποτελείται από ίνες κολλαγόνου διατεταγμένες σε στρώσεις οι οποίες έχουν διαφορετική κατεύθυνση η κάθε μία (σχήμα 1.8). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αφενός η μηχανική ισοτροπία στις κάθετες στον οπτικό άξονα κατευθύνσεις και αφετέρου εξασφαλίζεται ότι η μέση απόσταση<sup>25</sup> μεταξύ των δομικών στοιχείων του στρώματος είναι πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος του (ορατού) φωτός του οποίου καλείται να υποστηρίξει τη διάδοση (σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8: i) Διαφορετική κατεύθυνση ινών κολλαγόνου (εικόνα από οπτικό μικροσκόπιο) ii)Μέση απόσταση ινών κολλαγόνου και διάμετρος τους.

Ανάμεσα στις ίνες του κολλαγόνου υπάρχει η εξωκυττάρια ουσία η οποία κυρίως αποτελείται από γλυκοσαμινογλυκάνες στις οποίες δεσμεύεται νερό μέσω δεσμών υδρογόνου. Η συνολική περιεκτικότητα του στρώματος του κερατοειδή σε νερό είναι περίπου 80% κ.β. Στο στρώμα του κερατοειδή βρίσκονται διάσπαρτα κερατοκύτταρα.

Δεσκεμέτειος μεμβράνη: Στην εσωτερική πλευρά του κερατοειδή υπάρχει η Δεσκεμέτειος μεμβράνη η οποία είναι η βασική μεμβράνη του ενδοθηλίου του κερατοειδή.

**Το ενδοθήλιο:** Αποτελείται από μία μονοκυτταρική στρώση εξαγωνικών κυττάρων τα οποία αφενός δεν αναγεννώνται και αφετέρου παίζουν ζωτικό ρόλο στη διατήρηση της διαύγειας του κερατοειδή μέσω της άντλησης νερού από τον κερατοειδή προς τον πρόσθιο θάλαμο. Αυτή η αντλία εξασφαλίζει την πυκνή διάταξη των ινών κολλαγόνου του στρώματος σε διαδοχικές στρώσεις όπως προαναφέρθηκε. Σε περίπτωση ανεπάρκειας του ενδοθηλίου να επιτελέσει αυτή τη λειτουργία η μέση απόσταση μεταξύ των ινών του κολλαγόνου αυξάνει (οίδημα), με αποτέλεσμα τη σκέδαση και την απώλεια της διαύγειας του κερατοειδή.

#### 1.3.2 Η διαφάνεια του κερατοειδή.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε υγιείς και νέους ηλικιακά οφθαλμούς, ο κερατοειδής είναι ένας εξαιρετικά διάφανος ιστός, που επιτρέπει την ελεύθερη διάδοση της Η/Μ ακτινοβολίας στην περιοχή του ορατού. Εκτός από την απουσία αιμοφόρων αγγείων, η σύνθεση του κερατοειδή είναι σχεδόν πανομοιότυπη με αυτή του σκληρού. Σε αντίθεση με τον σκληρό, οι δομές του κερατοειδή είναι διατεταγμένες με τρόπο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιούν την σκέδαση του φωτός. Έτσι, έχει υπολογιστεί<sup>26</sup> ότι το 97% περίπου του ορατού φωτός που διέρχεται μέσα από τον κερατοειδή, διαδίδεται ανεμπόδιστα προς το εσωτερικό του οφθαλμού.

Η διαύγεια του κερατοειδή εξασφαλίζεται αρχικά από το γεγονός ότι τόσο η εξωτερική όσο και η εσωτερική επιφάνεια του επιθηλίου είναι λεία. Επιπλέον, οι ίνες κολλαγόνου, η κύρια πηγή σκέδασης στο στρώμα, είναι διατεταγμένες σχηματίζοντας ένα πλέγμα (σχήμα 1.9), με μέση απόσταση μεταξύ τους τέτοια, ώστε η καταστρεπτική συμβολή του φωτός που σκεδάζεται, να συμβαίνει προς όλες τις κατευθύνσεις πλην της κατεύθυνσης διάδοσης<sup>27</sup>. Επιπλέον οι διαστάσεις των ινών κολλαγόνου, που είναι αρκετά μικρότερες από το μήκος κύματος, συνεισφέρουν στην διαφάνεια του κερατοειδή (σχήμα 1.9).



Σχήμα 1.9: Διάταξη ινών κολλαγόνου στο πλέγμα σε διατομή, που προτείνεται από τον Maurice για την ερμηνεία της διαφάνειας το κερατοειδή. Παρουσιάζεται ένα εξαγωνικό πλέγμα, οι γραμμές που περνούν από τις ίνες αναδεικνύουν δύο διαφορετικά επίπεδα του πλέγματος. Τα βέλη μεταξύ των ινών, αναπαριστούν τις δυνάμεις που διαμορφώνουν την κανονικότητα της δομής. Το μήκος κύματος σχεδιάζεται προς σύγκριση των μεγεθών.

Βασική παράμετρος στην διαύγεια του κερατοειδή αποτελεί και ο βαθμός ενυδάτωσης του<sup>28</sup>. Το ενδοθήλιο, που βρίσκεται ανάμεσα στο στρώμα και το υδατοειδές υγρό, διαδραματίζει ένα ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο σε αυτήν την λειτουργία. Λόγω του ότι το στρώμα τείνει να απορροφήσει νερό από τον πρόσθιο θάλαμο, η κύρια λειτουργία του ενδοθηλίου είναι να αντλεί νερό από το στρώμα του κερατοειδή προς τον πρόσθιο θάλαμο, διατηρώντας σταθερή την κατάσταση ενυδάτωσης του.

Όσο αναφορά την διαύγεια του κερατοειδή σε κυτταρική βάση, υπάρχουν ενδείξεις ότι τα κερατοκύτταρα του κερατοειδή, εκφράζουν υδροδιαλυτές πρωτεΐνες συχνά ένζυμα για τον έλεγχο των οπτικών τους ιδιοτήτων. Ειδικότερα, από μετρήσεις σε κερατοειδείς κουνελιών, βρέθηκε μεγάλη ποσότητα των υδροδιαλυτών πρωτεϊνών TKT (transketolase) και ALDH1 (aldehyde dehydrogenase class 1) σε κερατοκύτταρα διάφανων κερατοειδών, και αξιοπρόσεκτα χαμηλά επίπεδα αυτών των πρωτεϊνών σε κερατοκύτταρα αδιαφανών κερατοειδών<sup>29</sup>. Τα στοιχεία αυτά, αναδεικνύουν σε κυτταρικό επίπεδο την συνεισφορά των εν λόγω πρωτεϊνών στην διαφάνεια του κερατοειδή.

### 1.3.3 Η σκέδαση στον κερατοειδή.

Στην προηγούμενη ενότητα, μελετήθηκε η κατάσταση διαφάνειας του κερατοειδή, βάση της ιστολογίας των δομών του, της διάταξη τους, αλλά και της λειτουργίας που επιτελούν στον δυναμικά μεταβαλλόμενο, ζωντανό αυτό όργανο. Παθολογικές καταστάσεις του κερατοειδή ωστόσο, μπορούν να αλλοιώσουν την διαύγεια του, ενισχύοντας φαινόμενα σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας.

Μια τέτοια κατάσταση είναι η καταστροφή μεγάλου αριθμού ενδοθηλιακών κυττάρων. Έχοντας ήδη αναφερθεί στον ρόλο που διαδραματίζει το ενδοθήλιο στην κατάσταση ενυδάτωσης του κερατοειδή, η μείωση του αριθμού των κυττάρων και η υποβάθμιση της λειτουργίας του, επιτρέπει την εισροή νερού στο στρώμα, προκαλώντας οίδημα του στρώματος. Σε μια τέτοια κατάσταση, η εξαγωνική δομή του πλέγματος των ινών κολλαγόνου καταστρέφεται (σχήμα 1.10), η μέση τιμή του δείκτη διάθλασης του κερατοειδή μειώνεται<sup>30</sup>, το πάχος του κερατοειδή αυξάνεται, και κατ' επέκταση η σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό, και δεδομένου ότι τα ενδοθηλιακά κύτταρα δεν αναγεννώνται αλλά ο αριθμός τους μειώνεται συνεχώς με την πάροδο της ηλικίας, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην διατήρηση της ακεραιότητας των ενδοθηλιακών κυττάρων κατά την διάρκεια χειρουργικών επεμβάσεων.



Σχήμα 1.10: i) Σχηματική αναπαράσταση, διαταραχής της εξαγωνικής δομής του πλέγματος των ινών κολλαγόνου, λόγω οιδήματος. Οι εξασθένιση των δυνάμεων που συγκρατούν τις ίνες παρουσιάζεται σχηματικά με τα βέλη. ii) Σχέση μεταξύ του φωτός που σκεδάζεται σε διεύθυνση αντίθετη με αυτήν της διάδοση της Η/Μ ακτινοβολίας και οιδήματος, σε κερατοειδείς κουνελιών (*Maurice, 1957*).

Αυξημένη θολερότητα του κερατοειδή, και κατ' επέκταση σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας παρατηρείται σε συνθήκες αυξημένης ενδοφθάλμιας πίεσης. Η θόλωση από μηχανική καταπόνηση συμπεραίνεται ευκολότερα όταν ο κερατοειδή είναι οιδηματώδης. Αυτό φαίνεται από το διάγραμμα του σχήματος 1.11 που ακολουθεί, και καταγράφει τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων<sup>27</sup>, του φωτός που σκεδάζεται προς τα πίσω από τον κερατοειδή κουνελιών, καθώς η ενδοφθάλμια πίεση αυξήθηκε μέσω μιας βελόνας που εισάχθηκε στο υαλώδες.



Σχήμα 1.11: Σχέση μεταξύ ενδοφθάλμιας πίεση και φωτός που σκεδάζεται από τον κερατοειδή. Η ενδοφθάλμια πίεση αυξήθηκε με την εισχώρηση βελόνας στον υαλώδες (Maurice, 1957).

Μία ακόμα κατάσταση αυξημένης σκέδασης στον κερατοειδή, έχει μελετηθεί και μετρηθεί με αντικειμενική μέθοδο (*Optical Coherence Tomography*), μετά από την δημιουργία οιδήματος λόγω χρήσης φακών επαφής<sup>31</sup>. Ειδικότερα, η σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας από τον κερατοειδή, σε διεύθυνση αντίθετη με αυτήν της διάδοσης, αυξάνεται στο επιθήλιο και το οπίσθιο τμήμα του στρώματος του κερατοειδή κατά την διάρκεια ανάπτυξης του οιδήματος. Ωστόσο, η οιδηματώδης κατάσταση του κερατοειδή είναι παροδική. Με την αφαίρεση του φακού και την πάροδο του χρόνου, το οίδημα υποχωρεί, η σκέδαση μειώνεται (σχήμα 1.12 i) και τελικά επανέρχεται στα φυσιολογικά επίπεδα (σχήμα 1.12 ii).



Σχήμα 1.12: i) Γραμμική μείωση της σκέδασης στον κερατοειδή με την αποκατάσταση του οιδήματος, ii) Αποκατάσταση της σκέδασης με την πάροδο του χρόνου. (Στον οριζόντιο άξονα, είναι οι διαφορετικές τομές του κερατοειδή που μετρήθηκαν από το επιθήλιο μέχρι τον οπίσθιο στρώμα)

Αυξημένη σκέδαση στον κερατοειδή παρατηρείται επίσης μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής. Ανεξάρτητα από την μέθοδο που ακολουθείται (PRK, LASIK, EPI-LASIK) για την διόρθωση του διαθλαστικού σφάλματος, η κατάσταση αυξημένης σκέδασης (σε διαφορετικό βαθμό ανάλογα με την μέθοδο) στον κερατοειδή είναι ένα αναπόφευκτο γεγονός, που επηρεάζει την ποιότητα της όρασης των ασθενών, τουλάχιστον στα πρώτα στάδια αποκατάστασης της όρασης τους.

Η επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή<sup>32</sup> (*PhotoRefractive Keratectomy*, PRK) είναι μια τεχνική όπου το επιθήλιο του κερατοειδή αφαιρείται μηχανικά με απόξεση. Στην συνέχεια η στοιβάδα του Bownman και το στρώμα του κερατοειδή εκτίθενται σε κατανομή φωτοεκτομής προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή διόρθωση. Οι αλλαγές στην μορφολογία του κερατοειδή μετά από μια τέτοια επέμβαση, στο άμεσο διάστημα επούλωσης του όσο και σε βάθος χρόνου<sup>33</sup> είναι σημαντικές. Ο Torben Møller -Pedersen<sup>34</sup> και οι συνεργάτες του, μελέτησαν με την βοήθεια της ομοεστιακής μικροσκοπίας της αλλαγές στην μορφολογία του κερατοειδή επέμβασης σε ένα δείγμα ασθενών για την διόρθωση μυωπίας. Σκοπός τους, ήταν να ερμηνεύσουν την διαθλαστική επέμβαση, οι 15 από τους 17 ασθενείς (ποσοστό 88%), είχαν μια βαθμιαία αύξηση της σκέδασης στον κερατοειδή μέχρι τον τρίτο μήνα. Στην συνέχεια, η θόλωση του κερατοειδή υποχώρησε

σταδιακά, για να σταθεροποιηθεί μετά από ένα χρόνο, σε επίπεδα σκέδασης ωστόσο υψηλότερα από αυτά που οι ασθενείς παρουσίαζαν προεγχειρητικά (σχήμα 1.13 B). Παράλληλα, μελετήθηκε η σχέση της θόλωσης του κερατοειδή με το βάθος αποδόμησης του στρώματος (σχήμα 1.13 C). Βρέθηκε ισχυρή συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών, αναδεικνύοντας το γεγονός ότι η διόρθωση υψηλών διαθλαστικών σφαλμάτων, συνδέεται με την ανάπτυξη μεγαλύτερης θόλωσης στον κερατοειδή.



Σχήμα 1.13: B) Εκτίμηση της θόλωσης του κερατοειδή σαν συνάρτηση του χρόνου, με χρήση ομοεστιακής μικροσκοπίας και σάρωση του σε διαφορετικά επίπεδα (Confocal Microscopy Through Focusing). Οι άδειοι κύκλοι αφορούν δύο ασθενής με μη φυσιολογικές τιμές, που αποκλίνουν από το μέσο όρο. C) Συσχέτιση της θόλωσης του κερατοειδή και του βάθους φωτοαποδόμησης. Οι άδειοι κύκλοι αφορούν τους δύο ασθενής με τις μη φυσιολογικές τιμές (O Torben Møller –Pedersen et al, 2000).

Στην προσπάθεια ερμηνείας της αυξημένης σκέδασης στον κερατοειδή, οι έρευνες έχουν συνδέσει την θόλωση του κερατοειδή με μηχανισμούς επούλωσης που αναπτύσσονται μετά από διαθλαστικές επεμβάσεις. Έτσι, βρέθηκε ένας αυξημένος αριθμός κερατοκυττάρων, με έντονη κυτταρική δραστηριότητα (παραγωγής κολλαγόνου), στο εμπρόσθιο στρώμα του κερατοειδή, με αυξημένη ανακλαστικότητα τόσο των πυρήνων τους όσο και του κυτταρικού σώματος, υποθέτοντας ότι οι ανακλάσεις σε κυτταρικό επίπεδο, είναι οι πηγές αυξημένης σκέδασης στον κερατοειδή μετά από μία επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή. Όλοι οι κερατοειδείς προεγχειρητικά έδειξαν

φυσιολογικά, αδρανή κερατοκύτταρα, με χαμηλή ανακλαστικότητα των πυρήνων τους και μη ορατές κυτταρικές διεργασίες (σχήμα 1.14 A).



Σχήμα 1.14: Μορφολογικά χαρακτηριστικά εμπρόσθιου στρώματος (πρώτα 50μm) κερατοειδή (A-D) από ένα ασθενή πριν και μετά από διαθλαστική επέμβαση PRK. A, προεγχειρητικά φυσιολογικοί πυρήνες κερατοκυττάρων, B, ένα μήνα μετά από PRK, ενεργοποιημένα κερατοκύτταρα με αυξημένη ανακλαστικότητα του πυρήνα και του κυτταρικού σώματος, C, 6 μήνες μετά από PRK, αυξημένη πυκνότητα ενεργοποιημένων κερατοκυττάρων. Η μπάρα είναι 100μm. D, 12 μήνες μετά από PRK, λιγότερο ανακλαστικοί, αδρανείς πυρήνες κερατοκυττάρων, που περιβάλλονται από ανακλαστικές εναποθέσεις.

Ένα μήνα μετά από το PRK, στο εμπρόσθιο τμήμα του στρώματος, παρουσιάζεται αυξημένη πυκνότητα κερατοκυττάρων, με αυξημένη ανακλαστικότητα τόσο στον πυρήνα όσο και στο κυτταρικό σώμα (σχήμα 1.14 B). Η κυτταρική ανακλαστικότητα ελαττώθηκε μετά από 6 μήνες, αν και η πυκνότητα των κερατοκυττάρων παρέμεινε αυξημένη σε σχέση με αυτήν προεγχειρητικά (σχήμα 1.14 C). Ένα χρόνο μετά, η πυκνότητα και η ανακλαστικότητα των κερατοκυττάρων επέστρεψαν στα φυσιολογικά επίπεδα (σχήμα 1.14 D), ωστόσο μικρές ανωμαλίες όπως διάστικτες εναποθέσεις, αναδεικνύουν την μη πλήρη αποκατάσταση του ιστού.

Όπως έγινε σαφές από την προηγούμενη παράγραφο, η ανάπτυξη επουλωτικής δραστηριότητας από τον κερατοειδή (κυρίως μέσα από την ενεργοποίηση των

κερατοκυττάρων) ως αντίδραση στην φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή, είναι η αιτία εμφάνισης αυξημένης θόλωσης και κατ' επέκταση σκέδασης. Στην προσπάθεια μείωσης της επουλωτικής δραστηριότητας στο Πανεπιστήμιο Κρήτης αναπτύχθηκε μια νέα διαθλαστική τεχνική, η LASIK<sup>35</sup> (Laser in-situ Keratomileusis). Η τεχνική αυτή συνίσταται στην δημιουργία ενός κερατοειδικού κρημνού πάγους περίπου 140μm με χρήση ειδικού εργαλείου (μικρο-κερατόμος), και στην εναπόθεση του υποκείμενου στρώματος του κερατοειδή στην κατανομή φωτοεκτομής. Ο κερατοειδικός κρημνός επανατοποθετείται στην επιφάνεια του ακτινοβολημένου στρώματος με αποτέλεσμα την ταχύτερη αποκατάσταση της όρασης και την ελαχιστοποίηση της επουλωτικής δραστηριότητας στον κερατοειδή. Μελέτες της μορφολογίας του κερατοειδή μετά από LASIK, με την βοήθεια της ομοεστιακής μικροσκοπίας<sup>36</sup>, έχουν αναδείξει την ύπαρξη μικροσωματιδίων (πιθανότατα μεταλλικής σύστασης) στο επίπεδο του κερατοειδικού κρημνού που παρουσιάζουν ανακλαστικότητα μεταβλητής έντασης (σχήμα 1.15 i), πτυχώσεις στην μεμβράνη του Bowman (σχήμα 1.15 ii), και βέβαια την ενεργοποίηση κερατοκυττάρων που εμφανίζουν ανακλαστικούς πυρήγες και κυτταρικό σώμα (σχήμα 1.15 iii)



Σχήμα 1.15: i) Ανακλαστικά μικροσωματίδια στο επίπεδο του κερατοειδικού κρημνού, την 8 ημέρα μετά την επέμβαση ii) μικροπτυχώσεις στην μεμβράνη του Bowman iii) ανακλαστικοί πυρήνες και κυτταρικά σώματα, των ενεργοποιημένων κερατοκυττάρων την 8 ημέρα μετά την επέμβαση. (Pierre-Jean Pisella et al, 2001)

Έτσι, αν και η επουλωτική δραστηριότητα του κερατοειδή με την LASIK είναι μειωμένη σε σχέση με αυτήν που εμφανίζεται μετά από επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή (PRK), η εμφάνιση μορφολογικών αλλοιώσεων είναι αναπόφευκτη. Οι αλλοιώσεις αυτές αποτελούν πηγές αυξημένης σκέδασης στον κερατοειδή, η οποία και έχει μελετηθεί από τον Ε. Berrio και τους συνεργάτες του. Με μία αντικειμενική μέθοδο<sup>37</sup> μελέτησαν ένα μικρό αριθμό ασθενών, οι οποίοι υποβλήθηκαν σε διαθλαστική επέμβαση διόρθωσης μυωπίας με την μέθοδο αυτή. Αν και το δείγμα ήταν μικρό για να θεωρηθούν τα συμπεράσματα ασφαλή, ωστόσο είναι ενδεικτικά, της αυξημένης σκέδασης στον κερατοειδή μετά από LASIK, κυρίως σε οφθαλμούς στους οποίους ασθενείς βρέθηκε να είναι κατά 30% μεγαλύτερη σε σχέση με φυσιολογικούς οφθαλμούς.

## Κεφάλαιο ΙΙ

### 2.1 Η σκέδαση ως φυσική διεργασία

Η σκέδαση, είναι εν γένει μια φυσική διεργασία όπου κάποια μορφή ακτινοβολίας, όπως το φως ή κινούμενα σωματίδια, αναγκάζονται να αποκλίνουν από την ευθύγραμμη τροχιά, λόγω ανομοιογενειών του μέσου στο οποίο διαδίδονται. Τα είδη των ανομοιογενειών που μπορούν να προκαλέσουν σκέδαση, γνωστά ως σκεδαστές ή κέντρα σκέδασης, είναι πολυάριθμα για να αναφερθούν και να κατηγοριοποιηθούν, αλλά ένα μικρό δείγμα περιλαμβάνει σωματίδια, σταγονίδια, μεταβολές της πυκνότητας σε υγρά, ατέλειες σε στερεά με κρυσταλλική δομή και κύτταρα σε ιστούς. Η επίδραση τέτοιων δομών στον οπτικό δρόμο κύματος ή σωματιδίου, μπορεί να περιγραφεί από την θεωρία της σκέδασης.

Ανάλογα με το είδος της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τους σκεδαστές, η σκέδαση κατηγοριοποιείται σε ελαστική και ανελαστική. Η ελαστική σκέδαση περιλαμβάνει την μηδενική (ή πολύ μικρή) ανταλλαγή ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας με τον σκεδαστή. Η ανελαστική σκέδαση αντίθετα περιλαμβάνει την μεταβολή της ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Αυτοί οι όροι προέρχονται από την κινητική θεωρία κρούσης στερεών σωμάτων, που συχνά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση της σκέδασης.

Εάν η ακτινοβολία υποστεί μερική ή ολική απώλεια ενέργειας κατά την αλληλεπίδραση της με σκεδαστές, η διεργασία είναι γνωστή ως απορρόφηση. Στην κλασσική φυσική η απορρόφηση και η σκέδαση αντιμετωπίζονται ως διαφορετικά φαινόμενα, ενώ στην κβαντική φυσική η απορρόφηση αντιμετωπίζεται ως μια μορφή σκέδασης. Για την ακρίβεια, η απορρόφηση δεν μπορεί να υπάρξει χωρίς κάποιο βαθμό σκέδασης και η σκέδαση σχεδόν σπάνια είναι ελαστική. Σε μακροσκοπικό επίπεδο ωστόσο, είναι σύνηθες η απορρόφηση και η σκέδαση να λαμβάνουν χώρα χωρίς κάποια αλληλεπίδραση μεταξύ τους, και έτσι αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητες φυσικές διεργασίες.

Μια άλλη κατηγοριοποίηση της σκέδασης είναι αυτή της απλής και της πολλαπλής σκέδασης. Όταν η ακτινοβολία σκεδάζεται μόνο από ένα κέντρο σκέδασης,

κατά την διάδοση της σε ένα μέσο που περιέχει σκεδαστές, έχουμε την περίπτωση της απλής σκέδασης. Είναι πολύ συχνό φαινόμενο, κέντρα σκέδασης να ομαδοποιούνται, και σε τέτοιες περιπτώσεις η ακτινοβολία μπορεί να σκεδαστεί πολλές φορές, οπότε και έχουμε την περίπτωση της πολλαπλής σκέδασης. Η κύρια διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων της απλής και της πολλαπλής σκέδασης, είναι ότι η απλή μπορεί να μελετηθεί ως ένα τυχαίο φαινόμενο, ενώ η πολλαπλή μπορεί να μοντελοποιηθεί και να υπολογιστεί. Στην απλή σκέδαση, η ακριβής θέση ενός κέντρου σκέδασης μικροσκοπικών διαστάσεων, δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί σε σχέση με την διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, και το αποτέλεσμα που εξαρτάται ισχυρά από την ακριβή τροχιά της ακτινοβολίας, εμφανίζεται τυχαίο στον παρατηρητή. Γι' αυτό και η απλή σκέδαση συχνά περιγράφεται από κατανομές πιθανότητας. Στην πολλαπλή σκέδαση, η τυχαιότητα της αλληλεπίδρασης τείνει να αντισταθμιστεί από τον μεγάλο αριθμό συμβάντων σκέδασης. Έτσι, η κατανομή έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας μπορεί να μοντελοποιηθεί και να υπολογιστεί χωρίς την βοήθεια της στατιστικής.

### 2.2 Η σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας

Τα ηλεκτρομαγνητικά (H/M) κύματα, είναι από τα πλέον γνωστά και εκείνα που περισσότερο συχνά υπόκεινται σε φαινόμενα σκέδασης. Η σκέδαση του φωτός είναι μία από τις δύο κύριες διεργασίες (η δεύτερη είναι η απορρόφηση) που συνεισφέρουν στην ορατή εμφάνιση των περισσοτέρων αντικειμένων που μας περιβάλλουν. Οι επιφάνειες των αντικειμένων που τις αντιλαμβανόμαστε λευκές, οφείλουν την εμφάνιση τους σχεδόν αποκλειστικά στην σκέδαση του φωτός από την επιφάνεια του αντικειμένου. Επιπλέον, μπορεί να δώσει χρώμα σε ορισμένα αντικείμενα, συνήθως αποχρώσεις του μπλε, όπως συμβαίνει με τον ουρανό και την ίριδα του ανθρώπινου οφθαλμού.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η σκέδαση της ακτινοβολίας μπορεί να είναι ελαστική ή ανελαστική. Στην περίπτωση της Η/Μ 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*. Στην

ανελαστική σκέδαση, λόγω αλλαγής της ενέργειας των φωτονίων, η σκεδαζόμενη ακτινοβολία υπόκεινται σε αλλαγή του μήκους κύματος πέραν της αλλαγής της τροχιάς της. Φαινόμενα ανελαστικής σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας περιγράφουν τα μοντέλα σκέδασης κατά *Brillouin, Raman* και *Compton*. Στις επόμενες παραγράφους, θα ασχοληθούμε μόνο με τις περιπτώσεις ελαστικής σκέδασης, κατηγορία στην οποία ανήκει και η σκέδαση του φωτός ανθρώπινο οφθαλμό, καθώς η πλήρης ανάλυση της θεωρίας της σκέδασης ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

Η σκέδαση **Rayleigh**, είναι μια διεργασία όπου η Η/Μ ακτινοβολία (συμπεριλαμβανομένου του φωτός) σκεδάζεται από ένα μικρό σφαιρικό όγκο μεταβλητού δείκτη διάθλασης, όπως ένα σωματίδιο, ένα σταγονίδιο ή ακόμα και μεταβολές πυκνότητας. Για να εφαρμοστεί αυτό το μοντέλο σκέδασης, η σφαίρα πρέπει να είναι μικρότερη σε διάμετρο από το μήκος κύματος (λ) του σκεδαζόμενου κύματος. Τυπικά το ανώτερο όριο είναι το 1/10 του μήκους κύματος. Σε αυτή την περιοχή μεγεθών, το ακριβές σχήμα του κέντρου σκέδασης δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό και μπορεί να αντιμετωπισθεί σαν μια σφαίρα ισοδύναμου όγκου. Ο συντελεστής σκέδασης και κατ' επέκταση η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός, είναι αντιστρόφως ανάλογος με την τέταρτη δύναμη του μήκους κύματος. Έτσι, η ένταση *I* του σκεδαζόμενου φωτός από ένα μικρό σωματίδιο, μιας δέσμης μη πολωμένου φωτός με μήκος κύματος λ και ένταση *Iο* δίνεται από την σχέση:

$$I = Io \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \left(\frac{d}{2}\right)^6$$
(2.1)

όπου *R* είναι η απόσταση από το σωματίδιο,  $\theta$  η γωνία σκέδασης, *n* ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου και *d* η διάμετρος του σωματιδίου. Η γωνιακή κατανομή σκέδασης σύμφωνα με το μοντέλο του Rayleigh, που καθορίζεται από τον όρο (1+cos<sup>2</sup>  $\theta$ ) είναι συμμετρική ως προς το επίπεδο που είναι κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, και έτσι η κατανομή είναι ίδια στην διεύθυνση διάδοσής και αντίθετα σε αυτήν (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Κατανομή σκέδασης της ακτινοβολίας κατά Rayleigh.

Ολοκληρώνοντας σε μια σφαίρα γύρω από το κέντρο σκέδασης, η ενεργός διατομή σκέδασης  $\sigma_s$ , σύμφωνα με το μοντέλο του Rayleigh είναι:

$$\sigma_s = \frac{2\pi^5}{3} \frac{d^6}{\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \tag{2.2}$$

Ο συντελεστής σκέδασης για μια ομάδα σωματιδίων - σκεδαστών είναι ο αριθμός των σωματιδίων N ανά μονάδα όγκου επί την ενεργό διατομή σκέδασης σ.

### 2.3 Η σκέδαση Mie

Στις προηγούμενες παραγράφους αυτής της ενότητας, έγινε μια απλή αναφορά στην σκέδαση ως φυσική διεργασία, και τα θεωρητικά μοντέλα που την περιγράφουν φορμαλιστικά. Στην συνέχεια, γίνεται μια εκτενή αναφορά στο μοντέλο σκέδασης *Mie*, που περιγράφει την σκέδαση της H/M ακτινοβολίας από σωματίδια με διάμετρο συγκρίσιμο με το μήκος κύματος. Σε αυτό το μοντέλο, το σχήμα των κέντρων σκέδασης παίζει ένα σημαντικό ρόλο και η θεωρία βρίσκει καλή εφαρμογή σε σφαίρες, και με κάποιες τροποποιήσεις σε σφαιροειδή και ελλειψοειδή. Δεδομένου ότι η σκέδαση Mie περιγράφει την σκέδαση του φωτός από ομογενής σφαίρα, η διεργασία αυτή δεν μπορεί να αντιμετωπισθεί πέρα από την λύση των εξισώσεων Maxwell, με τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Ας θεωρήσουμε το σύστημα συντεταγμένων που περιγράφεται στο σχήμα 2.2. Οι σφαιρικές συντεταγμένες ενός σημείου P, συμβολίζονται με  $(r, \theta, \varphi)$  ενώ το διάνυσμα OP με τις καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z).



Σχήμα 2.2: Σύστημα συντεταγμένων

Η βαθμωτή κυματική εξίσωση,

$$\Delta \psi + k^2 m^2 \psi = 0 \tag{2.3}$$

όπου k είναι το κυματοδιάνυσμα και m ο δείκτης διάθλασης του μέσου στο οποίο διαδίδεται το κύμα, σε αυτές τις μεταβλητές μπορεί να λυθεί με την μέθοδο χωρισμού των μεταβλητών και έχει λύσεις της μορφής

$$\psi_{ln} = \frac{\cos l\varphi}{\sin l\varphi} P_n^l(\cos \theta) z(mkr)$$
(2.4)

όπου n και lείναι δείκτες που ικανοποιούν την σχέση

$$n \ge l \ge 0 \tag{2.5}$$

ο δεύτερος όρος είναι τα πολυώνυμα Legendre και ο τρίτος μπορεί να είναι οποιαδήποτε συνάρτηση Bessel σε σφαιρικές συντεταγμένες. Για το πρόβλημα της σκέδασης ενός επίπεδου μετώπου κύματος από μια ομοιογενή σφαίρα, και για λόγους απλοποίησης των συμβολισμών, θεωρούμε ότι το μέσο στο οποίο διαδίδεται η Η/Μ ακτινοβολία είναι το

κενό, έχει δείκτη διάθλασης  $m_2 = 1$ , και το υλικό από το οποίο αποτελείται η σφαίρα δείκτη διάθλασης m. Θεωρούμε το πεδίο γραμμικά πολωμένο. Το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων είναι στο κέντρο της σφαίρας, η άξονας z κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, και ο άξονας x στο επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 2.3: Σύστημα συντεταγμένων όπου το κέντρο της σφαίρας βρίσκεται στην αρχή των αξόνων και άξονας x βρίσκεται στο επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου Ε

Το προσπίπτων κύμα με μοναδιαίο πλάτος μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση

$$E = a_x e^{-ikz + i\omega t} \tag{2.6}$$

και ικανοποιεί την κυματική εξίσωση 2.3. Μπορεί να αποδειχτεί<sup>38</sup> (αλλά ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της εργασίας) ότι το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις

$$u = e^{i\omega t} \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} P_n^1(\cos \theta) j_n(kr)$$
(2.7)

$$\upsilon = e^{i\omega t} \sin \varphi \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} P_n^1(\cos \theta) j_n(kr)$$
(2.8)

όπου  $j_n$  είναι η συνάρτηση Bessel σε σφαιρικές συντεταγμένες που προκύπτει από την Bessel πρώτης τάξης,  $J_{n+1/2}$ . Η μορφή αυτή του προσπίπτων κύματος, ορίζει και την μορφή των λύσεων. Το πεδίο έξω από την σφαίρα αποτελείται από το προσπίπτων κύμα

και το σκεδαζόμενο. Εφαρμόζοντας τις συνοριακές συνθήκες, το πεδίο που σκεδάζεται δίνεται από τις σχέσεις

$$u = e^{i\omega t} \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} -a_n (-i)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} P_n^1(\cos \theta) h_n^2(kr)$$
(2.9)

$$u = e^{i\omega t} \sin \varphi \sum_{n=1}^{\infty} -b_n (-i)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} P_n^1(\cos \theta) h_n^2(kr)$$
(2.10)

Αυτές οι σειρές, περιλαμβάνουν λύσεις με l=1, όπως οι σειρές του προσπίπτων κύματος, και  $a_n, b_n$  είναι οι συντελεστές που πρέπει να υπολογιστούν. Οι συνάρτηση Bessel  $h_n^2(kr)$  προκύπτει από την συνάρτηση Bessel δεύτερης τάξης  $H_{n+1/2}^2(kr)$  και επιλέχθηκε λόγω της ασυμπτωτικής συμπεριφοράς

$$h_n^2(kr) \sim \frac{i^{n+1}}{kr} e^{-ikr}$$
 (2.11)

όπου αναπαριστά ένα σφαιρικό κύμα, όπως απαιτείται για το σκεδαζόμενο κύμα. Ομοίως, το πεδίο μέσα στην σφαίρα δίνεται από τις εξισώσεις

$$u = e^{i\omega t} \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} mc_n (-i)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} P_n^1(\cos \theta) j_n(mkr)$$
(2.12)

$$\upsilon = e^{i\omega t} \sin \varphi \sum_{n=1}^{\infty} m d_n (-i)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} P_n^1(\cos \theta) j_n(mkr)$$
(2.13)

Εδώ οι συντελεστές  $c_n$  και  $d_n$  είναι ένα ακόμα ζευγάρι μεταβλητών που πρέπει να υπολογιστούν, και η επιλογή της συνάρτησης  $j_n(mkr)$  βασίζεται στο ότι ο δείκτης διάθλασης m και το πεδίο είναι πεπερασμένα στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Η εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών κατά περίπτωση, οδηγεί στον πλήρη καθορισμό των λύσεων της θεωρίας του Mie.
## 2.4 Anomalous Diffraction Theory

Όπως έγινε αντιληπτό από την προηγούμενη ενότητα, το μοντέλο του Mie για την σκέδαση, δίνει ως λύσεις εν γένει πολύπλοκες συναρτήσεις. Ο καθορισμός των παραμέτρων αυτών των λύσεων γίνεται κάθε φορά με βάση τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε προβλήματος (ακριβές μέγεθος & σχήμα σκεδαστών, δείκτης διάθλασης, ενεργός διατομή σκέδασης, απορρόφηση κ.α). Στην συνέχεια, περιγράφεται 'η θεωρία της ανώμαλης περίθλασης' (που ανήκει στην κατηγορία σκέδασης Mie), μοντέλο που προσεγγίζει ικανοποιητικά την σκέδαση του φωτός στον κερατοειδή (από δομές όπως κερατοκύτταρα, ανωμαλίες στην δομή του κολλαγόνου κ.α που περιγράφησαν σε προηγούμενες ενότητες) μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής, και το οποίο χρησιμοποιήθηκε για υπολογισμούς προσομοίωσης την σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

Στην σκέδαση Η/Μ ακτινοβολίας από σωματίδια πολύ μεγάλα σε σχέση με το μήκος κύματος, το προσπίπτων επίπεδο μέτωπο κύματος, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από οπτικές ακτίνες, όπου η κάθε μία διανύει το δικό της οπτικό μονοπάτι. Έτσι, οι ακτίνες που χτυπάνε το σωματίδιο και αυτές που περνάνε κατά μήκος του δημιουργούν δύο διαφορετικά φαινόμενα.

Ι. Ανάκλαση και διάθλαση. Οι ακτίνες που χτυπούν την επιφάνεια του σωματιδίου ανακλώνται και διαθλώνται μερικώς. Το φως που διαθλάται, μπορεί να εξέρθει από το σωμάτιο μετά από μια ακόμα διάθλαση και ενδεχομένως πολλές εσωτερικές ανακλάσεις. Έτσι, το φως που ανακλάται από την επιφάνεια του σωματιδίου και αυτό που εξέρχεται έχοντας διέλθει από το εσωτερικό του, συνεισφέρουν στην συνολική σκέδαση από το κέντρο σκέδασης. Η ενέργεια που δεν εξέρχεται από το σωμάτιο σκεδαστή, χάνεται λόγω απορρόφησης. Προφανώς, το ποσοστό της ενέργειας που απορροφάται ή σκεδάζεται καθώς και η γωνιακή κατανομή και η πόλωση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, εξαρτάται από την μορφή και την σύνθεση του σωματιδίου και την κατάσταση της επιφάνειας του.

**Π.** Περίθλαση. Οι ακτίνες που περνούν κατά μήκος του σωματιδίου, σχηματίζουν ένα επίπεδο μέτωπο κύματος από το οποίο ένα τμήμα του, σε μέγεθος και σχήμα που καθορίζεται από την γεωμετρική σκιά του σκεδαστή, λείπει. Αυτό το ημιτελές μέτωπο κύματος σύμφωνα με την αρχή του Huygens' δημιουργεί φαινόμενα περίθλασης,

δημιουργώντας σε μεγάλες αποστάσεις την κατανομή έντασης Fraunhofer. Η κατανομή της περίθλασης, εξαρτάται από το μέγεθος και την μορφή του σκεδαστή, αλλά είναι ανεξάρτητη της σύνθεσης του ή την φύση της επιφάνειας του.

Τα δύο φαινόμενα που μόλις περιγράφησαν, είναι ξεχωριστά όχι μόνο λόγω της εξάρτησης τους από την φύση του σωματιδίου αλλά και στην γωνιακή κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Κρατώντας σταθερό το μέγεθος του σωματιδίου και μειώνοντας το μήκος κύματος, η κατανομή σκέδασης λόγω ανάκλασης και διάθλασης θα προσεγγίζει όλο και περισσότερο την κατανομή που προβλέπεται από την γεωμετρική οπτική. Συγχρόνως, η κατανομή περίθλασης θα περιορίζεται σε ένα στενό αλλά μεγάλης έντασης λοβό γύρω από την διεύθυνση διάδοσης,  $\theta = 0$ . Έτσι, η συνολική κατανομή σκέδασης θα αποτελείται από δύο μέρη, ένα πολύ στενό και πολύ έντονο λοβό λόγω περίθλασης (II) και μια λιγότερο έντονη ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις που εξαρτάται από της ιδιότητες του σκεδαστή. Αντίθετα αυξάνοντας το μήκος κύματος, θα φτάσουμε σε ένα στάδιο όπου οι δύο κατανομές θα είναι συγκρίσιμες σε ένταση και γωνιακή έκταση. Αυτό σημαίνει και την κατάρρευση της θεωρίας σκέδασης από μεγάλα σωματίδια, και την ανάγκη μιας περισσότερο ακριβής μεθόδου για την επίλυση του προβλήματος. Μια εξαίρεση υφίσταται στην περίπτωση σωματιδίων με δείκτη διάθλασης κοντά στην μονάδα. Για ένα εύρος μεγεθών, οι δύο κατανομές έχουν συγκρίσιμη ένταση και συνδυάζονται με φαινόμενα οπτικής συμβολής. Αυτήν την κατηγορία περιγράφει και η θεωρία της ανώμαλης περίθλασης'.

Εστιάζοντας την προσοχή μας στους περιορισμούς που θέτει η θεωρία αυτή, κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός κάποιων μεταβλητών που περιγράφουν τις ιδιότητες των σκεδαστών, και οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια, για την φορμαλιστική περιγραφή του μοντέλου. Θεωρώντας ότι το σωμάτιο σκεδαστής δεν βρίσκεται στο κενό, αλλά σε ένα μέσο με δείκτη διάθλασης  $m_2$  (πραγματικό) και η σφαίρα (ορίζοντας ταυτόχρονα και το σχήμα του σκεδαστή) έχει ένα δείκτη διάθλασης  $m_1$  (πραγματικό ή μιγαδικό). Ο δείκτης διάθλασης που χρησιμοποιείται στον φορμαλισμό που ακολουθεί δίνεται από την σχέση

$$m = m_1 / m_2$$
 (2.14)

38

το μήκος κύματος λαπό την σχέση

$$\lambda = \lambda_{\kappa \varepsilon \nu \phi} / m_2 \tag{2.15}$$

Επιπλέον ορίζεται η μεταβλητή

$$x = ka = \frac{2\pi a}{\lambda} \tag{2.16}$$

η οποία δίνει το μήκος της σφαίρας εκφρασμένο σε μήκη κύματος, ενώ *a* είναι η ακτίνα της σφαίρας. Η τρίτη παράμετρος είναι η αλλαγή φάσης που προκύπτει όταν μια φωτεινή ακτίνα περνάει μέσα από μια σφαίρα κατά μήκος της διαμέτρου της (σχήμα 2.4) και δίνεται από την σχέση

Σχήμα 2.4: Οπτικές ακτίνες που διέρχονται μέσα από την σφαίρα.

Έχοντας ορίσει τις απαραίτητες μεταβλητές μπορούμε να αναφερθούμε πλέον στους περιορισμούς που θέτει 'η θεωρία της ανώμαλης περίθλασης'. Η σκέδαση από ένα σωματίδιο, εξαρτάται από το γεγονός ότι ο δείκτης διάθλασης m του σωματιδίου διαφέρει από τον δείκτη διάθλασης του υλικού που το περιβάλλει. Έτσι, σύμφωνα με την σχέση 2.14 για m = 1 δεν υπάρχει σκέδαση, και για m κοντά στο 1 η σκέδαση είναι μικρή. Το μοντέλο που περιγράφεται σε αυτή την ενότητα βασίζεται στο γεγονός ότι η τιμή του  $\rho$  είναι σταθερή, το  $x \to \infty$  και εξετάζει την μετάβαση όπου  $m \to 1$ . Η φυσική περιγραφή των φαινομένων σε αυτό το πεδίο ορισμού των μεταβλητών, είναι η ευθύγραμμη διάδοση ενός τμήματος της ακτινοβολίας και η διαδοχική περίθλαση ενός άλλου μέρους αυτής, σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία σε αυτήν την περίπτωση συγκεντρώνεται γύρω από την διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, ενώ λαμβάνουν χώρα και φαινόμενα συμβολής μεταξύ της περιθλώμενης και της διαθλώμενης ακτινοβολίας. Τα φαινόμενα συμβολής, επηρεάζουν την κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας για όλες εκείνες τις τιμές γωνιών σκέδασης θ, για τις οποίες η συνεισφορά της περίθλασης είναι σημαντική.

Ας θεωρήσουμε το παράδειγμα μιας σταγόνας νερού (m = 4/3), με διάμετρο 3μm, που σκεδάζει ακτινοβολία με μήκος κύματος  $\lambda/2\pi = 0.1 \mu m$ . Τότε, x = 15 και η αλλαγή φάσης της κεντρικής ακτίνας είναι  $\rho = \frac{2}{3}x = 10$ . Στην συνέχεια, ας φανταστούμε μια σφαίρα με m = 7/6 και διάμετρο 6μm που εκτίθεται στην ίδια ακτινοβολία. Σε αυτήν την περίπτωση ο όρος m-1 έχει την μισή τιμή και η παράμετρος x την διπλάσια σε σχέση με το προηγούμενο παράδειγμα. Ωστόσο η αλλαγή φάσης  $\rho$  είναι ίδια και για τις δύο περιπτώσεις. Αυτό συνεπάγεται ότι η επιρροή των φαινομένων συμβολής στην κατανομή σκέδασης θα είναι όμοια. Έτσι, τα δύο παραδείγματα ορίζουν *ομόλογα* διαγράμματα σκέδασης. Το διάγραμμα στο δεύτερο παράδειγμα είναι δύο φορές πιο στενό και τέσσερις φορές πιο έντονο σε ένταση από το πρώτο, αλλά οι 'ανωμαλίες' στην κατανομή είναι ίδιες. Ο μαθηματικός φορμαλισμός αυτής της ιδέας είναι η εξής: Όταν οι όροι m-1 και θ μεταβάλλονται ανάλογα με το 1/x έτσι ώστε οι όροι

$$\rho = 2x(m-1)$$
  $\kappa \alpha i$   $z = x\theta$ 

να είναι σταθεροί, τότε οι συναρτήσεις

$$x^{-2}S_1(x,m,\theta)$$
  $\kappa\alpha\iota$   $x^{-2}S_2(x,m,\theta)$ 

προσεγγίζουν για  $x \to \infty$ ,  $m \to 1 \ \kappa \alpha \iota \ \theta \to 0$ , ένα κοινό όριο όπου είναι μια συνάρτηση του  $\rho$  και z μόνο. Αυτή η συνάρτηση συμβολίζεται ως  $A(\rho, z)$ . Οι συναρτήσεις  $S_1 \& S_2$  είναι συναρτήσεις πλάτους, που περιγράφουν το πλάτος και την φάση ενός κύματος που σκεδάζεται, λαμβάνοντας υπ' όψιν την πόλωση της Η/Μ ακτινοβολίας. Πριν προχωρήσουμε στην εύρεση της λύσης για την συνάρτηση  $A(\rho, z)$ , ας δούμε πως προκύπτουν αυτές οι συναρτήσεις πλάτους στον φορμαλισμό που ακολουθήθηκε.

Ας θεωρήσουμε ένα σωματίδιο τυχαίου σχήματος και σύνθεσης που ακτινοβολείται από ένα επίπεδο μέτωπο κύματος σύμφωνα με το σχήμα 2.5 που ακολουθεί



Σχήμα 2.5: Σωματίδιο τυχαίου σχήματος & σύνθεσης που ακτινοβολείται από ένα επίπεδο μέτωπο κύματος. Το προσπίπτων & το σκεδαζόμενο κύμα ακολουθούν διαφορετικές κατευθύνσεις.

Η διαταραχή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μπορεί να γραφτεί ως

$$u_0 = e^{-ikz + i\omega t} \tag{2.18}$$

Το σκεδαζόμενο κύμα στο μακρινό πεδίο, είναι ένα σφαιρικό μέτωπο κύματος με πλάτος αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης *r*. Έτσι, μπορεί να γραφτεί στην μορφή

$$u = S(\theta, \varphi) \frac{e^{-ikr + ikz}}{ikr}$$
(2.19)

ορίζοντας έτσι την συνάρτηση πλάτους  $S(\theta, \varphi)$  του σωματιδίου σκεδαστή. Συνδυάζοντας τις δύο προηγούμενες εξισώσεις προκύπτει ότι

$$u = S(\theta, \varphi) \frac{e^{-ikr + ikz}}{ikr} u_0$$
(2.20)

41

Η συνάρτηση πλάτους είναι εν γένει μιγαδική και μπορεί να γραφτεί ως

$$S(\theta, \varphi) = s \cdot e^{i\sigma} \tag{2.21}$$

όπου το s είναι θετικό και το σ πραγματικό, και τα δύο συναρτήσεις των θ,φ. Η φάση σ εξαρτάται από την επιλογή του συστήματος συντεταγμένων που πρέπει να γίνει εάν ληφθούν υπ' όψιν πολωμένα Η/Μ κύματα. Η γενική περίπτωση που περιλαμβάνει την επιρροή της πόλωσης, για σκέδαση προς όλες τις κατευθύνσεις περιγράφεται από τέσσερις συναρτήσεις πλάτους  $S_1, S_2, S_3$  και  $S_4$ , όλες συναρτήσεις των θ και φ, που δημιουργούν ένα πίνακα τεσσάρων στοιχείων. Έτσι, ο ορισμός της  $S(\theta, \varphi)$  πρέπει να αντικατασταθεί με την σχέση

$$\begin{pmatrix} E_l \\ E_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_2 & S_3 \\ S_4 & S_1 \end{pmatrix} \cdot \frac{e^{-ikr + ikz}}{ikr} \begin{pmatrix} E_{lo} \\ E_{ro} \end{pmatrix}$$
(2.22)

Για σφαιρικά σωματίδια ισχύει ότι  $S_3 = S_4 = 0$ , και οι συναρτήσεις  $S_1(\theta)$  και  $S_2(\theta)$ είναι συναρτήσεις μόνο της γωνίας θ, αναδεικνύοντας την κυκλική συμμετρία του προβλήματος (κεφάλαιο 4, Van de Hulst, 'Scattering by Small Particles').

Ας γυρίσουμε τώρα στο πρόβλημα του προσδιορισμού της συνάρτησης  $A(\rho, z)$ σύμφωνα με την 'θεωρία της ανώμαλης περίθλασης'. Τρεις μέθοδοι για τον υπολογισμό της ζητούμενης συνάρτησης προτείνονται από την βιβλιογραφία<sup>38</sup>.

Πρώτη Μέθοδος: Εφαρμόζοντας την αρχή του Huygens σε ένα επίπεδο V μόλις πίσω από την σφαίρα (σχήμα 2.4), με τον άξονα z να είναι στην διεύθυνση διάδοσης και η διεύθυνση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο επίπεδο zOξ, με μια μικρή γωνία ως προς τον άξονα z. Τότε η συνάρτηση πλάτους δίνεται από την σχέση

$$S(\theta) = \frac{k^2}{2\pi} \iint (1 - e^{-i\rho\sin\tau}) e^{-ik\xi\theta} d\xi dn \qquad (2.23)$$

Εδώ το ολοκλήρωμα πρέπει να υπολογιστεί σε μια επιφάνεια κύκλου ακτίνας α. Επιπλέον, η παράμετρος τ ορίζεται ως  $a^2 \cos^2 \tau = \xi^2 + n^2$ . Αλλάζοντας το σύστημα συντεταγμένων σε πολικό, με τις αντικαταστάσεις  $\xi = \alpha \cos \tau \cos \varphi$ ,  $n = \alpha \cos \tau \sin \varphi$  $d\xi dn = a^2 \cos \tau d\varphi d(\cos \tau)$  και ολοκλήρωση ως προς την γωνία φ, προκύπτει ότι

$$A(\rho, z) = S(\theta) / x^{2} = \int_{0}^{\pi/2} (1 - e^{-i\rho\sin\tau}) J_{0}(z\cos\tau)\cos\tau\sin\tau d\tau$$
(2.24)

Δεύτερη Μέθοδος: Μπορούμε επίσης να αρχίσουμε από την λύση της θεωρίας του Mie. Βρίσκοντας την ασυμπτωτική συμπεριφορά των συντελεστών  $a_n \kappa \alpha \iota \beta_n$  για  $\chi \to \infty \kappa \alpha \iota \ m \to 1$ . Το αποτέλεσμα είναι ίδιο με αυτό της πρώτης μεθόδου όσο αναφορά το ολοκλήρωμα που περιγράφει την λύση.

*Τρίτη Μέθοδος:* Μια προσεγγιστική και απλή λύση είναι να αθροίσουμε τις συναρτήσεις πλάτους για το περιθλώμενο και το διαθλώμενο φως.

$$A(\rho, z) = A_{diff}(\rho, z) + A_{trans}(\rho, z)$$
(2.25)

Η ακτινοβολία που περιθλάται από ένα αδιαφανή δίσκο ή σφαίρα δίνεται υπό αυτές τις συνθήκες (μεγάλα σωματίδια, μικρές γωνίες) από την σχέση

$$A_{diff}(\rho, z) = \frac{J_1(z)}{z}$$
 (2.26)

και η ακτινοβολία που διαδίδεται μέσα από την σφαίρα έχει την μορφή

$$A_{trans}(\rho, z) = \frac{-i\rho}{\rho^2 + z^2} \cdot e^{-i\sqrt{\rho^2 + z^2}}$$
(2.27)

Ωστόσο, η υπόθεση ότι το άθροισμα των εξισώσεων 2.26 & 2.27 είναι η λύση για την συνολική συνάρτηση  $A(\rho, z)$  δεν επιβεβαιώνεται από τον υπολογισμό της λύσης με βάση την ακριβή φόρμουλα που σκιαγραφείται στην συνέχεια.

Το ανάπτυγμα του ολοκληρώματος που προκύπτει από τις δύο πρώτες μεθόδους είναι ακριβές για μιγαδικές τιμές της παραμέτρου m στο όριο όπου  $m \rightarrow 1$  και έτσι το  $\rho$ μπορεί να είναι επίσης μιγαδικό. Ας δούμε τώρα τι γίνεται για πραγματικές τιμές αυτών των παραμέτρων. Ας συμβολίσουμε με ReA και ImA το πραγματικό και τα φανταστικό μέρος της συνάρτησης  $A(\rho, z)$ . Με την αντικατάσταση  $\gamma = (\pi/2) - \tau$ βρίσκουμε ότι

$$\operatorname{Im} A = \int_{0}^{\pi/2} \sin(\rho \cos \gamma) J_0(z \sin \gamma) \sin \gamma \cos \gamma d\gamma \qquad (2.28)$$

όπου είναι το δεύτερο ολοκλήρωμα του Sonine με n = 1/2, m = 0 και ισούται με

Im 
$$A = \frac{\rho}{y^2} \left(\frac{\pi y}{2}\right)^{1/2} J_{3/2}(y) = \frac{\rho}{y^2} \psi_1(y)$$
 (2.29)

όπου  $y^2 = \rho^2 + z^2$  και  $\psi_1(y)$  είναι η συνάρτηση Riccati-Bessel. Το πραγματικό μέρος μπορεί να γραφτεί σε γνωστές συναρτήσεις με το ανάπτυγμα σε σειρές. Θα δοθούν δύο διαφορετικά αναπτύγματα, που είναι χρήσιμα για μικρές και για μεγάλες τιμές του  $\rho$  αντίστοιχα. Οι πρώτες σειρές βρίσκονται αναπτύσσοντας τον όρο  $1 - \cos(\rho \cos \gamma)$  σε δυνάμεις του  $\rho \cos \gamma$  και είναι

Re 
$$A = \rho^2 \frac{1}{z^2} J_2(z) - \frac{\rho^4}{1 \cdot 3} \frac{1}{z^3} J_3(z) + \frac{\rho^6}{1 \cdot 3 \cdot 5} \frac{1}{z^4} J_4(z) + \dots$$
 (2.30)

που συγκλίνει για οποιοδήποτε συνδυασμό των  $\rho$  και z. Το ανάπτυγμα του ReA για μεγάλες τιμές του  $\rho$  είναι λιγότερο προφανές. Βασίζεται στο διαχωρισμό περιθλώμενου και διαθλώμενου φωτός παρά στην ασυμπτωτική ανάπτυξη σειρών. Για το διαθλώμενο μέρος περιμένουμε ένα όρο στην εξίσωση για το  $A(\rho,z)$  που έχει την ασυμπτωτική μορφή  $i\rho y^{-2} \exp(-iy)$  για μεγάλες τιμές του  $\rho$  και έχει το φανταστικό μέρος της σχέσης 2.30 για όλες τις τιμές του  $\rho$ . Μια απλή λύση που ικανοποιεί αυτές τις συνθήκες είναι

$$\dot{A}_{trans}(\rho, z) = \frac{i\rho}{y^2} \left(\frac{\pi y}{2}\right)^{1/2} H_{3/2}^{(2)}(y)$$
(2.31)

όπου το πραγματικό μέρος αυτής της συνάρτησης αναμένεται να είναι ένα όρος στο ReA. Κάνοντας μια ανάπτυξη σε δυνάμεις του ρ και του z το πραγματικό μέρος, είναι

$$\operatorname{Re} A = \frac{1}{z} J_{1}(z) + \frac{\rho}{y^{2}} \left(\frac{\pi y}{2}\right)^{1/2} N_{3/2}(y) + \frac{1}{\rho^{2}} J_{0}(z) + \frac{1 \cdot 3}{\rho^{4}} z J_{1}(z) + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{\rho^{6}} z^{2} J_{2}(z) + \dots$$
(2.32)

Η εξίσωση 2.32 δείχνει συμπερασματικά ότι δεν επιτρέπεται απλά να προσθέσουμε τους όρους για το περιθλώμενο και το διαθλώμενο μέρος. Αντικαθιστώντας τον όρο  $A_{trans}(\rho, z)$  της σχέσης 2.27 με την έκφραση της σχέσης 2.31, μπορούμε να κάνουμε το φανταστικό μέρος σωστό για όλες τις τιμές του  $\rho$  αλλά το πραγματικό απαιτεί την προσθήκη ενός όρου που ξεκινά με  $(1/\rho^2)J_0(z)$ .

## 2.4.1 Αριθμητικά αποτελέσματα της λύσης του μοντέλου

Στην προηγούμενη ενότητα αναπτύχθηκε φορμαλιστικά το μοντέλο σκέδασης σύμφωνα με την 'θεωρία της ανώμαλης περίθλασης'. Οι φυσικές διεργασίες (περίθλαση, διάθλαση και διάδοση) που περιγράφει αυτό το μοντέλο αναπαράγουν, όπως έχει ήδη αναφερθεί, την σκέδαση στον κερατοειδή από τα ενεργοποιημένα (καταστάσεις επούλωσης του κερατοειδή) κερατοκύτταρα του στρώματος. Στην ενότητα αυτή, δίνονται αριθμητικά αποτελέσματα της λύσης του μοντέλου, σε μια προσπάθεια αναπαράστασης της κατανομής έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

Η συνάρτηση πλάτους  $A(\rho, z)$  που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων, είναι αυτή που προέκυψε από την προσεγγιστική λύση και δίνεται από την σχέση 2.25. Χρησιμοποιώντας την σωστή σχέση για τον όρο  $A_{trans}(\rho, z)$ που περιγράφει το διαθλώμενο μέρος της ακτινοβολίας (σχέση 2.31), και την προσθήκη του όρου  $(1/\rho^2)J_0(z)$  (σχέση 2.32), η ολοκληρωμένη συνάρτηση πλάτους δίνεται από την σχέση

$$A(\rho, z) = \frac{J_1(z)}{z} + \frac{i\rho}{y^2} \left(\frac{\pi y}{2}\right)^{1/2} H_{3/2}^{(2)}(y) + \frac{1}{\rho^2} J_0(z)$$
(2.33)

όπου όλες οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην σχέση αυτή, έχουν τον ορισμό που τους έχει δοθεί στην ενότητα 2.4 που προηγήθηκε.

Έτσι, η ένταση της σκεδαζόμενης Η/Μ ακτινοβολίας από ένα σωματίδιο, ανεξαρτήτως πόλωσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, σαν συνάρτηση της γωνίας σκέδασης θ, δίνεται από την σχέση

$$I(\theta) = \frac{k^2 a^4 |A|^2}{r^2}$$
(2.34)

Ο αριθμητικός υπολογισμός της κατανομής έντασης έγινε με την βοήθεια της Matlab (The MathWorks, Inc. Version 6.5.0.180913a Release 13). Για την εκτέλεση των υπολογισμών, δόθηκαν τιμές στις παραμέτρους της εξίσωσης 2.33 που αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες σκέδασης στον κερατοειδή. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης διάθλασης των σκεδαστών (κερατοκυττάρων) η τιμή  $n_{ker} = 1.565$ . Στον δείκτη διάθλαση του μέσου που περιβάλλει τα κερατοκύτταρα, και δεν είναι άλλο από το στρώμα του κερατοειδή, δόθηκε η τιμή  $n_{ker} = 1.354$ . Έτσι, η τιμή της παραμέτρου *m* (σχέση 2.14) διαμορφώθηκε στην τιμή 1.1558. Το μήκος κύματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν  $\lambda = 632 nm$  και αντιστοιχεί στο ορατό φάσμα της Η/Μ ακτινοβολίας. Όσο αναφορά το μέγεθος των σκεδαστών, αυτό κυμαινόταν από 1 έως 100μm.

Η κατανομή έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας (κανονικοποιημένη στην μονάδα) που προέκυψε από το αριθμητικό υπολογισμό, για αυτά τα μεγέθη σκεδαστών δίνεται στο σχήμα 2.6 i) που ακολουθεί. Η ίδια κατανομή κανονικοποιημένη ως προς την ενέργεια που σκεδάζεται μέσα στις 3 πρώτες μοίρες, δίνεται στο σχήμα 2.6 ii).



Σχήμα 2.6: i) Προσομοίωση της κατανομής έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, για σκεδαστές με μέγεθος από 1έως 100μm, ii) κανονικοποιημένη κατανομή ως προς την ενέργεια που σκεδάζεται στις 3 πρώτες μοίρες.

Για τον υπολογισμό της κατανομής έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από σκεδαστές αυθαίρετου μεγέθους, θεωρήθηκε ότι το μέγεθος τους ακολουθεί Gaussian κατανομή (σχήμα 2.7), με μέση τιμή mean\_a = 20 & 40μm και απόκλιση, variation\_a ίση με 2μm.



Σχήμα 2.7: Γκαουσιανή κατανομή του μεγέθους των σκεδαστών με μέση τιμή 20μm και 40μm και απόκλιση 2μm, που χρησιμοποιήθηκε στον αριθμητικό υπολογισμό της κατανομής έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

Παίρνοντας την προβολή της κατανομής αυτής, πάνω στην κατανομή έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που δίνεται στο σχήμα 2.6 ii), υπολογίστηκε η κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας για αυτά τα μεγέθη σκεδαστών (20 & 40μm), που δίνονται στις εικόνες i & ii αντίστοιχα, του σχήματος 2.8 που ακολουθεί



Σχήμα 2.8: i) Κατανομή έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, από σκεδαστές μεγέθους 20μm, ii) από σκεδαστές μεγέθους 40μm.

Από τον αριθμητικό υπολογισμό της λύσης του μοντέλου σκέδασης που προηγήθηκε, και την προσομοίωση της κατανομής έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, μπορεί κανείς να εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα. Ειδικότερα μπορεί με βάση αυτό το θεωρητικό μοντέλο, να έχει μια εκτίμηση για τις σχετικές εντάσεις της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας (εισάγοντας στους υπολογισμού την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας), καθώς επίσης και την έκταση αυτής στο χώρο, ανάλογα με το μέγεθος των σκεδαστών. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη στην παρούσα εργασία (και για αυτό εξετάζεται στο πειραματικό μέρος της), αφού η γνώση της χωρικής έκτασης και τη έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο επίπεδο του αμφιβληστροειδικού ειδώλου, μπορεί οδηγήσει σε συμπεράσματα για το πια είναι η συνεισφορά του φαινομένου της σκέδασης στην αλλοίωση της ποιότητας της όρασης.

Από την διεθνή βιβλιογραφία<sup>39</sup>, προκύπτει ότι το μέγεθος των πυρήνων των κερατοκυττάρων κυμαίνεται στα μερικά (5~6) μικρόμετρα. Ωστόσο, μετά από τις επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής, λόγω της επουλωτικής δραστηριότητας που αναπτύσσουν τα κερατοκύτταρα (παραγωγή κολλαγόνου), λαμβάνουν χώρα έντονες κυτταρικές διεργασίες. Η μελέτη του στρώματος του κερατοειδή υπό τέτοιες συνθήκες (βλέπε αναφορές κεφαλαίου Ι), αναδεικνύει μια εκτενέστερη χωρικά περιοχή αυξημένης ανακλαστικότητας. Αν και το μέγεθος του πυρήνα των κερατοκυττάρων δεν μεταβάλλεται, οι περιοχές αυξημένης ανακλαστικότητας αναδεικνύουν τοπικές μεταβολές του δείκτη διάθλασης, και κατ επέκταση αύξηση του μεγέθους των κέντρων σκέδασης. Χρησιμοποιώντας μια μέση τιμή για το μέγεθος των σκεδαστών (κερατοκυττάρων) ίση με 10μm η κατανομή έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που προκύπτει σύμφωνα με την 'θεωρία της ανώμαλης περίθλασης' παρίσταται γραφικά στην εικόνα του σχήματος 2.9. Η κατανομή έντασης της σκεδαζόμενης από τα κερατοκύτταρα ακτινοβολίας εκτείνεται χωρικά στις ± 2 μοίρες.



Σχήμα 2.9: i) Προσομοίωση της κατανομής έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα κερατοκύτταρα ii), Προφίλ της ίδιας κατανομής.

Τα χαρακτηριστικά των κερατοκυττάρων που μόλις αναφέρθηκαν, η μέση τιμή μεγέθους και κατανομή έντασης, χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την επιλογή των πρότυπων κέντρων σκέδασης (μέγεθος, σχήμα), στο φυσικό μοντέλο που αναπτύχθηκε και προτείνει η παρούσα εργασία.

## 2.5 Μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό

Οι οπτικές ιδιότητες του ανθρώπινου οφθαλμού και οι ατέλειες του οπτικού συστήματος, περιορίζουν την ποιότητα της όρασης, καθώς και την δυνατότητα απεικόνισης και μελέτης δομών του οφθαλμού, όπως είναι ο αμφιβληστοειδής χιτώνας. Το φαινόμενο της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό, όπως έχει ήδη αναφερθεί (κεφάλαιο Ι) οδηγεί στην μείωση τόσο της φωτεινότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου όσο και της οπτικής ποιότητας του. Επιπλέον, επηρεάζει τις μετρήσεις συστημάτων αξιολόγησης της ποιότητας της όρασης<sup>40</sup>, στις οποίες βασίζονται οι κλινικοί για την εκτέλεση επεμβάσεων διαθλαστικής χειρουργικής. Έτσι, η εκτίμηση της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό και η δυνατότητα ποσοτικοποίησης της, είναι κυρίαρχος στόχος για την διεθνή επιστημονική κοινότητα που δραστηριοποιείται στην επιστήμη της όρασης.

Οι μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό σήμερα, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις αντικειμενικές και τις υποκειμενικές. Οι πρώτες, αφορούν την άμεση μέτρηση της Η/Μ ακτινοβολίας που σκεδάζεται, και ο ορισμός μεταβλητών για την ποσοτικοποίηση της. Η βασική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για την αντικειμενική μέτρηση της σκέδασης, βασίζεται στην αρχή της διπλής διέλευσης (*Double-Pass*) που εισήγαγε ο Flamant<sup>41</sup> το 1955, και την οποία αξιοποίησαν οι P.Artal και J.Santamaria και οι συνεργάτες τους, για την εκτίμηση της ποιότητας της όρασης<sup>42,43</sup>.



Σχήμα 2.10: Πειραματική διάταξη διπλής διέλευσης. (Εικόνα από P. Artal)

Η δέσμη του laser, φιλτράρεται χωρικά και με την βοήθεια ενός συστήματος φακών (L2 & L3) και του οπτικού συστήματος του οφθαλμού εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή. Η εστιασμένη αυτή κατανομή λειτουργεί ως δευτερογενής πηγή ακτινοβολίας, και έτσι η Η/Μ ακτινοβολία που ανιχνεύεται έχει διέλθει (και συνεπώς αλληλεπιδράσει με τις δομές του οφθαλμού) δύο φορές από το οπτικό σύστημα του ανθρώπινου οφθαλμού.

Στις υποκειμενικές μεθόδους μέτρησης αντίθετα η σκέδαση μετράται έμμεσα, αφού το αποτέλεσμα της σκέδασης στην ποιότητα της όρασης είναι η παράμετρος που αξιολογείται (ειδικότερα, η μείωση της φωτεινότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου). Με αυτές τις μεθόδους, δεν μπορούν ωστόσο να διαχωριστούν τα οπτικά (σκέδαση) από τα νευρολογικά αίτια που δύναται να οδηγήσουν στην μείωση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης, και έτσι εισάγουν την πιθανότητα λανθασμένης εκτίμησης. Επιπλέον, δεδομένου ότι βασίζονται στο κριτήριο και την συνεργασία του εκάστοτε εξεταζόμενου, γίνεται σαφές ότι οι αντικειμενικές μέθοδοι είναι οι πλέον αξιόπιστες. Στην συνέχεια, γίνεται μια αναφορά τόσο στις αντικειμενικές όσο και τις υποκειμενικές μεθόδους μέτρησης της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα.

# 2.5.1 Αντικειμενικές μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης.

Ο Juan M. Bueno<sup>44</sup> και οι συνεργάτες του, χρησιμοποίησαν την πόλωση της Η/Μ ακτινοβολίας ως παράμετρο για την εκτίμηση της σκέδασης. Είναι γνωστό ότι οι αλλαγές στην κατάσταση πόλωσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του μέσου που σκεδάζει. Έτσι, δεδομένου ότι η από-πόλωση (μείωση του βαθμού πόλωσης) της Η/Μ ακτινοβολίας είναι μια ιδιότητα που συνδέεται με την σκέδαση και την απώλεια συμφωνίας στην κατάσταση πόλωσης<sup>45</sup> εκτίμησαν την δυνατότητα χρήσης του βαθμού πόλωσης DOP (*Degree Of Polarization*) του φωτός που περνάει από ένα οπτικό σύστημα, σαν παράμετρο για την ποσοτικοποίηση της σκέδασης παρουσία εκτροπών. Με αυτήν την έννοια, αλλαγές στο ποσοστό της ακτινοβολίας που σκεδάζεται θα σχετίζεται με αλλαγές στον βαθμό πόλωσης της (DOP). Στο σχήμα 2.11 που ακολουθεί, δίνεται ένα σχεδιάγραμμα της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποίησαν, και βασίζεται στην αρχή της διπλής διέλευσης<sup>46,47</sup> (DP, Double-Pass)



Σχήμα 2.11: Πειραματική διάταξη των J.M. Bueno et al, για την αντικειμενική μέτρηση της σκέδασης, που βασίζεται στην αρχή της απλής διέλευσης.

Μια παράλληλη δέσμη laser με μήκος κύματος 543nm και διάμετρο 1mm, χρησιμοποιείται για την δημιουργία σημειακής πηγής στην εστία του υπό εξέταση συστήματος. Ένας γραμμικός πολωτής P1, δημιουργεί μια κατάσταση πόλωσης, επιτρέποντας την διέλευση ακτινοβολίας με κατάσταση πόλωσης κάθετη ως προς το δείγμα. Στο δεύτερο πέρασμα η ανακλώμενη Η/Μ ακτινοβολία διέρχεται μέσα από ένα διαχωριστή δέσμης BS, διαδίδεται μέσα από ένα σύστημα διόρθωσης της εστίασης FC, στην συνέχεια μέσα από ένα αναλυτή πόλωσης AU, και φτάνει στον ανιχνευτή, μία CCD camera DP-CCD, η οποία και έχει ένα αντικειμενικό φακό εστιακής απόστασης 50mm OB. Το FC αποτελείται από ένα ζεύγος αχρωματικών φακών L1 & L2 με εστιακές αποστάσεις 190 και 200nm αντίστοιχα, οι οποίοι και χωρίζονται από τρία κάτοπτρα, εκ των οποίων τα δύο, M2 & M3 είναι τοποθετημένα σε μία βάση με δυνατότητα κίνησης. Έτσι, τροποποιείται ο οπτικός δρόμος μεταξύ των δύο φακών και δίνεται η δυνατότητα διόρθωσης της εστίασης. Ο αναλυτής πόλωσης ΑU, αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο πλακίδιο λ/4 και ένα σταθερό γραμμικό πολωτή P2, με τον άξονα διέλευσης παράλληλο με αυτόν του Ρ1. Και τα δύο στοιχεία του συστήματος AU μπορούν να αφαιρεθούν από το σύστημα εάν χρειαστεί. Επιπλέον ο άξονας του πολωτή P2 μπορεί να προσανατολιστεί σε διαφορετικές γωνίες. Ένα διάφραγμα 5mm AP, τοποθετήθηκε σε ένα επίπεδο συζυγές με το επίπεδο της κόρης του υπό εξέταση συστήματος, και το οποίο λειτουργεί ως η κόρη εξόδου του συστήματος. Επιπλέον, ένα αφαιρούμενο κάτοπτρο RM, τοποθετημένο σε γωνία 45<sup>0</sup> ως προς τον οπτικό άξονα, χρησιμοποιείται για να τροποποιήσει το οπτικό μονοπάτι της δέσμης του laser, και να την οδηγήσει σε ένα σύστημα Hartmann-Shack (HS) για την εκτίμηση των εκτροπών του υπό εξέταση συστήματος. Σε αυτή την τροποποίηση οι φακοί L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, θέτουν την συστοιχία των φακών (με 45mm εστιακή απόσταση και διάμετρο 0.6mm έκαστος) του HS σε συζυγή επίπεδο με το μέτωπο κύματος που εξέρχεται από την κόρη εξόδου του συστήματος που μελέτησαν. Το σύστημα αυτό αποτελούνταν από τρία μέρη: ένα 25.4mm επιπεδόκυρτο φακό AL, ένα περιστρεφόμενο διαχυτή D, τοποθετημένο στην εστία του AL και ένα κεραμικό πλακίδιο PLZT, που δίνει την δυνατότητα παραγωγής ελεγχόμενων ποσοστών σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Τα κεραμικά PLZT, είναι διάφανα, φερο-ηλεκτρικά υλικά, που παράγουν διαφορετικά επίπεδα σκέδασης όταν μεταβάλλεται η τάση που τους εφαρμόζεται. Ειδικότερα η σκέδαση που παράγεται όταν H/M ακτινοβολία προσπίπτει σε αυτό το πλακίδιο αυξάνεται καθώς η τάση που εφαρμόζεται σε αυτό αυξάνεται.

Κατά την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων τους ο Juan M. Bueno και οι συνεργάτες του, μελέτησαν τις εκτροπές του υπό εξέταση συστήματος (με την βοήθεια του HS) αλλά και τον βαθμό πόλωσης (DOP, με την βοήθεια του AU και την χρήση των διανυσμάτων Stokes) της H/M ακτινοβολίας μετά από ένα διπλό πέρασμα από το σύστημα, σαν συνάρτηση της εφαρμοζόμενης στο PLZT τάσης. Διαπίστωσαν ότι οι εκτροπές του συστήματος δεν μεταβλήθηκαν ουσιαστικά, για διαφορετικά επίπεδα σκέδασης. Ωστόσο, παρατήρησαν μια ανακατανομή της έντασης της H/M ακτινοβολίας καθώς τα επίπεδα σκέδασης αυξανόταν (σχήμα 2.12 i, iii).



Σχήμα 2.12: i) Προφίλ της κατανομής ακτινοβολίας στο κεντρικό κομμάτι των DP εικόνων, iii)στην περιφέρεια των DP εικόνων, ii) μείωση του DOP για αυξανόμενα επίπεδα σκέδασης, iv) γραμμική εξάρτηση του DOP σαν συνάρτηση της σκέδασης (ο παράγοντας κ΄ αποτελεί το ολοκλήρωμα κάτω από το προφίλ μεταξύ των 50 & 110 arcmin) (J.M Bueno et al, 2004).

Ειδικότερα, παρατήρησαν το μέγιστο των προφίλ κατανομής των εικόνων να μειώνεται, ενώ το ποσοστό της ακτινοβολίας που συγκεντρωνόταν στην περιφέρεια των προφίλ αυξανόταν. Η συμπεριφορά αυτή, είναι χαρακτηριστική για καταστάσεις αυξημένης σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας. Παράλληλα, διαπίστωσαν μείωση του βαθμού πόλωσης DOP, για καταστάσεις αυξημένης σκέδασης, και μάλιστα η εξάρτηση αυτή ήταν γραμμική (σχήμα 2.12 ii,iv). Έτσι επιβεβαίωσαν πειραματικά, την πρόταση τους για χρήση του DOP ως μετρική για την αντικειμενική εκτίμηση και μέτρηση της σκέδασης.

Βασισμένοι στην αρχή λειτουργίας της εκτροπομετρίας Tscherning<sup>48</sup> (σχήμα 2.13), οι D.De Brouwere, H.Ginis και οι συνεργάτες τους<sup>49</sup>, εκτίμησαν με αντικειμενική μέθοδο την σκέδαση στον ανθρώπινο οφθαλμό.



Σχήμα 2.13: i) Πειραματική διάταξη ενός εκτροπόμετρου Tscherning, ii) Κατανομή έντασης στο επίπεδο του αμφιβληστροειδή, από την τροποποιημένη διάταξη ενός εκτροπόμετρου Tscherning που χρησιμοποίησαν οι D.De Brouwere et al.

Σύμφωνα με αυτήν την αρχή, ένα διάφραγμα πολλών οπών τοποθετείται μπροστά από ένα τηλεσκόπιο που κάνει την δέσμη του laser παράλληλη, δημιουργώντας ένα αριθμό παράλληλων δεσμών που εισέρχονται στο υπό εξέταση οπτικό σύστημα. 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 D. De Brouwere και οι συνεργάτες του, τροποποιώντας την διάταξη ενός εκτροπόμετρου Tscherning, έκαναν χρήση μιας μάσκας δώδεκα οπών (μικρών διαστάσεων ώστε να μην υπάρχει συνεισφορά των εκτροπών στην PSF), και πηγής laser στα 660nm, για την εξέταση ασθενών που είχαν υποστεί διαθλαστική χειρουργική. Από την ανάλυση των ληφθέντων εικόνων (σχήμα 2.13 ii), κατάφεραν να εκτιμήσουν την διεύρυνση της κατανομής έντασης στο επίπεδο του αμφιβληστροειδή, λόγω σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας.

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<sup>50</sup>, ορίζοντας ως δείκτη διάχυσης των λόγω των εντάσεων, στο κέντρο και την περιφέρεια του προφίλ της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Μετρήσεις *in vivo* βασισμένες στην ίδια αρχή (double-pass), πραγματοποίησαν και οι Mahnaz Shahidi, and Yirong Yang, οι οποίοι μελέτησαν

τις εκτροπές του ανθρώπινου οφθαλμού και την σκέδαση του φωτός σε υγιείς οφθαλμούς σαν συνάρτηση της ηλικίας<sup>51</sup>. Δείκτη για την εκτίμηση της σκέδασης σε αυτήν την εργασία, αποτέλεσε η διαφορά στο ολοκλήρωμα που προέκυψε από δύο διαφορετικές κατανομές (σε μία διάσταση) διασποράς σημείου<sup>1</sup> (PSF). Η μία προέκυπτε από μετρήσεις που ελήφθησαν με μια διάταξη Hartmann-Shack (HS) και περιείχε πληροφορία για τις εκτροπές του οφθαλμού, ενώ η δεύτερη ήταν η συνολική PSF του υπό εξέταση οφθαλμού, που διαμορφωνόταν τόσο λόγω εκτροπών όσο και λόγω της σκέδασης του φωτός. *In vitro* μετρήσεις της θόλωσης σε κερατοειδείς ζώων μετά από επέμβαση διαθλαστικής χειρουργικής (PRK), πραγματοποίησαν Juan A. del Val και οι συνεργάτες του<sup>52</sup>. Στην προσπάθεια τους να συνδέσουν την αυξημένη θόλωση του κερατοειδή μετά από PRK, με την πυκνότητα των κερατοκυττάρων στο στρώμα, μέτρησαν την διαπερατότητα του κερατοειδή σε διαφορετικά σημεία του.

# 2.5.2 Υποκειμενικές μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης.

Οι υποκειμενικές μέθοδοι μέτρησης της σκέδασης βασίζονται σε ψυχοφυσικές μετρήσεις. 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.

Το 1992, οι Thomas J.T.P van den Berg και Jan Kees IJspeert ανέπτυξαν μια συσκευή για κλινική χρήση<sup>53</sup>, η οποία είχε την δυνατότητα μέτρησης της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό, με μια ψυχοφυσική προσέγγιση 'άμεσης αντιστάθμισης' όπως οι ίδιοι την χαρακτήρισαν. Σε αυτήν την συσκευή, ο εξεταζόμενος καλείται να κοιτάξει με το ένα μάτι μέσα σε ένα σωλήνα διαμέτρου 5 cm στον οποίο και βλέπει μια ομόκεντρη διάταξη φωτεινών πεδίων. Δακτύλιοι που φέρουν φωτεινές πηγές από την λειτουργία φωτοδιόδων είναι τοποθετημένοι στο τοίχωμα και την βάση του σωλήνα (σχήμα 2.14).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Η συνάρτηση διασποράς σημείου (*Point Spread Function*), είναι μια συνάρτηση σε δύο διαστάσεις, που δίνει την κατανομή της Η/Μ ακτινοβολίας στην εστία ενός οπτικού συστήματος, που δημιουργείται από μια σημειακή πηγή.



Σχήμα 2.14: Οπτικό πεδίο όπως το αντιλαμβάνεται ο εξεταζόμενος στην συσκευή που παρουσίασαν οι van den Berg & K.IJspeert το 1992. Ένα σκοτεινό πεδίο εξέτασης ακτίνας 1 μοίρας περιβάλλεται από ένα φωτεινό δακτύλιο με ακτίνα 2.5 μοίρες. Γύρω από αυτόν, τρείς δακτύλιοι που φέρουν φωτεινές πηγές (φωτοδιόδους) κατά μήκος της περιφέρειας τους, λειτουργούν ως πηγές σκέδασης. Οι δύο εξωτερικοί δακτύλιοι δεν είναι εστιασμένοι για τον εξεταζόμενο.

Στην προσέγγιση της 'άμεσης αντιστάθμισης' που πρότειναν, το πεδίο εξέτασης και η πηγή σκέδασης διαμορφώνονται σε αντίθετη φάση, με συχνότητα 8 Ηz. Η πηγή σκέδασης είναι ένας δακτύλιος με ακτίνα  $\phi = 3.5$ , 10 ή 28 μοίρες. Το πεδίο εξέτασης είναι στο κέντρο της βάσης του σωλήνα και ο εξεταζόμενος εστιάζει σε αυτό. 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.  $\Delta$ ιαμορφώνοντας το πεδίο εξέτασης με φωτεινότητα αντίθετης φάσης L (σε σχέση με αυτήν του φωτεινού δακτυλίου) ο εξεταζόμενος δεν αντιλαμβάνεται πλέον το πεδίο εξέτασης να αναβοσβήνει. Με αυτόν τον τρόπο, η διαμόρφωση που προκαλείται λόγω σκέδασης από των φωτεινό δακτύλιο αντισταθμίζεται άμεσα. Η τιμή της φωτεινότητας L, είναι μια μέτρηση της PSF στην γωνία που σχηματίζει ο φωτεινός δακτύλιος και το πεδίο εξέτασης. Εάν ορίσουμε ως Ε την φωτεινότητα διαμόρφωσης στο μάτι, που προκύπτει λόγω της ύπαρξης της πηγής σκέδασης, ο λόγος L/E ισούται με κανονικοποιημένη στην μονάδα PSF. Επιπλέον, δεδομένου ότι πάνω από την μία μοίρα, η PSF είναι αντιστρόφως ανάλογη με την γωνία σκέδασης ~  $\phi^{-2}$  (προσέγγιση των Stiles και Holladay<sup>54</sup>), όρισαν ως παράμετρο σκέδασης το όρο  $\phi^2 \times L/E$ .

Ωστόσο, η διαμόρφωση του οπτικού πεδίου που αντιλαμβάνεται ο εξεταζόμενος και δίνεται στην εικόνα του σχήματος 2.14, επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων. Αρχικά, το φως που σκεδάζεται, καλύπτει τον φωτεινό δακτύλιο που περιβάλλει το πεδίο εξέτασης, παρέχοντας σε αυτή την περιοχή ισχυρή αντίληψη του flicker. Η σταθερή φωτεινότητα του φωτεινού αυτού δακτυλίου υποβαθμίζει το ενοχλητικό αυτό γεγονός και περιορίζει την αντίληψη του flicker στο πεδίο εξέτασης και μόνο. Εάν η φωτεινότητα του δακτυλίου που περιβάλλει το πεδίο εξέτασης και μόνο. Εάν η φωτεινότητα του δακτυλίου που περιβάλλει το πεδίο εξέτασης και μόνο. Εάν η φωτεινότητα του δακτυλίου που περιβάλλει το πεδίο εξέτασης και μόνο. Εάν η φωτεινότητα του δακτυλίου που περιβάλλει το πεδίο εξέτασης είναι μεγάλη, η ευαισθησία ανίχνευσης του flicker στο κέντρο μειώνεται. Η μέγιστη ακρίβεια στις μετρήσεις επιτυγχάνεται όταν το φως από τον δακτύλιο που περιβάλει το πεδίο εξέτασης, δίνει ποσοστό σκέδασης στο κέντρο του οπτικού πεδίου, ίδιο με αυτό της πηγής σκέδασης. Επιπλέον, το μέγεθος του πεδίου εξέτασης θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό έτσι ώστε ο εξεταζόμενος να μην αντιλαμβάνεται την ασυμφωνία της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, αλλά αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να εξασφαλίζει υψηλή ευαισθησίας ανίχνευσης του flicker.

Πριν την εργασία των Thomas J.T.P van den Berg και Jan Kees IJspeert, η συμβατική μέθοδος μέτρησης της Η/Μ ακτινοβολίας που σκεδάζεται στον ανθρώπινο οφθαλμό, γινόταν με την εκτίμηση της φωτεινότητας ενός ομοιογενώς φωτισμένου στόχου που ισοδυναμεί με το veiling effect από μια φωτεινή πηγή που τοποθετείται σε μια απόσταση από τον εξεταζόμενο και υπό συγκεκριμένη γωνία ως προς την γραμμή όρασης του (σχήμα 2.15).



Σχήμα 2.15: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας μέτρησης της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό με την συμβατική μέθοδο.

Η φωτεινή πηγή, δημιουργεί μια ομοιόμορφη κατανομή έντασης στον αμφιβληστροειδή, προσομοιώνοντας το φαινόμενο της σκέδασης. 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. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι τιμές των threshold ενδέχεται να επηρεάζονται σημαντικά από την παρουσία μιας φωτεινής πηγής, π.χ λόγω μεταβολής του κριτηρίου του εξεταζόμενου, αλλαγές της δυνατότητας προσαρμογής του στα διαφορετικά επίπεδα φωτεινότητας των στόχων ή λόγω κακής προσήλωσης του, στον στόχο παρατήρησης.

Β. Ειδικό Μέρος

# Κεφάλαιο ΙΙΙ

## 3.1 Το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο σκέδασης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παρούσα εργασία προτείνει ένα φυσικό μοντέλο σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας, που προσομοιώνει την σκέδαση στον κερατοειδή μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής. Η επιλογή του μοντέλου, βασίστηκε στα χαρακτηριστικά (μέγεθος, σχήμα, κατανομή έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας) των δομών του κερατοειδή (κερατοκύτταρα, ανωμαλίες στην διάταξη του κολλαγόνου) που εμφανίζονται ως πηγές σκέδασης στον κερατοειδή μετά τις εν λόγω επεμβάσεις, και τα οποία μελετήθηκαν στο κεφάλαιο ΙΙ. Τα μεγέθη αυτά προσδιορίστηκαν κατ' εκτίμηση με βάση τη βιβλιογραφία αλλά και παρατηρήσεις με το ομοεστιακό μικροσκόπιο.

#### Σύσταση μοντέλου

Το φυσικό μοντέλο που προτείνεται, αποτελείται από πρότυπους σκεδαστές εμποτισμένους σε υδρογέλη. Ως πρότυποι σκεδαστές, χρησιμοποιήθηκαν μικροσφαιρίδια γυαλιού (Dragonite® Solid Glass Beads, Jaygo Incorporated) με μέγεθος που κυμαινόταν μεταξύ 1-20μm. Τα εν λόγω σφαιρίδια παράγονται από υψηλής ποιότητας και καθαρότητας soda-lime γυαλί, που αποτελείται κατά 70% από διοξείδιο του πυριτίου, 15% οξείδιο του νατρίου (soda) και 9% οξείδιο του ασβεστίου (lime). Το οξείδιο του νατρίου αποδίδει την χαμηλή θερμοκρασία τήξης στην οποία το διοξείδιο του πυριτίου λιώνει, και το οξείδιο του ασβεστίου λειτουργεί ως σταθεροποιητής. Το εν λόγω γυαλί είναι φτηνό, χημικά σταθερό, άκαμπτο και εξαιρετικά εύχρηστο. Οι θερμικές, μηχανικές ιδιότητες του soda-lime γυαλιού δίνονται στον πίνακα Ι.

Μηχανικές και Θερμικές Ιδιότητες του soda-lime γυαλιού				
Θερμική αγωγιμότητα	0.937 W.m/m <sup>2</sup> °C	Ειδική θερμότητα	0.21	
Πυκνότητα	$2.44 \text{ g/cm}^3$	Σημείο πήξης	546 °C	
Ειδ. Βαρύτητα	2.53	Σημείο τήξης	726 °C	
Ειδ. Βάρος	$2.483 \text{ g/ cm}^3$	Σκληρότητα (κλίμακα Moh)	6-7	
Συντ. θερμικής διαστολής	$8.6 \times 10^{-6} / {}^{\circ}C$	Λόγος Poisson	0.22	

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

Όσο αναφορά τις οπτικές του ιδιότητες, παρουσιάζει δείκτη διάθλασης n = 1.523 για μήκος κύματος ακτινοβολίας  $\lambda = 435 nm$ , και n = 1.513 για μήκος κύματος ακτινοβολίας  $\lambda = 645 nm$ . Η διαπερατότητα στην περιοχή του ορατού φάσματος είναι ιδιαίτερα υψηλή (όπως φαίνεται από το διάγραμμα του σχήματος 3.1), μειώνεται αισθητά στην περιοχή του υπέρυθρου ενώ είναι μηδενική στην περιοχή του υπεριώδους.



Σχήμα 3.1: Διαπερατότητα soda-lime γυαλιού σε όλο το φάσμα της Η/Μ ακτινοβολίας.

Η ειδική διεργασία καθαρίσματος και γυαλίσματος του γυαλιού από το οποίο κατασκευάστηκαν τα μικροσφαιρίδια, χωρίς προσθήκη άλλων ουσιών όπως υδροφθωρικό οξύ, τους αποδίδει μια καθαρή, αμόλυντη και λαμπερή επιφάνεια (σχήμα 3.2 i). Έτσι, πληρούν όλες τις προϋποθέσεις που απαιτούνται για βιομηχανική εφαρμογή καθώς έχουν ομοιόμορφο σχήμα, είναι πλήρως σφαιρικά (σχήμα 3.2 ii), είναι εύκολα στο καθάρισμα, και παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στην διάβρωση, χωρίς ατέλειες ή ρωγμές στην επιφάνεια τους (σχήμα 3.2 ii).



Σχήμα 3.2: i) Καθαρή και λαμπερή επιφάνεια των μικροσφαιριδίων που χρησιμοποιήθηκαν στο προτεινόμενο μοντέλο, ii) πλήρως σφαιρικό σχήμα, iii) ατέλειες στο σχήμα και την επιφάνεια άλλων μέσων (εικόνες από την ιστοσελίδα της Jaygo).

Η ομοιογένεια αυτή των εν λόγω σφαιριδίων καθιστά εύκολη τη μοντελοποίηση του γωνιακού νόμου σκέδασης όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Τα συστατικά της υδρογέλης που παρασκευάστηκε, ήταν ζελατίνη από κολλαγόνο δέρματος χοίρου, κ-καραγινάνη και απιονισμένο νερό. Η ζελατίνη από κολλαγόνο δέρματος χοίρου (Sigma Chemical Co. Product number: G-8150, Type A), είναι ένα ετερογενές μείγμα υδροδιαλυτής πρωτεΐνης με υψηλό μοριακό βάρος, που περιέχεται στο κολλαγόνο. Οι πρωτεΐνες εξάγονται με το βράσιμο δέρματος σε νερό, ενώ ο τύπος Α ζελατίνης που χρησιμοποιήθηκε, αντλείται από το κατεργασία του ιστού με οξύ. Όσο αναφορά τις φυσικές ιδιότητες αυτού του τύπου ζελατίνης, περιέχει 78-80 mmmole ελεύθερων ομάδων καρβοζυλίου για κάθε 100gr πρωτεΐνης. Το PH ενός διαλύματος με συγκέντρωση 1.5% κ.β στους 25 °C είναι 3.8-5.5. Όσο αναφορά τον βαθμό στερεότητας της ζελατίνης, αυτή εκτιμάται σε περίπου 300 μονάδες Bloom. Η μονάδα αυτή είναι μια μέτρηση της δύναμης που πρέπει να ασκηθεί στην ζελατίνη, που σχηματίζεται από διάλυμα γνωστής συγκέντρωσης<sup>55</sup>, σε μια δοσμένη επιφάνεια δείγματος έτσι ώστε να παραμορφωθεί κατά 4mm. Η ζελατίνη αυτή διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου και έχει εμφάνιση μιας ελαφρά κίτρινης σκόνης.

Η κ-καραγινάνη ανήκει στην κατηγορία των πολυσακχαριτών και παράγεται από θαλάσσια φύκια. Αποτελούν μεγάλα εύκαμπτα μόρια με δομή διπλής έλικας και χρησιμοποιούνται ως μέσα σταθεροποίησης διαλυμάτων. Η κ-καραγινάνη που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δειγμάτων (Sigma Chemical Co. Carrageenan-Kappa, Product Type: C-1263, Type III), περιείχε 0.6% NA<sup>+</sup>, 6.8% K<sup>+</sup>, και 2.4% Ca<sup>+</sup>. Η κ-καραγινάνη διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου και έχει εμφάνιση μιας ελαφρά κίτρινης σκόνης.

## 3.2 Χαρακτηριστικά δειγμάτων.

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων, κατασκευάστηκαν μια σειρά δειγμάτων από το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο υδρογέλης με μικροσφαιρίδια γυαλιού. Τα δείγματα διαφοροποιούνταν ως προς την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων και το πάχος τους. Επιπλέον, παρασκευάστηκαν δείγματα αποτελούμενα από μικροσφαιρίδια εμποτισμένα σε διάλυμα οφθαλμικής γέλης, αλλά και φακοί επαφής που περιείχαν τα εν λόγω σφαιρίδια

# 3.2.1 Δείγματα υδρογέλης.

Για την παραγωγή των δειγμάτων μικρή ποσότητα απιονισμένου νερού θερμάνθηκε στους 45-50 °C. Σε αυτήν, προστέθηκε ποσότητα ζελατίνης από κολλαγόνο δέρματος χοίρου (Sigma Chemical Co. Product number: G-8150, Type A), ίση με το 20% του βάρους του νερού, και ποσότητα κ-καραγινάνης (Sigma Chemical Co. Carrageenan-Kappa, Product Type:C-1263, Type III), ίση με το 1% του βάρους του νερού, τα οποία και αναμείχτηκαν έως ότου σχηματιστεί ένα ομοιογενές διάλυμα. Τόσο η ζελατίνη όσο και η κ-καραγινάνη σε θερμοκρασία χώρου όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι σε στερεή μορφή. Στους 45-50 °C ωστόσο ρευστοποιούνται, καθιστώντας την δημιουργία ενός ομοιογενούς διαλύματος γρήγορη. Η χρήση της κ-καραγινάνης προσέδωσε στο διάλυμα μεγαλύτερη σταθερότητα, ικανοποιώντας την ανάγκη δημιουργίας ενός παχύρευστου διαλύματος, που μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί και να τοποθετηθεί σε ειδικά κελιά για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Στην συνέχεια, κρατώντας σταθερές τις ποσότητες ζελατίνης και κ-καραγινάνης, προστέθηκαν τα μικροσφαιρίδια γυαλιού σε έξι διαφορετικές κατά βάρος (διαλύματος) συγκεντρώσεις, οι οποίες και δίνονται στον πίνακα ΙΙ που ακολουθεί. Το τελικό διάλυμα σε θερμοκρασία μικρότερη των 40 °C σχημάτιζε μια συμπαγή υδρογέλη. Όλες οι μετρήσεις του βάρους των συστατικών έγιναν με ζυγαριά ακριβείας (Denver Instrument Company, AA-160) που παρείχε την δυνατότητα μέτρησης βάρους με ακρίβεια 10<sup>-4</sup>gr.

Σύσταση δειγμάτων υδρογέλης					
	Απιον.		κ-καραγινάνη	Σφαιρίδια	Συγκ. σφαιριδ.
	νερό (gr)	Ζελατίνη (gr)	(gr)	γυαλιού (gr)	(κ.β.)
Δείγμα 1	10	2	0.1	0	0
Δείγμα 2	10	2	0.1	0.06	0.0049
Δείγμα 3	10	2	0.1	0.09	0.0075
Δείγμα 4	10	2	0.1	0.11	0.009
Δείγμα 5	10	2	0.1	0.14	0.012
Δείγμα 6	10	2	0.1	0.19	0.0157

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙ

Πριν προστεθούν στο διάλυμα, τα μικροσφαιρίδια ήταν υπό μορφή κόκκων λευκής σκόνης, με διαστάσεις μερικών εκατοντάδων μικρών έως και 1mm. Για την καλύτερη ανάμειζη τους με το διάλυμα, πριν προστεθούν σε αυτό, τους ασκήθηκε μηχανική πίεση έως ότου διασπαστούν σε μικρά συσσωματώματα σφαιριδίων γυαλιού με διαστάσεις μερικών μικρομέτρων. Η ανάμειζη των μικροσφαιριδίων με το διάλυμα κολλαγόνου έως ότου ένα ομοιογενές διάλυμα δημιουργηθεί, ήταν το δυσκολότερο μέρος της διαδικασίας παρασκευής των δειγμάτων. Για τον έλεγχο της ομοιογένειας των δειγμάτων, ελήφθησαν εικόνες με την βοήθεια της οπτικής μικροσκοπίας που κάθε φορά επιβεβαίωναν τον υψηλό βαθμό ομοιογένειας τους Η εικόνα του σχήματος 3.3 που ακολουθεί, είναι ενδεικτική της ομοιογένειας αυτής.



Σχήμα 3.3: Εικόνα από οπτικό μικροσκόπιο του δείγματος 2. Διακρίνονται τα μικροσφαιρίδια γυαλιού και το διάλυμα κολλαγόνου. Η υψηλή ομοιογένεια του δείγματος διαπιστώνεται καθώς σε κάθε περιοχή μεγέθους της τάξης των μερικών δεκάδων μικρομέτρων παρατηρείται πρακτικά σταθερός αριθμός μικροσφαιριδίων.

# 3.2.1.1 Δείκτης διάθλασης υδρογέλης.

Όπως προαναφέρθηκε, τα μικροσφαιρίδια γυαλιού εμποτίστηκαν σε διάλυμα υδρογέλης, με συγκέντρωση ζελατίνης 20% κ.β απιονισμένου νερού. Για την εκτίμηση των οπτικών ιδιοτήτων της υδρογέλης, έγιναν μετρήσεις του δείκτη διάθλασης της, σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης της ζελατίνης. Παρασκευάστηκαν έξι δείγματα (με την διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα § 3.2) από απιονισμένο νερό, 1% κ.β κκαραγινάνη και διαφορετικές συγκεντρώσεις ζελατίνης. Οι μετρήσεις έγιναν με ένα υψηλής ακρίβειας διαθλασίμετρο (TMC refractometer) (σχήμα 3.4), το οποίο δίνει την δυνατότητα μέτρησης της ειδικής βαρύτητας και της πυκνότητας του υπό εξέταση δείγματος σε αλάτι. Για την βαθμονόμηση του οργάνου (σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή<sup>56</sup>) σε θερμοκρασία χώρου ίση με 20°C και με την βοήθεια της ρυθμιστικής βίδας, μια σταγόνα απιονισμένου νερού τοποθετήθηκε κάτω από πλαστικό πλακίδιο επικάλυψης και η συσκευή ρυθμίστηκε ώστε η ένδειξη του οργάνου να είναι στην αρχή κάθε κλίμακας (σχήμα 3.4 ii). Στην συνέχεια, τα δείγματα που παρασκευάστηκαν, μετρήθηκαν με τον εν λόγω διαθλασίμετρο, αφού πρώτα

διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία 10-20°C, εύρος θερμοκρασιών δείγματος, για τις οποίες οι ενδείξεις του οργάνου είναι οι πλέον αξιόπιστες. Με την χρήση του προσοφθάλμιου φακού, ο χειριστής του οργάνου είχε την δυνατότητα εστίασης στην κλίμακα της συσκευής, για την ακριβέστερη ανάγνωση της μέτρησης.



Σχήμα 3.4: i)TMC διαθλασίμετρο, 1.πρίσμα, 2. πλαστικό πλακίδιο επικάλυψης, 3.βίδα ρύθμισης, 4.σωλήνας που περιέχει κάτοπτρο, 5.προσοφθάλμιος φακός, ii)κλίμακες μέτρησης του διαθλασίμετρου. Η αριστερή, για την μέτρηση της ειδικής βαρύτητας και η δεξιά για την μέτρηση της πυκνότητας του δείγματος σε άλας (σε ποσοστό ‰.).

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν, ήταν από τις ενδείξεις του οργάνου για την πυκνότητα των δειγμάτων σε αλάτι (δεξιά κλίμακα). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων σαν συνάρτηση της διαφορετικής συγκέντρωσης ζελατίνης στην υδρογέλη, αλλά και η σύσταση των δειγμάτων που παρασκευάστηκαν, δίνονται στον πίνακα ΙΙΙ.

Σύσταση δειγμάτων υδρογέλης					
	Απιον. νερό	Ζελατίνη	κ-καραγινάνη	Συγκ. ζελατίνης	Ένδειξη
	(gr)	(gr)	(gr)	% κ.β	διαθλασ. ‰
Δείγμα 1	10	0.52	0.1	5	50
Δείγμα 2	10	1	0.1	10	97
Δείγμα 3	10	1.2	0.1	12	115
Δείγμα 4	10	1.5	0.1	15	130
Δείγμα 5	10	1.73	0.1	17.3	155
Δείγμα 6	10	2	0.1	20	κορεσμός

 $\Pi INAKA\Sigma \ III$ 

Από μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας και δεδομένων που υπάρχουν για την βαθμονόμηση διαθλασίμετρων<sup>57</sup>, προκύπτει ότι η τιμή του δείκτη διάθλασης σε διάλυμα άλατος και νερού σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης NACL, δίνεται από την σχέση:

$$n = 0.0018 * mass Conc_{NACL} + 1.333$$
 (3.1)

Βάση της σχέσης 3.1, και τα δεδομένα του πίνακα ΙΙΙ κατασκευάστηκε το διάγραμμα 3.1, που δίνει τον δείκτη διάθλασης των δειγμάτων υδρογέλης που παρασκευάστηκαν σαν συνάρτησης της συγκέντρωση ζελατίνης (% κ.β).



 $\Delta$ ιάγραμμα 3.1:  $\Delta$ είκτης διάθλασης σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης ζελατίνης (% κ.β).

Κάνοντας προσαρμογή ευθείας στα πειραματικά δεδομένα του διαγράμματος 3.1, η εξίσωση που δίνει τον δείκτη διάθλασης της υδρογέλης σαν συνάρτηση της % κ.β συγκέντρωσης ζελατίνης, δίνεται από την σχέση:

$$n = 0.0016 * mass Conc_{Gelatin} + 1.333$$
 (3.2)

Από την σχέση 3.2, προκύπτει ότι η δείκτης διάθλασης της υδρογέλης που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δειγμάτων (η σύσταση των οποίων δίνεται στον πίνακα II) είναι n =1.3656.

# 3.2.2 Δείγματα οφθαλμικής γέλης.

Για την παραγωγή των δειγμάτων, μικρή ποσότητα οφθαλμικής γέλης Thilogel, με περιεκτικότητα 0.3 % σε καρβομέρη (C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>), χρησιμοποιήθηκε ως μέσο διάλυσης των μικροσφαιριδίων. Η καρβομέρη είναι ένα ομο-πολυμερές ακρυλικού οξέως συνδεδεμένο με αιθέριο έλαιο προπυλενίου. Όσο αναφορά τις οπτικές ιδιότητες της οφθαλμικής γέλης, με το διαθλασίμετρο (TMC refractometer) και την διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο § 3.2.1 μετρήθηκε ο δείκτης διάθλασης της, και βάση της σχέσης 3.2 βρέθηκε ίσος με n = 1.3411.

Στην οφθαλμική γέλη Thilogel, προστέθηκαν τα μικροσφαιρίδια γυαλιού σε τέσσερις διαφορετικές συγκεντρώσεις. Πριν προστεθούν στο διάλυμα, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία διάσπασης τους σε μικρά συσσωματώματα σφαιριδίων γυαλιού, όπως έγινε και με τα δείγματα υδρογέλης. Στην συνέχεια το διάλυμα της οφθαλμικής γέλης με τα μικροσφαιρίδια γυαλιού αναμείχτηκε έως ότου αποκτήσει ομοιογένεια. Όλα τα δείγματα που παρασκευάστηκαν είχαν πάχος 0.5mm και κ.β συγκεντρώσεις μικροσφαιριδίων που δίνονται στον πίνακα IV.

Σύσταση δειγμάτων οφθαλμικής γέλης				
	Οφθαλμική γέλη (gr)	Μικροσφαιρίδια	Συγκέντρωση	
		(gr)	(κ.β)	
Δείγμα 1	12.2	0.0061	0.0005	
Δείγμα 2	30	0.03	0.001	
Δείγμα 3	6	0.012	0.02	
Δείγμα 4	6	0.03	0.05	

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙV

## 3.2.3 Φακοί επαφής.

Πέραν της αντικειμενικής μέτρησης της σκέδασης από το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο, κρίθηκε ενδιαφέρουσα η προσπάθεια σύγκρισης των μετρήσεων με αυτά που προκύπτουν από ψυχοφυσικές μεθόδους. Για τον λόγο αυτό, και με την βοήθεια της εταιρίας Menicon Co. κατασκευάστηκαν φακοί επαφής που περιείχαν στο εσωτερικό τους μικροσφαιρίδια γυαλιού.

Μετά την διεξαγωγή των πρώτων αντικειμενικών μετρήσεων ελήφθησαν χρήσιμες πληροφορίες για την εξάρτηση του ποσοστού σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων. Αξιοποιώντας τις, αποφασίστηκε η κατασκευή φακών επαφής με πέντε διαφορετικές συγκεντρώσεις μικροσφαιριδίων (εικόνα σχήματος 3.5), τέτοιες ώστε να προσομοιώνουν το κατά δυνατόν καλύτερα καταστάσεις ήπιας σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό λόγω παθολογικών καταστάσεων σε διάφορα στάδια.



Σχήμα 3.5: Αριστερά: φακός επαφής με μηδενική συγκέντρωση μικροσφαιριδίων (φακός 1), δεξιά: φακός επαφής με την μεγαλύτερη συγκέντρωση (φακός 5), από το σύνολο των πέντε που παρασκευάστηκαν. Τα φωτεινά σημεία στον φακό 1 (αριστερά) αποδίδονται στην ύπαρξη μικρών κόκκων σκόνης, που βρίσκονται στην καλυπτρίδα μικροσκοπίου που χρησιμοποιήθηκε ως βάση τοποθέτησης των φακών για την λήψη της εικόνας.

Οι φακοί επαφής που παρασκευάστηκαν από την Menicon Co. ήταν τύπου RGP, όπου σύμφωνα με τις συστάσεις της εταιρίας, είναι κατασκευασμένοι από υλικό που επιτρέπει την διέλευση οξυγόνου (O<sub>2</sub>) προς τον κερατοειδή. Η κίνηση του φακού πάνω στον οφθαλμό διευκολύνει την διακίνηση των δακρύων κάτω από την οπίσθια επιφάνεια του, χωρίς να επηρεάζει έτσι τον μεταβολισμό και την ακεραιότητα του κερατοειδή. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των φακών επαφής που παρασκευάστηκαν και οι συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων που περιείχαν, δίνονται στον πίνακα V.

Χαρακτηριστικά φακών επαφής					
	Ακτίνα	Διοπτρική		Πάχος στο	Συγκ.
	καμπυλότητας	Ισχύς	Διάμετρος	κέντρο	μικρο <del>σ</del> φαιριδίων
	(mm)	(D)	(mm)	(mm)	(gr/ml RGP)
Φακός 1	7.81	0.00	9.2	0.225	0
Φακός 2	7.81	0.00	9.2	0.227	0.000272978
Φακός 3	7.81	0.00	9.2	0.224	0.000545957
Φακός 4	7.80	0.00	9.2	0.223	0.000818935
Φακός 5	7.81	0.00	9.2	0.225	0.001091914

ΠΙΝΑΚΑΣ V

Η επιλογή της βασικής ακτίνας καμπυλότητας (base curvature) έγινε λαμβάνοντας υπ' όψιν την μέση τιμή της ακτίνας καμπυλότητας σε φυσιολογικούς οφθαλμούς, με σκοπό την καλύτερη δυνατή εφαρμογή τους σε ένα δείγμα εξεταζόμενων που προσφέρθηκαν για την διεξαγωγή των ψυχοφυσικών μετρήσεων. Η επιλογή της μηδενικής διοπτρικής ισχύς των φακών, έγινε για να περιοριστεί η συνεισφορά τους στην ποιότητα της όρασης των εξεταζόμενων, στο φαινόμενο της σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας από τα μικροσφαιρίδια.

Όσο αναφορά τα οπτικά χαρακτηριστικά των φακών επαφής, ο δείκτης διάθλασης του υλικού από το οποίο παρασκευάστηκαν ήταν (με βάση τις προδιαγραφές της κατασκευάστριας εταιρείας) ίσος με 1.448-1.450. Επιπλέον, η εταιρία παραγωγής των φακών, πραγματοποίησε μετρήσεις της διαπερατότητας τους, σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος της ακτινοβολίας, για τον έλεγχο πιθανής μεταβολής της, σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης των μικροσφαιριδίων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, συγκεντρώνονται στον πίνακα VI. Από τις μετρήσεις αυτές, δεν προκύπτουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ φακών με διαφορετική συγκέντρωση μικροσφαιριδίων.

Διαπερατότητα Φακών Επαφής				
	Μήκος κύματος	Μήκος κύματος		
	210 ~ 380nm	380 ~ 780nm		
Φακός 1	0.4 %	88.2 %		
Φακός 2	0.3 %	87.4 %		
Φακός 3	0.4 %	88.4 %		
Φακός 4	0.45 %	88.6 %		
Φακός 5	0.4 %	88.6 %		

ΠΙΝΑΚΑΣ VΙ

# 3.3 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 περιγράφησαν σε προηγούμενη ενότητα (§ 2.5). Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια πειραματική διάταξη, για την διεξαγωγή μετρήσεων της σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας από το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο, που αφορούν μετρήσεις της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας μετά από μια απλή διέλευση της από το σκεδάζων μέσο. Για την εκτίμηση της σκέδασης ποσοτικά, χρησιμοποιήθηκε ως μετρική το *Ballistic Ratio* (BR) (Βαλλιστικό κλάσμα), που ορίστηκε ως το ποσοστό της προσπίπτουσας Η/Μ ακτινοβολίας που δεν συναντά κανένα σκεδαστή στον οπτικό του δρόμο.

Μετρήσεις απλής διέλευσης διεξήχθησαν στα δείγματα που παρασκευάστηκαν, με σκοπό τόσο την μελέτη της εξάρτησης του BR από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων, όσο και του προφίλ έντασης της σκεδαζόμενης Η/Μ ακτινοβολίας.
# 3.3.1 Ballistic Ratio και συγκέντρωση μικροσφαιριδίων.

## <u>Σκοπός</u>

Αναπτύχθηκε μια πειραματική διάταξη για την μελέτη της εξάρτησης του ποσοστού της Η/Μ ακτινοβολίας που σκεδάζεται, από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων, στα δείγματα με μέσο διάλυσης την υδρογέλη και την οφθαλμική γέλη.

# 3.3.1.1 Μετρήσεις σε δείγματα υδρογέλης.

## Μέθοδος

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, μικρή ποσότητα από τα δείγματα υδρογέλης που παρασκευάστηκαν τοποθετήθηκε σε ειδικά διαμορφωμένα κελιά (σχήμα 3.6). Ως βάση χρησιμοποιήθηκε καλυπτρίδα μικροσκοπίου που επιτρέπει την διέλευση της Η/Μ ακτινοβολίας στην περιοχή του ορατού φάσματος. Στις άκρες της τοποθετήθηκαν πρότυπα χαλύβδινα πλακίδια (Mitotoyo prod. # 611821), για την δημιουργία διάκενου καθορισμένου πλάτους ανάμεσα στην βάση και την δεύτερη καλυπτρίδα μικροσκοπίου που τοποθετήθηκε παράλληλα με αυτήν της βάσης. Τα χαλύβδινα πλακίδια είχαν πάχος 50 και 100μm, και με συνδυασμό τους δημιουργήθηκαν διάκενα διαφορετικού πάχους, στα οποία τοποθετήθηκαν μικρές ποσότητες από τα 6 διαφορετικά δείγματα σε θερμοκρασία 45-50 °C. Με την χρήση μεταλλικών σφικτήρων, οι καλυπτρίδες μικροσκοπίου κρατήθηκαν σε παράλληλη θέση και το πάγος του σχηματιζόμενου διάκενου σταθερό, δίνοντας την δυνατότητα τοποθέτησης των δειγμάτων στην πειραματική διάταξη με τον επιθυμητό προσανατολισμό. Ωστόσο λόγω της ρευστής, αρχικά, μορφής του δείγματος σε αυτήν την θερμοκρασία, τα κελιά κρατήθηκαν σε οριζόντια θέση για μερικά δεκάδες δευτερόλεπτα, έως ότου το δείγμα αποκτήσει μια συμπαγή και στερεή μορφή. Έτσι, αποφεύχθηκε η ανακατανομή των μικροσφαιριδίων μέσα στο διάλυμα της υδρογέλης, και η πιθανή απώλεια της ομοιογένειας του δείγματος. Στα εν λόγω κελιά τοποθετήθηκαν και τα δείγματα στα οποία ως μέσο εμπότισης των μικροσφαιριδίων χρησιμοποιήθηκε οφθαλμική γέλη.



Σχήμα 3.6: Κελιά τοποθέτησης των δειγμάτων.

Για την ακριβή εκτίμηση του πάχους κάθε δείγματος, μετά το τέλος των μετρήσεων που αφορούσαν την σκέδαση, το σχηματιζόμενο ισοπαχές στρώμα στερεής υδρογέλης που περιείχε τα μικροσφαιρίδια γυαλιού, αφαιρέθηκε από το κελί και μετρήθηκε με την βοήθεια της ομοεστιακής μικροσκοπίας. Σαρώνοντας το ισοπαχές δείγμα με την βοήθεια του ομοεστιακού μικροσκοπίου HRT II (Heidenberg Engineering) εκτιμήθηκε το πάχος των δειγμάτων με ακρίβεια μικρομέτρου.

Η οπτική διάταξη που αναπτύχθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων παρίσταται σχηματικά στο σχήμα 3.7 που ακολουθεί. Μια πηγή laser He-Ne συνεχούς λειτουργίας, με μήκος κύματος ακτινοβολίας στα  $\lambda = 632nm$  χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή μιας δέσμης laser. Η δέσμη αυτή ομογενοποιήθηκε περνώντας από χωρικό φίλτρο, αποτελούμενο από ένα θετικό επιπεδόκυρτο θετικό φακό *L1* εστιακής απόστασης 10 cm, ένα διάφραγμα 0.5mm, και ένα δεύτερο αμφίκυρτο θετικό φακό *L2* εστιακής απόστασης 50 cm, ο οποίος και εστίαζε την δέσμη στον ανιχνευτή. Μετά την έξοδο της δέσμης από το χωρικό φίλτρο, αυτή διήλθε μέσα από φίλτρο (Neutral Density Filter) για τον έλεγχο της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, προς αποφυγή κορεσμού του ανιχνευτικού συστήματος. Με την χρήση ενός πρίσματος ορθής εκτροπής ο οπτικός άξονας του συστήματος υπέστη στροφή 90 μοιρών (για λόγους εξοικονόμησης χώρου), και στην συνέχεια πέρασε από τσόπερ για την χρονική διαμόρφωση της δέσμης του laser σε τετραγωνικό παλμό. Το δείγμα τοποθετήθηκε στην οπτική διάταξη με την μεγάλη επιφάνεια των καλυπτρίδων κάθετη στον οπτικό άξονα του συστήματος, και πάνω από το κέντρο περιστροφής ενός βραχίονα.



Σχήμα 3.7: Πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.

Ο βραχίονας μήκους 16.3cm, προσαρτήθηκε πάνω σε βαθμονομημένο γωνιόμετρο, δίνοντας την δυνατότητα περιστροφής του ως προς την γωνία σκέδασης θ της ακτινοβολίας. Μια φωτοδίοδος πυριτίου (Type:FDS010, PIN-7787-2 0450-1), με επίπεδη ενεργή περιοχή 2.25mm<sup>2</sup> (τετραγωνικού σχήματος), αποτέλεσε το ανιχνευτικό σύστημα. Τοποθετημένη στο άκρο του περιστρεφόμενου βραχίονα, είχε την δυνατότητα ανίχνευσης του σκεδαζόμενου φωτός για διαφορετικές γωνίες σκέδασης θ. Το σήμα της φωτοδιόδου οδηγήθηκε στην συνέχεια προς ενίσχυση σε έναν τελεστικό ενισχυτή, πριν καταλήξει στο σύστημα καταγραφής του σήματος, ένα 8-bit παλμογράφο (Hewlett Packard, Model No:54616C, 500Hz).

Για την μελέτη της απόκρισης της φωτοδιόδου σαν συνάρτηση της έντασης της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας, διεξήχθησαν μετρήσεις με την οπτική διάταξη που μόλις περιγράφηκε. Απουσία δείγματος, και με την χρήση μια σειράς φίλτρων (Melles Griot, Set No:311492) διαφορετικής οπτικής πυκνότητας, μετρήθηκε η απόκριση της φωτοδιόδου. Δεδομένου ότι η διαπερατότητα των φίλτρων συνδέεται με την οπτική τους πυκνότητα σύμφωνα με την σχέση

$$Transmittance = 10^{-OD}$$
(3.3)

τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στο διάγραμμα 3.2.



Διάγραμμα 3.2: Απόκριση της φωτοδιόδου.

Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι η απόκριση της φωτοδιόδου στην ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (για εντάσεις της τάξης που χρησιμοποιήθηκαν στο εν λόγω πείραμα) είναι γραμμική. Αυτή, διασφαλίζει ότι το σήμα που καταγράφεται είναι ευθέως ανάλογο της μεταβολής της έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ενισχύοντας την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην ευθυγράμμιση της φωτοδιόδου, και ειδικότερα της ενεργής περιοχής της, με τον οπτικό άξονα του συστήματος. Η μικρή επιφάνεια ανίχνευσης της φωτοδιόδου, δημιούργησε την ανάγκη εστίασης της δέσμης μέσα σε αυτήν την επιφάνεια με ακρίβεια. Έτσι, η δέσμη του laser εστιάστηκε σε ένα κυκλικό spot διαμέτρου 0.5mm στο κέντρο της ενεργής επιφάνειας ανίχνευσης της φωτοδιόδου.

Για την μελέτη της εξάρτησης του ποσοστού της σκεδαζόμενης Η/Μ ακτινοβολίας από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρησιμοποιήθηκε ως μετρική το βαλλιστικό κλάσμα, *BR*. Αυτό, υπολογίστηκε ως ο λόγος των τάσεων (V<sub>p-p</sub>) που κατέγραψε ο παλμογράφος παρουσία και απουσία δείγματος στην οπτική διάταξη.

$$BR = \frac{V_{p-p} (M\epsilon \,\delta\epsilon i\gamma\mu\alpha)}{V_{p-p} (X\omega\rho i\varsigma \,\delta\epsilon i\gamma\mu\alpha)}$$
(3.4)

Λόγω διαφορετικού πάχους των δειγμάτων υδρογέλης που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις, αναμένεται το BR δειγμάτων ίδιας συγκέντρωσης σε μικροσφαιρίδια, να μεταβάλλεται σαν συνάρτηση του πάχους τους. Για τον λόγω αυτό, μελετήθηκε η εξάρτηση του BR από την 'συνολική ενεργό διατομή σκέδασης' (Scatter Cross-Section SCS) κάθε δείγματος, αντί της συγκέντρωσης του, που αντιπροσωπεύει καλύτερα των αριθμό των σκεδαστών που η δέσμη του laser συναντά, κατά την διέλευση της από το δείγμα. Η 'συνολική ενεργό διατομή σκέδασης' ορίζεται ως:

$$SCS_{total} = \frac{\sum_{All \ particles} Particle \ Cross \ Section}{Sample \ Surface}$$
(3.5)

Μετά από μια σειρά απλών υπολογισμών, προκύπτει ότι:

$$SCS_{total} = \frac{2 \times S_{sphere} \times Concentration \times Sample Thickness}{m_{sphere} \times S_{Unit Area}}$$
(3.6)

Στην σχέση 3.6,  $m_{sphere}$  είναι η μάζα ενός μικροσφαιριδίου δεδομένης ακτίνας,  $S_{sphere}$  η επιφάνεια του, ενός ο συντελεστής 2 έχει προστεθεί στην εξίσωση καθώς η ενεργός διατομή σκέδασης για ένα μικροσφαιρίδιο είναι διπλάσια της επιφάνειας του. Για σφαιρίδια δοσμένης ακτίνας, η 'συνολική ενεργός διατομή σκέδασης' μεταβάλλεται με τρόπο ανάλογο με το γινόμενο της κ.β συγκέντρωσης των μικροσφαιριδίων στο δείγμα επί το πάχος του δείγματος (το γινόμενο αυτό θα αναφέρεται ως κανονικοποιημένη συγκέντρωση).

Τέλος να σημειωθεί, ότι όπως φαίνεται και από τον πίνακα ΙΙ, το δείγμα 1 που παρασκευάστηκε δεν περιείχε μικροσφαιρίδια, και χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό πιθανής σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας λόγω ατελειών των οπτικών στοιχείων της διάταξης (φακών, καλυπτρίδων μικροσκοπίου κ.α), ή μικροδομών της υδρογέλης (π.χ συσσωματώματα υδρογέλης). Έτσι, οι υπολογισμοί της σκέδασης της δέσμης του laser, καθώς αυτή διέρχεται από τα υπό εξέταση δείγματα, αφορούν αποκλειστικά την παρουσία των μικροσφαιριδίων.

## <u>Αποτελέσματα</u>

Οι πρώτες μετρήσεις για την μελέτη της εξάρτησης του ποσοστού της Η/Μ ακτινοβολίας που σκεδάζεται από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων, διεξήχθησαν στα δείγματα οφθαλμικής γέλης (πίνακας IV). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 3.3: Εξάρτηση του BR από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων στα δείγματα οφθαλμικής γέλης. Οι κανονικοποιημένες συγκεντρώσεις αφορούν το γινόμενο της κ.β συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων επί το πάχος του δείγματος και είναι ανάλογες της 'συνολικής ενεργής διατομής σκέδασης' (σχέση 3.6).

Ο μικρός αριθμός δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, δεν επέτρεψε την χρήση των εν λόγω μετρήσεων για την φορμαλιστική περιγραφή της εξάρτησης του BR από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων. Ωστόσο, οι πρώτες αυτές μετρήσεις παρείχαν χρήσιμες πληροφορίες για την τάξη μεγέθους των συγκεντρώσεων που έπρεπε να χρησιμοποιηθούν στα δείγματα υδρογέλης και τους φακούς επαφής που αναπτύχθηκαν στην συνέχεια, προκειμένου να επιτευχθούν ποσοστά σκέδασης της H/M ακτινοβολίας που αντιστοιχούν σε ένα μεγάλο εύρος τιμών του BR (0 < BR < 1).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα υδρογέλης (πίνακας ΙΙ) δίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 3.4: Εξάρτηση του BR από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων στα δείγματα υδρογέλης. Οι κανονικοποιημένες συγκεντρώσεις αφορούν το γινόμενο της κ.β συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων επί το πάχος του δείγματος και είναι ανάλογες της 'συνολικής ενεργής διατομής σκέδασης' (σχέση 3.6).

Προσαρμόζοντας μια ευθεία στα δεδομένα του διαγράμματος 3.4, προκύπτει ότι η εξάρτηση του BR από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων περιγράφεται από την σχέση:

$$BR = 1,0217 - 0,3391*$$
 Norm. Concentration (3.7)

me suntelesth  $R^2 = 0.88$ .

#### Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που μόλις περιγράφησαν, και την σχέση 3.7, εξήχθη μια μαθηματική σχέση που συνδέει το BR με την κανονικοποημένη συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων. Η σχέση αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της κατάλληλης συγκέντρωσης των μικροσφαιριδίων που πρέπει να τοποθετηθεί στους φακούς επαφής που αναπτύχθηκαν (με την βοήθεια της Menicon), έτσι ώστε αυτοί να παράγουν ποσοστά σκέδασης που να καλύπτουν ένα ικανοποιητικό εύρος τιμών του BR.

Επιπλέον από την μελέτη του διαγράμματος 3.4, προκύπτει μια πιθανή αλλαγή του μηχανισμού αλληλεπίδρασης της δέσμης του laser με τα μικροσφαιρίδια γυαλιού, για τιμές BR μικρότερες από 0.4. Για τιμές BR που κυμαίνονται 1<BR<0.4 θεωρείται ότι τα

φωτόνια σκεδάζονται μια φορά από τους σκεδαστές, και η πιθανότητα πολλαπλής σκέδασης είναι πολύ μικρή. Αντίθετα για τιμές BR≤0.4, η πιθανότητα αυτή αυξάνεται, και φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης λαμβάνουν χώρα κατά την διέλευση της δέσμης από τα υπό εξέταση δείγματα. Στο διάγραμμα 3.5 που ακολουθεί, παρίσταται γραφικά η σχέση του BR με την ενεργό διατομή σκέδασης των μικροσφαιριδίων, σύμφωνα με τα διαφορετικά μοντέλα σκέδασης. Στο διάγραμμα αυτό, δίνονται και τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν από τα πειράματα απλής διέλευσης.



Διάγραμμα 3.5: Σχέση BR με την ενεργό διατομή σκέδασης, για διαφορετικά μοντέλα σκέδασης. Τα μπλε σημεία στο διάγραμμα, αποτελούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν από τις μετρήσεις απλής διέλευσης.

# 3.3.1.2 Μετρήσεις σε φακούς επαφής.

#### <u>Μέθοδος</u>

Για τις μετρήσεις της σκέδασης που αφορούν τους φακούς επαφής, ακολουθήθηκε μια διαφορετική μέθοδος λήψης και ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε για τον σκοπό αυτό δίνεται στην εικόνα του σχήματος που ακολουθεί.



Σχήμα 3.8: Πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις της σκέδασης στους φακούς επαφής. Η απόσταση του δείγματος από τα κύρια επίπεδα του οπτικού συστήματος της camera και του φακού L2 ήταν 7cm.

Η δέσμη από ένα laser He-Ne συνεχούς λειτουργίας, με μήκος κύματος ακτινοβολίας  $\lambda = 632 nm$ , ομογενοποιήθηκε περνώντας από χωρικό φίλτρο. Αυτό αποτελούνταν από ένα αντικειμενικό φακό, *Obj.* (5x, 0.12), ένα διάφραγμα, *P1*, 30μm και ένα δεύτερο φακό *L1*, που έκανε την δέσμη παράλληλη. Με την χρήση διαφράγματος *P2*, η διάμετρος της δέσμης περιορίστηκε στα 3.5mm, πριν στραφεί ο άξονας διάδοσης της κατά 90 μοίρες με την χρήση κατόπτρου. Μετά από μία απλή διέλευση της από το υπό εξέταση δείγμα, η παράλληλη δέσμη του laser έγινε συγκλίνουσα με την βοήθεια ενός φακού *L2*, πριν

εισέλθει στο σύστημα ανίχνευσης και καταγραφής της οπτικής διάταξης. Το σύστημα αυτό ήταν μια CCD camera (Type XCD-x700) όπου έφερε προσαρτημένο πάνω της φακό *CL*, με δυνατότητα μετακίνησης του κατά μήκος του οπτικού άξονα, δίνοντας την δυνατότητα μεταβλητής εστίασης. Το ανιχνευόμενο από την camera σήμα, στην συνέχεια οδηγήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού δόθηκε η δυνατότητα προβολής της κατανομής έντασης της ακτινοβολίας στην οθόνη του. Το λογισμικό, έδινε επιπλέον την δυνατότητα επιλογής της ενίσχυσης του ανιχνευόμενου σήματος (Gain:0-18dB), και της διάρκειας έκθεσης του ανιχνευτή στην Η/Μ ακτινοβολία (Exposure time: 10μs-1s). Η CCD camera ήταν 8-bit, και απεικόνιζε την ένταση της ακτινοβολίας σε 255 επίπεδα του γκρι.

Για την μελέτη της απόκρισης της camera σαν συνάρτηση της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με την τοποθέτηση στην οπτική διάταξη (σχήμα 3.8) μιας σειράς φίλτρων (Melles Griot, Set No:311492) διαφορετικής οπτικής πυκνότητας. Στην θέση του φακού επαφής τοποθετήθηκε ένα διαχυτής (άμορφο γυαλί) για την δημιουργία μιας ομοιόμορφης κατανομής έντασης (εικόνες σχήματος 3.9), η δέσμη του laser εστιάστηκε στην CCD, ενώ οι παράμετροι της camera ρυθμίστηκαν προς αποφυγή κορεσμού των pixel της οθόνης.



Σχήμα 3.9: Εικόνες με φίλτρα διαφορετικής οπτικής πυκνότητας που ελήφθησαν για την βαθμονόμηση της camera.

Με την βοήθεια κατάλληλου αλγορίθμου στην Matlab, υπολογίστηκε η συνολική ενέργεια (άθροισμα των εντάσεων των pixel) της εικόνας σαν συνάρτηση της διαπερατότητα των φίλτρων (σχέση 3.3). Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, ο συντελεστής ενίσχυσης της camera ρυθμίστηκε στα 18dB, τιμή στην οποία πραγματοποιήθηκαν όλες οι μετρήσεις με το εν λόγω σύστημα ανίχνευσης. Επιπλέον, απουσία της δέσμης του laser (ή οποιαδήποτε άλλης φωτεινής πηγής στον χώρο

διεξαγωγής των μετρήσεων), υπολογίστηκε η ένταση που ανιχνεύεται από την camera, και η οποία αντιστοιχεί στο θόρυβο του συστήματος ανίχνευσης (dark current). Λαμβάνοντας υπ' όψιν την παράμετρο αυτή, και κανονικοποιώντας τα αποτελέσματα ως προς την μέγιστη τιμή έντασης, η απόκριση του συστήματος ανίχνευσης δίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 3.6: Απόκριση της camera σαν συνάρτηση της έντασης της Η/Μ ακτινοβολίας.

Από το διάγραμμα αυτό, φαίνεται ότι η απόκριση της camera δεν είναι γραμμική. Αντίθετα συμπιέζει τις τιμές για μεγάλες εντάσεις, και είναι γραμμική στην περιοχή των μικρών εντάσεων, γεγονός που θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά την ανάλυση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με την εν λόγω camera.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για την μελέτη της απόκρισης της camera σαν συνάρτηση του χρόνου έκθεσης (exposure time) του ανιχνευτή στην Η/Μ ακτινοβολία. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ξανά η οπτική διάταξη του σχήματος 3.8. Απουσία δείγματος, η δέσμη του laser απεστιάστηκε από τον ανιχνευτή, με την μετακίνηση του φακού της camera (CL) (διαμόρφωση που χρησιμοποιήθηκε και για τις μετρήσεις της σκέδασης των φακών επαφής), ενώ η ενίσχυση της camera στον ανιχνευόμενο σήμα ήταν ξανά στα 18dB. Για την μέτρηση της απόκρισης, σε όλο το εύρος χρόνων έκθεσης (10μs-1s) του ανιχνευτή στην ακτινοβολία, χωρίς των κορεσμό των pixel της οθόνης του υπολογιστή, ήταν απαραίτητη η δημιουργία τεσσάρων διαφορετικών επιπέδων έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για τον σκοπό αυτό, τοποθετήθηκαν στην οπτική διάταξη φίλτρα, με οπτική πυκνότητα (Optical Density) τέτοια ώστε τα pixel της εικόνας που λαμβάνονται να μην είναι κορεσμένα. Στην συνέχεια, γνωρίζοντας την διαφορά στην ένταση για τα τέσσερα αυτά διαφορετικά επίπεδα (βάση της οπτικής πυκνότητας των φίλτρων), κατασκευάστηκε το συνολικό διάγραμμα απόκρισης της camera για όλο το εύρος χρόνων έκθεσης του ανιχνευτή στην ακτινοβολία.

Λόγω απεστίασης της δέσμης του laser από τον ανιχνευτή, και κατ' επέκταση της χαμηλής έντασης στις εικόνες που λαμβάνονται, οι διακυμάνσεις της έντασης στην δέσμη του laser, εισήγαγαν αντίστοιχες διακυμάνσεις στις τιμές των εντάσεων που καταγράφονται από την camera. Για την ενίσχυση της αξιοπιστίας των μετρήσεων, ελήφθησαν τέσσερις εικόνες για κάθε χρόνο έκθεσης, και οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στην τελική εικόνα που προκύπτει από τον μέσο όρο των τεσσάρων. Οι υπολογισμοί έγιναν ξανά με την βοήθεια κατάλληλου αλγορίθμου της Matlab, με τον οποίο υπολογίστηκε η συνολική ενέργεια κάθε εικόνας (αυτή που προέκυψε από τον μέσο όρο των τεσσάρων ληφθέντων) σαν συνάρτηση του χρόνου έκθεσης. Παράλληλα, με την διαδικασία αυτή, αντισταθμίστηκε και το πρόβλημα θορύβου των εικόνων λόγω διακυμάνσεων στην ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας (speckle noise), που προκύπτει σε περιπτώσεις σκέδασης σύμφωνης ακτινοβολίας. Τέλος, γνωρίζοντας (από το διάγραμμα 3.6) ότι η απόκριση της camera δεν είναι γραμμική σαν συνάρτηση της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, κάθε μία από τις τέσσερις εικόνες που ελήφθησαν, και πριν χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς, διορθώθηκαν με βάση την απόκριση της camera (διάγραμμα 3.7).



Διάγραμμα 3.7: Απόκριση της camera σαν συνάρτηση του διαφορετικού χρόνου έκθεσης του ανιχνευτή στην Η/Μ ακτινοβολία.

Από το διάγραμμα αυτό, προκύπτει ότι η απόκριση του ανιχνευτικού συστήματος είναι γραμμική για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης της CCD στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Για την μέτρηση της σκέδασης στους φακούς επαφής με την πειραματική διάταξη του σχήματος 3.8, τοποθετήθηκαν σε ειδική βάση που κατασκευάστηκε (εικόνες σχήματος 3.10). Επιπλέον πριν από κάθε μέτρηση, όλοι οι φακοί επαφής πέρασαν από διαδικασία καθαρισμού. Σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή (Menicon Co.) διατηρούνται εμποτισμένοι σε διάλυμα (MeniCare Plus), που περιείχε 0.0005% Polohexamethylene Biguanide, 0.5% Poloxamer, και 0.275% Hyptomellose. Το εν λόγω διάλυμα, χρησιμοποιήθηκε για τον καθαρισμό της επιφάνειας τους και στην συνέχεια ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό. Για την απομάκρυνση των σταγονιδίων νερού χρησιμοποιήθηκε στεγνός αέρας.



Σχήμα 3.10: i) Όψη, ii) κάτοψη ειδικής βάσης που κατασκευάστηκε για την τοποθέτηση των φακών επαφής. Η πλαστική βάση 1 διαθέτει άνοιγμα 9mm και εσοχή βάθους 2mm για την τοποθέτηση του σκεδάζων φακού επαφής (SCL). Η βάση 2 διαθέτει άνοιγμα διαμέτρου 9mm και εφάπτεται στην περιφέρεια του SCL.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μετρική που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της σκέδασης είναι το Ballistic Ratio. Όσο αναφορά τις μετρήσεις που διεξήχθησαν στα δείγματα υδρογέλης (§ 3.3.1), το BR υπολογίστηκε από τον λόγο της τάσης  $V_{p-p}$  που καταγράφεται στον παλμογράφο, παρουσία και απουσία δείγματος (σχέση 3.4). Στις μετρήσεις που αφορούν τους φακούς επαφής, το BR υπολογίστηκε από την ανάλυση των εικόνων (με την χρήση κατάλληλου αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στην Matlab) που ελήφθησαν με την CCD camera.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας σε ένα οπτικό σύστημα επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της 'συνάρτησης διασποράς σημείου' PSF του. Όπως έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικά (§ 2.5.1, Bueno et al), αφαιρεί ενέργεια από κεντρική περιοχή της PSF (βαλλιστικό μέρος) και την κατανέμει στην περιφέρεια, δημιουργώντας άλω. Λόγω της μικρής συγκέντρωσης των φακών επαφής σε μικροσφαιρίδια γυαλιού, και κατ' επέκταση του μικρού ποσοστού της Η/Μ ακτινοβολίας που σκεδάζεται, η ένταση στην περιφέρεια (άλως) ήταν κατά πολύ μικρότερη από την ένταση στο κέντρο (βαλλιστικό μέρος της ακτινοβολίας). Η μικρή δυναμική περιοχή της camera (8-bit) ωστόσο δεν παρείχε την δυνατότητα απεικόνισης της κατανομής σε όλο της το εύρος. Μεταβάλλοντας τον χρόνο έκθεσης του ανιχνευτή στη Η/Μ ακτινοβολία, δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά επίπεδα φωτεινότητας, στα οποία εκτέθηκε το υπό εξέταση δείγμα. Για μικρούς χρόνους έκθεσης απεικονίστηκε το βαλλιστικό μέρος της κατανομής (μη κορεσμένη εικόνα i, σχήμα 3.11), ενώ για μεγαλύτερους η άλως που δημιουργείται λόγω σκέδασης (κορεσμένη εικόνα ii, σχήμα 3.11).





Σχήμα 3.11: i)Βαλλιστικό μέρος της κατανομής έντασης που προέκυψε από την μέτρηση τη σκέδασης στον φακό επαφής No.2, ii) η άλως λόγω σκέδασης στον ίδιο φακό επαφής (το βαλλιστικό μέρος της κατανομής είναι κορεσμένο).

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στην Matlab (και ο οποίος παρατίθεται στο παράρτημα Α) για την ανάλυση των εικόνων που ελήφθησαν απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.12. Κάθε εικόνα, πριν υποστεί οποιαδήποτε ανάλυση, διορθώθηκε βάση της απόκρισης του ανιχνευτικού συστήματος, η οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί ήταν μη γραμμική (διάγραμμα 3.5).



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στην Matlab για την ανάλυση των εικόνων.

Στην συνέχεια γνωρίζοντας τον χρόνο έκθεσης που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη κάθε εικόνας (κορεσμένη και μη κορεσμένη, σχήμα 3.11) αλλά και την απόκριση του συστήματος ανίχνευσης σαν συνάρτηση του χρόνου έκθεσης του στην Η/Μ ακτινοβολία (διάγραμμα 3.6), υπολογίστηκαν τα δύο διαφορετικά επίπεδα φωτεινότητας στα οποία εκτέθηκε το υπό εξέταση δείγμα. Το επόμενο βήμα ήταν ο υπολογισμός του προφίλ, της κατανομής έντασης που απεικονίστηκε στην οθόνη του υπολογιστή, μετά από μια απλή διέλευση της δέσμης του laser από το σκεδάζοντα φακό επαφής. Για τον υπολογισμό του βέλτιστου δυνατού προφίλ, που εξάγεται από την εικόνα που απεικονίζει την άλω, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ακτινικής ολοκλήρωσης των προφίλ που προκύπτουν για διαφορετικές γωνίες σάρωσης θ, γύρω από το κέντρο της κατανομής.



Σχήμα 3.13: Γεωμετρία της ακτινικής ολοκλήρωσης των προφίλ που προκύπτουν για διαφορετικές γωνίες σάρωσης θ.

Δεδομένου ότι η κατανομή έντασης προβάλλεται στον ανιχνευτή μέσω ενός οπτικού συστήματος, (αυτό που σχηματίζουν οι φακοί *CL & L2*, της οπτικής διάταξης του σχήματος 3.8) το επόμενο βήμα ήταν η διόρθωση του προφίλ έντασης, με βάση την μεγέθυνση που το εν λόγω οπτικό σύστημα εισάγει. Έχοντας υπολογίσει το προφίλ σκέδασης που προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις, στην συνέχεια έγινε προσαρμογή του θεωρητικού προφίλ σκέδασης, που προκύπτει από την 'θεωρία της ανώμαλης περίθλασης' και η οποία αναπτύχθηκε σε προηγούμενη ενότητα της παρούσας εργασίας (§ 2.4.1). Από την προσαρμογή αυτή, οριοθετείται η περιοχή κάτω από το προφίλ σκέδασης που αντιπροσωπεύει την Η/Μ ακτινοβολία που σκεδάζεται (σχήμα 3.14). Έτσι, αθροίζοντας την ενέργεια του σκεδαζόμενου και του βαλλιστικού μέρους της ακτινοβολίας, υπολογίζεται το *Ballistic Ratio* για το υπό εξέταση δείγμα σύμφωνα με την σχέση:



Σχήμα 3.14: Μπλε καμπύλη: Πειραματικό προφίλ (Βαλλιστική + σκεδαζόμενη ακτινοβολία) Κόκκινη καμπύλη: θεωρητικό προφίλ, για τους φακούς επαφής i) No.1, και ii) No.5.

# Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στους φακούς επαφής, δίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 3.8: BR για τους φακούς επαφής που μετρήθηκαν με πειράματα απλής διέλευσης. Η πράσινη γραμμή αντιπροσωπεύει την τιμή του BR που υπολογίστηκε απουσία φακού.

Από το διάγραμμα 3.8, είναι εμφανής η μείωση του BR καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων στους φακούς επαφής. Για τον φακό No.1, όπου δεν περιέχει μικροσφαιρίδια γυαλιού, το BR δεν είναι 1, όπως αναμενόταν. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ύπαρξη σκέδασης που δεν οφείλεται στα μικροσφαιρίδια, αλλά στις ατέλειες των οπτικών στοιχείων της διάταξης.

Εξετάζοντας την ενέργεια της Η/Μ ακτινοβολίας που σκεδάζεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτή ισούται με το ολοκλήρωμα του προφίλ σκέδασης στην περιοχή που οριοθετείται από την προσαρμογή του θεωρητικού προφίλ (διάγραμμα ii) στο σχήμα 3.14). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας δίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 3.9: Βαλλιστική και σκεδαζόμενη ενέργεια της Η/Μ ακτινοβολίας που σκεδάζεται από τους φακούς επαφής στα πειράματα απλής διέλευσης.

Η ενέργεια της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας όπως είναι αναμενόμενο αυξάνεται καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων στους φακούς επαφής. Αντίθετα με την ίδια τάση μειώνεται η ενέργεια του βαλλιστικού μέρους της δέσμης όπως αναδεικνύει και το διάγραμμα ii). Στην συνέχεια, δίνεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα της βαλλιστικής, της σκεδαζόμενης και της συνολικής ενέργειας της δέσμης του laser, που διέρχεται από του φακούς επαφής, και η οποία υπολογίστηκε από την ανάλυση των εικόνων.



Διάγραμμα 3.10: Συγκεντρωτικό διάγραμμα της βαλλιστικής, σκεδαζόμενης και συνολικής ενέργειας της δέσμης του laser, μετά από απλής διέλευσης της από τους φακούς επαφής.

## <u>Συμπεράσματα</u>

Από το διάγραμμα 3.8, προκύπτει μια γραμμική τάση μείωσης του BR των φακών επαφής, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων που περιέχουν. Το γεγονός αυτό έρχεται σε συμφωνία με την γραμμική αύξηση της συγκέντρωσης των μικροσφαιριδίων που τοποθετήθηκαν στους φακούς επαφής. Ωστόσο, βάση της εξίσωσης 3.7 που δίνει τις τιμές του BR σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης των μικροσφαιριδίων, αναμενόταν υψηλότερα ποσοστά σκέδασης, από αυτά που τελικά μετρήθηκαν από τα πειράματα απλής διέλευσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στον υψηλότερο δείκτη διάθλασης που παρουσιάζει το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι φακοί επαφής, (RGP) σε σχέση με τον δείκτη διάθλασης της υδρογέλης. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο ΙΙ της παρούσας εργασίας, η σκέδαση πηγάζει από την διαφορά των δεικτών διάθλασης που η Η/Μ ακτινοβολία συναντά κατά την διέλευση της από το σκεδάζων μέσο. Έτσι, λόγω του ότι δείκτης διάθλασης του μέσου που περιβάλλει τους σκεδαστές στους φακούς επαφής είναι πιο κοντά στην τιμή του δείκτη διάθλασης των μικροσφαιριδίων, το ποσοστό σκέδασης της ακτινοβολίας είναι μικρότερο από αυτό που ένα δείγμα υδρογέλης με ίδια συγκέντρωση σκεδαστών παράγει.

Το δεύτερο σημείο που χρήζει σχολιασμού, είναι τα αποτελέσματα των μετρήσεων που δίνονται στον διάγραμμα 3.10. Η συνολική ενέργεια της δέσμης του laser δεν παραμένει σταθερή για όλους τους φακούς επαφής, που μετρήθηκαν ωστόσο με τις ίδιες πειραματικές συνθήκες. Το γεγονός αυτό δεν μπορεί να αποδοθεί στις πιθανές διακυμάνσεις στην ένταση του laser, καθώς η μείωση της συνολικής ενέργειας ακολουθεί μια συγκεκριμένη τάση, και συγκεκριμένα αυτήν της μείωσης της βαλλιστικής ενέργειας της δέσμης. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πιθανότατα λαμβάνει χώρα οπισθοσκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε και βάση του οποίου επιλέχθηκε και η περιοχή ανάλυσης των εικόνων. Έτσι, παρόλο που η ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη σκέδαση σε μικρές γωνίες (± 2°), δεν παύει να αντιπροσωπεύει ένα μετρήσιμο κλάσμα της συνολικής ισχύος.

# 3.3.2 Προφίλ έντασης της σκεδαζόμενης Η/Μ ακτινοβολίας.

## <u>Σκοπός</u>

Για την μελέτη του προφίλ έντασης της σκεδαζόμενης Η/Μ ακτινοβολίας σε μεγάλες γωνίες ( $\geq$ 5-6 μοιρών), χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που περιγράφηκε στην ενότητα § 3.3.1.1 Με την χρήση του γωνιόμετρου, δόθηκε η δυνατότητα περιστροφής της φωτοδιόδου γύρω από το κέντρο σκέδασης της δέσμης του laser, και η καταγραφή της έντασης της σαν συνάρτηση της γωνίας σκέδασης θ. Για την μελέτη του προφίλ σκέδασης σε γωνίες μικρότερες των 5-6 μοιρών κρίθηκε απαραίτητη η τροποποίηση της πειραματικής διάταξης.

#### <u>Μέθοδος</u>

Η τροποποιημένη πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε δίνεται σχηματικά στην εικόνα του σχήματος 3.15. Το τσόπερ αντικαταστήθηκε από ένα περιστρεφόμενο μεταλλικό έλασμα με μορφή λεπίδας, πάνω στο οποίο εστιάστηκε η δέσμη του laser με την βοήθεια του φακού *L2*. Επιπλέον τροποποιήθηκε το σύστημα ανίχνευσης, τοποθετώντας την ενεργή περιοχή της φωτοδιόδου μέσα σε ένα μεταλλικό κέλυφος κυλινδρικού σχήματος (Integrating Sphere). Η μία βάση του κελύφους είχε σφαιρικό σχήμα (με την εσωτερική επιφάνεια επικαλυμμένη με ένα στρώμα μικροσφαιριδίων γυαλιού για την ενίσχυση της διάχυτης ανάκλασης της ακτινοβολίας ) ενώ η άλλη διέθετε ένα κυκλικό άνοιγμα διαμέτρου 5mm, επιτρέποντας την είσοδο της δέσμης του laser στο εσωτερικό του.



Σχήμα 3.15: Τροποποιημένη διάταξη για την μελέτη του προφίλ σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας σε μικρές γωνίες.

Η ανιχνευόμενη από την φωτοδίοδο ένταση είναι σε αυτή την περίπτωση, ανάλογη της έντασης της ακτινοβολίας στο επίπεδο του ανοίγματος της κυλινδρικού κελύφους. Το όφελος από την χρήση του Integrating-Sphere είναι η ενίσχυση της αξιοπιστίας των μετρήσεων, δεδομένου ότι η ακτινοβολία ανιχνεύεται μετά από πολλαπλές, διάχυτες, ανακλάσεις στο εσωτερικό της. Έτσι, αποφεύγεται η ανίχνευση ακτινοβολίας που προέρχεται από ανεπιθύμητες ανακλάσεις στα οπτικά στοιχεία της διάταξης (φακοί, μεταλλικές επιφάνειες φωτοδιόδου), και η οποία δεν οφείλει την ύπαρξη της στην σκέδαση από τα μικροσφαιρίδια του δείγματος.

Εστιάζοντας την δέσμη του laser πάνω στο περιστρεφόμενο knife-edge, η κατανομή έντασης διαδοχικά καλύπτεται και αποκαλύπτεται με τη συχνότητα περιστροφής του μεταλλικού ελάσματος. Ρυθμίζοντας τις παραμέτρους του παλμογράφου, μπορεί να απομονωθεί η μετάβαση αυτή, και τότε το σήμα που καταγράφεται έχει την σιγμοειδή μορφή (Sigmoidal) που δίνεται στην εικόνα του σχήματος 3.16. Η πληροφορία για το προφίλ έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, προκύπτει από την καμπύλη αυτή, με επεξεργασία της εικόνας που λαμβάνεται από την οθόνη του παλμογράφου με την βοήθεια ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής.



Σχήμα 3.16: Σήμα που καταγράφεται στον παλμογράφο στην πειραματική διάταξη με το knifeedge.

Με την ανάπτυξη κατάλληλου αλγορίθμου στην Matlab από την εικόνα αυτή, υπολογίστηκαν σημείο προς σημείο οι συντεταγμένες της καμπύλης. Στην συνέχεια υπολογίστηκαν αριθμητικά οι τιμές μιας συνάρτησης με σιγμοειδή μορφή που δίνεται από την σχέση

$$y = \frac{a}{2} + b + \frac{b}{2} Erf((x - x0)/c)$$
(3.9)

Στις παραμέτρους a,b,c και x0 της εξίσωσης 3.9, δόθηκαν αυθαίρετα αρχικές τιμές, ενώ η παράμετρος x αφορούσε της τετμημένες της πειραματικής καμπύλης του σχήματος 3.16. Η συνάρτηση Erf(t) που δίνεται από την σχέση

$$Erf(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{t} e^{-z^{2}} dz$$
 (3.10)

αποτελεί το ολοκλήρωμα μια Γκαουσιανής κατανομής. Έτσι, οι παράμετροι της εξίσωσης 3.9, αναδεικνύουν μορφολογικά χαρακτηριστικά της Γκαουσιανής κατανομής και κατ' επέκταση του προφίλ έντασης της σκεδαζόμενης Η/Μ ακτινοβολίας. Ειδικότερα η παράμετρος c, δίνει το FWHM της κατανομής, η b το πλάτος της, η a την μετατόπιση της κατανομής στον άξονα y, και η παράμετρος x0 την μετατόπιση της στον άξονα y, και η παράμετρος x



Σχήμα 3.17: Χαρακτηριστικά Γκαουσιανής κατανομής.

Υπολογίζοντας αριθμητικά τις τιμές της σιγμοειδής συνάρτησης 3.9 για τις τιμές χρόνου που προέκυψαν από την πειραματική καμπύλη, υπολογίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων *a*,*b*,*c* και *x*0, για τις οποίες η θεωρητική καμπύλη προσεγγίζει καλύτερα τις τιμές της πειραματικής (με χρήση της μεθόδου των ελάχιστων τετραγώνων).

Με την πειραματική διάταξη και την μέθοδο που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους αυτής της ενότητας, μελετήθηκε το προφίλ έντασης της δέσμης του laser, μετά από απλή διέλευση της από δείγματα με μικροσφαιρίδια γυαλιού εμποτισμένα σε διάλυμα υδρογέλης. Η διαδικασία παρασκευής των δειγμάτων ήταν αυτή που περιγράφεται στην ενότητα § 3.2.1. Η διαδικασία τοποθέτησης τους σε κελιά και η μέτρηση του πάχους τους, διεξήχθησαν με την μέθοδο που περιγράφεται στην ενότητα § 3.3.1. Η απόσταση των δειγμάτων από το knife-edge ήταν 4.6cm, ενώ αυτή του knifeedge από το Integrating-Sphere 4.7cm. Στην απόσταση αυτή, το άνοιγμα της Integrating-Sphere αντιστοιχεί σε γωνία 6 μοιρών.

Όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκε μία Γκαουσιανή κατανομή για να προσεγγιστεί το ολοκλήρωμα της κατανομής της έντασης της ακτινοβολίας στο επίπεδο του τσόπερ κατά την κάθετη στην ταχύτητα του τσόπερ διεύθυνση. Η προσέγγιση αυτή –αν και δεν αντιστοιχεί σε κάποιο θεωρητικό μοντέλοαποδείχθηκε στην πράξη αποτελεσματική.

## <u>Αποτελέσματα</u>

Το προφίλ έντασης της δέσμης του laser μετά από μια απλή διέλευση της από το δείγμα No.5 (τα χαρακτηριστικά του οποίου δίνονται στον πίνακα II), όπως μετρήθηκε με τη διάταξη που περιγράφεται στην ενότητα § 3.3.1.1, σε δύο διαφορετικά πάχη, δίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 3.11: Προφίλ της κατανομής έντασης από μετρήσεις της σκέδασης στο δείγμα υδρογέλης No.5, για γωνίες σκέδασης 1 < θ < 15. Κόκκινη καμπύλη: Δείγμα No.5 πάχους 65 μm, Μαύρη καμπύλη: Δείγμα No.5 πάχους 140 μm.

Το ποσοστό σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας από το δείγμα No.5 ήταν υψηλό λόγω της επίσης υψηλής συγκέντρωσης μικροσφαιριδίων που περιείχε. Έτσι, δόθηκε η δυνατότητα καταγραφής εντάσεων της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας για γωνίες σκέδασης μέχρι και 14 μοιρών. Λόγω κορεσμού της φωτοδιόδου, δεν ελήφθησαν μετρήσεις της έντασης του βαλλιστικού μέρους της δέσμης (στις μηδέν μοίρες), κάτι το οποίο δεν αποτελούσε και σκοπό των εν λόγω μετρήσεων.

Βάση των όσων έχουν αναφερθεί για τα χαρακτηριστικά της κατανομής έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, θα περίμενε κανείς το προφίλ έντασης του δείγματος των 140μm, να παρουσιάζει μικρότερη τιμή μεγίστου, και αυξημένες εντάσεις στις μεγάλες γωνίες σε σχέση με αυτό του δείγματος των 65μm, όπου η κανονικοποιημένη συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων είναι μικρότερη. Ωστόσο η ένταση της δέσμης του laser ρυθμίστηκε ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση και καταγραφή των εντάσεων της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε όλο τους το εύρος. Έτσι, τα δύο δείγματα που μετρήθηκαν, εκτέθηκαν σε διαφορετικές εντάσεις προσπίπτουσας ακτινοβολίας, και οι μετρήσεις που δίνονται στο διάγραμμα 3.11 δεν προσφέρονται για την εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων. Σκοπός των εν λόγω μετρήσεων ήταν η μελέτη της μορφής του προφίλ, και αν αυτή αλλάζει για διαφορετικές συγκεντρώσεις σκεδαστών. Κανονικοποιώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο δείγμα πάχους 140μm βάση αυτών που προέκυψαν για το δείγμα πάχους 65μm, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί, η μορφή του προφίλ δεν αλλάζει.



Διάγραμμα 3.12: Προφίλ της κατανομής έντασης από μετρήσεις της σκέδασης στο δείγμα υδρογέλης No.5, για γωνίες σκέδασης 1 < θ < 15. Κόκκινη καμπύλη: Δείγμα No.5 πάχους 65 μm, Μαύρη καμπύλη: Κανονικοποιημένες τιμές δείγματος No.5 πάχους 140 μm.

Όσο αναφορά τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με την πειραματική διάταξη του σχήματος 3.15 και την μέθοδο που περιγράφηκε στην ενότητα § 3.3.2, για την εκτίμηση του προφίλ σκέδασης σε μικρές γωνίες, τα αποτελέσματα για τα δείγματα υδρογέλης με συγκεντρώσεις μικροσφαιριδίων που δίνονται στον πίνακα ΙΙ δίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 3.13: Προφίλ σκέδασης της δέσμης του laser μετά από απλή διέλευση της από τα δείγματα υδρογέλης όπως μετρήθηκε με τη διάταξη του σχήματος 3.15.

Στο διάγραμμα αυτό, είναι χαρακτηριστική η μείωση της μέγιστης τιμής του προφίλ των δειγμάτων σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης των μικροσφαιρίδιων που περιέχουν. Λόγω διαφορετικού πάχους των δειγμάτων που μετρήθηκαν, και σύμφωνα με τους υπολογισμούς που προηγήθηκαν (σχέση 3.6), χρησιμοποιείται ξανά ο όρος της κανονικοποιημένης συγκέντρωσης, για την ακριβέστερη εκτίμηση της συγκέντρωσης των μικροσφαιριδίων στα δείγματα. Δεν παρατηρείται διεύρυνση της κατανομής για αυξημένες συγκεντρώσεις μικροσφαιριδίων, γεγονός που ενισχύει την υπόθεσή μας για απουσία πολλαπλής σκέδασης στις συγκεκριμένες συγκεντρώσεις. Τα συμπεράσματα αυτά, που εξάγει κανείς από την μελέτη των προφίλ σκέδασης γραφικά, επιβεβαιώνονται από τα διαγράμματα που ακολουθούν, στα οποία δίνονται τα χαρακτηριστικά των προφίλ (FWHM, κανονικοποιημένο πλάτος) σαν συνάρτηση κανονικοποιημένης της συγκέντρωσης των δειγμάτων σε μικροσφαιρίδια.



Διάγραμμα 3.14: i) Κανονικοποιημένο πλάτος των προφίλ σκέδασης, ii)FWHM των προφίλ σκέδασης, σαν συνάρτηση της κανονικοποιημένης συγκέντρωσης μικροσφαιριδίων (σχέση 3.6) για τα δείγματα υδρογέλης (η κατανομή στο επίπεδο του ανοίγματος της Integrating sphere είναι 6 μοίρες), iii) BR σαν συνάρτηση της κανονικοποιημένης συγκέντρωσης των μικροσφαιριδίων. Οι τιμές των BR πραγματοποιήθηκε με την υπολογισμό της συνολικής ενέργειας που περικλείεται κάτω από το προφίλ έντασης του διαγράμματος 3.12.

Υπολογίζοντας την ενέργεια που περικλείεται κάτω από το προφίλ έντασης (του διαγράμματος 3.13), μελετήθηκε η σχέση του BR με την κανονικοποιημένη συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων στα υπό εξέταση δείγματα. Προσαρμόζοντας μια ευθεία στα πειραματικά δεδομένα, προκύπτει ότι η εξίσωση που περιγράφει την σχέση αυτή είναι:

$$BR = 0.942 - 0.412 * Norm. Concentration$$
(3.11)

και συντελεστή  $R^2 = 0.84$ 

## <u>Συμπεράσματα</u>

Συγκρίνοντας την σχέση 3.11, με αυτήν που προέκυψε από τα πειράματα απλής διέλευσης που περιγράφονται στην παράγραφο 3.3.1.1 (σχέση 3.7), προκύπτει μια ισχυρή συμφωνία των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις μετρήσεις με τις δυο διαφορετικές μεθόδους.

Σκοπός ανάπτυξης της πειραματικής διάταξης που δίνεται στο σχήμα 3.15, και της μεθοδολογίας ανάλυσης των μετρήσεων που ελήφθησαν, ήταν η μελέτη του προφίλ της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Ωστόσο, από τα προφίλ σκέδασης που υπολογίστηκαν και παρατίθενται στο διάγραμμα 3.13, προέκυψε ότι δεν είναι δυνατός με την εν λόγω μέθοδο, ο υπολογισμός του συνολικού προφίλ, που θα απεικονίζει τόσο το βαλλιστικό όσο και το σκεδαζόμενο μέρος της Η/Μ ακτινοβολίας. Ειδικότερα, τα προφίλ που τελικά παρουσιάζονται αφορούν το βαλλιστικό μέρος της δέσμης και δεν περιέχουν πληροφορία για το μέρος της Η/Μ ακτινοβολίας που σκεδάζεται. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διαφορά στην ένταση του βαλλιστικού και του σκεδαζόμενου μέρους της δέσμης του laser, είναι μεγάλη. Για την δυνατότητα ανίχνευσης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, απαιτείται η ακτινοβόληση των υπό εξέταση δειγμάτων με υψηλές εντάσεις, που οδηγούν ωστόσο σε κορεσμό της φωτοδιόδου. Επιπλέον, ρυθμίζοντας την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επίπεδα τέτοια ώστε να αποφευχθεί ο κορεσμός της φωτοδιόδου, η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας κυμαίνεται στα επίπεδα θορύβου (dark current) του ανιχνευτή, γεγονός που την καθιστά μη ανιχνεύσιμη. Ο δεύτερος παράγοντας που στερεί την δυνατότητα ανίγνευσης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι η μικρή δυναμική περιοχή του παλμογράφου (8 bit, 255 επίπεδα φωτεινότητας). Η χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή που αναπτύχθηκε, για την ενίσχυση του σήματος, δεν βοήθησε, λόγω του ότι ο παλμογράφος δεν είχε την δυνατότητα απεικόνισης του πλήρους εύρους της κατανομής. Για τον λόγο αυτό, οδηγηθήκαμε στη αλλαγή του συστήματος ανίχνευσης και καταγραφής της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, στα πειράματα που διεξήχθησαν στην συνέχεια, ένα μέρος των οποίων παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.3.1.2).

# Κεφάλαιο ΙV

# 4.1 Μετρήσεις διπλής διέλευσης.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφηκαν οι μετρήσεις απλής διέλευσης που διεξήχθησαν, για την εκτίμηση της σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας από το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, για την εκτίμηση της σκέδασης μετά από διπλή διέλευση της ακτινοβολίας από το σκεδάζων μέσο. Η αρχή της διπλής διέλευσης όπως έχει ήδη αναφερθεί, (§ 2.5.1) αποτελεί την βασική μέθοδο η οποία έχει χρησιμοποιηθεί έως σήμερα για την αντικειμενική μέτρηση της σκέδασης. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, βασίστηκαν στην μέθοδο που ανέπτυξαν οι D.De Brouwere, Χ. Γκίνης και οι συνεργάτες τους, για την εκτίμηση της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό. Όπως έχει ήδη αναφερθεί (§ 2.5.1), η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή λειτουργίας της εκτροπομετρίας Tscherning. Το βασικό πλεονέκτημα των μεθόδων διπλής διέλευσης είναι ότι δεν απαιτείται η αφαίρεση του δείγματος με αποτέλεσμα να είναι η μόνη αποδεκτή προσέγγιση για μετρήσεις στον ζωντανό οφθαλμό.

# 4.2 Η εκτροπομετρία Tscherning.

Το 1894, ο Tscherning<sup>58</sup> παρουσίασε μία νέα μέθοδο για την εκτίμηση των οπτικών εκτροπών στον ανθρώπινο οφθαλμό. Στην οπτική διάταξη που πρότεινε (σχήμα 4.1 i)), μια πηγή laser Nd-YAG, χρησιμοποιείται για την παραγωγή δέσμης με μήκος κύματος ακτινοβολίας στα 532nm. Η δέσμη εισέρχεται σε τηλεσκοπικό σύστημα, γίνεται παράλληλη, και στην συνέχεια διέρχεται από ένα διάφραγμα με 168 μικρές οπές (pin holes), δημιουργώντας έτσι ισάριθμες φωτεινές ακτίνες. Για την αποφυγή πιθανών ανακλάσεων από τις οπτικές επιφάνειες του ανθρώπινου οφθαλμού και την αλλοίωση της ποιότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου, στο κέντρο του διαφράγματος δεν υπάρχουν οπές (σχήμα 4.1 ii)). Οι διάμετρος του μοτίβου των φωτεινών κηλίδων στο επίπεδο του κερατοειδή είναι 10mm ενώ η διάμετρος του αμφιβληστροειδικού ειδώλου διατηρείται σταθερή στο 1mm με την χρήση φακού (aberroscope lens). Ο αριθμός των φωτεινών ακτινών που προβάλλονται στον αμφιβληστροειδή εξαρτάται από το μέγεθος της κόρης του υπό εξέταση οφθαλμού. Ο συνολικός χρόνος ακτινοβόλησης είναι 40ms, ενώ η ισχύς της ακτινοβολίας είναι αρκετά μικρότερη από τα επίπεδα που απαιτούνται διεθνώς, για την ασφάλεια των εξεταζόμενων.



Σχήμα 4.1: i) Αρχή λειτουργίας εκτροπομετρίας Tscherning, ii) απεικόνιση σημείων του διαφράγματος στον αμφιβληστροειδή, α) ιδανικό οπτικό σύστημα, β) οπτικό σύστημα με εκτροπές.

Οι φωτεινές κηλίδες στον αμφιβληστροειδή, απεικονίζονται στην συνέχεια σε μία CCD camera υψηλής ευαισθησίας, μέσω έμμεσης οφθαλμοσκόπησης. Η διάμετρος της κόρης εξόδου διατηρείται στο 1mm, και έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι τα οπτικά απεικόνισης του αμφιβληστροειδικού ειδώλου είναι στο περιθλαστικό όριο. Το σύστημα ανίχνευσης της ακτινοβολίας είναι συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή, και ο υπολογισμός των

εκτροπών γίνεται με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού, και την ανάλυση του αμφιβληστροειδικού ειδώλου. Ειδικότερα, γίνεται σύγκριση της θέσης της κάθε φωτεινής κηλίδας στο επίπεδο του αμφιβληστροειδή με αυτή που θα έπρεπε να έχει εάν το οπτικό σύστημα ήταν ιδανικό. Το ιδανικό μοτίβο των φωτεινών κηλίδων προκύπτει από υπολογισμούς που βασίζονται στο μοντέλο οφθαλμού του Gullstrand. Από τις αποκλίσεις των κηλίδων στον αμφιβληστροειδή και με την βοήθεια των πολυωνύμων Zernike, ανακατασκευάζεται το μέτωπο κύματος εκτροπών του υπό εξέταση οφθαλμού.

Η ποιότητα των φωτεινών κηλίδων στον αμφιβληστροειδή, εξαρτάται από την οπτική διαύγεια των δομών του οφθαλμού. Έτσι, θολερότητες στον κερατοειδή και τον κρυσταλλοειδή φακό εξασθενίζουν την ένταση των φωτεινών ακτίνων, και αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά των φωτεινών κηλίδων. Με την κατάλληλη επεξεργασία των εικόνων που λαμβάνονται από την CCD camera, είναι δυνατή η εκτίμηση της σκέδασης.

# 4.2.1 Μετρήσεις σε δείγματα υδρογέλης

## <u>Σκοπός</u>

Σκοπός των εν λόγω μετρήσεων είναι η αντικειμενική εκτίμηση της σκέδασης από το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο μετά από διπλή διέλευση της δέσμης του laser από τα υπό εξέταση δείγματα, και ειδικότερα, η μελέτη της εξάρτησης του BR από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων χρησιμοποιώντας την προαναφερθείσα διάταξη του Tscherning. Επιπλέον, η προσπάθεια συσχέτισης των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις διπλής διέλευσης με αυτά που προέκυψαν από τις μετρήσεις απλής διέλευσης.

#### Μέθοδος

Οι μετρήσεις σκέδασης στα δείγματα υδρογέλης, πραγματοποιήθηκαν με τον αναλυτή μετώπου κύματος Wavelight Wavefront Analyzer, του οποίου η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην εκτροπομετρία Tscherning, και η οποία περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο (§ 4.2). Η οπτική διάταξη της συσκευής αυτής δίνεται στην εικόνα του σχήματος που ακολουθεί



Σχήμα 4.2: Διάταξη του αναλυτή μετώπου κύματος Wavelight Wavefront Analyzer που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις διπλής διέλευσης.

Η πηγή laser του εν λόγω συστήματος είναι ένα διοδικό laser στα 660nm (Laser class 2 (IEC 825)). Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων η μάσκα των πολλών οπών που φέρει η συσκευή, αντικαταστάθηκε με μία μάσκα 12 οπών που απεικονίζεται στην εικόνα του σχήματος 4.2. Οι διαστάσεις των οπών ήταν 100μm. Όσο αναφορά το σύστημα ανίχνευσης και καταγραφής της Η/Μ ακτινοβολίας, αυτό αποτελούνταν από μια CCD camera υψηλής ευαισθησίας, όπου με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού έδινε την δυνατότητα ρύθμισης της παραμέτρου αυτής.

Για το έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρήσεων της CCD, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της απόκρισης της σαν συνάρτηση της έντασης της δέσμης του laser. Μια σειρά φίλτρων (Melles Griot, Set No:311492) γνωστής οπτικής πυκνότητας τοποθετήθηκαν στον οπτικό δρόμο της δέσμης του laser, και τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί



Διάγραμμα 4.1: Απόκριση της camera για διαφορετικά επίπεδα φωτεινότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι η απόκριση της camera είναι γραμμική στην ένταση της ακτινοβολίας που ανιχνεύει. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για την μελέτη της απόκρισης του ανιχνευτικού συστήματος για διαφορετικές τιμές ευαισθησίας του. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα υδρογέλης η τιμή ευαισθησίας της CCD διατηρήθηκε σταθερή (166) και ίση με αυτήν που χρησιμοποιούν οι κλινικοί κατά την εξέταση ασθενών.



Διάγραμμα 4.2: Απόκριση του ανιχνευτικού συστήματος για διαφορετικές τιμές ευαισθησίας του.

Τα δείγματα υδρογέλης στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, ήταν αυτά που παρασκευάστηκαν και για τις μετρήσεις απλής διέλευσης. Οι συγκεντρώσεις των

μικροσφαιριδίων είναι αυτές που δίνονται στον πίνακα ΙΙ του κεφαλαίου 3, και η παχυμετρία των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε ξανά με την χρήση του ομοεστιακού μικροσκοπίου HRT II (Heidenberg Engineering). Για την τοποθέτηση των δειγμάτων στην οπτική διάταξη του Wavelight Wavefront Analyzer, κατασκευάστηκε ένα πρότυπο μοντέλο οφθαλμού, το οποίο και απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Στο τελικό στάδιο παρασκευής των δειγμάτων υδρογέλης (που περιγράφεται στην ενότητα § 3.2.1 ), και ενώ αυτά ήταν ακόμα σε ρευστή μορφή, τοποθετήθηκαν ανάμεσα στου δύο φακούς L1 & L2. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε, στην κατά το δυνατό γρηγορότερη συναρμολόγηση του μοντέλου, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος έκθεσης των δειγμάτων στον αέρα, και να αποφευχθεί η αφυδάτωση τους.



Σχήμα 4.3: i)Όψη, ii) κάτοψη του πρότυπου μοντέλου οφθαλμού που κατασκευάστηκε για την τοποθέτηση των δειγμάτων υδρογέλης. L1, επιπεδόκυρτος φακός εστιακής απόστασης 30mm, από BK7, L2, αμφίκυρτος φακό εστιακής απόστασης 30mm, από BK7. Η ημισφαιρική επιφάνεια της βάσης 4, προσομοιώνει τον αμφιβληστροειδή ενώ το σύστημα των φακών έχει διοπτρική ισχύ ίση με αυτή του ανθρώπινου οφθαλμού.

Το πιο ενδιαφέρον μέρος των εν λόγω πειραμάτων ήταν η επεξεργασία των εικόνων για τον υπολογισμό της σκέδασης. Ενδεικτικά οι εικόνες που καταγράφηκαν (σχήμα 4.3) από την CCD camera, για δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις μικροσφαιριδίων (κανονικοποιημένες με το πάχος των δειγμάτων) δίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 4.4: Εικόνες που ελήφθησαν από το τον αναλυτή μετώπου κύματος Wavelight Wavefront Analyzer, από μετρήσεις σε δείγματα υδρογέλης, i) εικόνα δείγματος 1 ii) εικόνα δείγματος 5, με συγκεντρώσεις μικροσφαιριδίων που δίνονται στον πίνακα ΙΙ του κεφ.3

Μια πρώτη παρατήρηση από τις εικόνες αυτές, είναι ότι η ένταση των φωτεινών κηλίδων στην εικόνα του δείγματος 5 είναι πολύ μικρότερη από αυτών του δείγματος 1. Η σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας από τα μικροσφαιρίδια γυαλιού που περιέχονται στα υπό εξέταση δείγματα, αφαιρεί ενέργεια από το βαλλιστικό μέρος της δέσμης, και την κατανέμει στην περιφέρεια της συνάρτησης διασποράς σημείου (PSF) κάθε φωτεινής κηλίδας. Όπως συνέβη και με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στους φακούς επαφής (§ 3.3.1.2), οι εικόνες περιέχουν θόρυβο (speckle noise) λόγω του υψηλού βαθμού συμφωνίας της δέσμης του laser. Για τον λόγο αυτό, και για την ενίσχυση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, ελήφθησαν τέσσερις εικόνες για κάθε δείγμα, και οι υπολογισμοί για την εκτίμηση της σκέδασης, πραγματοποιήθηκαν στην εικόνα που προέκυψε από τον μέση τιμή τους.

Για τον υπολογισμό της σκέδασης ποσοτικά, χρησιμοποιήθηκε ξανά ως μετρική το βαλλιστικό κλάσμα (BR). Ο υπολογισμός της παραμέτρου αυτής, πραγματοποιήθηκε με την επεξεργασία των εικόνων που ελήφθησαν, και την χρήση κατάλληλου αλγορίθμου στην Matlab, την οποία ανέπτυξαν οι D. De Brouwere, X. Γκίνης και οι συνεργάτες τους στην εργασία που πραγματοποίησαν για την μελέτη της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό (§ 2.5.1). Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή του αλγορίθμου, κρίνεται απαραίτητη η εκτίμηση των παραμέτρων που διαμορφώνουν τα χαρακτηριστικά των φωτεινών κηλίδων στην CCD, και τα οποία λαμβάνονται υπ' όψιν στους υπολογισμούς. Αρχικά η κατανομή διαμορφώνεται από την κατανομή έντασης της εισερχόμενης ακτινοβολίας κατά την διέλευσης της από τις οπές. Μια δεύτερη παράμετρος είναι η μεγέθυνση που τα οπτικά στοιχεία της διάταξης εισάγουν κατά την απεικόνιση των φωτεινών κηλίδων στον ανιχνευτή. Επιπλέον, η ανάλυση της camera, όπου στην εν λόγω διάταξη ήταν 8-bit, καθορίζει τα διαφορετικά επίπεδα φωτεινότητας που μπορεί να απεικονίσει, οριοθετώντας και το εύρος της κατανομής που μπορεί να καταγραφεί. Ο θόρυβος (speckle noise) λόγω σκέδασης της σύμφωνης ακτινοβολίας του laser (όπως έχει ήδη αναφερθεί και φαίνεται στις εικόνες του σχήματος 4.4), αλλοιώνει την ποιότητα της εικόνας. Η τελευταία παράμετρος, η οποία και αποτελεί αντικείμενο μελέτης της εργασίας αυτής, είναι η σκέδαση της δέσμης του laser από το υπό εξέταση δείγμα.

Σε μια συνοπτική περιγραφή του αλγορίθμου, η διαδικασία ανάλυσης των ληφθέντων εικόνων δίνεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος που ακολουθεί. Για τον υπολογισμό του βέλτιστου δυνατού προφίλ για κάθε φωτεινή κηλίδα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ακτινικής ολοκλήρωσης των προφίλ που προκύπτουν για διαφορετικές γωνίες σάρωσης *θ*, γύρω από το κέντρο της κατανομής. Διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε και στην ανάλυση των εικόνων που ελήφθησαν από τα πειράματα απλής διέλευσης που πραγματοποιήθηκαν στους φακούς επαφής και μελετήθηκαν στην ενότητα § 3.3.1.2.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της Matlab, για την ανάλυση των εικόνων στα πειράματα διπλής διέλευσης.
Η διαδικασία υπολογισμού του θεωρητικού προφίλ, έγινε βάση των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την διάδοση της δέσμης στην οπτική διάταξη και οι οποίες σχηματικά απεικονίζονται στην εικόνα του σχήματος 4.6.



Σχήμα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την διάδοση της δέσμης στην οπτική διάταξη.

Η κατανομή έντασης που εισέρχεται στο υπό εξέταση δείγμα, είναι μια συνέλιξη της κατανομής έντασης της δέσμης του laser που διαμορφώνεται από την PSF του οπτικού συστήματος και της κατανομής περίθλασης από τις οπές. Στην συνέχεια ένα μέρος της δέσμης (που εκφράζεται από την τιμή του BR) σκεδάζεται από το δείγμα υδρογέλης που περιέχει του σκεδαστές, διαδίδεται μέσα στο μοντέλο του οφθαλμού, και εστιάζεται στην ημισφαιρική επιφάνεια. Φορμαλιστικά ο υπολογισμός αυτός συνοψίζεται στην εξίσωση:

$$Profile_{retina} = BR \times Profile_{Optical System} +$$

$$(1-BR) \times (Profile_{Optical System} \otimes Anomalous Scattering Profile)$$

$$(4.1)$$

Κατά την διέλευση της ακτινοβολίας (βαλλιστικό μέρος και σκεδαζόμενο) για δεύτερη φορά από το δείγμα υδρογέλης, ένα μέρος αυτής σκεδάζεται ξανά από τα μικροσφαιρίδια, και στην συνέχεια απεικονίζεται από τα οπτικά στοιχεία της διάταξης στην CCD camera. Η κατανομή σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας κάθε φορά που αυτή διέρχεται από το υπό εξέταση δείγμα, είναι η συνέλιξη της PSF του οπτικού συστήματος που έχει υποστεί περίθλαση από τις οπές, με την κατανομή έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που προκύπτει από την 'θεωρία της ανώμαλης περίθλασης' (§ 2.4.1), πολλαπλασιασμένη με την τιμή του 1-BR (μέρος της ακτινοβολίας που σκεδάζεται).

### Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα υδρογέλης, δίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 4.3: Εξάρτηση του BR από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων στα δείγματα υδρογέλης. Οι κανονικοποιημένες συγκεντρώσεις αφορούν το γινόμενο της κ.β συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων επί το πάχος του δείγματος και είναι ανάλογες της 'συνολικής ενεργής διατομής σκέδασης' (σχέση 3.6).

Προσαρμόζοντας μια ευθεία στα δεδομένα του διαγράμματος 4.3, προκύπτει ότι η εξάρτηση του BR από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων περιγράφεται από την σχέση:

$$BR = 1,0378 - 0,1134 * Norm.Concentration$$
 (4.2)

και συντελεστή  $R^2 = 0.81$ . Η εξίσωση αυτή διαφέρει από την αντίστοιχη της σχέσης 3.7 που εξήχθη από τις μετρήσεις των πειραμάτων απλής διέλευσης.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα απλής διέλευσης σε σχέση με αυτά που προέκυψαν από τα πειράματα διπλής διέλευσης, για την εξάρτηση του BR από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων, μπορεί να γίνει από το διάγραμμα που ακολουθεί



Διάγραμμα 4.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων από τα πειράματα απλής και διπλής διέλευσης που διεξήχθησαν για την μελέτη της εξάρτησης του BR από την συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων.

Κάνοντας γραμμική προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα του διαγράμματος 4.4, η εξίσωση που περιγράφει την σχέση του BR που μετρήθηκε με πειράματα απλής διέλευσης σε σχέση με τις τιμές του BR που προέκυψαν από τα πειράματα διπλής διέλευσης είναι

$$BR_{Single Pass} = 0,2159 + 0,7088 *BR_{Double Pass}$$
(4.3)

### <u>Συμπεράσματα</u>

Η εξάρτηση του BR από την κανονικοποιημένη συγκέντρωση μικροσφαιριδίων στα υπό εξέταση δείγματα, όπως αναδεικνύει η εξίσωση 4.2 είναι γραμμική. Το γεγονός αυτό έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των μετρήσεων απλής διέλευσης που περιγράφουν οι εξισώσεις 3.7 & 3.11. Ωστόσο παρουσιάζεται μια μικρή διαφορά στους συντελεστές των εξισώσεων που περιγράφουν την γραμμική εξάρτηση. Η διαφορά αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι με τις πειραματικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν για την εκτίμηση της σκέδασης, δεν υπολογίζεται η ενέργεια της Η/Μ ακτινοβολίας που σκεδάζεται σε διεύθυνση αντίθετη με αυτήν διάδοση της δέσμης (οπισθοσκέδαση). Αν και το ποσοστό αυτό είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερο από το ποσοστό της ακτινοβολίας που σκεδάζεται στην διεύθυνση διάδοσης της δέσμης, είναι ικανό να δικαιολογήσει την διαφορά αυτή, δεδομένου ότι στις μετρήσεις διπλής διέλευσης είναι διπλάσιο από αυτό των μετρήσεων απλής διέλευσης. Η εξίσωση 4.3 αναδεικνύει την ισχυρή εξάρτηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δυο διαφορετικές μεθόδους μέτρησης της σκέδασης που παράγουν τα δείγματα από το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο. Το γεγονός αυτό, ισχυροποιεί την αξιοπιστία των μετρήσεων που προκύπτουν από τις δύο πειραματικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν, και οι οποίες βασίζονται στην μέτρηση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας μετά από απλή διέλευση της από το σκεδάζων μέσο. Έτσι, αφήνει ενθαρρυντικά στοιχεία για την χρήση της μεθόδου αυτής ως μια εναλλακτική, αξιόπιστη μέθοδο εκτίμηση της σκέδασης in vitro.

### 4.3 Μετρήσεις της σκέδασης In vivo.

Πέραν της αντικειμενικής μέτρησης της σκέδασης από το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου μέτρησης της σκέδασης *in vivo*. Στην προσπάθεια αυτή, θεωρήθηκε ενδιαφέρουσα η ανάλυση των χαρακτηριστικών του ειδώλου, που δημιουργείται κατά την ανάκλαση της Η/Μ ακτινοβολίας από την οπίσθια επιφάνεια του κρυσταλοειδή φακού. Οι ανακλάσεις της ακτινοβολίας από τις επιφάνειες του οπτικού συστήματος του ανθρώπινου οφθαλμού είναι γνωστές ως εικόνες Purkinje, και σχηματικά δίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 4.7: Σχηματικό διάγραμμα δημιουργίας εικόνων Purkinje. 1: Πρώτο Purkinje, ανάκλαση από την εμπρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή, 2: Δεύτερο Purkinje, από την οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδή, 3: Τρίτο Purkinje, από την εμπρόσθια επιφάνεια του φακού, 4: Τέταρτο Purkinje, από την οπίσθια επιφάνεια του φακού.

Αναλύοντας το τέταρτο Purkinje, μπορεί να εκτιμηθεί η σκέδαση στον ανθρώπινο οφθαλμό που προέρχεται από τον κερατοειδή και τον κρυσταλλοειδή φακό. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 1 (§ 1.2 και §1.3), σε υγιείς και νέους οφθαλμούς, οι δύο αυτές δομές του οφθαλμού είναι διάφανες στην ορατή Η/Μ ακτινοβολία. Με την πάροδο της ηλικίας ωστόσο η διαφάνεια του φακού αλλοιώνεται, ενώ η κερατοειδής παρουσιάζει αυξημένη σκέδαση μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής. Έτσι, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των υπό εξέταση οφθαλμών μπορούν να ανιχνευτούν αλλαγές στην σκέδαση που οφείλονται στο σύστημα κερατοειδή-φακού.

### <u>Σκοπός</u>

Για την αντικειμενική μέτρηση της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό *in vivo,* αναπτύχθηκε μια πειραματική διάταξη που αξιολογεί την πληροφορία που φέρει η τέταρτη εικόνα Purkinje για την σκέδαση στο σύστημα κερατοειδή – φακού.

### Μέθοδος

Η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε για την απεικόνιση του τέταρτου Purkinje, δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί



Σχήμα 4.8: Πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό *in vivo*, απεικονίζοντας το τέταρτο Purkinje

Ένα laser He-Ne στα 633nm χρησιμοποιήθηκε ως πηγή ακτινοβόλησης. Η δέσμη διευρύνθηκε και έγινε παράλληλη περνώντας από χωρικό φίλτρο, που αποτελούνταν από έναν αντικειμενικό φακό, *Obj.* (5x, 0.12), ένα διάφραγμα, *P1*, 30μm και ένα δεύτερο φακό *L1*. Ένα διάφραγμα *P2* μεταβλητής διαμέτρου τοποθετήθηκε για τον έλεγχο της διαμέτρου της δέσμης που ακτινοβολεί τον υπό εξέταση οφθαλμό. Η χρήση του εν λόγω διαφράγματος κρίθηκε απαραίτητη, για την αποφυγή ακτινοβόλησης της ίριδας των εξεταζομένων, οι οποίοι παρουσίαζαν κόρη διαφορετικής διαμέτρου. Σε αντίθετη περίπτωση, η εικόνα που λαμβάνεται περιέχει πληροφορία της σκέδασης προερχόμενη από την ίριδα, κάτι το οποίο δεν αποτελεί σκοπό των εν λόγω μετρήσεων. Ένα φίλτρο γνωστής οπτικής πυκνότητα παρεμβλήθηκε στην πορεία της δέσμης για την διαμόρφωση της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανάλογα με τις διαφορετικές πειραματικές συνθήκες, και η οποία σε κάθε περίπτωση ήταν αρκετά μικρότερη από τα επίπεδα έντασης που απαιτούνται διεθνώς για την ασφάλεια των εξεταζόμενων. Η εικόνα του 4<sup>ου</sup> Purkinje απεικονίστηκε από το οπτικό σύστημα της camera στην CCD, η οποία και απείχε 9 cm από τον κερατοειδή του υπό εξέταση οφθαλμού.

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, ζητήθηκε από τους εξεταζόμενους να κοιτούν μέσα στην camera (ο μη εξεταζόμενος οφθαλμός εστίαζε σε ένα σταθερό σημείο, για την δημιουργία σταθερής διεύθυνσης προσήλωσης). Έτσι, η γωνία μεταξύ του αξόνων καταγραφής και ακτινοβόλησης ήταν 40 μοίρες. Σε αυτή την γωνία το είδωλο του 4<sup>ου</sup> Purkinje ήταν αρκετά μακριά από αυτό του 1<sup>ου</sup>, συνθήκη αναγκαία λόγω της μεγάλης έντασης που παρουσιάζει το 1<sup>ο</sup> (εικόνα σχήματος 4.9). Σε αντίθεση περίπτωση θα υπήρχε συνεισφορά στην κατανομή έντασης του 4<sup>ου</sup> Purkinje από το 1<sup>ο</sup>



Σχήμα 4.9: Θέση και χαρακτηριστικά 1<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> Purkinje στον ανθρώπινο οφθαλμό, στην οπτική διάταξη που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της σκέδασης *in vivo*. Φωτισμός των ορίων της ίριδας για την αναγνώριση της θέσης των Purkinje στον οφθαλμό. Η CCD camera είναι εστιασμένη στο 4<sup>ο</sup> Purkinje (To 1<sup>o</sup> είναι απεστιασμένο λόγω διαφορετικής θέσης του ειδώλου του, στον οπτικό σύστημα του ανθρώπινου οφθαλμού).

Εικόνες καταγράφηκαν για δύο διαφορετικές πειραματικές συνθήκες: παρουσία και απουσία φίλτρου στην οπτική διάταξη. Παρουσία του φίλτρου το είδωλο του 4<sup>ου</sup> Purkinje δεν ήταν κορεσμένο και η ένταση του ήταν αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να ξεχωρίζει από τον φωτισμό του περιβάλλοντος του, που γεμίζει την κόρη. Αφαιρώντας το φίλτρο στην συνέχεια η εικόνα ήταν κορεσμένη. Έτσι, έγιναν εντονότερα τα χαρακτηριστικά της κατανομής έντασης στην περιφέρεια του ειδώλου, όπου και κατανέμεται η σκεδαζόμενη Η/Μ ακτινοβολία. Για κάθε πειραματική συνθήκη, ελήφθησαν τέσσερις εικόνες, για τον υπολογισμό της μέσης τιμής, και την υποβάθμιση του θορύβου της εικόνας (speckle noise).

Για την αποφυγή έκθεσης του ανθρώπινου οφθαλμού στην ακτινοβολία του laser για μεγάλο χρόνο, η διαδικασία ελέγχτηκε πρώτα σε ένα μοντέλο οφθαλμού με ελεγχόμενα επίπεδα σκέδασης. Αυτό αποτελούνταν από φακό επαφής που περιείχε μικροσφαιρίδια γυαλιού (φακοί επαφής που μελετήθηκαν στην ενότητα § 3.3.1.2 ), και χρησιμοποιήθηκε ως κερατοειδής, τοποθετημένο μπροστά από έναν αμφίκυρτο ενδοφακό που χρησιμοποιήθηκε ως κρυσταλλοειδής φακός. Ο ενδοφακός είχε διοπτρική ισχύ 14.5 D, διάμετρο 6.5mm και πάχος περίπου 1mm (AMO, model PC65CTB). Το εν λόγω σύστημα τοποθετήθηκε σε βάση με δυνατότητα κίνησης στις τρεις διαστάσεις, για την ευθυγράμμιση του μοντέλου (σχήμα 4.10) με τον οπτικό άξονα της διάταξης.



Σχήμα 4.10: Μοντέλο οφθαλμού που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων με την οπτική διάταξη που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της σκέδασης *in vivo*.

Οι εικόνες που ελήφθησαν με την διάταξη και την μεθοδολογία που μόλις περιγράφηκε, επεξεργάστηκαν με την χρήση κατάλληλου αλγορίθμου στην Matlab, για τον υπολογισμό του BR των οφθαλμών που εξετάστηκαν. Ο αλγόριθμος ήταν κατά βάση ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των εικόνων στα πειράματα διπλής διέλευσης, που πραγματοποιήθηκαν στους φακούς επαφής (διάγραμμα 3.12, κεφαλαίου 3). Η πρώτη διαφορά με τον εν λόγω αλγόριθμο υπόκειται στο τρίτο βήμα όπου ο προσδιορισμός των δύο επιπέδων φωτεινότητας έγινε βάση της οπτικής πυκνότητας των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των κατάλληλων πειραματικών συνθηκών. Η δεύτερη, είναι ο υπολογισμός της μεγέθυνσης του προφίλ σκέδασης λόγω απεικόνισης του, τόσο από το οπτικό σύστημα της CCD camera, όσο και από αυτό του ανθρώπινου οφθαλμού. Κατ' ουσία όμως, πρόκειται για μια μοντελοποίηση με χρήση δύο διαδοχικών συνελίξεων σε ένα ενδιάμεσο επίπεδο ειδώλου.

Για τον υπολογισμό της μεγέθυνσης που εισάγει το οπτικό σύστημα του οφθαλμού στο προφίλ σκέδασης, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πινάκων της γεωμετρικής οπτικής. Η μέθοδος αυτή, δίνει την δυνατότητα υπολογισμού του διανύσματος εξόδου (θέση, γωνία) μιας οπτικής ακτίνας από ένα οπτικό σύστημα, γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά (ακτίνες καμπυλότητες, αποστάσεις, δείκτες διάθλασης) των στοιχείων του συστήματος και την γωνία, θέση εισόδου της ακτίνας σε αυτό (σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11: Σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει το διάνυσμα θέσης οπτικής ακτίνας κατά την είσοδο και την έξοδο αυτής από ένα οπτικό σύστημα Μ.

Φορμαλιστικά, η σχηματική αναπαράσταση της διάδοσης μιας οπτικής ακτίνας από ένα οπτικό σύστημα συνοψίζεται από την σχέση:

$$\begin{bmatrix} y_i \\ \beta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_{i-1} \\ \beta_{i-1} \end{bmatrix}$$
(4.4)

Ο τελικός πίνακας μετασχηματισμού Μ που περιγράφει το οπτικό σύστημα, δημιουργείται με διαδοχική εφαρμογή μετασχηματισμών διάθλασης και μετατόπισης της οπτικής ακτίνας από τα οπτικά στοιχεία του συστήματος. Τα οπτικά στοιχεία του ανθρώπινου οφθαλμού, από τα οποία διέρχονται οι οπτικές ακτίνες που σχηματίζουν το 4° Purkinje, πριν εισέρθουν στο οπτικό σύστημα της camera για απεικόνιση στην CCD είναι ο κερατοειδής και ο κρυσταλλοειδής φακός.

Σκοπός τον υπολογισμών που ακολουθούν, είναι η εκτίμηση της μεγέθυνσης του προφίλ σκέδασης από τα οπτικά στοιχεία του οφθαλμού. Στο σύστημα που εξετάζεται, η σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας μπορεί να συμβαίνει τόσο στον κερατοειδή όσο και στον κρυσταλλοειδή φακό. Οι δύο αυτές περιπτώσεις θα μελετηθούν στην συνέχεια ως δύο ανεξάρτητα γεγονότα. Έτσι θα είναι δυνατός ο υπολογισμός της μεγέθυνσης του προφίλ σκέδασης κάθε φορά, ανάλογα με το εάν η σκέδαση συμβαίνει στον κερατοειδή ή τον κρυσταλλοειδή φακό, των υπό εξέταση οφθαλμών. Η πληροφορία για το πού βρίσκονται οι πηγές σκέδασης, προκύπτει κάθε φορά από τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων όπως είναι η ηλικία τους (υποδηλώνει πιθανή απώλεια διαύγειας του φακού), και το εάν έχουν υποστεί διαθλαστικές επεμβάσεις (σκέδαση στον κερατοειδή). Εξετάζοντας την περίπτωση σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας στον κερατοειδή, θα θεωρήσουμε την ύπαρξη μιας σημειακής πηγής στο κέντρο του, στο οποίο υποθέτουμε ότι βρίσκεται και το κέντρο σκέδασης (σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12: Το οπτικό σύστημα του οφθαλμού, και τα διανύσματα εισόδου και εξόδου της οπτικής ακτίνας, που ξεκινά από το κέντρο σκέδασης που βρίσκεται στο κέντρο του κερατοειδή.

Ακολουθώντας την πορεία μιας οπτικής ακτίνας που ξεκινά από την σημειακή αυτή πηγή, και η οποία διαδίδεται κατά την θετική φορά του άξονα z, μέχρι την έξοδο της από την εμπρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή, οι πίνακες που περιγράφουν διαδοχικά την διάδοση της στο οπτικό σύστημα του οφθαλμού δίνονται στην συνέχεια (η ερμηνεία των συμβόλων που χρησιμοποιούνται στους πίνακες, δίνεται στο σχήμα 4.12).

1. Διάδοση κατά την διεύθυνση z μέσα στον κερατοειδή:

$$C_1^1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z0}{2n_c} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Διάθλαση από την οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδή:

$$C_{2}^{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n_{aq} - n_{c})}{R_{2}^{c}} & 1 \end{bmatrix}$$

3. Διάδοση κατά την διεύθυνση z, μέσα στο πρόσθιο θάλαμο και το υδατοειδές υγρό :

$$C_3^1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z1}{n_{aq}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. Διάθλαση από την εμπρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού:

$$C_{4}^{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n_{L} - n_{aq})}{R_{1}^{L}} & 1 \end{bmatrix}$$

5. Διάδοση κατά την διεύθυνση z, μέσα στον κρυσταλλοειδή φακό:

$$C_5^1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z2}{n_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

6. Ανάκλαση από την οπίσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού:

$$C_6^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(-n_L) - n_L}{-R_2^L} & 1 \end{bmatrix}$$

7. Διάδοση κατά την διεύθυνση - z, μέσα στον κρυσταλλοειδή φακό:

$$C_7^1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-z2}{-n_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

8. Διάθλαση από την εμπρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού:

$$C_8^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0\\ -\frac{(-n_{aq}) - (-n_L)}{-R_1^L} & 1 \end{bmatrix}$$

9. Διάδοση κατά την διεύθυνση -z, μέσα στο πρόσθιο θάλαμο και το υδατοειδές υγρό :

$$C_9^1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-z1}{-n_{aq}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

10. Διάθλαση από την οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδή:

$$C_{10}^{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(-n_{c}) - (-n_{aq})}{-R_{2}^{c}} & 1 \end{bmatrix}$$

11. Διάδοση κατά την διεύθυνση - z μέσα στον κερατοειδή:

$$C_{11}^{\mathrm{l}} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z0}{n_c} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

12. Διάθλαση από την εμπρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή:

$$C_{12}^{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(-1) - (-n_{c})}{-R_{1}^{c}} & 1 \end{bmatrix}$$

Στους υπολογισμούς που προηγήθηκαν πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι αποστάσεις είναι διανυσματικές, και κατά την διάδοση της οπτικής ακτίνας κατά την διεύθυνση –z, η τιμή του δείκτη διάθλασης παίρνει αρνητικό πρόσημο. Ο συνολικός πίνακας μετασχηματισμού του οπτικού συστήματος είναι:

$$M_{Corneal \ Scatter}^{1} = C_{12}^{1} \cdot C_{11}^{1} \cdot C_{10}^{1} \cdot \dots C_{1}$$
(4.5)

Γνωρίζοντας τον συνολικό πίνακα μετασχηματισμού από την σχέση 4.5 το διάνυσμα θέσης της οπτικής ακτίνας κατά την έξοδο της από την εμπρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή, υπολογίζεται από την σχέση 4.4. Θεωρώντας ότι το κέντρο σκέδασης βρίσκεται πάνω στον οπτικό άξονα,  $y_{cornea\_i=1}^1 = 0$ , προκύπτει ότι:

$$a_{cornea\_i}^1 = c_{22} \cdot n_c \cdot a_{i-1} \tag{4.6}$$

$$y_{cornea_i}^1 = c_{12} \cdot n_c \cdot a_{i-1} \tag{4.7}$$

ópou $c_{\rm 22}, c_{\rm 12}$  eínai ta stoiceía tou pínaka  $M^{\rm 1}_{\rm Corneal~Scatter}$  .

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση όπου η σκέδαση της Η/Μ ακτινοβολίας συμβαίνει στον κρυσταλλοειδή φακό. Θα θεωρήσουμε ότι το κέντρο σκέδασης βρίσκεται στο κέντρο του (σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13: Το οπτικό του οφθαλμού, και τα διανύσματα εισόδου και εξόδου της οπτικής ακτίνας, που ξεκινά από το κέντρο σκέδασης που βρίσκεται στο κέντρο του κρυσταλλοειδή φακού.

Ακολουθώντας ξανά την πορεία μιας οπτικής ακτίνας που ξεκινά από την σημειακή αυτή πηγή, και η οποία διαδίδεται κατά την θετική φορά του άξονα z, μέχρι την έξοδο της από την εμπρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή, οι πίνακες που περιγράφουν διαδοχικά την διάδοση της στο οπτικό σύστημα του οφθαλμού δίνονται ακολούθως.

1. Διάδοση κατά την διεύθυνση z μέσα στον κρυσταλλοειδή φακό:

$$L_1^1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z^2}{2n_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. Ανάκλαση από την οπίσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού:

$$L_{2}^{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(-n_{L}) - n_{L}}{-R_{2}^{L}} & 1 \end{bmatrix}$$

3. Διάδοση κατά την διεύθυνση - z μέσα στον κρυσταλλοειδή φακό:

$$L_3^1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-z2}{-n_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. Διάθλαση από την εμπρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού:

$$L_{4}^{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0\\ -\frac{(-n_{aq}) - (-n_{L})}{-R_{1}^{L}} & 1 \end{bmatrix}$$

5. Διάδοση κατά την διεύθυνση -z, μέσα στο πρόσθιο θάλαμο και το υδατοειδές υγρό :

$$L_5^1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-z1}{-n_{aq}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

6. Διάθλαση από την οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδή:

$$L_{6}^{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(-n_{c}) - (-n_{aq})}{-R_{2}^{c}} & 1 \end{bmatrix}$$

7. Διάδοση κατά την διεύθυνση - z μέσα στον κερατοειδή:

$$L_7^1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z0}{n_c} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

8. Διάθλαση από την εμπρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή:

$$L_8^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0\\ -\frac{(-1) - (-n_c)}{-R_1^c} & 1 \end{bmatrix}$$

Ο συνολικός πίνακας μετασχηματισμού σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$L_{Lens \ Scatter}^{1} = L_{8}^{1} \cdot L_{7}^{1} \cdot L_{6}^{1} \cdot \dots \cdot L_{1}^{1}$$
(4.8)

Από τις σχέσεις 4.4 και 4.8 το διάνυσμα θέσης της εν λόγω οπτικής ακτίνας κατά την έξοδο της από την εμπρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή δίνεται από τις σχέσεις:

$$\boldsymbol{\beta}_{Lens\ i}^{1} = \boldsymbol{l}_{22} \cdot \boldsymbol{n}_{L} \cdot \boldsymbol{\beta}_{i-1} \tag{4.9}$$

$$y_{Lens_{i}}^{1} = l_{12} \cdot n_{L} \cdot \beta_{i-1} \tag{4.10}$$

όπου  $l_{22}$ ,  $l_{12}$  είναι τα στοιχεία του πίνακα  $L^1_{Lens Scatter}$ , έχοντας θεωρήσει ότι  $y^1_{Lens\_i-1} = 0$ . Το μόνο στοιχείο που απαιτείται πλέον για την ολοκλήρωση των υπολογισμών, είναι η γωνία με την οποία οι οπτικές ακτίνες ξεκινούν από την σημειακή πηγή.

Εστιάζοντας την προσοχή μας στην σκέδαση στον κερατοειδή, από την 'θεωρία της ανώμαλης περίθλασης' όπως έχει ήδη αναφερθεί (§ 2.4.1), το προφίλ της κατανομής έντασης της ακτινοβολίας που σκεδάζεται από τις δομές του κερατοειδή μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής, εκτείνεται στις ± 2 μοίρες. Χρησιμοποιώντας την τιμή αυτή, ως την γωνία με την οποία ξεκινά μία οπτική ακτίνα από την σημειακή πηγή, και τα χαρακτηριστικά (δείκτες διάθλασης, αποστάσεις, ακτίνες καμπυλότητας) του οπτικού συστήματος του ανθρώπινου οφθαλμού από το μοντέλο του Navarro<sup>59</sup>, μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά η μεγέθυνση του προφίλ σκέδασης από το οπτικό σύστημα του οφθαλμού.

Στην συνέχεια απαιτείται ο υπολογισμός της μεγέθυνσης που εισάγει το οπτικό σύστημα της camera, κατά την απεικόνιση του προφίλ σκέδασης στην CCD. Λόγω του ότι δεν είναι γνωστά τα ακριβή χαρακτηριστικά (ακτίνες καμπυλότητας, αποστάσεις, δείκτες διάθλασης) των οπτικών στοιχείων της camera, γίνεται προσπάθεια υπολογισμού της θέσης των κύριων επιπέδων του οπτικού συστήματος (σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14: Οπτικό σύστημα της CCD camera, CL1,CL2 είναι τα οπτικά στοιχεία του συστήματος.

Από μετρήσεις που διεξήχθησαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων, γνωρίζουμε ότι ένα αντικείμενο διαστάσεων 1mm, που βρίσκεται στο επίπεδο του αντικειμένου, απεικονίζεται στην CCD σε 94 pixel. Ωστόσο η camera διαθέτει 768 pixels σε αυτή την διεύθυνση, διαστάσεων 6.25μm το καθένα. Άρα το αντικείμενο διαστάσεων 1mm απεικονίστηκε σε 0.5875mm στην CCD. Από αναλογία των τριγώνων που σχηματίζει η οπτική ακτίνα που απεικονίζει το αντικείμενο, προκύπτει ότι

$$\frac{0.5875\,mm}{z4} = \frac{1\,mm}{z3} \tag{4.11}$$

και επιπλέον

$$z4 + z3 = L \tag{4.12}$$

123

Από τις εξισώσεις 4.11 & 4.12 προκύπτει ότι z3 = 114.5mm & z4 = 67.2mm. Επιπλέον από τον νόμο των φακών, και γνωρίζοντας πλέον την θέση των κύριων επιπέδων (τα οποία εξ' αρχής έχουμε θεωρήσει ότι συμπίπτουν) η διοπτρική ισχύς του οπτικού συστήματος της camera δίνεται από την σχέση:

$$f_{CCD} = \frac{z4 \cdot z3}{z3 + z4} = 21 \ mm \tag{4.13}$$

Γνωρίζοντας τις θέσεις των κυρίων επιπέδων και την διοπτρική ισχύ του οπτικού συστήματος της camera, το διάνυσμα μιας οπτικής ακτίνας που εξέρχεται από την εμπρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή και εισέρχεται στο εν λόγω οπτικό σύστημα, υπολογίζεται με την μέθοδο των πινάκων. Οι πίνακες αυτοί είναι:

1. Διάδοση κατά την διεύθυνση - z στον αέρα:

$$CCD_{1} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-z3}{-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. Διάθλαση από το οπτικό σύστημα της CCD:

$$CCD_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_{CCD}} & 1 \end{bmatrix}$$

Ο συνολικός πίνακας μετασχηματισμού σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$CCD_{total} = CCD_2 \cdot CCD_1 \tag{4.14}$$

Από τις σχέσεις 4.4 και 4.14 το διάνυσμα θέσης της οπτικής ακτίνας κατά την έξοδο της από το οπτικό σύστημα της camera είναι:

$$\omega_{CCD-i} = ccd_{21} \cdot y_{i-1} + ccd_{22} \cdot 1 \cdot \varphi_{i-1}$$
(4.15)

$$y_{CCD-i} = ccd_{11} \cdot y_{i-1} + ccd_{12} \cdot 1 \cdot \varphi_{i-1}$$
(4.16)

όπου  $\mathit{ccd}_{22}, \mathit{ccd}_{12}, \mathit{ccd}_{21}$ είναι τα στοιχεία του πίνακα  $\mathit{CCD}_{\mathit{total}}$ .

Γνωρίζοντας την γωνία και την θέση εξόδου της οπτικής ακτίνας από το οπτικό σύστημα της camera, μπορεί να υπολογιστεί η έκταση της κατανομής σε pixel στο επίπεδο της CCD. Από την γεωμετρία του σχήματος 3.32 προκύπτει ότι:

$$Area_{CCD} = \omega_{CCD \ i} \cdot z4 \tag{4.17}$$

Έτσι, με τους υπολογισμούς που προηγήθηκαν, μπορεί να υπολογιστεί πως μια κατανομή σκέδασης στον κερατοειδή ή στον φακό επαφής, απεικονίζεται στην CCD, λόγω μεγέθυνσης που τα οπτικά στοιχεία από τα οποία διέρχεται, εισάγουν Στο τελευταίο βήμα των εν λόγω υπολογισμών, γνωρίζοντας την μεγέθυνση της κατανομής στο επίπεδο της CCD, υπολογίζεται η μεγέθυνση αυτής, στο επίπεδο που σχηματίζεται το 4° Purkinje. Επίπεδο στο οποίο το σύστημα απεικόνισης εστιάζει, και στο οποίο γίνεται ο υπολογισμός του προφίλ σκεέδασης

### Αποτελέσματα

Η διαδικασία ανάλυσης των εικόνων που ελήφθησαν με την πειραματική διάταξη του σχήματος 4.8, ήταν σε εξέλιξη κατά το πέρας αυτής της εργασίας. Η επεξεργασία των πρώτων εικόνων που ελήφθησαν, αφορούσαν μετρήσεις σε εθελοντές που φόρεσαν του φακούς επαφής με τα μικροσφαιρίδια γυαλιού. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν στην προσπάθεια εκτίμησης της σκέδασης στους εν λόγω φακούς, με μια δεύτερη μέθοδο, πέραν αυτής που περιγράφηκε στην ενότητα § 3.3.1.2. Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται η πειραματική εικόνα που ελήφθη απουσία φίλτρου (το τέταρτο Purkinje είναι κορεσμένο), από την camera (σχήμα 4.15 i). Η εικόνα ii), του σχήματος 4.15, έχει υποστεί επεξεργασία στην Matlab, και αναδεικνύει την σκεδαζόμενη ακτινοβολία γύρω από το βαλλιστικό μέρος της ανακλώμενης ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.15: i)Εικόνα που ελήφθη από την camera, και απεικονίζει το 4° Purkinje, ii) η περιοχή ανάλυσης της εικόνας στην Matlab, που αναδεικνύει την σκεδαζόμενη ακτινοβολία (πράσινη περιοχή) γύρω από το βαλλιστικό μέρος (κόκκινη περιοχή) της ανακλώμενης ακτινοβολίας, iii) Μπλε: Πειραματικό προφίλ, Κόκκινο: θεωρητικό προφίλ της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, που οριοθετεί την περιοχή ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό της σκεδαζόμενης και της βαλλιστικής ενέργειας (το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό που δίνεται στο σχήμα 3.12 του κεφαλαίου ΙΙΙ).

### <u>Συμπεράσματα</u>

Από τον υπολογισμό της μεγέθυνσης του προφίλ σκέδασης, που το οπτικό σύστημα του οφθαλμού και της camera εισάγει, προέκυψε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία για την οπτική διάταξη που δίνεται στο σχήμα 4.8, συγκεντρώνεται σε μια πολύ μικρή περιοχή (λίγα λεπτά της μοίρας) γύρω από το βαλλιστικό μέρος της ανακλώμενης από την οπίσθια επιφάνεια του φακού ακτινοβολίας. Έτσι, δεν ήταν δυνατός ο σαφής διαχωρισμός βαλλιστικής και σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στις εικόνες που ελήφθησαν. Το γεγονός αυτό κατέστησε ιδιαίτερα ευαίσθητη την υπολογιζόμενη τιμή του BR στον καθορισμό των ορίων κάθε περιοχής, και έτσι δεν ήταν δυνατή η εκτίμηση της σκέδασης που οι υπό μελέτη φακοί επαφής εισάγουν. Ωστόσο, με την τροποποίηση του οπτικού συστήματος της camera, είναι δυνατή η δημιουργία ενός συστήματος απεικόνισης με μικρή εστιακή απόσταση. Με την τροποποίηση αυτή είναι δυνατή η κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε μια ευρεία περιοχή γύρω από το βαλλιστικό μέρος αυτής, καθιστώντας δυνατή την εκτίμηση της σκέδασης, και ταυτόχρονα την τεχνική αυτή καινοτόμα στην μέτρηση in vivo της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό. Παράλληλα, μπορεί με την ίδια μέθοδο να αναλυθεί και το 3° Purkinje, δίνοντας την δυνατότητα ανάλυσης του ειδώλου που δημιουργείται από

# Κεφάλαιο V

### 5.1 Υποκειμενικές μετρήσεις της σκέδασης.

Στα κεφάλαια ΙΙΙ και ΙV που προηγήθηκαν, παρουσιάστηκαν οι αντικειμενικές μετρήσεις της σκέδασης που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα από το προτεινόμενο φυσικό μοντέλο. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο ΙΙ (§ 2.5.2),της παρούσας εργασίας, πέραν των αντικειμενικών μετρήσεων της σκέδασης, έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα και υποκειμενικές μέθοδοι για την μελέτη της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό. Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται σε ψυχοφυσικές μετρήσεις, αξιολογώντας το αποτέλεσμα της σκέδασης στην ποιότητα της όρασης και ειδικότερα η μείωση της φωτεινότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι υποκειμενικές μετρήσεις της σκέδασης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

### <u>Σκοπός</u>

Σκοπός των εν λόγω μετρήσεων, είναι η μέτρηση της σκέδασης που παράγουν οι φακοί επαφής, με υποκειμενική μέθοδο. Ειδικότερα, η εκτίμηση της ποιότητας της όρασης εθελοντών, που φόρεσαν τους εν λόγω φακούς, όσο αναφορά την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης που παρουσιάζουν.

#### Μέθοδος

Για την εκτίμηση της σκέδασης με υποκειμενική μέθοδο, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή C-Quant 80000, Straylight Meter, η οποία αποτελεί μια εξελιγμένη έκδοση της συσκευής που οι Thomas J.T.P van den Berg και Jan Kees IJspeert το 1992 ανέπτυξαν για κλινική χρήση (§ 2.5.2). Η νέα αυτή έκδοση βασίζεται στην μέθοδο της 'συγκρινόμενης αντιστάθμισης'. Η βασικότερη διαφορά με την προηγούμενη έκδοση, είναι στο πεδίο εξέτασης, όπου πλέον είναι χωρισμένο σε δύο ημισφαίρια.



Σχήμα 5.1: Οθόνη εξέτασης για το Straylight Meter που βασίζεται στην αρχή της 'συγκρινόμενης αντιστάθμισης'.

Επιπλέον, κατά την διάρκεια της μέτρησης το ερέθισμα δεν εμφανίζεται συνεχώς, αλλά σε μία σειρά ερεθισμάτων μικρής χρονικής διάρκειας. Μεταξύ των ερεθισμάτων η διαφορά περιορίζεται στα δύο πεδία εξέτασης. Το ένα πεδίο εξέτασης είναι συνεχώς μαύρο. Στο έτερο πεδίο εξέτασης, προστίθεται φωτισμός (φωτισμός αντιστάθμισης του σκεδαζόμενου φωτός, που δημιουργείται από την πηγή σκέδασης, και η οποία δίνεται στο σχήμα 5.1 με την μορφή του μαύρου δακτυλίου) που αναβοσβήνει. Έτσι, το ένα πεδίο αντισταθμισης' και το άλλο σε κάποια τιμή αντιστάθμισης της ίδιας μεθόδου. Το ζητούμενο από τον εξεταζόμενο είναι να αποφασίσει για κάθε ερέθισμα ποιο πεδίο εξέτασης αναβοσβήνει τυ τυχαίο τρόπο, η επιλογή του πεδίου που είναι συνεχώς μαύρο.

Το πεδίο εξέτασης που δεν έχει φωτισμό αντιστάθμισης είναι συνεχώς μαύρο. Λόγω της ύπαρξης του δακτυλίου (straylight source) που αναβοσβήνει, ο εξεταζόμενος αντιλαμβάνεται το πεδίο αυτό επίσης να αναβοσβήνει με την ίδια συχνότητα. Παράλληλα, το ίδιο σκεδαζόμενο φως προκαλεί την αντίληψη ενός flicker και στο έτερο πεδίο εξέτασης, το οποίο ωστόσο έχει φωτεινότητα αντιστάθμισης, διαφορετική για κάθε ερέθισμα. Έτσι , το flicker που τελικά αντιλαμβάνεται ο εξεταζόμενος στο εν λόγω πεδίο εξέτασης, είναι διαφορετικό για κάθε ερέθισμα. Ανάλογα με την φωτεινότητα αντιστάθμισης που φέρει, μπορεί να αναβοσβήνει λιγότερο ή περισσότερο έντονα από το πεδίο εξέτασης που δεν φέρει φωτισμό αντιστάθμισης. Όταν ο εξεταζόμενος επιλέξει το πεδίο που φέρει τον φωτισμό αντιστάθμισης (στην ερώτηση για το πιο πεδίο αναβοσβήνει εντονότερα), το σκορ είναι 1, ενώ στην αντίθετη περίπτωση το σκορ είναι 0.

Ας δούμε τώρα τι συμβαίνει, καθώς ο φωτισμός αντιστάθμισης στο πεδίο εξέτασης μεταβάλλεται. Το πεδίο στο οποίο δεν παρέχεται φωτεινότητα αντιστάθμισης, έχει σταθερή φωτεινότητα (ροζ γραμμή στο διάγραμμα a του σχήματος 5.2), ίση με αυτήν που δημιουργεί ο η πηγή σκέδασης (μαύρος δακτύλιος στο σχήμα 5.2). Η φωτεινότητα του πεδίου εξέτασης που φέρει φωτισμό αντιστάθμισης, μεταβάλλεται, ανάλογα με την ένταση του φωτισμού αντιστάθμισης (μπλε γραμμή στο διάγραμμα a του σχήματος 5.2). Η γραφική παράσταση του σκορ του εξεταζόμενου, σαν συνάρτηση του φωτισμού αντιστάθμισης (δίνεται στο διάγραμμα b, του σχήματος 5.2) δίνει την *ψυχομετρική συνάρτηση* ' του, για την σύγκριση που του ζητείται να κάνει. Εν γένει η συνάρτηση αυτή ορίζεται ως η πιθανότητα για μια συγκεκριμένη απόκριση (δεξί ή αριστερό πεδίο εξέτασης στην περίπτωση μας), σαν συνάρτηση της τιμής του ερεθίσματος (του φωτισμού αντιστάθμισης στην ενλόγω εξέταση).



Σχήμα 5.2: a)Διάγραμμα της διαμορφωμένης φωτεινότητας που φτάνει στον αμφιβληστροειδή σαν συνάρτηση του φωτισμού διαμόρφωσης, b) Μέση τιμή του σκορ του εξεταζόμενου, σαν συνάρτηση του φωτισμού διαμόρφωσης (ψυχομετρική συνάρτηση).

Όταν ο φωτισμός των δύο πεδίων εξέτασης είναι ίδιος, η απάντηση του εξεταζόμενου μπορεί να είναι 0 ή 1 με πιθανότητα 50%. Έτσι, όταν η μέση τιμή του σκορ του εξεταζόμενου είναι 0.5, τα δύο υπό εξέταση πεδία αναβοσβήνουν το ίδιο έντονα, και ο

φωτισμός αντιστάθμισης στο πεδίο εξέτασης ισούται με το διπλάσιο του φωτός που σκεδάζεται λόγω της ύπαρξης του δακτυλίου που αναβοσβήνει (straylight source).

Με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού που συνοδεύει της συσκευή C-Quant, υπολογίζεται από την 'ψυχομετρική συνάρτηση' κάθε εξεταζόμενου, η τιμή της φωτεινότητας αντιστάθμισης, και στην συνέχεια η τιμή της παραμέτρου σκέδασης s, που χαρακτηρίζει μια φυσική ιδιότητα του οφθαλμού, και έτσι είναι ανεξάρτητη από την ένταση της πηγής του σκεδαζόμενου φωτός. Ορίζεται με τρόπο τέτοιο, ώστε ο λόγος εντάσεων της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας και της πηγής της, να έχει σημασία. Στην εικόνα του σχήματος που ακολουθεί φαίνεται η οθόνη διαχείρισης που αντικρίζει ο εξεταστής.

2 OCULUS - C Quant Exemination Settings			L C R
Name: Deno, Patient Date of birth: 2310.1973	Eye: Connection: No	Range: A((4)	Sjart Ø Automatic See
Dure         25.02.2006         Age:         3         Duration:         01.52           Logiti         0.93         End         0.06         0:         1.47		1	
		50 T Smidth	0
	***	×	

Σχήμα 5.3: Οθόνη διαχείρισης του λογισμικού που αντικρίζει ο εξεταστής στο C-Quant, Straylight Meter.

Ανάλογα με τα επίπεδα σκέδασης του υπό εξέταση οφθαλμού, η 'ψυχομετρική συνάρτηση' μετατοπίζεται προς τα δεξιά (σε υψηλότερες τιμές φωτεινότητας αντιστάθμισης). Για το λόγο αυτό, το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα μεταβολής του εύρους φωτεινότητας των ερεθισμάτων που προβάλλονται. Επιπλέον για το έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρήσεων, υπολογίζεται η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής της παραμέτρου s που υπολογίζεται.

### Αποτελέσματα

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της σκέδασης με την συσκευή C-Quant, Straylight Meter, σε 3 εθελοντές που φόρεσαν τους φακούς επαφής με τα μικροσφαιρίδια γυαλιού. Και οι τρείς, ήταν ηλικιακά νέοι, με μέσο όρο ηλικία 25 ± 2 χρόνια, απουσία παθολογικών καταστάσεων και στους δύο οφθαλμούς. Το διαθλαστικό σφάλμα των εξεταζόμενων διορθώθηκε μόνο στην περίπτωση που αυτό υπερέβαινε τις 1.5 διοπτρίες. Για μικρότερα διαθλαστικά σφάλματα, αποφεύχθηκε η εισαγωγή ενός ακόμα οπτικού στοιχείου, (του φακού διόρθωσης του διαθλαστικού σφάλματος), το οποίο και πιθανότατα θα εισήγαγε σκέδαση λόγω ύπαρξης ατελειών ή ακαθαρσιών στις επιφάνειες του. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και στους δύο οφθαλμούς των εξεταζόμενων, και τα αποτελέσματα δίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 5.1: Τιμές της παραμέτρου σκέδασης Log(s) από το C-Quant Straylight Meter, για 3 εξεταζόμενους που φόρεσαν τους φακούς επαφής.

Από το διάγραμμα αυτό είναι εμφανής η γραμμική αύξηση της παραμέτρου σκέδασης *s*, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση των μικροσφαιριδίων στους φακούς επαφής και για τους δύο οφθαλμούς των τριών εθελοντών που εξετάστηκαν. Στην συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή της παραμέτρου *s*, για τους τρείς εξεταζόμενους σαν συνάρτηση του φακού

επαφής που κλήθηκαν να φορέσουν. Εδώ αξίζει να σημειωθεί, ότι η σκέδαση που κάθε φακός επαφής εισάγει, προστίθεται στο ποσοστό σκέδασης που ο οφθαλμός κάθε εξεταζόμενου παρουσιάζει απουσία φακού επαφής. Για τον λόγο αυτό μετρήθηκαν τα ποσοστά σκέδασης που παρουσιάζουν οι εξεταζόμενοι πριν την έναρξη των πειραμάτων, έτσι ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί η σκέδαση που οι φακοί επαφής εισάγουν. Στο διάγραμμα που ακολουθεί δίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών.



Διάγραμμα 5.2: Μέση τιμή της παραμέτρους σκέδασης s, που προέκυψε από τις μετρήσεις στους τρείς εξεταζόμενους για τους φακούς επαφής που περιείχαν μικροσφαιρίδια..

#### <u>Συμπεράσματα</u>

Από το διάγραμμα 5.2, προκύπτει μια γραμμική αύξηση της σκέδασης που εισάγουν οι φακοί επαφής, και η οποία εκφράζεται στις εν λόγω μετρήσεις με την παράμετρο σκέδασης s. Η μικρή απόκλιση από την γραμμική αυτή αύξηση που παρουσιάζουν οι φακοί επαφής No. 3,4 και 5, οφείλεται πιθανότατα στην παρουσία οιδήματος στον κερατοειδή κατά την διάρκεια πραγματοποίησης των μετρήσεων. Οι εξεταζόμενοι κλήθηκαν να φορέσουν τους φακούς επαφής, ξεκινώντας από τον No.1 έως τον No.5. Δεδομένου ότι οι εν λόγω φακοί είναι σκληροί, είναι αναμενόμενο να προκαλούν οίδημα στον κερατοειδή των εξεταζόμενων, καθώς ο χρόνος εφαρμογής τους παρατείνεται. Επιπλέον αυτό που αξίζει να σημειωθεί, είναι ότι αν και οι τιμές των BR που υπολογίστηκαν για τους φακούς επαφής ήταν μικρότερες από τις αναμενόμενες, από τις ψυχοφυσικές μετρήσεις προκύπτει ότι τα ποσοστά αυτά σκέδασης που παράγουν,

καλύπτουν μια ικανοποιητικά μεγάλη περιοχή τιμών της παραμέτρου s, 0.3 < s < 13. Δεδομένου ότι η τιμή της παραμέτρου σκέδασης s, είναι s = 8, για φυσιολογικούς οφθαλμούς τα ποσοστά σκέδασης που εισάγουν οι φακοί επαφής αντιστοιχούν σε υποκλινικά στάδια ανάπτυξης παθολογικών καταστάσεων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο σκοπός διεξαγωγής των ψυχοφυσικών μετρήσεων ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με αυτά που προέκυψαν από την αντικειμενική μέτρηση της σκέδαση στους φακούς επαφής. Λόγω της διαφορετικής μετρικής που χρησιμοποιούν οι δύο μέθοδοι (BR για την αντικειμενική, παράμετρος *s* για την υποκειμενική) για την εκτίμηση της σκέδασης, δεν είναι δυνατή η ποσοτικά αυστηρή σύγκριση των αποτελεσμάτων. Ποιοτικά ωστόσο μπορεί να γίνει, και για τον λόγο αυτό παρίστανται γραφικά στα διαγράμματα που ακολουθούν η σχέση των δύο παραμέτρων, η οποία προκύπτει να είναι γραμμική, αναδεικνύοντας μια αναλογία στα αποτελέσματα των μετρήσεων με τις δύο διαφορετικές μεθόδους.



Διάγραμμα 5.3: Σχέση BR και παραμέτρου s για τους φακούς επαφής, στους 3 εξεταζόμενους.

## Γενικά συμπεράσματα

Η σκέδαση στον ανθρώπινο οφθαλμό είναι ένα φαινόμενο που επηρεάζει την ποιότητα της όρασης. Συγκεντρώνει το ενδιαφέρον της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας, και καθημερινά γίνονται προσπάθειες ανάπτυξης νέων μεθόδων αντικειμενικών και υποκειμενικών, για την αξιόπιστη και ακριβή εκτίμηση της. Από την φύση του προβλήματος, η δυσκολία του εγχειρήματος είναι μεγάλη, και απαιτείται ακόμα πολύ προσπάθεια έως ότου αντιμετωπιστεί με τρόπο σαφή και αποτελεσματικό. Στο Πανεπιστήμιο Κρήτης, η σκέδαση στον ανθρώπινο οφθαλμό είναι ένα θέμα που συγκεντρώνει το ενδιαφέρον της ερευνητικής ομάδας του Β.Ε.Μ.Μ.Ο, η οποία και δραστηριοποιείται τα τελευταία χρόνια στην διερεύνηση του.

Στα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, αναπτύχθηκε ένα νέο φυσικό μοντέλο που προσομοιώνει την σκέδαση στον κερατοειδή, μετά από επεμβάσεις διαθλαστικής χειρουργικής. Αναπτύχθηκαν νέες πειραματικές διατάξεις για την αντικειμενική μέτρηση της σκέδασης από το εν λόγω μοντέλο, καθώς επίσης και από φακούς επαφής που κατασκευάστηκαν και περιείχαν πρότυπους σκεδαστές. Τα φυσικά αυτά μοντέλα μπορούν μελλοντικά να χρησιμοποιηθούν για τη βαθμονόμηση οργάνων και διατάξεων αλλά και για τη διεξαγωγή περεταίρω ψυχοφυσικών μετρήσεων.

Η πειραματική διάταξη απλής διέλευσης που αναπτύχθηκε (και η οποία παρουσιάζεται στην ενότητα § 3.3.1), υπήρξε αποτελεσματική για τον υπολογισμό του *Ballistic Ratio*, της μετρικής που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της σκέδασης ποσοτικά.

Η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε για την μελέτη του προφίλ σκέδασης (και η οποία παρουσιάζεται στην ενότητα § 3.3.2), δεν οδήγησε στα αναμενόμενα αποτελέσματα. Η περιορισμένη δυναμική περιοχή των συστημάτων ανίχνευσης και καταγραφής της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, που ήταν διαθέσιμα στο εργαστήριο και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, αποτέλεσαν εμπόδιο στην προσπάθεια αυτή. Με την χρήση σύγχρονων συστημάτων ωστόσο, η τεχνική αυτή συστήνεται για την μελέτη του προφίλ σκέδασης της Η/Μ ακτινοβολίας in vitro.

Η χρήση της camera ως μέσο ανίχνευσης και καταγραφής της ακτινοβολίας στην φωτομετρία, αποδείχτηκε ότι χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Το εν λόγω σύστημα

χρησιμοποιήθηκε σε δύο πειραματικές διατάξεις (μετρήσεις απλής διέλευσης στους φακούς επαφής, και διπλής διέλευσης στο Tscherning), και στην προσπάθεια εξαγωγής αξιόπιστων μετρήσεων, κληθήκαμε να διερευνήσουμε με ακρίβεια την απόκριση του συστήματος σε μια σειρά παραμέτρων (ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας, χρόνος έκθεσης του ανιχνευτή στην ακτινοβολία, ευαισθησία ανίχνευσης).

Η τεχνική ανάλυσης της εικόνας που προκύπτει λόγω ανάκλασης της εισερχόμενης στον ανθρώπινο οφθαλμό ακτινοβολίας, από την οπίσθια επιφάνεια του φακού, είναι αυτή τη στιγμή στο τελικό στάδιο διαμόρφωσης της. Κατασκευάζοντας ένα πρότυπο μοντέλο οφθαλμού που παράγει διαφορετικά επίπεδα σκέδασης (§ 4.3) δόθηκε η δυνατότητα επιλογής των βέλτιστων πειραματικών συνθηκών για την διεξαγωγή των μετρήσεων, αποφεύγοντας έτσι, την εκτεταμένη ακτινοβόληση ανθρώπινου οφθαλμού. Το πρόβλημα της μεγέθυνσης στην κατανομή σκέδασης που το οπτικό σύστημα του οφθαλμού και του συστήματος ανίχνευσης εισάγει αντιμετωπίστηκε, και σύντομα θα δοθούν τα πρώτα αποτελέσματα των μετρήσεων, που θα καταστήσουν την εν λόγω τεχνική, ιδιαιτέρως ενδιαφέρουσα, για την in vivo, μέτρηση της σκέδασης στον ανθρώπινο οφθαλμό.

### Βιβλιογραφία

[1] Fincham, E.F (1925). '*The changes in the form of the crystalline lens in accommodation*' Transaction of the Optical society, 26, p.239-269

[2] Burd H.G, et al (1999) 'Mechanics of accommodation in the human eye' Vis.Res. 39(9) p.1591–1595

[3] Koretz J & Handelman, G.H (1988), '*How the human eye focuses*' Scientific American, July, p.64-71.

[4] Bloemendal (Ed) (1981) 'Molecular and cellular Biology of the Eye Lens. 'Pub:Wiley

[5] Garner LF, et al. '*Refractive index of the crystalline lens in young and aged eyes*', Clin. Exp Optom. 1998 Jul, 81(4): p.145-150

[6] Benedek, GB (1971) et al, '*Theory of the transparency of the eye*.' Appl Optics, 10: p.459-473.

[7] Trokel, S (1962) et al, '*The physical basis for the transparency of the crystalline lens*.' Invest Ophthalmol, Vol. 1 p.493-501.

[8] Dubbelman, M. and G.L. Van der Heijde, '*The shape of the aging human lens: curvature, equivalent refractive index and the lens paradox*'. Vision Res, 2001. 41(14): p. 1867-77.

[9] Dubbelman, M.et al. '*The thickness of the aging human lens obtained from corrected Scheimpflug images*'. Optom Vis Sci, 2001. 78(6): p. 411-416.

[10] Vrensen, G.F., '*Aging of the human eye lens--a morphological point of view*'. Comp Biochem Physiol A Physiol, 1995. 111(4): p. 519-32.

[11] Glasser, A. and M.C. Campbell, *Presbyopia and the optical changes in the human crystalline lens with age*. Vision Res, 1998. 38(2): p. 209-29.

[12] Glasser, A. and M.C. Campbell, '*Biometric, optical and physical changes in the isolated human crystalline lens with age in relation to presbyopia.*' Vision Res, 1999. 39(11): p. 1991-2015.

[13] Glasser, A., M.A. Croft, and P.L. Kaufman, '*Aging of the human crystalline lens and presbyopia*'. Int Ophthalmol Clin, 2001. 41(2): p. 1-15.

[14] Gilmartin, B., *The aetiology of presbyopia: a summary of the role of lenticular and extralenticular structures.* Ophthalmic Physiol Opt, 1995. 15(5): p. 431-7.

[15] Peter W.T. de Waard et al, 'Intraocular light scattering in age-related cataracts' Inv. Opth. & Visual Science, vol. 33,No 3, March 1992

[16] Barbara Pierscionek et al. '*Retinal images seen through a cataractous lens modeled as a phase-aberrating screen*', J. Opt.Soc.Am.A vol. 19, No. 8, August 2002

[17] Richard P. Hemenger, 'Sources of intraocular light scatter from inversion of an empirical glare function', Applied Optics, Vol. 31, No 19. 19 July 1992

[18] Robert F. Jacob, 'Determination of human eye lens membrane structure by X-Ray diffraction analysis' The Rigaku Journal, vol.17/number 1/2000

[19] Ralph Michael et al, 'Changes in the refractive index of lens fibre membranes during maturation-impact on lens transparency' Exp. Eye Research 77 (2003) p.93-99

[20] M.L.Hennelly et al. '*The effect of age on the light scattering characteristics of the eye*' Opthal. Physiol. Opt, No. 2, p.197-203 (1998)

[21] Juan M. Bueno et al. 'Polarization properties of the in vitro old human crystalline lens', Opthal.Physiol. Vol. 23, p.109-118, 2003

[22] Michael J. Cox, et al. 'Scatter and its implications for the measurement of optical image quality in human eyes', Optometry & Vision Science, vol. 80, No. 1, p.58-68

[23] Linda J. Muller et al. 'Corneal nerves: structure, contents and function' Experimental Eye Research 76(2003) 521-542

[24] Linda J Muller et al. 'The specific architecture of the anterior stroma accounts for maintenance of corneal curvature' Br. J Opthalmol. 2001; 85; 437-443

[25] Albert Daxer et al. 'Collagen fibrils in the human corneal stroma: structure and aging', IOVS, March 1998, Vol. 39, No. 3

[26] David B. Ameen, et al, 'A Lattice Model for Computing the Transmissivity of the Cornea and Sclera', Biophysical Journal Volume 75 November 1998 2520–2531

[27] Maurice, D. M. 1957. 'The structure and transparency of the corneal stroma'. J. Physiol. 136:263–286

[28] Oksana Kostyuk et al, '*Transparency of the bovine corneal stroma at physiological hydration and its dependence on concentration of the ambient anion*' J. Physiol. 2002;543;633-642;

[29] James V. Jester et al, '*The cellular basis of corneal transparency: evidence for* '*corneal crystallins*' Journal of Cell Science 112, 613-622 (1999)

[30] Young L Kim, et al, 'Variation of corneal refractive index with hydration' Phys.Med. Biol. 49 (2004) 859–868

[31] Jianhua Wang et al, 'Objective Measurements of Corneal Light-Backscatter during Corneal Swelling, by Optical Coherence Tomography' IOVS, October 2004, Vol. 45, No. 10

[32] Χ. Γκίνης, 'Αλληλεπίδραση laser – κερατοειδή και εισαγωγικές έννοιες της διαθλαστικής χειρουργικής.' Σημειώσεις από το μάθημα Φυσιολογική Οπτική & Εφαρμογές ΙΙ, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Οπτική & Όραση

 [33] Jukka A. O. Moilanen et al, 'Long-Term Corneal Morphology after PRK by In Vivo Confocal Microscopy', Investigative Ophthalmology & Visual Science, March 2003, Vol. 44, No. 3

[34] Torben Møller-Pedersen, 'Stromal Wound Healing Explains Refractive Instability and Haze Development after Photorefractive Keratectomy', Ophthalmology 2000;107:1235–1245

[35] Pallikaris IG, et al. 'Laser in situ keratomileusis.' Lasers Surg Med 1990;10:463-8.

[36] Pierre-Jean Pisella et al, 'Evaluation of Corneal Stromal Changes In Vivo after Laser In Situ Keratomileusis with Confocal Microscopy' Ophthalmology 2001;108:1744–1750

[37] E. Berrio, J.M. Bueno, M. Redondo, P. Artal, "Does Intraocular Scattering Increase after Lasik Refractive Surgery?", Invest. Ophthalmol. Vis. Sci., 44, E-Abstract 2089 (2003)

[38] H.C van de Hulst, '*Light Scattering by small particles*' Dover Publications, Inc, New York

[39] Torben Møller-Pedersen, *'Keratocyte reflectivity and corneal haze'*, Experimental Eye Research 78 (2004) 553–560.

[40] Fernando Diaz Douton et al, '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

[41] Flamant F. '*Etude de la repartition de lumiere dans l'image retinienne d'une fente.*' Rev. Optique. 1955; 34: 433-459.

[42] 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).

[43] 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).

[44] 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.

[45] R. A. Chipman, "Polarimetry," in *Handbook of Optics*, 2nd ed., M. Bass, ed. (McGraw-Hill, New York, 1995), Vol. 2, Chap. 22.

[46] 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).

[47] 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).

[48] Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke HE, Seiler T. '*Principles of Tscherning aberrometry*'. J Refract Surg. 2000 Sep-Oct;16(5):S570-1.

[49] D.De Brouwere, H Ginis et al, ARVO Abstract

[50] Gerald Westheimer and Junzhong Liang, '*Evaluating Diffusion of Light in the Eye* by Objective Means', Invest Ophthalmol Vis Sci. 1994; 35:2652-2657

[51] Mahnaz Shahidi, and Yirong Yang, 'Measurements of Ocular Aberrations and Light Scatter in Healthy Subjects' Optom Vis Sci 2004;81:853–857

[52] Juan A. del Val, 'Experimental measurement of corneal haze after excimer laser keratectomy', 1 April 2001/ Vol. 40, No. 10/ Appl.Optics

[53] 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

[54] W. S. Stiles, '*The Scattering Theory of the Effect of Glare on the Brightness Difference Threshold*', Proceedings of the Royal society of London. Series B, Vol. 105, No 735 (Jul. 4, 1929), 131-146

[55] *Standard Methods for the Sampling and Testing of Gelatins*, Gelatin Manufacturers Institute of America, Inc., 501 fifth Ave., Room 1015, New York, NY.

[56] http://www.tmc-ltd.co.uk/downloads/instructions.asp?f=tmc-refractometer

[57] http://www.topac.com/Salinity\_brix.html

[58] Tscherning, M. 'Die monochromatischen Aberrationen des menschlichen Auges'. Z Psychol. Physiol. Sinne 1894;6:456-471.

[59] Isabel Escudero-Sanz, Rafael Navarro 'OFF-AXIS ABERRATIONS OF A WIDE-ANGLE SCHEMATIC EYE MODEL' J. Opt. Soc. Am. A, 1999.