



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ & ΠΡΟΝΟΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΕΚΤΡΟΠΟΜΕΤΡΙΑΣ
ΣΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ, ΤΗΝ
ΟΦΘΑΛΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΗΝ
ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑ.**

ΜΑΥΡΟΓΟΝΑΤΟΥ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ-ΜΑΡΙΑ

Εποπτεύων καθηγητής: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΑΛΛΙΝΙΚΟΣ, MSc, PhD

ΑΙΓΙΟ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της φοίτησης μου για το τμήμα Οπτικής και Οπτομετρίας, στο Παράρτημα Αιγίου του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πατρών. Αντικείμενό της αποτέλεσε η εκτροπομετρία, η οποία είναι ό,τι πιο σύγχρονο στην μελέτη των οπτικών σφαλμάτων και της οπτικής απόδοσης του οφθαλμού. Γνωστή και ως τοπογραφία μετώπου κύματος ή αμπερομετρία, αποτελεί χρήσιμο διαγνωστικό εργαλείο για την εκτίμηση της ποιότητας της όρασης.

Οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου κύριο Παναγιώτη Καλλίνικο MSc, PhD για τις υποδείξεις, την υπομονή και την συνολική βοήθεια που μου παρείχε.

Ευχαριστίες επίσης αρμόζουν στον κύριο Βασίλη Κόκοτα, οπτομέτρη, για το υλικό που μου παρείχε, καθώς και στην κυρία Κωνσταντίνα Ψυχογιού, οπτομέτρη, για τις πολύτιμες υποδείξεις και γνώσεις που μου μετέφερε. Τέλος, τον κύριο Γιώργο Κατσουράκη, χειρουργό οφθαλμίατρο, ο οποίος με την ευκαιρία που μου έδωσε να παρακολουθήσω διαθλαστική επέμβαση Lasik, με βοήθησε στην εις βάθος κατανόηση της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο οφθαλμός δεν είναι ένα τέλειο οπτικό σύστημα αλλά διαθέτει σφάλματα τα οποία υποβαθμίζουν την ποιότητα της όρασης. Ποιότητα στην όραση σημαίνει ένα καλά εστιασμένο είδωλο πάνω στον αμφιβληστροειδή του οφθαλμού. Όταν υπάρχει κάποιο διαθλαστικό σφάλμα αναιρείται αυτή η ιδιότητα με αποτέλεσμα η όρασή μας να γίνεται προβληματική.

Το σφαίρωμα και ο κύλινδρος (εκτροπές χαμηλής τάξης) δεν είναι τα μόνα διαθλαστικά σφάλματα του οφθαλμού. Υπάρχουν επιπλέον εκτροπές οι οποίες είναι γνωστές ως εκτροπές υψηλής τάξης και δεν διορθώνονται με συμβατικές μεθόδους διόρθωσης.

Οι συσκευές που υπολογίζουν ταυτόχρονα τις εκτροπές χαμηλής και υψηλής τάξης ονομάζονται εκτροπόμετρα ή αμπερόμετρα και η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην μέτρηση του μετώπου κύματος (wavefront) του οφθαλμού. Το wavefront περιέχει ουσιαστικά όλα τα οπτικά σφάλματα του οφθαλμού και είναι μοναδικό για τον κάθε οφθαλμό. Η περιγραφή του γίνεται με αλγορίθμους που αποτελούνται από πολυώνυμα Zernike.

Λόγο της μοναδικότητας του μετώπου κύματος, για την διόρθωση των εκτροπών υψηλής τάξης απαιτούνται απόλυτα εξατομικευμένοι μέθοδοι. Η συμβατικές μέθοδοι διαθλαστικής χειρουργικής εξελίχθηκαν με την βοήθεια της εκτροπομετρίας και πλέον εφαρμόζονται και μέθοδοι οι οποίοι δεν διορθώνουν μόνο τα σφάλματα χαμηλής τάξης, αλλά και τα σφάλματα υψηλής τάξης. Η εξατομικευμένη διαθλαστική χειρουργική παρέχει με βεβαιότητα όχι μόνο διόρθωση αλλά και καλής ποιότητας όραση.

Τέλος η εξατομικευση λαμβάνει χώρα και στο πεδίο των οπτικών επιστημών καθώς πλέον κατασκευάζονται φακοί επαφής και οφθαλμικοί φακοί οι οποίοι με βάση το wavefront τελειοποιούν την ποιότητα της όρασης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 ^ο : Οπτική λειτουργία.....	1
1.1 Οφθαλμός.....	1
1.1.1 Ανατομία του οφθαλμού	2
1.1.2 Κερατοειδής	3
1.2 Διαθλαστικές ανωμαλίες.....	8
1.2.1 Μυωπία.....	8
1.2.2 Υπερμετροπία	9
1.2.3 Αστιγματισμός.....	10
1.2.4 Πρεσβυωπία.....	10
1.3.Εκτροπές οφθαλμού.....	11
1.3.1 Μονοχρωματικές εκτροπές	12
1.3.2 χρωματικές εκτροπές.....	15
Κεφάλαιο 2 ^ο :Μέτωπο κύματος(wavefront) και εκτροπομετρία.....	17
2.1 Ποιότητα όρασης.....	17
2.2 Εκτροπομετρία	18
2.3 Wavefront.....	18
2.4.Ιστορική αναδρομή σχετικά με τους αναλυτές του wavefront.....	21
2.4.1 Η αρχή του Hartman Scack αναλυτή	22
2.4.2 Η αρχή του αμπερόμετρου Tschrening	24
2.5 Η Αμπερομετρική τοπογραφία.....	26
2.5.1 Η χαρτογραφία του wavefront	26
2.5.2 Το οφθαλμικό wavefront.....	27
2.5.3 Το κερατοειδικό wavefront	31
2.5.4 Συναρτήσεις PSF , MTF ,τιμή RMS	32

2.6 Πολυώνυμα Zernike	35
2.6.1 Η Πρακτική σημασία των πολυωνύμων του Zernike	36
2.6.2 Η σχηματική απόδοση.....	38
3.1 Εισαγωγή.....	39
3.2 Διαθλαστική χειρουργική	40
3.2.1 PRK	41
3.2.2 Lasik	42
3.2.3 Η εφαρμογή του wavefront στην διαθλαστική χειρουργική - Wavefront guided Lasik	45
3.3 Φακοί Επαφής	47
3.3.1 Κατηγορίες φακών επαφής.....	47
3.3.2 Εξατομικευμένοι wavefront φακοί επαφής.....	50
3.4 Οφθαλμικοί φακοί	52
3.4.1 Κατηγορίες οφθαλμικών φακών	52
3.4.2 Εξατομικευμένοι wavefront οφθαλμικοί φακοί.....	54
Κεφάλαιο 4 ^ο : Επίλογος	57
4.1 Επίλογος	57
4.2 Βιβλιογραφικές αναφορές	58

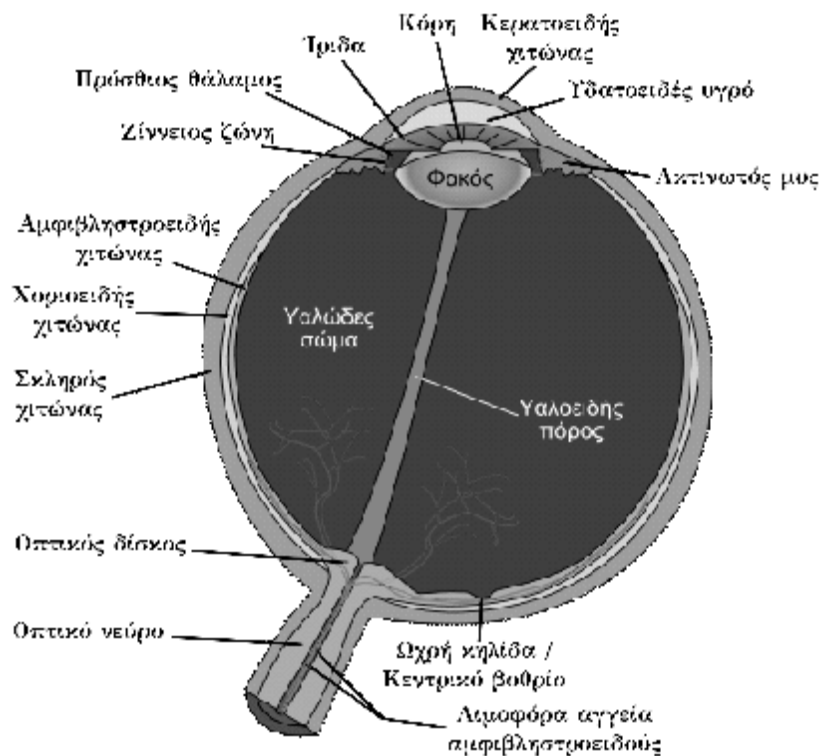
Κεφάλαιο 1

Οπτική λειτουργία

1.1 Οφθαλμός

Ο οφθαλμός είναι ένα πολύπλοκο οπτικό σύστημα. Λειτουργεί ως αισθητήρας για τη δημιουργία ειδώλου στον αμφιβληστροειδή χιτώνα και με την βοήθεια του οπτικού νεύρου, μεταδίδει το ερέθισμα στον εγκέφαλο. Το τμήμα του εγκεφάλου που εκτελεί την επεξεργασία και την τελική κατανόηση της εικόνας-πληροφορίας, είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία της όρασης.

Αν και μικρό όργανο, αποτελείται από πολλά λειτουργικά μέρη (Εικόνα 1).



Εικόνα 1.1 : Τα μέρη του οφθαλμού

1.1.1. Ανατομία οφθαλμού

Κάθε οφθαλμικός βολβός είναι χονδρικά σφαιρικός με διάμετρο περίπου 2,5 εκατοστά και βρίσκεται προφυλαγμένος μέσα στον οφθαλμικό κόγχο, που σχηματίζουν τα οστά του κρανίου. Ο βολβός του ματιού αποτελείται από τρεις χιτώνες, τον ιώδη, τον αγγειώδη και τον νευρινό χιτώνα.

Ο **ιώδης χιτώνας**, ο οποίος είναι εξωτερικός, διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα, το σκληρό και τον κερατοειδή. Ο σκληρός καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα του οφθαλμού οπισθίως (5/6). Είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση του σχήματος του βολβού καθώς και για την προστασία του εσωτερικού από πιθανό τραυματισμό.

Ο **αγγειώδης-μελαγχρωματικός χιτώνας** αποτελεί το σύνολο τριών επιμέρους τμημάτων, του χοριοειδούς, του ακτινωτού σώματος και της ίριδας και αποτελεί τον ενδιάμεσο οφθαλμικό χιτώνα (Χανδρινός, 2009).

Ο **νεύρινος χιτώνας** είναι γνωστός και ως αμφιβληστροειδής, βρίσκεται μεταξύ του υαλοειδούς σώματος και του χοριοειδούς. Περιέχει νευρικές ίνες και εξειδικευμένα κύτταρα, τους φωτουποδοχείς, και ευθύνεται για τη μετατροπή του φωτεινού σήματος που εισέρχεται διαθλώμενο στον οφθαλμό, σε σήμα αναγνωρίσιμο από τον εγκέφαλο, με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία. Με πορεία από το υαλοειδές σώμα προς το οπτικό νεύρο συναντώνται στον αμφιβληστροειδή δέκα στιβάδες. Η πρώτη στιβάδα είναι το **μελάγχρουν επιθήλιο/μελανοχρωστικό πέταλο**, ένα στρώμα κυττάρων στενά συνδεδεμένων με τη μεμβράνη του Bruch του χοριοειδούς. Στη συνέχεια η **στιβάδα των φωτουποδοχέων** οι οποίοι είναι δύο ειδών. Τα κωνία, όπου είναι υπεύθυνα για την έγχρωμη όραση και τα ραβδία, υπεύθυνα για την όραση στις διαβαθμίσεις του άσπρου-μαύρου σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού. Επόμενη αμφιβληστροειδική στιβάδα είναι η **έξω αφοριστική μεμβράνη**, η οποία είναι ένα στρώμα σύνδεσης των φωτουποδοχέων με τα κύτταρα Muller, τα οποία καλύπτουν το χώρο του αμφιβληστροειδούς που απουσιάζουν νευρώνες. Η τέταρτη στιβάδα είναι η **έξω κοκκώδης στιβάδα** που αποτελείται από τους πυρήνες των φωτουποδοχέων. Ακολουθεί η **έξω δικτυωτή στιβάδα** και η **έσω κοκκώδης στιβάδα** (Snell and Lem, 2006).

Στον αμφιβληστροειδή υπάρχει μια περιοχή κοίλανσης 3mm ρινικά από την ωχρά κηλίδα και ονομάζεται οπτική θηλή (1,5mm διάμετρο) Η κοίλανση αυτή οφείλεται στην συγκέντρωση των οπτικών ινών που τρυπούν το σκληρό χιτώνα (στο ηθμοειδές πέταλο) και εξέρχονται από τον οφθαλμό σχηματίζοντας το οπτικό νεύρο. Η οπτική θηλή

χαρακτηρίζεται ως «τυφλό σημείο» καθώς δεν υπάρχουν κύτταρα φωτουποδοχέων (Snell and Lem, 2006).

Κρυσταλλοειδής Φακός

Ο κρυσταλλοειδής ο φακός είναι μια αμφίκυρτη διαφανή δομή που λαμβάνει χώρα πίσω από την ίριδα και την κόρη, αλλά και μπροστά από το υαλοειδές σώμα και συγκρατείται από τις ίνες της Ζιννείου ζώνης. Το πάχος του είναι 4mm και έχει διάμετρο 10mm, Το όργανο αυτό παρουσιάζει διαφάνεια και κυρτότητα στην εμπρός και οπίσθια επιφάνεια, με μεγαλύτερη την οπίσθια.

Διακρίνονται τρία τμήματα, το **περιφάκιο**, (μεμβράνη που περιβάλλει εξ ολοκλήρου το φακό), το **επιθήλιο**, (στρώμα κυττάρων σε σχήμα κύβου) και τέλος τις **φακαίες ίνες** (Snell and Lem, 2006).

Υαλοειδές Σώμα

Το υαλώδες σώμα είναι ένα διαυγές παχύρρευστο υγρό που καταλαμβάνει τα 4/5 του βολβού και βρίσκεται πίσω από το φακό, και εφάπτεται με τον αμφιβληστροειδή. Συνεισφέρει στη διάθλαση που υφίσταται το εισερχόμενο στον οφθαλμό φως, αποτελώντας έτσι ένα από τα διαθλαστικά οφθαλμικά μέσα.

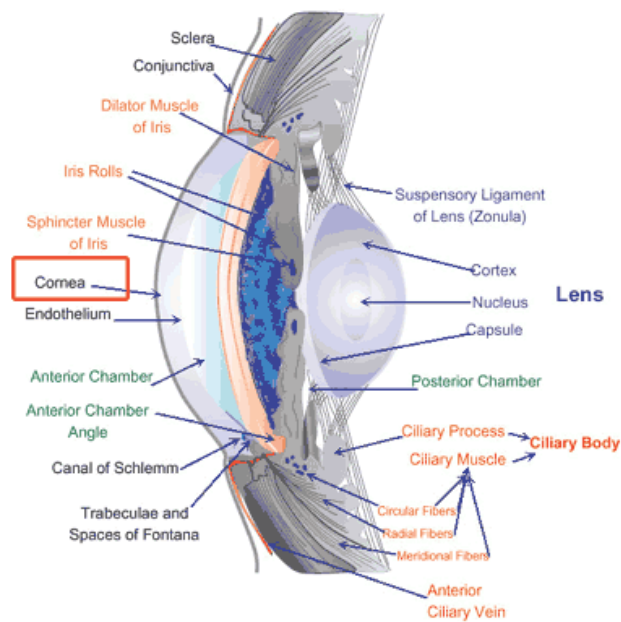
Οι ουσίες που αποτελείται το υαλώδες σώμα είναι άλατα, διαλυτές πρωτεΐνες, υαλουρονικό οξύ και αμινοξέα, ενώ το βασικό του συστατικό και μάλιστα κατά ποσοστό 98% είναι το νερό και ίνες κολλαγόνου (Φωτεινάκης και συνεργάτες, 2000).

1.1.2 Κερατοειδής

Ο κερατοειδής είναι ένας διαφανής χιτώνας που καταλαμβάνει το πρόσθιο 1/6 και διαφανές τμήμα του ινώδη χιτώνα του οφθαλμικού βολβού και αποτελεί το κυριότερο διαθλαστικό μέσο του οπτικού συστήματος του οφθαλμού καθώς είναι το πρώτο οφθαλμικό μέσο στο οποίο διαθλάται η εισερχόμενη ακτίνα φωτός που προέρχεται από τα διάφορα αντικείμενα του περιβάλλοντος χώρου (Εικόνα 1.2). Πρακτικά όμως θα λέγαμε ότι η πρώτη διάθλαση γίνεται στην επιφάνεια της

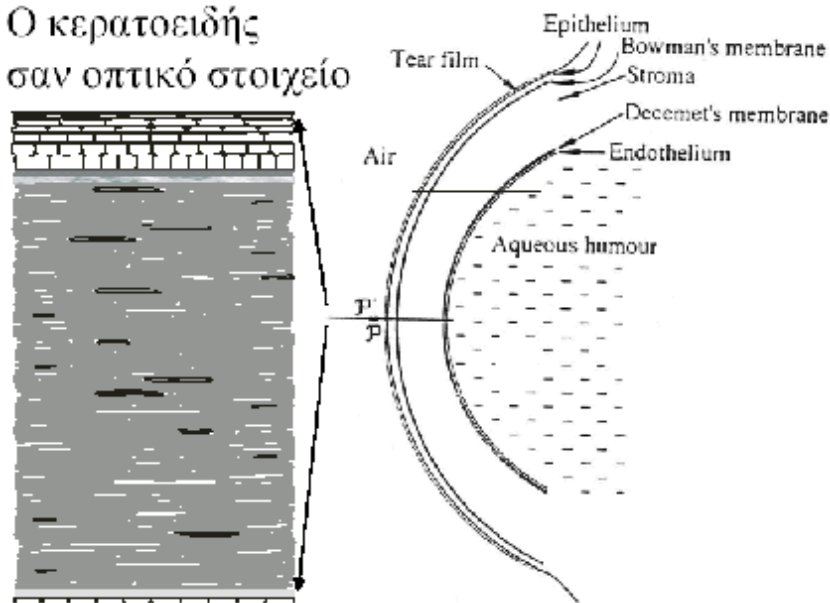
δακρυϊκής στιβάδας. Η στιβάδα αυτή καλύπτει τον κερατοειδή εξωτερικά και διακρίνεται στην λιπώδη, υδάτινη και βλεννώδη στιβάδα (Ασημέλλης και συνεργάτες, 2007).

Η διαθλαστική ισχύς του κερατοειδούς είναι περίπου σε 45 διοπτρίες. Η καμπυλότητα του είναι μεγαλύτερη από αυτή του υπόλοιπου βολβού και η *επιπολής σκληραία αύλακα* είναι αυτή που διαχωρίζει τον κερατοειδή με τον σκληρό χιτώνα. Σε πρόσθια άποψη ο κερατοειδής έχει κυρτό σχήμα και ελαφρώς ελλειπτικό. Οι διαστάσεις του διαφέρουν από άτομο σε άτομο αλλά κατά μέσο όρο οι διάμετροι είναι 10,6mm κάθετα και 11,7mm οριζόντια. Οπίσθια έχει κοίλο και κυκλικό σχήμα με 11,7mm διάμετρο. Στο κέντρο είναι πιο λεπτός (0,5- 0,6 mm) και περιφερειακά είναι πιο παχύς (0,7mm). Ο κερατοειδής στην παρεμβολή του με τον αέρα έχει δείκτη διάθλασης 1,00 και με το υδατοειδές υγρό 1,33 (Snell and Lem, 2006). Ο κερατοειδής αποτελείται από πέντε στιβάδες (Εικόνα 1.3). Από έξω προς τα μέσα οι στιβάδες είναι το *επιθήλιο*, το *πρόσθιο αφοριστικό πέταλο*(μεμβράνη Bowman), η ίδια ουσία (*στρώμα*), το *οπίσθιο αφοριστικό πέταλο* (μεμβράνη Descemet) και τέλος το *ενδοθήλιο*.



Εικόνα 1. 2 : Ο κερατοειδής

Ο κερατοειδής σαν οπτικό στοιχείο



Εικόνα 1.3: Τα μέρη του κερατοειδή

Το επιθήλιο

Το επιθήλιο είναι πλακώδες και αποτελείται από 5 στιβάδες επιθηλιακών κυττάρων. Συνολικά το πάχος του είναι 50-60 nm. Τα κύτταρα στη βάση του επιθηλίου έχουν σχήμα κυλινδρικό σε αντίθεση με τα επιφανειακά που είναι πεπλατυσμένα και εμπύρηννα. Στο σκληροκερατοειδές όριο (ΣΚΟ) το επιθήλιο γίνεται πιο παχύ διαθέτοντας 10 στιβάδες κυττάρων, ή και περισσότερες. Το επιθήλιο έρχεται σε επαφή με τον βολβικό επιπεφυκότα. Στην περιοχή του ΣΚΟ υπάρχουν μελανοκύτταρα σε σκουρόχρωμες φυλές.

Μεταξύ της βασικής στιβάδας των εν βάθη επιθηλιακών κυττάρων και της μεμβράνης του Bowman υφίσταται η βασική μεμβράνη η οποία αποτελεί ξεχωριστή δομή του κερατοειδούς. Ειδικά κύτταρα της βασικής στιβάδας (ημιδεσμοσώματα) συνδέονται και με το στρώμα μέσω των καθηλωτικών ινιδίων που διέρχονται από τις παραπάνω δυο μεμβράνες. Τα ινίδια αυτά αποτελούνται από ίνες κολλαγόνου τύπου IV και εμφανίζει δυο ζώνες. Την πρόσθια ανοιχτόχρωμη ζώνη που αποτελείται από την λιπιδική στιβάδα με κοκκώδη εμφάνιση και την οπίσθια πυκνή ζώνη αποτελούμενη από ένα δίκτυο ινών (Snell and Lem, 2006).

Η μεμβράνη του Bowman

Η μεμβράνη του Bowman ή πρόσθιο αφοριστικό πέταλο είναι μία ξεχωριστή στιβάδα του κερατοειδή και βρίσκεται κάτω από την βασική μεμβράνη. πρόκειται για ακυτταρικό υμένα, πάχους 8-10 μm και αποτελείται από ίνες κολλαγόνου και θεμελιώδης ουσία. Η πρόσθια επιφάνεια της μεμβράνης είναι λεία και ομαλή, ενώ η οπίσθια είναι ασαφής και συγγέεται με το δίκτυο των κολλαγόνων ινιδίων του πρόσθιου στρώματος. Η μεμβράνη του Bowman τερματίζει απότομα στο σκληροκερατοειδές όριο και η εν βάθη επιφάνεια της γίνεται ένα με το στρώμα του κερατοειδούς (Snell and Lem, 2006).

Στρώμα ή ίδια ουσία

Το στρώμα του κερατοειδούς αντιπροσωπεύει περίπου το 90% του συνολικού πάχους του κερατοειδή. Σχηματίζεται από πολλαπλά πέταλα κολλαγόνων ινιδίων, κύτταρα και θεμέλιο ουσία. Τα πέταλα κολλαγόνου επικάθονται το ένα επί του άλλου και διατάσσονται παράλληλα μεταξύ τους αλλά και προς την επιφάνεια του κερατοειδή (Εικόνα 1.4). Κάθε πέταλο αποτελείται από κολλαγόνα ινίδια, περιβαλλόμενα από θεμέλια ουσία. Τα ινίδια είναι παράλληλα μεταξύ τους και είναι κυρίως τύπου I και λιγότερο III, V και IV. Η διάταξη αυτή αποτελεί την κύρια αιτία της διαφάνειας του κερατοειδούς. Υπολογίζεται ότι ο αριθμός των πετάλων ανέρχεται στα 200-250 με πάχος το καθένα 2 μm . Η θεμέλιος ουσία, η οποία συμπληρώνει τον χώρο μεταξύ των ινιδίων του κολλαγόνου, αποτελείται από πρωτεογλυκάνες και γλυκοζαμινογλυκάνες και μπορεί να βρεθούν και μακροφάγα, λεμφοκύτταρα και πολυμορφοπύρηνα (Snell and Lem, 2006).

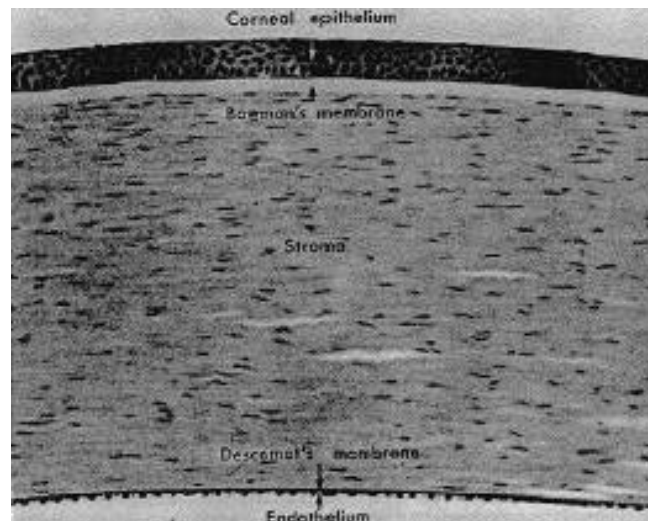
Η Δεσκεμέτιος μεμβράνη

Η δεσκεμέτιος μεμβράνη βρίσκεται στο οπίσθιο μέρος του στρώματος. Αποτελεί τη βασική μεμβράνη του ενδοθηλίου και παράγεται εν μέρει ή πιθανώς εξ ολοκλήρου από τα ενδοθηλιακά κύτταρα. Είναι σκληρή και ομοιογενής και όσο αφορά το πάχος της, κατά τη γέννηση έχει πάχος 4 μm , ενώ στον ενήλικα φθάνει τα 10 μm . Είναι αφορισμένη από το στρώμα και το πάχος της είναι μεγαλύτερο από αυτό του ενδοθηλίου. Μπορεί εύκολα να αποκοπεί από το στρώμα και το ενδοθήλιο εφόσον ραγεί, και να χαθεί μέσα στον πρόσθιο θάλαμο. Αποτελείται από λεπτά κολλαγόνα ινίδια τύπου IV σε εξαγωνική διάταξη, με ομοιόμορφη κατανομή, διαφορετικά

όμως από αυτά του στρώματος. Τερματίζει απότομα στο ΣΚΟ (Snell and Lem, 2006).

Το ενδοθήλιο

Τελευταία στοιβάδα του κερατοειδούς είναι το ενδοθήλιο το οποίο αποτελείται από μία μονοκυτταρική στρώση πολυγωνικών αποπλατισμένων κυττάρων, των οποίων το κυταρρόπλασμα είναι πλούσιο σε μιτοχόνδριο τα οποία συμβάλλουν σημαντικά στην μεταφορά υγρού από τον κερατοειδή προς τον πρόσθιο θάλαμο και στην διατήρηση του κερατοειδή ελαφρώς αφυδατωμένο, πράγμα που απαιτείται για την διαύγεια του. Τα κύτταρα συνδέονται με αποφρακτικές ζώνες και οι επιφάνειες τους σχηματίζουν μικρολάχνες (Snell and Lem, 2006).



Εικόνα 1.4: Ιστολογική δομή κερατοειδούς

1.2 Διαθλαστικές ανωμαλίες

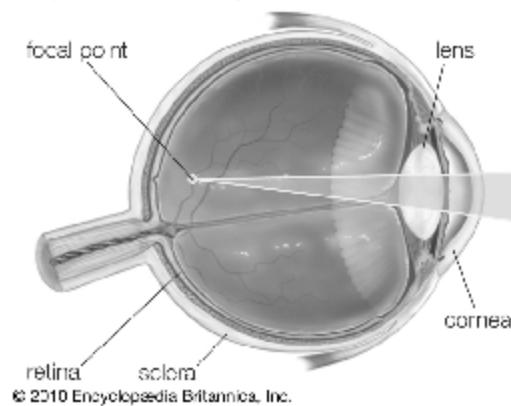
Η κατάσταση κατά την οποία ο οφθαλμός, χωρίς προσαρμογή, σχηματίζει ένα τέλειο είδωλο επάνω ακριβώς στον αμφιβληστροειδή, ονομάζεται **εμμετροπία**. Αυτή είναι η φυσιολογική και ιδανική κατάσταση που μπορεί να βρίσκεται ο οφθαλμός, δεν είναι όμως και ιδιαίτερα συχνή καθώς η **αμετροπία**, η ύπαρξη δηλαδή διαθλαστικού σφάλματος, συναντάται στα περισσότερα μάτια. Οι διαθλαστικές ανωμαλίες γίνονται άμεσα αντιληπτές από την μείωση της οπτικής οξύτητας, παρόλα αυτά δεν ευθύνονται αποκλειστικά για την μείωση αυτή. Παράγοντες όπως για παράδειγμα η διάμετρος της κόρης, η προσαρμογή του οφθαλμού στις διάφορες συνθήκες φωτισμού και άλλα επηρεάζουν την οπτική οξύτητα. Η αμετροπία μπορεί να οφείλεται σε διαταραχή της διαθλαστικής δύναμης του ματιού (μεγάλη κυρτότητα κερατοειδούς), και ονομάζεται **διαθλαστική αμετροπία**, ενώ αντίθετα αν οφείλεται σε διαταραχή του αξονικού μήκους του οφθαλμού, χαρακτηρίζεται ως **αξονική αμετροπία**. Διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις αμετροπιών:

1.2.1 Μυωπία

Αν παράλληλη δέσμη ακτινών εισέρχεται στον οφθαλμό και δεν εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή αλλά μπροστά του, η διαθλαστική ανωμαλία ονομάζεται μυωπία (Εικόνα 1.5). Οι ακτίνες φτάνουν στον αμφιβληστροειδή χιασμένες και αποκλίνουσες και το αντικείμενο φαίνεται θολό. Κατά την μυωπία μπορεί να υπάρχει μεγάλος προσθιοπίσθιος άξονας του οφθαλμού ή μεγάλη διαθλαστική δύναμη του οπτικού συστήματος, ή ακόμα και τα δύο.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, αν η μυωπία οφείλεται σε μεγάλη διαθλαστική δύναμη, τότε ονομάζεται **διαθλαστική μυωπία**, ενώ αν οφείλεται σε μεγάλο προσθιοπίσθιο άξονα του οφθαλμού, ονομάζεται **αξονική μυωπία**. Η τελευταία συναντάται σε πολύ υψηλές μυωπίες μεγαλύτερες δηλαδή από 6,0-7,0 dpt (Δαμανάκης, 1999). Έρευνες έχουν δείξει ότι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες συμβάλλουν στην δημιουργία μυωπίας. Περιβάλλον και γενετική μπορεί να αλληλεπιδράσουν μαζί ώστε να χαρακτηριστεί ένας οφθαλμός μυωπικός (Legerton and Chou, 2009).

Myopia (nearsightedness)

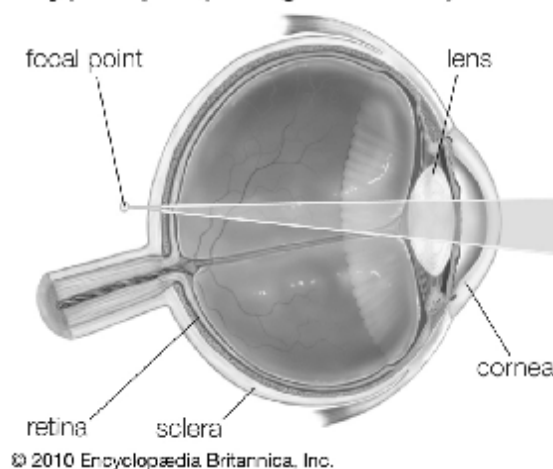


Εικόνα 1.5: μυωπικός οφθαλμός

1.2.2 Υπερμετροπία

Αν παράλληλη δέσμη ακτινών εισέρχεται στον οφθαλμό και δεν εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή αλλά πίσω του (σχηματίζει δηλαδή εστία αφού τον έχει συναντήσει), η διαθλαστική ανωμαλία ονομάζεται υπερμετροπία (Εικόνα 1.6). Κάθε σημείο ενός αντικειμένου παρουσιάζεται στον αμφιβληστροειδή σαν κύκλο σύγχυσης και το αντικείμενο διακρίνεται θολά. Κατά την υπερμετροπία μπορεί να υπάρχει μικρός προσθιοπίσθιος άξονας του οφθαλμού ή μικρή διαθλαστική δύναμη του οπτικού συστήματος, ή ακόμα και τα δύο. Στα πρώτα χρόνια της ζωής ενός ανθρώπου η υπερμετροπία θεωρείται φυσιολογική κατάσταση καθώς στην παιδική ηλικία ο προσθιοπίσθιος άξονας είναι μικρός και με την πάροδο του χρόνου αυξάνεται και μειώνεται η υπερμετροπία. Συνήθως όμως μπορεί ύστερα από εμμετροπικό, το μάτι να ξαναγίνει υπερμετροπικό (Δαμανάκης, 1999).

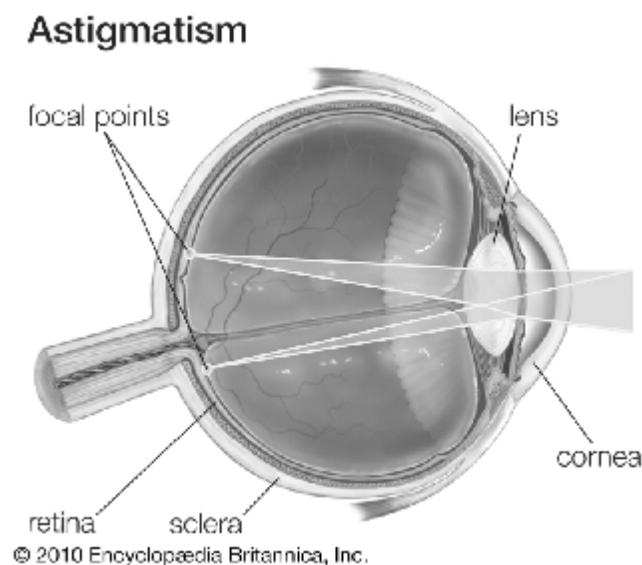
Hyperopia (farsightedness)



Εικόνα 1.6: Υπερμετροπικός οφθαλμός

1.2.3 Αστιγματισμός

Κατά τον αστιγματισμό, δεν υπάρχει ίδια διαθλαστική δύναμη σε όλους τους μεσημβρινούς με απόρροια την αδυναμία του οφθαλμού να συγκεντρώσει όλες τις εισερχόμενες ακτίνες σε ένα σημείο στον αμφιβληστροειδή (Εικόνα 1.7). Κατά κύριο λόγο η ύπαρξη αστιγματισμού οφείλεται στο διαταραγμένο σχήμα του κερατοειδούς καθώς δεν είναι σφαιρικός και η ακτίνα καμπυλότητας δεν είναι η ίδια σε όλους τους μεσημβρινούς. Ο μεσημβρινός που διαθέτει την μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας έχει μεγαλύτερη διαθλαστική δύναμη και είναι κυρτότερος σε σχέση με τον μεσημβρινό με την μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας ο οποίος είναι λιγότερο κυρτός και με μικρότερη δύναμη. Ο αστιγματισμός επίσης μπορεί να οφείλεται και στον φακό του ματιού, όμως είναι λιγότερο συχνός (Δαμανάκης, 1999).

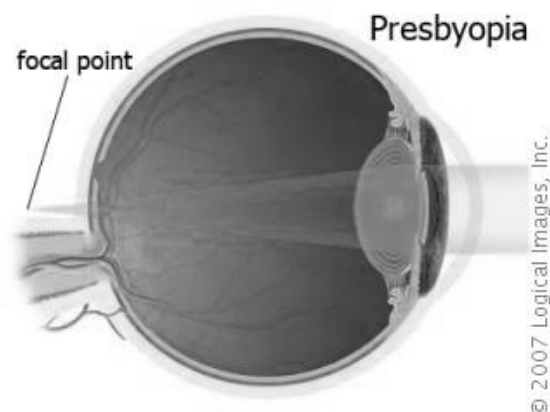


Εικόνα 1.7: Αστιγματικός οφθαλμός.

1.2.4 Πρεσβυωπία

Ο κρυσταλλοειδής φακός στις νεαρές ηλικίες είναι ελαστικός και αλλάζει το σχήμα του καθώς συσπάται το ακτινωτό σώμα. Κατά την πάροδο των χρόνων όμως ο φακός σκληραίνει και χάνει την ελαστικότητά του με αποτέλεσμα να μειώνεται η προσαρμοστική του ικανότητα. Μετά την

ηλικία των 40 ετών περίπου η ελαστικότητα του μειώνεται και προκαλούνται προβλήματα στην κοντινή όραση (Εικόνα 1.8) (Δαμανάκης, 1999).



Εικόνα 1.8 : Οφθαλμός με πρεσβυωπία.

1.3.Εκτροπές οφθαλμού

Από πλευράς οπτικής φυσικής, ο οφθαλμός δεν είναι ένα απόλυτα τέλειο οπτικό σύστημα καθώς διακρίνεται από διάφορα χαρακτηριστικά τα οποία μειώνουν την οπτική του αντίληψη και ανάλυση (Charman, 1991; Sawides et al., 2011). Οι ακτίνες φωτός καθώς διαδίδονται και διαθλώνται από τα διάφορα διαθλαστικά μέσα του οφθαλμού, τα οποία διαθέτουν όμως ατέλειες, υφίσταται οπτικές εκτροπές, που μειώνουν την ποιότητα του ειδώλου που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή. Οι εκτροπές αυτές μπορεί να είναι **μονοχρωματικές εκτροπές** (που προκύπτουν από την γεωμετρία του οφθαλμού), ή **χρωματικές εκτροπές** (Charman, 1991).

Οι εκτροπές περιορίζουν την ποιότητα της όρασης ιδιαιτέρως όταν το μέγεθος της κόρης είναι μεγαλύτερο από τα 2.5 - 3 mm, ενώ όταν η κόρη είναι μικρότερη, η διακριτική ικανότητα του οφθαλμού μειώνεται λόγω του φαινομένου της περίθλασης. Θα λέγαμε δηλαδή, ότι η αύξηση της διαμέτρου της κόρης βελτιώνει την διακριτική ικανότητα λόγω της μείωσης του φαινομένου της περίθλασης αλλά ταυτόχρονα μειώνεται

λόγω των μονοχρωματικών εκτροπών (Campbell and Green, 1965; Charman, 1991).

Ακόμη και σε περίπτωση που η πιθανή αμετροπία έχει διορθωθεί, είτε με οφθαλμικούς φακούς και φακούς επαφής είτε με διαθλαστική χειρουργική, το τελικό είδωλο που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή, δεν θα είναι απόλυτα ευκρινές, αλλά θα είναι σε κάποιο βαθμό θολωμένο, λόγω των χρωματικών και μονοχρωματικών εκτροπών (και της περίθλασης), όπου δεν διορθώνονται με τις παραπάνω μεθόδους (Charman and Chateau, 2003).

1.3.1 Μονοχρωματικές εκτροπές

Οι μονοχρωματικές εκτροπές διακρίνονται σε χαμηλής και υψηλής τάξης. Στις εκτροπές χαμηλής τάξης (έως δεύτερης τάξης) ανήκουν το σφαίρωμα και ο αστιγματισμός. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η διόρθωση της διαθλαστικής ανωμαλίας με φακούς επαφής και άλλες μεθόδους μπορεί να βελτιώσει την όραση, ιδιαίτερα σε μικρού διαμέτρου κόρες. Ο οφθαλμός όμως υποφέρει από τις εκτροπές υψηλής τάξης οι οποίες επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα της όρασης και αυτές είναι το κόμα, η σφαιρική εκτροπή, η καμπύλωση πεδίου και η παραμόρφωση πεδίου. Ακόμα και σε έναν εμμετρικό οφθαλμό μπορεί να υπάρχουν υψηλής τάξης σφάλματα που να συμβάλλουν στην μείωση της ποιότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου (Guirao et al., 2002; Ασημέλλης και συνεργάτες, 2008; Wang et al., 2011).

Στις μονοχρωματικές εκτροπές υψηλής τάξης λοιπόν, αναφέρονται οι παραμορφώσεις που υφίστανται οι ακτίνες όταν εισέρχονται σε ένα οπτικό σύστημα, στο οποίο έχουν διορθωθεί τα απλά διαθλαστικά σφάλματα, αλλά λόγω γεωμετρίας του οφθαλμού, αυτές παραμένουν.

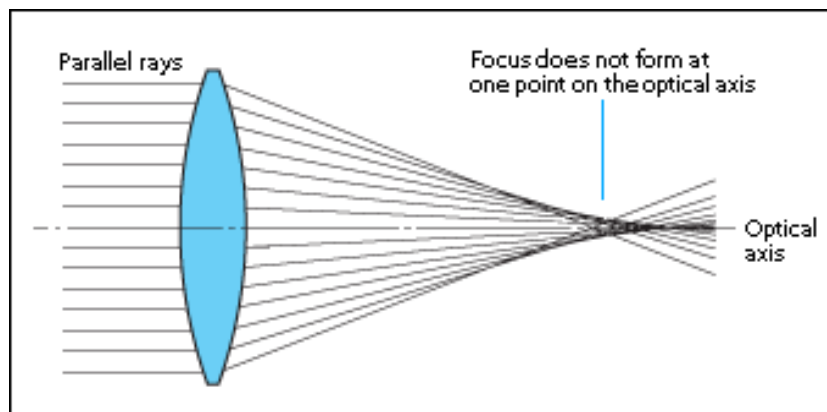
Η πλειοψηφία των εκτροπών αυτών καταλαμβάνεται από τις δεύτερης τάξης εκτροπές, ενώ οι μεγαλύτερης τάξης εμφανίζονται λιγότερο και είναι κατά πλειοψηφία συμμετρικές στα δύο μάτια.

Μια σειρά από μελέτες απέδειξε τις καταστροφικές επιπτώσεις που έχουν οι μονοχρωματικές εκτροπές υψηλής τάξης στην ποιότητα της εικόνας μέσω των συναρτήσεων PSF (point spread function), MTF (modulation transfer function). Έχει αποδειχτεί ότι αν μειωθούν, μπορεί να αυξηθεί η ευαισθησία αντίθεσης και η οπτική οξύτητα (Guirao et al., 2002).

- Σφαιρική εκτροπή

Κατά την σφαιρική εκτροπή οι φωτεινές ακτίνες που διέρχονται στην περιφέρεια μιας σφαιρικής επιφάνειας διαθλώνται περισσότερο από αυτές που διέρχονται από το κέντρο με απόρροια να σχηματίζουν εστία πιο κοντά στον φακό (Εικόνα 1.9). Οι ακτίνες λοιπόν που διέρχονται από τον φακό δεν σχηματίζουν μια σημειακή εστία αλλά κύκλο σύγχυσης .

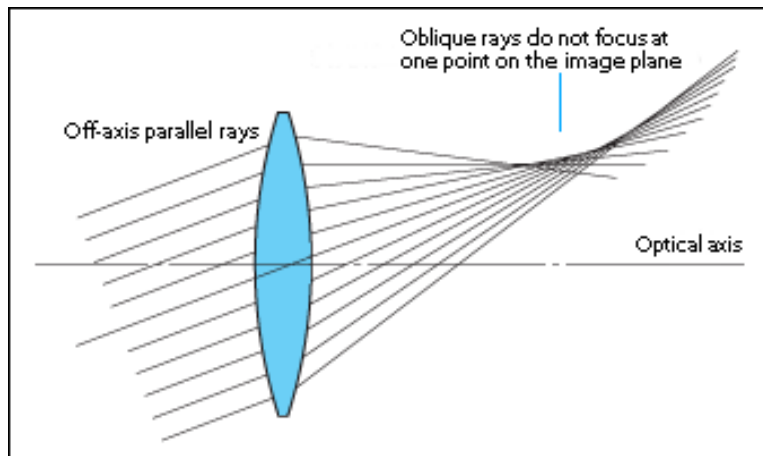
Υπάρχουν τρεις τρόπου με τους οποίους μπορεί να μειωθεί το φαινόμενο της σφαιρικής εκτροπής. Ο πρώτος είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα διάφραγμα το οποίο θα εμποδίζει τις περιφερειακές ακτίνες να διέρχονται από τον φακό. Ο δεύτερος είναι να επιλέξουμε τις κατάλληλες ακτίνες καμπυλότητας του φακού και τέλος να χρησιμοποιήσουμε ασφαιρικό φακό (Δαμανάκης, 1999).



Εικόνα 1.9: Σφαιρική εκτροπή.

- Κόμα ή κόμη

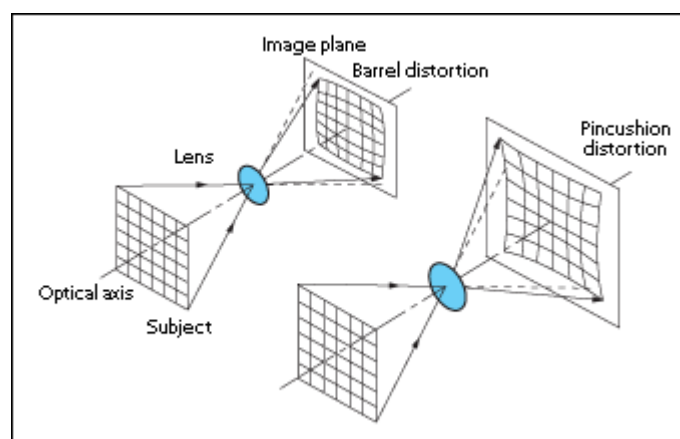
Το φαινόμενο της κόμης προκαλείται λόγω της επίδρασης των λοξών ακτινών της σφαιρικής εκτροπής (Εικόνα 1.10). Ως αποτέλεσμα έχουμε το είδωλο του σημείου που δημιουργείται από τις εκτός άξονα ακτίνες να αποτελείται από κύκλους που αλληλοεπικαλύπτονται που παίρνουν σχήμα κομήτη με περισσότερο φωτεινό κέντρο και λιγότερο φωτεινή ουρά (Δαμανάκης, 1999).



Εικόνα 1.10: Κόμη

• Παραμόρφωση πεδίου

Ως παραμόρφωση πεδίου χαρακτηρίζουμε την ανικανότητα ενός φακού (ή οπτικού συστήματος) να αναπαράγει σχηματικά ένα είδωλο - αντίγραφο του αντικειμένου (Εικόνα 1.11). Η μεγέθυνση των αντικειμένων διαφέρει αναλόγως την απόσταση που βρίσκονται από τον οπτικό άξονα. Ένα αντικείμενο περισσότερο μεγεθυμένο στο κέντρο και λιγότερο στην περιφέρεια ή το αντίθετο, μοιάζει παραμορφωμένο. Οι μεγάλοι σε δύναμη θετικοί φακοί μεγεθύνουν περισσότερο τα περιφερειακά τμήματα του αντικειμένου αντίθετα με τους αρνητικούς που τα σμικρύνουν (Δαμανάκης, 1999).

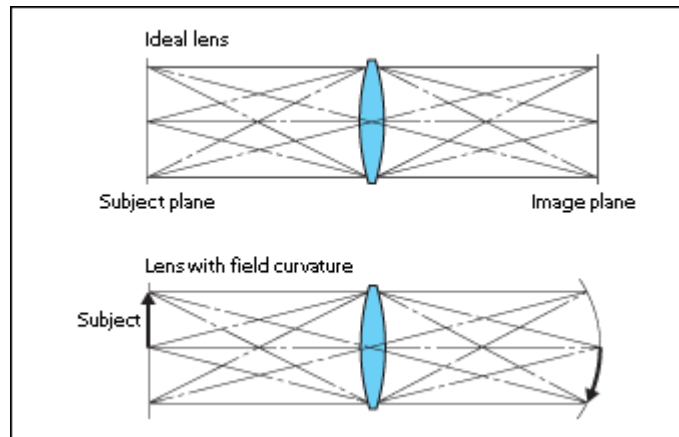


Εικόνα 1.11: Παραμόρφωση πεδίου

- Καμπύλωση πεδίου

Ως καμπύλωση πεδίου χαρακτηρίζουμε την ικανότητα ενός οπτικού συστήματος να εστιάζει όλα τα σημεία του ειδώλου σε μια καμπύλη επιφάνεια (Εικόνα 1.12). Πιο συγκεκριμένα, όλα τα τμήματα ενός αντικειμένου που είναι επίπεδο δεν απέχουν την ίδια απόσταση από μια σφαιρική διαθλαστική επιφάνεια. Στην περίπτωση ενός θετικού φακού, όλες οι ακτίνες της περιφέρειας εστιάζονται πιο κοντά στον φακό σε σχέση με τις κεντρικές. Συνεπώς η εικόνα του αντικειμένου μοιάζει κυρτωμένη στα άκρα του φακού. Το αντίθετο συμβαίνει με τον αρνητικό φακό.

Το αποτέλεσμα της καμπύλωσης του πεδίου είναι να μην καθίσταται δυνατός ο σχηματισμός της εικόνας του αντικειμένου σε επίπεδη επιφάνεια. Για να εστιαστούν όλα τα σημεία του αντικειμένου, πρέπει να υπάρχει κυρτή επιφάνεια (Δαμανάκης, 1999).

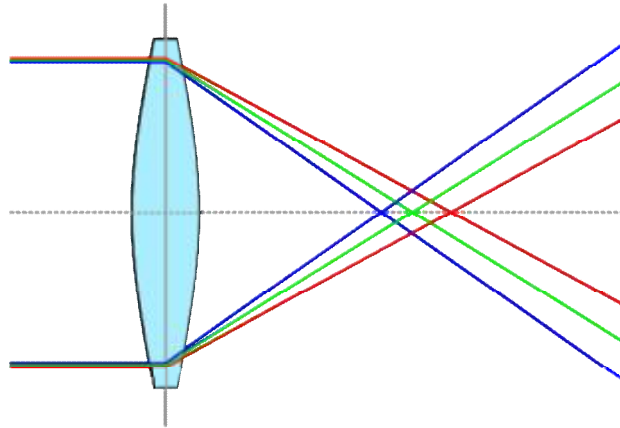


Εικόνα 1.12: Καμπύλωση πεδίου

1.3.2 Χρωματικές εκτροπές

Ο δείκτης διάθλασης του φωτός είναι διαφορετικός για τα διάφορα μήκη κύματος και είναι μεγαλύτερος για τα μικρά μήκη κύματος και μικρότερος για τα μεγάλα. Το λευκό φως είναι πολυχρωματικό καθώς αποτελείται από ακτινοβολίες με διάφορα μήκη κύματος και όταν διαπερνάει έναν σφαιρικό φακό, η διάθλαση που υφίστανται οι διάφορες ακτινοβολίες που το συνιστούν

διαφέρει και το φως αναλύεται στα διάφορα χρώματα. Οι ακτίνες με μικρό μήκος σχηματίζουν πιο κοντά στο φακό την εστία και οι ακτίνες με μεγάλο μήκος κύματος πιο μακριά. Αποτέλεσμα είναι να μην σχηματίζεται σημειακή εστία αλλά μια έγχρωμη κηλίδα. Οι ακτίνες που διαθλώνται περισσότερο είναι οι ιώδεις και οι λιγότερο οι ερυθρές (Εικόνα 1.13) (Δαμανάκης, 1999).



Εικόνα 1.13 : Χρωματική εκτροπή

Κεφάλαιο 2

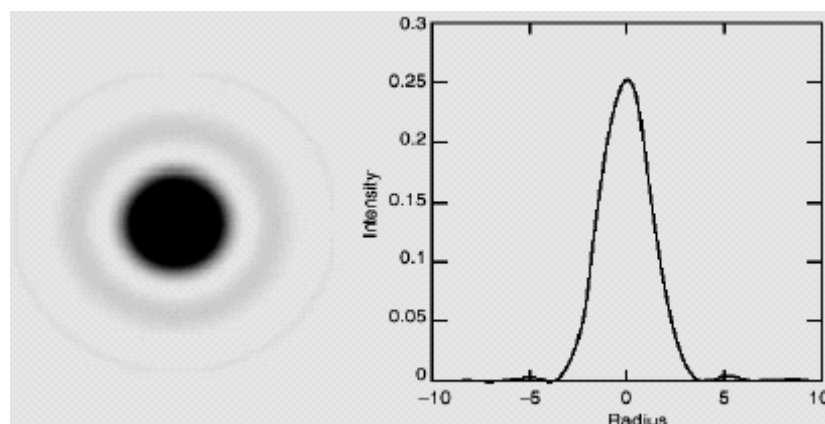
Μέτωπο κύματος(wavefront) και εκτροπομετρία

2.1 Ποιότητα όρασης

Η ποιότητα της όρασης εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- 1) από τα οπτικά μέσα του οφθαλμού, τα οποία επηρεάζουν την ποιότητα του ειδώλου που σχηματίζεται πάνω στον αμφιβληστροειδή,
- 2) από την φυσιολογική, ή μη, λειτουργία του αμφιβληστροειδούς,
- 3) από την επεξεργασία της εικόνας από τον εγκέφαλο.

Ο σχηματισμός του ειδώλου επηρεάζεται από το μέγεθος της κόρης, από τις εκτροπές και από την σκέδαση των οπτικών μέσων του οφθαλμού. Λόγω της ύπαρξης αυτών των παραγόντων, το οπτικό σύστημα αδυνατεί να παράγει ένα τέλειο είδωλο καθώς δεν επιτυγχάνεται η τέλεια σημειακή απεικόνιση μιας πηγής από το οπτικό σύστημα, αλλά απεικονίζεται το σχέδιο ενός κεντρικού φωτεινότερου δακτυλίου, που περιβάλλεται από ομόκεντρους δακτυλίους που σταδιακά μειώνεται η φωτεινότητά τους (airy disc) (Εικόνα 2.1) (Περδικάκης, 2007-2008).



Εικόνα 2.1 :Airy disc

2.2 Εκτροπομετρία

Οι οπτικές εκτροπές λοιπόν όπως προαναφέρθηκε αποτελούν έναν από τους παράγοντες που περιορίζουν την ποιότητα της όρασης. Οι εκτροπές ανώτερης τάξης αντιπροσωπεύουν περίπου το 20% των οπτικών ατελειών για τον μέσο άνθρωπο. Αν αυτές μπορούν να περιοριστούν, ακόμα και όταν η κόρη βρίσκεται σε μυδρίαση, η όραση μπορεί να βελτιωθεί (Chou, 2005).

Η εκτροπομετρία, η οποία είναι γνωστή και ως **τοπογραφία μετώπου κύματος**, είναι ό, τι πιο σύγχρονο στη μελέτη των οπτικών αυτών σφαλμάτων και της οπτικής απόδοσης. Είναι μια τεχνολογία που από το πεδίο της αστρονομίας εντάχθηκε στις οπτικές επιστήμες ώστε να συμβάλλει στην συγκέντρωση των απαραίτητων στοιχείων για την αντιμετώπιση των εκτροπών του οφθαλμού. Τα στοιχεία αυτά καθίστανται πολύ σημαντικά ώστε να σχεδιαστούν οι ιδανικές διορθώσεις για τον οφθαλμό (Marcos and Thibos, 2003; Calixte et al., 2010).

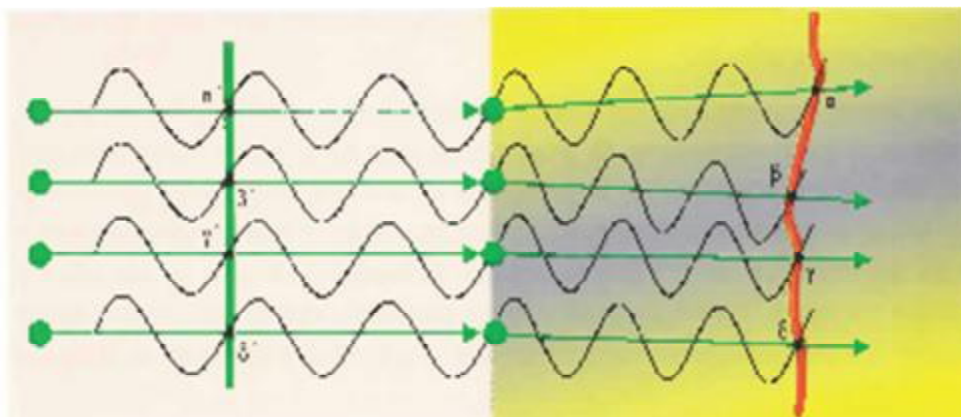
Οι αντικειμενικές μέθοδοι δεν υπολογίζουν τις εκτροπές υψηλής τάξης, αντίθετα με τα **εκτροπόμετρα** (ή διαφορετικά οι **διατάξεις τοπογράφησης σφαλμάτων**) τα οποία επιτρέπουν να καταγράφει και να αναλυθεί με λεπτομέρεια το μέτωπο κύματος που διέρχεται μέσα από το οπτικό σύστημα του οφθαλμού και στη συνέχεια το αναλύουν στις διαταραχές από τις οποίες αποτελείται.

2.3 Wavefront

Το φως δεν είναι τίποτε άλλο από ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από συγχρονισμένα ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία ταλαντώνονται σε κάθετα επίπεδα μεταξύ τους και κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης, χωρίς να διαταράσσουν τα σωματίδια του μέσου στο οποίο διαδίδονται. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι η συχνότητα ν , το μήκος λ , το εύρος του κύματος α και η περίοδος του T . Ο όρος «**wavefront**» αντιστοιχεί στον όρο «**κυματομέτωπο**» της φυσικής οπτικής.

Το οπτικό wavefront είναι ουσιαστικά μια επιφάνεια, ένα μέτωπο, που σχηματίζουν τα σημεία των ακτινών της δέσμης που βρίσκονται στην ίδια φάση κύματος, στην ίδια χρονική στιγμή της εκπομπής της δέσμης

φωτός (Εικόνα 2.2). Το επίπεδο του wavefront είναι κάθετο στις ακτίνες της δέσμης αυτής (Μαγουλάς,2005).



Εικόνα 2.2: Κυματομέτωπο

Η ανάλυση του wavefront είναι πολύ σημαντική καθώς είναι ο καλύτερος τρόπος να μελετήσουμε τις εκτροπές του ανθρώπινου οφθαλμού. Χρησιμοποιώντας εξελιγμένα όργανα που ονομάζονται αναλυτές μετώπου κύματος (wavefront analyzers) αμπερόμετρα, ή εκτροπόμετρα, μας δίνεται η δυνατότητα για την ακριβή μέτρηση και αναλυτική καταγραφή όλων των οπτικών εκτροπών (Thibos et al., 2002).

Τα αμπερόμετρα παρουσιάζουν ομοιότητα στην λειτουργία τους με τα αυτόματα διαθλασίμετρα (autorefractors) και θεωρούνται σαν *souper autorefractor* που μετρούν τις μονοχρωματικές εκτροπές χαμηλής (σφαίρωμα και κύλινδρο), αλλά επιπλέον και τις εκτροπές υψηλής τάξης. Η απεικόνιση γίνεται με τη μορφή χρωματικού χάρτη, ο οποίος ονομάζεται εκτροπομετρικός χάρτης. Οι χάρτες του wavefront εκφράζουν το σφάλμα ως υψομετρική διαφορά στη συντεταγμένη z, σε μικρά, ενώ οι x, y συντεταγμένες αφορούν τις διαστάσεις του μεγέθους της κόρης (Μαγουλάς, 2005; Ασημέλλης και συνεργάτες, 2008).

Η μέθοδος της καταγραφής του μετώπου κύματος στηρίζεται στις εξής αρχές:

Ενώ παράλληλες δέσμες φωτός που εκπέμπονται από κάποια πηγή εισέρχονται σε ένα οπτικό πεδίο το οποίο είναι ανομοιογενές, διαθλώνται προς ακαθόριστες κατευθύνσεις και προκαλείται μεταβολή στην φάση τους, λόγω της διαφορετικής ταχύτητας που διαθέτει πια η κάθε ακτίνα. Ως αποτέλεσμα έχουμε τα σημεία α, β, γ, δ όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 2.1, τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικές φωτεινές ακτίνες και

στην ίδια φάση για μια δεδομένη στιγμή του χρόνου, να δημιουργούν ένα παραμορφωμένο μέτωπο κύματος. Η απεικονιζόμενη λοιπόν κόκκινη γραμμή της εικόνας αποτελεί ένα μη ιδανικό wavefront, το οποίο όμως ουσιαστικά αποτελεί την εικόνα όλων σχεδόν των οφθαλμών, ακόμα και σε κάποιες περιπτώσεις των εμμετρικών. Αν οι ακτίνες εισέρχονται παράλληλες σε ένα ομοιογενές οπτικό μέσο τα σημεία α', β', γ', δ' τα οποία διαθέτουν την ίδια φάση, σχηματίζουν ένα επίπεδο, ιδανικό wavefront το οποίο όμως πρακτικά δεν υπάρχει, αλλά είναι απολύτως χρήσιμο, καθώς η απεικόνιση και η περιγραφή του wavefront του εκάστοτε οφθαλμού γίνεται ως καταγραφή των διαφορών του από το ιδεώδες wavefront καταγράφοντας την μεταβολή του (Μαγουλάς, 2005; Charman, 2005).

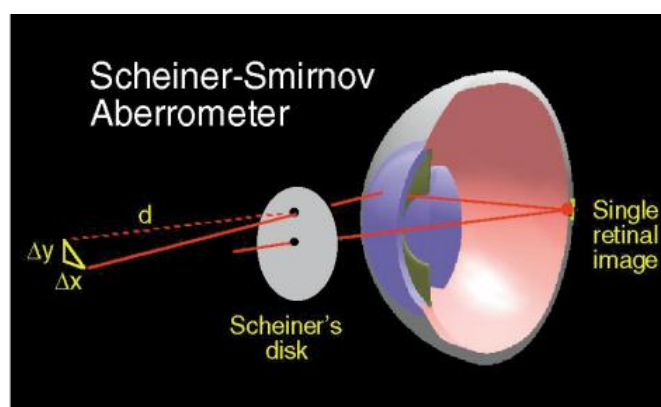
Η wavefront τεχνολογία λοιπόν, χρησιμοποιείται για να κατανοήσουμε και να αναλύσουμε τις οπτικές ιδιότητες του οφθαλμού. Ας φέρουμε για παράδειγμα το αμπερόμετρο **WASCAS Workstation** με **MEL-70 excimer laser**, το οποίο χρησιμοποιεί ένα Shack-Hartmann αισθητήρα με ανάλυση 210 μm στο επίπεδο του κερατοειδούς. Η πληροφορία του αισθητήρα χρησιμοποιείται για να αναλύσει τις οπτικές ιδιότητες του ματιού που δημιουργήσε το μέτωπο κύματος. Ξεκινώντας από τον αμφιβληστροειδή, παράγεται ένα ιδανικό μέτωπο το οποίο διέρχεται όλα τα μέσα του οφθαλμού. Καθώς το μέτωπο κύματος εξέρχεται από το μάτι, περιέχει ένα πλήρη χάρτη των εκτροπών του οφθαλμού προς ανάλυση. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται μπορούν κατόπιν να απεικονισθούν και να περιγραφούν με τους αλγόριθμους **Fourier** ή **Zernike** (Panagoroulou and Pallikaris, 2001).

Ο αλγόριθμος Zernike αποτελείται από πολυώνυμα. Τα πολυώνυμα αυτά διατυπώθηκαν το 1934 από τον Fritz Zernike. Επιλέχθηκαν για την ανάλυση του οφθαλμικού wavefront γιατί περιγράφουν με απόλυτη ακρίβεια τις μονοχρωματικές εκτροπές για τις οποίες μέχρι πρόσφατα δεν υπήρχε τρόπος για τη μέτρηση τους.

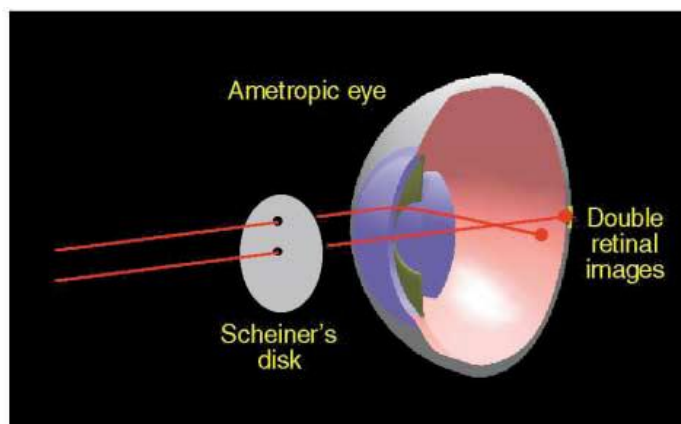
Τα δεδομένα της μέτρησης του wavefront επιτρέπουν τη κατανόηση της οπτικής κατάστασης των διαθλαστικών στοιχείων του οφθαλμού και την ποιότητα της όρασης του. Έτσι οπτικές ανωμαλίες που γενικά προκαλούν «ανώμαλο αστιγματισμό» μπορούν πλέον να χαρακτηριστούν, με τη χρήση των εκτροπών υψηλής τάξης, ως κόμα, trefoil κλπ (Μαγουλάς, 2005).

2.4 .Ιστορική αναδρομή σχετικά με τους αναλυτές του wavefront

Ο πρώτος που δοκίμασε να κατασκευάσει μια συσκευή για τον καθορισμό των εκτροπών του οφθαλμού ήταν ο Christofforus Schiener το 1719. Παρατήρησε πως μέσω ενός αδιαφανή δίσκου(ο οποίος ονομάστηκε δίσκος Scheiner), με 2 μικρές οπές που τοποθετείται μπροστά από τον οφθαλμό, αν πρόκειται για εμμετρικό οφθαλμό τα είδωλα ενός φωτεινού σημείου θα ταυτίζονται στον αμφιβληστροειδή (Εικόνα 2.3), ενώ αν είναι αμετρικός, δεν θα ταυτίζονται και θα δημιουργούνται δύο αμφιβληστροειδικά είδωλα(Εικόνα 2.4). Στην συνέχεια ο Tscherning, ο Hartmann και ο Smirnov εξέλιξαν την ιδέα του πρωτοπόρου Schiener ώστε οι Ronald Shack και Ben Platt να καταλήξουν στην τελική ιδέα κατασκευάζοντας το πρώτο Schiener-Hartmann-Shack screen (Thibos, 2000; Ασημέλλης και συνεργάτες, 2008).



Εικόνα 2.3: Αρχή λειτουργίας του δίσκου Scheiner ,εμμετρικός οφθαλμός



Εικόνα 2.4: Αρχή λειτουργίας του δίσκου Scheiner ,αμετροπικός οφθαλμός

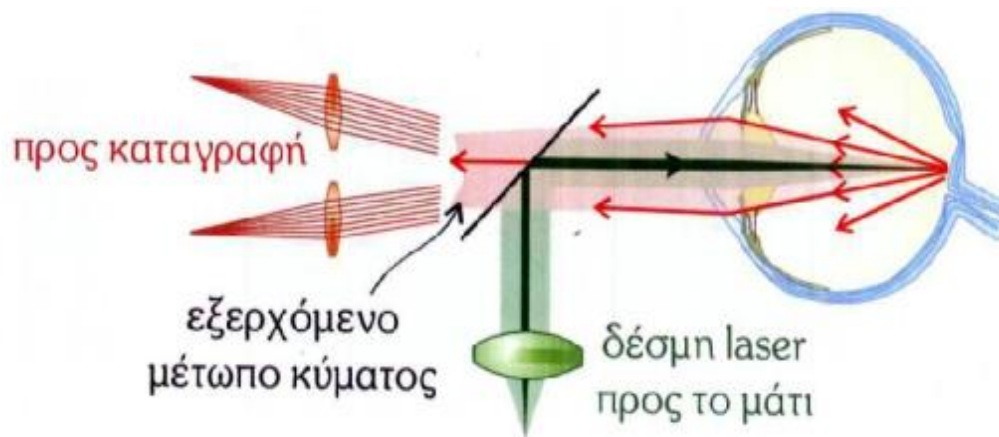
2.4.1 Η αρχή του Hartman Scack αναλυτή

Η τεχνική **Hartman Scack** εισήχθη στην οπτική επιστήμη στα μέσα της δεκαετίας του 1990 ως μια αντικειμενική μέθοδος για την ταυτόχρονη μέτρηση μονοχρωματικών σφαλμάτων υψηλής και χαμηλής τάξης του οφθαλμού. Η συσκευή COAS (**complete ophthalmic analysis system**), η οποία εκτελεί την εκτροπομετρία, τα τελευταία χρόνια έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς της κλινικής έρευνας όπως για παράδειγμα την μελέτη του μυωπικού οφθαλμού, περιπτώσεις ξηροφθαλμίας, κερατόκωνου, καταρράκτη, διαθλαστικής χειρουργικής και δημιουργία εξατομικευμένων φακών επαφής. (Cheng et al., 2003).

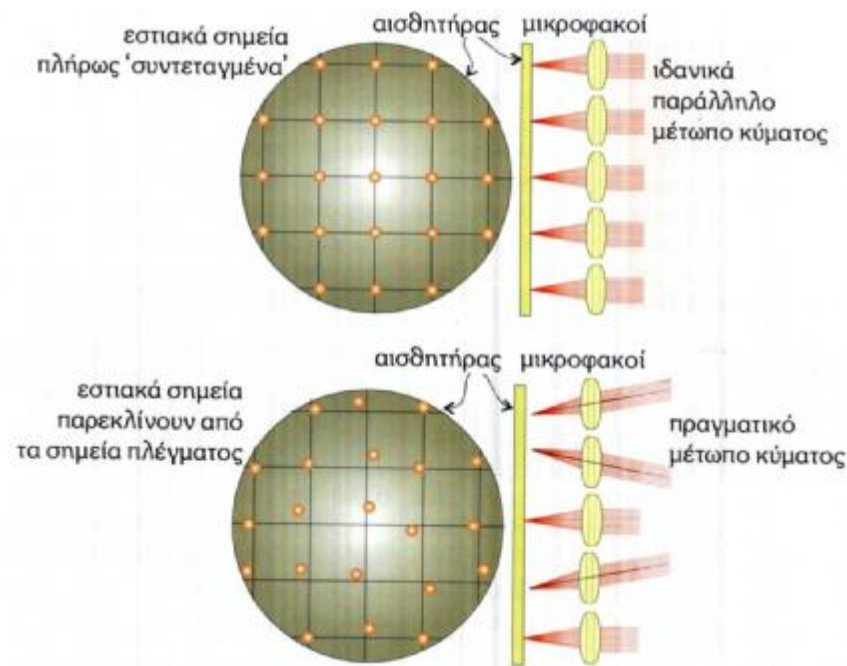
Η λειτουργία του μοιάζει πολύ με αυτή των αυτόματων διαθλασίμετρων. Ένα μεγάλο όμως πλεονέκτημα του αμπερόμετρου Coas, σε σχέση με το αυτόματο διαθλασίμετρο, είναι ότι μπορεί να υπολογίσει εκτός από τα χαμηλής τάξης σφάλματα και τα σφάλματα υψηλής τάξης και να περιγράψει πλήρως όλα τα οπτικά ελαττώματα του οφθαλμού. Τα αυτόματα διαθλασίμετρα έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια και είναι χρήσιμα όσο αφορά της εκτροπές χαμηλής τάξης (σφαίρωμα, κύλινδρο), μα είναι πολλές φορές ανακριβή και αποκλίνουν έως και 0,50 dpt από την πραγματική μέτρηση. Σε έρευνα που διεξήγαγαν οι Cheng, et all (2003) απέδειξαν πως τα αμπερόμετρα **Hartman Scack** μπορούν να υπολογίσουν το διαθλαστικό σφάλμα, την σφαιρική εκτροπή, το κόμα και τον παραξονικό αστιγματισμό με απόλυτη ακρίβεια (Cheng et al., 2003).

Η αρχή λειτουργίας των εκτροπομέτρων **Schiener-Hartmann-Shack**, τα οποία αποτελούν την πιο μεγάλη πλειοψηφία είναι απλή. Μέσα στον οφθαλμό προβάλλεται μια δέσμη υπέρυθρου laser χαμηλής ισχύος η οποία εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή και διαχέεται σε αυτόν (Εικόνα 2.5). Το φως από την πηγή (η οποία βρίσκεται στο σημείο που αντανακλά η δέσμη στον αμφιβληστροειδή) διαπερνά προς τα έξω, όλα τα διαθλαστικά μέσα του οφθαλμού, με συνέπεια να φέρει στην επιφάνεια κάθε διαθλαστική εκτροπή του. Το ανακλώμενο από τον αμφιβληστροειδή και εξερχόμενο από τον οφθαλμό φως συναντά ένα διατεταγμένο πλέγμα μικροφακών οι οποίοι εστιάζουν τα αντίστοιχα σημεία του εξερχόμενου wavefront από το οπτικό σύστημα. Έτσι απεικονίζεται και καταγράφεται ηλεκτρονικά ένα πλέγμα σημείων συγκρίνοντας τις αποκλίσεις από το ιδανικό πλέγμα. Από τα σημεία του διατεταγμένου πλέγματος αναπαράγεται το μέτωπο κύματος, και από αυτό οι οφθαλμικές εκτροπές (Εικόνα 2.6).

Από έναν εμμετρικό οφθαλμό αναμένουμε συνήθως ένα ιδανικό μέτωπο κύματος, με τα σημεία εστίασης άρτια διατεταγμένα στο καρτεσιανό πλέγμα αντίθετα με έναν αμμετρικό οφθαλμό (Ασημέλλης και συνεργάτες, 2008).



Εικόνα 2.5: Αρχή λειτουργίας της τοπογράφησης του wavefront

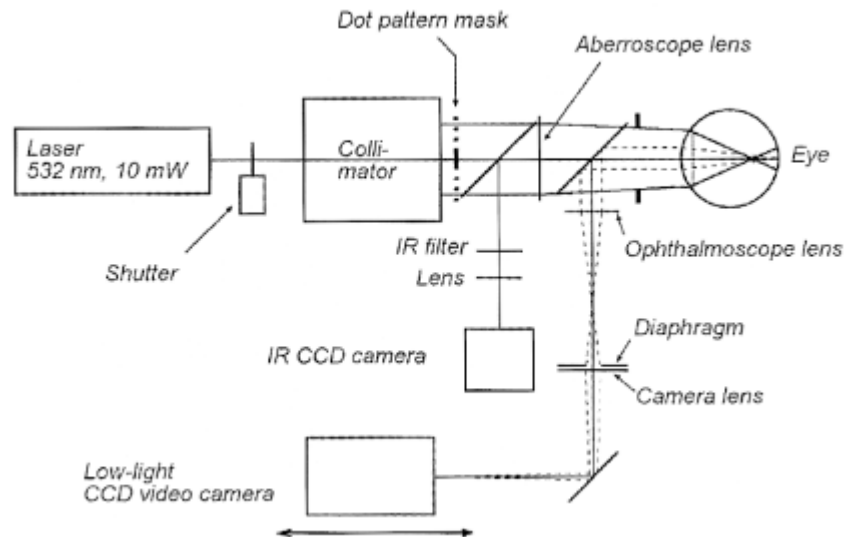


Εικόνα 2.6 : Η πρώτη εικόνα αναπαριστά την καταγραφή του ιδανικού μετώπου κύματος ,ενώ η δεύτερη του πραγματικού.

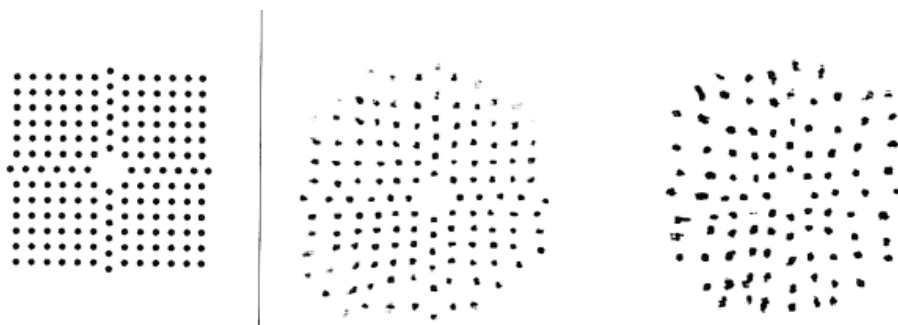
2.4.2 Η αρχή του αμπερόμετρου Tschrening

Το 1894 ο **Tschrening** δημοσίευσε έρευνες σχετικά με τις εκτροπές του ανθρώπινου οφθαλμού όπου κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τέτοιου είδους εκτροπές μπορούν να επιδεινώσουν την ποιότητα της όρασης, ενώ δεν υπάρχει τρόπος να διορθωθούν. Ο Tschrening εισήγαγε έναν νέο τρόπο για να καθορίζονται οι εκτροπές του ανθρώπινου οφθαλμού ο οποίος μοιάζει αρκετά με αυτόν του Schiennen-Hartmann-Shack (Mrochen et al.,2000).

Η διαφορά της Tschrening εκτροπομετρίας είναι ότι είναι διπλής διέλευσης αντί για μονής. Το φως που μετράται διέρχεται δύο φορές από τα διαθλαστικά μέσα του οφθαλμού πριν καταφθάσει στον αισθητήρα. Το φως από μια πηγή που εκπέμπει Nd:Yag Laser (μήκους κύματος 532 nm), αφού διευρυνθεί από ένα σύστημα τηλεσκοπίου, διαπερνά ένα πλέγμα από οπές (το οποίο είναι τοποθετημένο στην επιφάνεια ενός φακού με δύναμη + 4,00 dpt) και διαμορφώνεται σε μια ομάδα δεσμίδων φωτός. Το πλέγμα που αποτελείται από φωτεινές δέσμες, προβάλλεται στον αμφιβληστροειδή μέσα από ένα οπτικό σύστημα και ύστερα από την ανάκλαση του εξερχόμενου από τα οπτικά μέσα συλλέγεται από ένα αισθητήρα CCD (Εικόνα 2.7,2.8) (Mrochen et al., 2000).



Εικόνα 2.7 : Εκτροπόμετρο Tscherning



Εικόνα 2.8: Παραδείγματα από πλέγματα. Αριστερά είναι το πλέγμα της αμφιβληστροειδικής εικόνας που λαμβάνουμε από έναν εμμετρικό οφθαλμό. Οι δύο άλλες εικόνες αποτελούν το πλέγμα που λαμβάνουμε από τον αμφιβληστροειδή, μέσω του αμπερομέτρου Tscherning, αμετρικών οφθαλμών.

Πίνακας σύγκρισης των δύο αναλυτών μετώπου κύματος.		
	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αναλυτής Hartmann Shack	<ul style="list-style-type: none"> • Άμεση μέτρηση και ανάλυση • Υπολογισμός με ακρίβεια και αντιληπτικότητα • Μέγιστη διακριτική ικανότητα • Υψηλό εύρος μετρήσεων • Μέτρηση στο κέντρο του δικτύου των σημείων 	<ul style="list-style-type: none"> • Επικέντρωση στο κέντρο της κόρης • Δεν υπάρχει μέτρηση της κλίσης
Αναλυτής Tschernng	<ul style="list-style-type: none"> • Άμεση μέτρηση • Ύπαρξη φωτός για επικέντρωση του βλέμματος του εξεταζόμενου • Μέτρηση της γραμμής της όρασης 	<ul style="list-style-type: none"> • Η συσκευή ρυθμίζεται πιο αργά • Η ανάλυση είναι χρονοβόρα • Μη υψηλή διακριτική ανάλυση • Η ύπαρξη περίθλασης δυσκολεύει την μέτρηση • Πολύπλοκη η διάταξη του μηχανήματος • Το φως επικέντρωσης ενοχλεί τους ασθενείς (532 nm)

2.5 Η αμπερομετρική τοπογραφία

2.5.1 Η χαρτογραφία του wavefront

Το οφθαλμικό wavefront αποτελεί μια επιφάνεια που μορφολογικά διατηρείται, σχετικά, σταθερή στην πάροδο των χρόνων. Αλλάζει σαφώς σε οποιαδήποτε στιγμή (για παράδειγμα λόγω κάποιου τραυματισμού) καθώς και με την ηλικία, όμως οι μεταβολές του, κάτω από φυσιολογικές

συνθήκες, είναι σχετικά μικρές. Το wavefront του οφθαλμού διατηρεί τη βασική μορφολογία του τουλάχιστον μέχρι τα 45 έτη. Τα χαρακτηριστικά της μορφολογίας του είναι μετρήσιμα και μπορούν να εκτιμηθούν και να αξιολογηθούν χαρτογραφικά με τους αμπερομετρικούς χάρτες.

Το wavefront δεν αντιπροσωπεύει ένα απτό τόπο, αλλά μια επιφάνεια και μπορεί να περιγραφεί ως μια απεικονιζόμενη επιφάνεια τις ποιότητας τις οπτικής επίδοσης του οφθαλμού, δηλαδή τις εκτροπές, σε συνάρτηση με το μέγεθος του διαφράγματος του οφθαλμού το οποίο είναι η κόρη (Μαγουλάς, 2000).

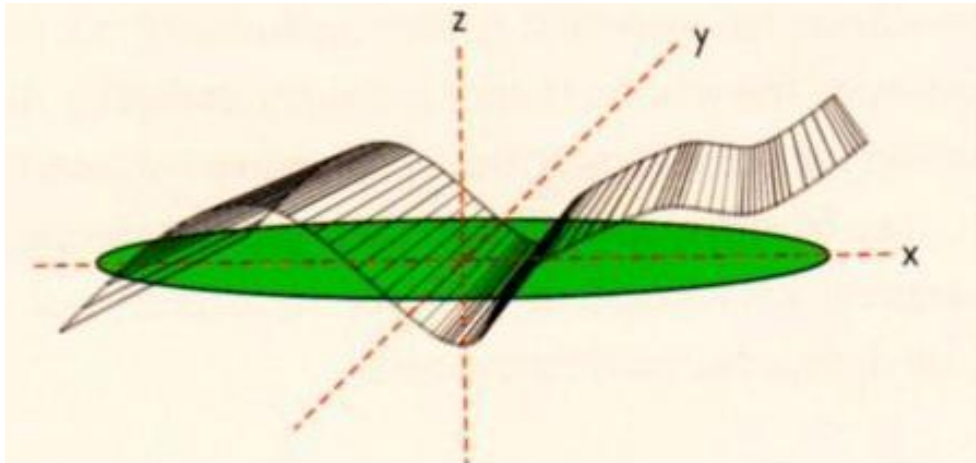
Η απεικόνιση του wavefront χαρτογραφικά μας δίνει τη δυνατότητα να κατανοήσουμε την αντιστοιχία ανάμεσα στην μορφολογία του μετώπου κύματος και της οπτικής επίδοσης. Για την ορθή ερμηνεία των χαρτογραφικών απεικονίσεων, απαραίτητη καθίσταται η γνώση των αρχών της μέτρησης και η ακολουθία της μεθοδολογίας που χρησιμοποιούνται (Μαγουλάς 2000).

2.5.2 Το οφθαλμικό wavefront

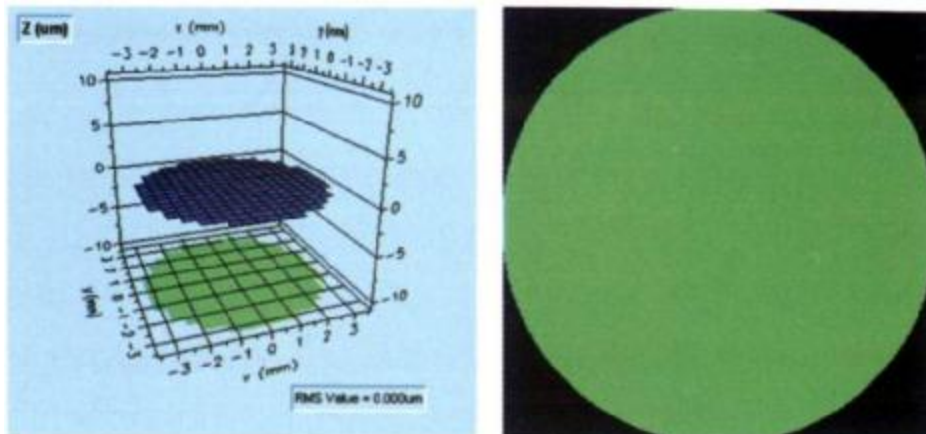
Η καταγραφή του μετώπου κύματος χαρτογραφικά αναπαριστά την τοπογραφική απόδοση των υψομετρικών διαφορών της μετρούμενης επιφάνειας του wavefront από την επιφάνεια του ιδεώδες wavefront. Η επιφάνεια του τελευταίου, είναι η επιφάνεια αναφοράς του εκτροπομετρικού χάρτη και είναι απόλυτα επίπεδη.

Το επίπεδο αναφοράς βρίσκεται πάνω στο επίπεδο της κόρης του οφθαλμού. Οι υψομετρικές διαφορές του wavefront είναι αρκετά μικρές και καταγράφονται στον άξονα z. Οι άξονες x,y αναφέρονται στις διαστάσεις της κόρης και καταγράφονται σε χιλιοστά αντίθετα με τον άξονα z που καταγράφεται σε μικρά (Εικόνα 2.9). Οι υψομετρικές διαφορές μπορούν να είναι θετικές και αρνητικές. Το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί σε υψομετρική διαφορά 0μm. Τα θερμά χρώματα (προς το κόκκινο) αντιστοιχούν σε διαφορές που υψομετρικά ξεπερνούν το επίπεδο αναφοράς, ενώ όταν η διαφορά υπόκειται υψομετρικά του επιπέδου αναφοράς, αποδίδεται με ψυχρά χρώματα (γαλάζιο, μπλε) (Μαγουλάς, 2000).

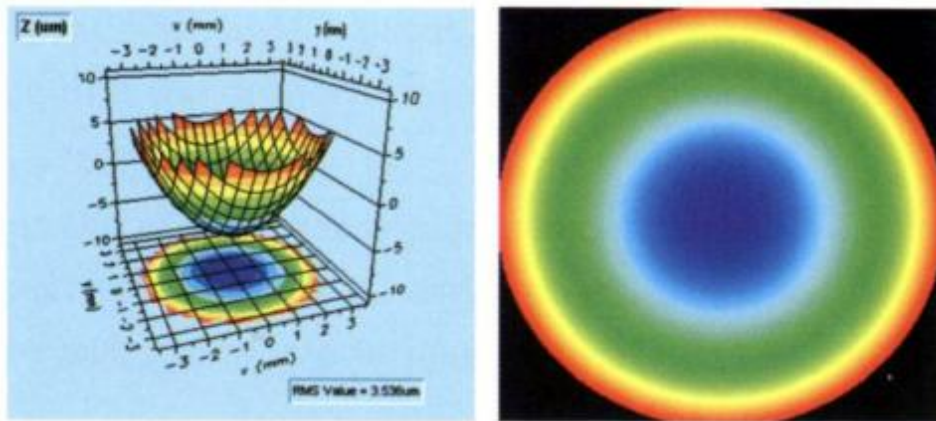
Όταν απουσιάζουν εκτροπές, ο χάρτης απεικονίζεται σαν ένας πράσινος επίπεδος κύκλος (Εικόνα 2.10), ενώ αν υπάρχουν εκτροπές, το οποίο είναι και το πιο σύνηθες, δημιουργούνται υψομετρικές διαφορές και ο εκτροπομετρικός χάρτης έχει σχήμα στόχου με ψυχρά χρώματα στο κέντρο (Εικόνα 2.11) (Μαγουλάς 2000).



Εικόνα 2.9: Το πράσινο επίπεδο απεικονίζει την επιφάνεια αναφοράς, δηλαδή το ιδανικό μέτωπο κύματος. Οι συντεταγμένες x, y προσδιορίζουν τα όρια της κόρης. Η κυματιστή επιφάνεια απεικονίζει το μετρούμενο μέτωπο κύματος.

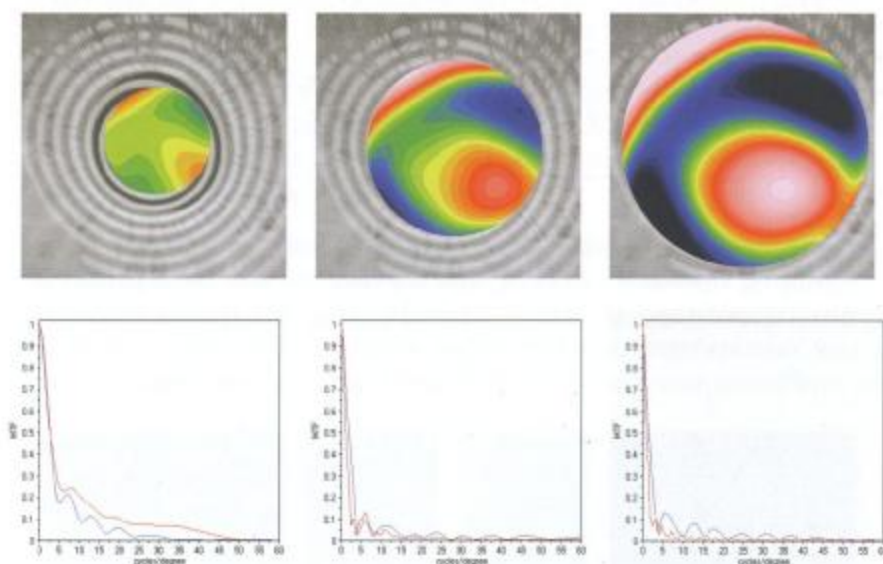


Εικόνα 2.10: Εκτροπομετρικός χάρτης ιδανικού μετώπου κύματος (απουσία εκτροπών).



Εικόνα 2.11 : Εκτροπομετρικός χάρτης επί παρουσίας εκτροπών. Ο χάρτης αυτός αντιπροσωπεύει οφθαλμό με μυωπία.

Η διάμετρος του εκτροπομετρικού χάρτη είναι ανάλογη με τη διάμετρο της κόρης καθώς **όσο μεγαλύτερη η κόρη, τόσο μεγαλύτερη η εμφάνιση των εκτροπών**. Η επίδραση των σφαλμάτων σε μικρού μεγέθους κόρη είναι μικρή, ενώ αντίθετα όσο διαστέλλεται η κόρη, μεγαλώνει ο κύκλος σύγχυσης και το βάθος πεδίου, με αποτέλεσμα η επίδραση των σφαλμάτων να αυξάνεται (διάμετρος κόρης > 3 mm). Αυτό είναι πρόδηλο και στην εικόνα 2.12, όπου παρατηρούμε στην πάνω γραμμή τους εκτροπομετρικούς χάρτες, με σταθερή χρωματική κλίμακα, από μια κερατοειδική τοπογραφία και στην κάτω την συνάρτηση MTF για διαμέτρους κόρης 3, 5, 7 mm (Ασημέλλης και συνεργάτες, 2008)

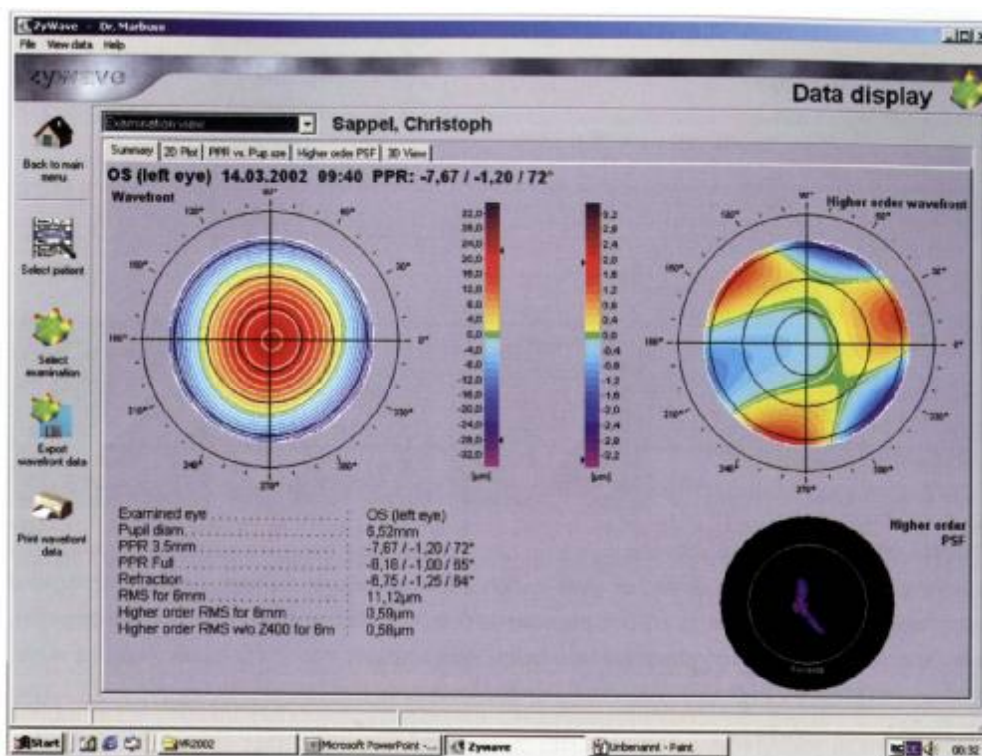


Εικόνα 2.12 : Περιστατικό κερατόκωνου .Στην επάνω γραμμή απεικονίζεται ο εκτροπομετρικός χάρτης και στην κάτω η συνάρτηση MTF για διαμέτρους κόρης 3,5,7 mm.

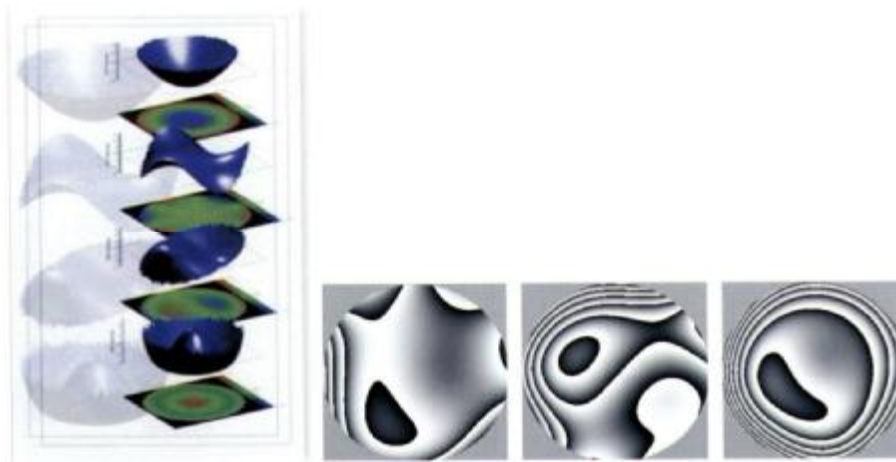
Ο χάρτης έχει μεσημβρινούς και δακτυλίους και είναι σε πλήρη αντιστοιχία με τα ανατομικά χαρακτηριστικά του οφθαλμού. Η περιφέρεια του χάρτη αντιστοιχεί στην περιφέρεια της κόρης ενώ το κέντρο του χάρτη αντιστοιχεί στο κέντρο της κόρης. Η απεικόνιση του wavefront χαρτογραφικά μπορεί να έχει 3 μορφές: ως *μονοχρωματικό γράφημα ή χάρτης, τοπογραφικός χάρτης περιγραμμάτων και στερεοσκοπικός χάρτης*. Κλινικά ο επικρατέστερος τρόπος είναι ο *πολυχρωματικός τοπογραφικός χάρτης* (Μαγουλάς, 2000).

Ο εκτροπομετρικός χάρτης μπορεί να απεικονίζει τις μονοχρωματικές εκτροπές υψηλής και χαμηλής τάξης ή μόνο της υψηλής τάξης. Όλοι οι αναλυτές παρέχουν την δυνατότητα κατασκευής του χάρτη όλων των εκτροπών (Εικόνα 2.13).

Η χαρτογράφηση των εκτροπών αναφέρεται σε εκτροπές από 3^η έως 6^η τάξη, δηλαδή συνδυάζονται 22 μορφές πολυωνύμων Zernike. Η χαρτογραφική απεικόνιση είναι αρκετά πολύπλοκη υπάρχουν όμως 3 τύποι από αναγνωρίσιμες εκτροπές υψηλής τάξης που κάνουν πιο εύκολη την αναγνώριση. Οι εκτροπές αυτές είναι το κόμα, η σφαιρική εκτροπή και το τριφύλλι (Εικόνα 2.14) (Μαγουλάς, 2000).



Εικόνα 2.13: Απεικόνιση των χαρτών του μετώπου κύματος από την συσκευή Zywave της B&L. Στα αριστερά βλέπουμε τον χάρτη του ολικού μετώπου κύματος, συμπεριλαμβανομένου και τις υψηλής τάξης εκτροπές, δεξιά ο χάρτης των εκτροπών υψηλής τάξης, κάτω δεξιά ο χάρτης PSF και κάτω αριστερά οι εκτιμήσεις των διαθλαστικών σφαλμάτων και οι τιμές RMS.



Εικόνα 2.14 : Στην κάθετη εικόνα απεικονίζονται οι πιο συνηθισμένες εκτροπές, οι οποίες είναι από πάνω προς τα κάτω , το μυωπικό defocus, το trefoil, το κόμα και η σφαιρική εκτροπή. Στην οριζόντια εικόνα απεικονίζεται ο μονοχρωματικός χάρτης του trefoil, του κόματος και της σφαιρικής εκτροπής.

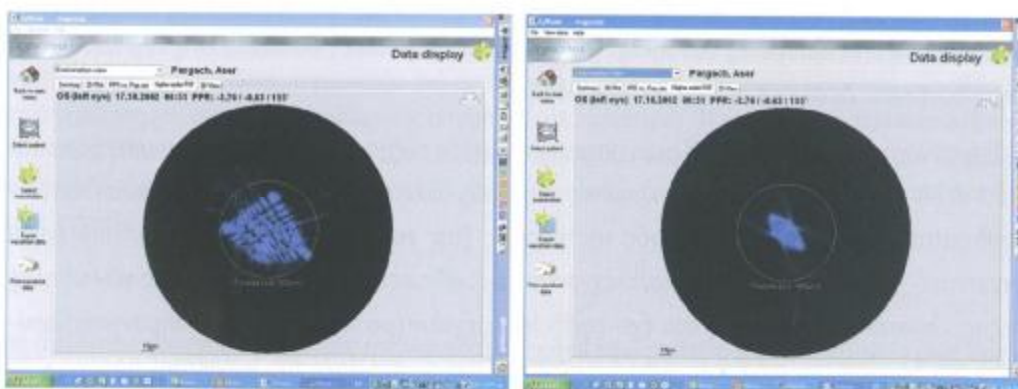
2.5.3 Το κερατοειδικό wavefront

Το κερατοειδικό wavefront αποτελεί το ολικό σφάλμα που προκαλείται αποκλειστικά από τις ανωμαλίες της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς. Έμμεσα συνάγεται από την μελέτη της υψομετρικής διαμόρφωσης της πρόσθιας κερατοειδικής επιφάνειας μέσω των συσκευών τοπογραφίας **placido disc**. Η αντιστοιχία αυτών των υψομετρικών διαφορών προς το σφάλμα του wavefront είναι 3 μm υψομετρικής διαφοράς για 1 μm σφάλματος. Αν η τοπογραφική συσκευή αναλύει το σφάλμα και με Zernike το σφάλμα το wavefront παρουσιάζεται και χαρτογραφικά .

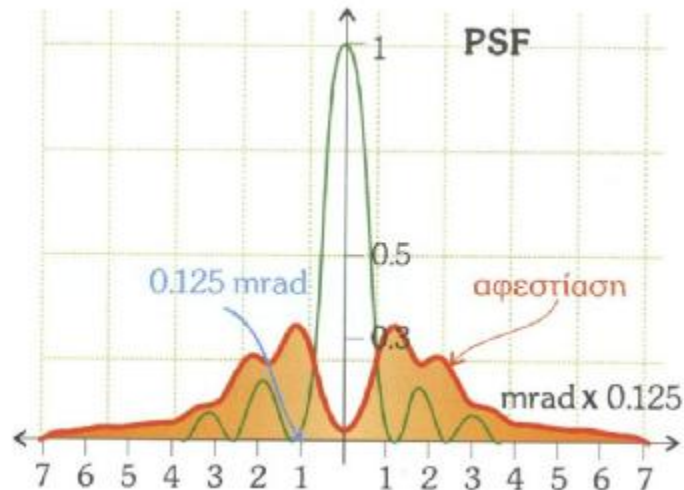
Για να αξιολογήσουμε το κερατοειδικό wavefront πρέπει να έχουμε υπόψη μας και την εικόνα του ολικού wavefront, ώστε να εξασφαλίζεται η ορθή εκτίμηση και καταγραφή. Για τον λόγο αυτό οι τοπογραφικές συσκευές, συνδυάζονται με αναλυτές μετώπου κύματος με αποτέλεσμα οι χάρτες να παρουσιάζονται ως συνδυασμένοι τετραπλοί χάρτες (Μαγουλάς, 2000).

2.5.4 Συναρτήσεις PSF ,MTF , τιμή RMS

Η συνάρτηση **PSF** (point spread function), είναι υπεύθυνη για την εκτίμηση της οπτικής τελειότητας μιας οπτικής συσκευής. Μπορεί να θεωρηθεί ως μια εικόνα που δημιουργείται πάνω στον αμφιβληστροειδή από μια μακρινή φωτεινή πηγή. Αν ο οφθαλμός είναι εμμετρικός τότε το PSF, καθορίζεται από τις επίδρασης της περίθλασης και είναι σημειακό, σε περίπτωση όμως που ο οφθαλμός είναι αμετρικός έχει τη μορφή μιας παραμορφωμένης κηλίδας λόγω των εκτροπών του οπτικού συστήματος (εικόνα 2.15). Η συνάρτηση αυτή είναι χαρακτηριστική για κάθε μορφή Zernike (εικόνα 2.16) (Μαγουλάς, 2000) .

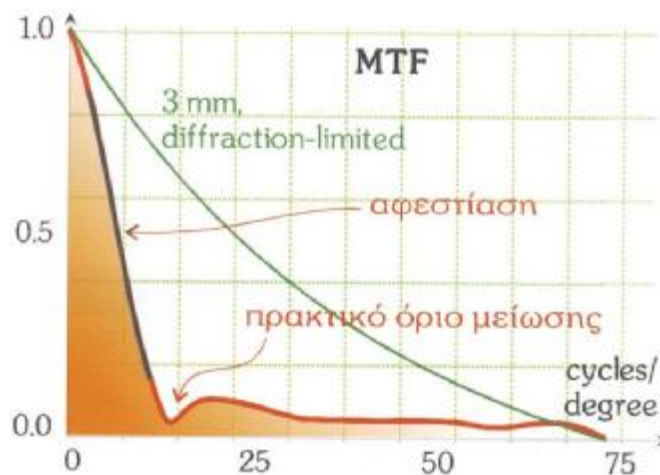


Εικόνα 2.15: Δύο PSF απεικονίσεις . Αριστερά: απεικόνιση οφθαλμού με μεγάλη διασπορά. Δεξιά : απεικόνιση PSF οφθαλμού μετά από αφαίρεση εκτροπών υψηλής τάξης.



Εικόνα 2.16 : Παράδειγμα συνάρτησης PSF για αφεστίαση.

Η συνάρτηση **MTF** (modulation transfer function) αποτελεί την συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης η οποία περιγράφει την αντίθεση που έχει ένα είδωλο, το οποίο αρχικά είχε ιδανική αντίθεση λευκού και μαύρου χρώματος. Λαμβάνει χώρα στις χωρικές συχνότητες και απεικονίζει μια γραφική εικόνα για το πώς επιδρά στις χωρικές συχνότητες το σύστημα του οφθαλμού. (Εικόνα 2.17). Στις συναρτήσεις αυτές θα συναντήσουμε μονάδες ανάλογες των χωρικών συχνοτήτων καθώς η συνάρτηση περιορίζεται από την μέγιστη χωρική συχνότητα που γίνεται αντιληπτή από τον οφθαλμό. Οι μονάδες που θα συναντήσουμε είναι ανάλογες του D/λ, μονάδες δηλαδή αντίστροφες από αυτές της συνάρτησης PSF .



Εικόνα 2.17: Παράδειγμα συνάρτησης MTF για αφεστίαση.

Οι συναρτήσεις αυτές χρησιμοποιούνται στην ανάλυση του wavefront με την βοήθεια των πολωνύμων Zernike. Καθένα από τα πολωνύμα διαθέτει ξεχωριστές συναρτήσεις PSF, MTF (Ασημέλλης και συνεργάτες, 2008). Η ύπαρξη σφαλμάτων επιδεινώνει τις δύο αυτές συναρτήσεις και πιο συγκεκριμένα στην MTF παρουσιάζεται μείωση του εμβαδού της όπως φαίνεται στην εικόνα 2.18.



Εικόνα 2.18: Το εμβαδόν της συνάρτησης MTF μειώνεται με την ύπαρξη σφαλμάτων.

Με αφορμή ότι η μέση τιμή κάθε πολωνύμου (εκτός του πιστονίου, $n=0$) είναι μηδενική χρησιμοποιείται η τιμή **RMS (Root mean square)**, ως ένα στατιστικό μέγεθος για να αξιολογήσουμε και να μετρήσουμε τις εκτροπές. Ουσιαστικά αποτελεί την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων όλων των τιμών που διαφέρουν από τον μέσο όρο στο μέτωπο κύματος. Η τιμή του είναι πάντα θετική και γίνεται αρνητική μόνο για δηλώσει τον προσανατολισμό του μετώπου κύματος.

Το RMS μπορεί να εκφραστεί με συναρτήσεις μέσω των πολωνύμων Zernike. Από το RMS κάθε εκτροπής μπορεί να βρεθεί η συνολική τιμή RMS του wavefront με αποτέλεσμα να μπορούμε να αξιολογήσουμε συνολικά τον οφθαλμό και τις λεπτομέρειες της όρασης (Κατσούλος και Ασημέλλης και συνεργάτες, 2008:1.14). Με λίγα λόγια θα λέγαμε πως η τιμή του RMS εξασφαλίζει ένα γενικότερο υπολογισμό της μεταβολής του μετρούμενου wavefront από το ιδανικό. Το RMS δεν αλλάζει σε

σχέση με την ηλικία του ατόμου, αλλά παρατηρούνται αλλαγές ανάλογα με το μέγεθος το μέγεθος της κόρης. Τιμή RMS η οποία υπέρκειται τα 0,25-0,30 μm προδίδει αυξημένες τιμές υψηλής τάξης και αποτελεί σοβαρή ένδειξη για την διόρθωσή τους. (Pallikaris et al., 2011; Μαγουλάς, 2000; Guirao and Williams, 2003).

2.6 Πολυώνυμα Zernike

Τα πολυώνυμα (**polynomials**) Zernike χρησιμοποιούταν στο παρελθόν και για αρκετές δεκαετίες στην αστρονομία για να περιγράψουν τις εκτροπές του μετώπου κύματος που προέρχονταν από τις ατμοσφαιρικές αναταραχές. Σήμερα, τα πολυώνυμα Zernike, από την επιστήμη της αστρονομίας πέρασαν στις οπτικές επιστήμες για να περιγράψουν τις μονοχρωματικές εκτροπές του ανθρώπινου οπτικού συστήματος (Zhu et al., 1999; Liang and Williams, 1997; Cheng et al., 2011).

Αποτελούν ένα καταγραφικό σύστημα για τον προσδιορισμό των διαθλαστικών σφαλμάτων ανεξαρτήτου τάξης. Παρουσιάζουν δηλαδή το είδος και το εύρος του διαθλαστικού σφάλματος που έχει ένα οπτικό σύστημα. Τα πολυώνυμα αυτά αποτελούν μαθητικές εκφράσεις που χαρακτηρίζονται από αθροίσματα δυνάμεων μίας ή και περισσότερων μεταβλητών, πολλαπλασιαζόμενων με κάποιους αριθμούς. Ο σκοπός της χρήσης των πολυωνύμων είναι να εκφράζονται τα δεδομένα του wavefront με τη μορφή αυτών. Ένα πολυώνυμο μιας μεταβλητής x είναι της μορφής :

$$P(x) = \alpha_n x^n + \alpha_{n-1} x^{n-1} + \dots + \alpha_1 x + \alpha_0$$

Η μεγαλύτερη δύναμη μιας μεταβλητής ,αποτελεί τον βαθμό του πολυωνύμου, το α_0 αποτελεί τον σταθερό όρο και όροι του πολυωνύμου ονομάζονται τα εξής μονώνυμα (Μαγουλάς, 2000):

$$\alpha_{n-1} x^{n-1}, \dots, \alpha_1 x, \alpha_0$$

Αυτή είναι και η γενικότερη διατύπωση για τα πολυώνυμα Seidel Zernike. Τα πολυώνυμα Zernike εκφράζονται σε πολικές συντεταγμένες μέσω μιας ακτινικής $R(\rho)$ και μιας αζιμουθιακής $G(\theta)$ συνάρτησης, όπου αν n είναι ο κύριος ακέραιος ακτινικός δείκτης και m ο δευτερεύων αζιμουθιακός δείκτης, εκφράζονται ως εξής:

$$Z_{n,m} = R_{n,m}(\rho) \cdot G(\theta)$$

Η τιμή n είναι πάντα θετική ακέραια, ενώ η τιμή m είναι πάντα άρτια για άρτιο και περιττός για περιττό κύριο δείκτη.

Μεταξύ τους τα πολυώνυμα είναι ορθογώνια στο εσωτερικό ενός μοναδιαίου κύκλου δηλαδή για $0 < \rho < 1$: (Wyant and Creath; Ασημέλλης, 2008 :6.30)

$$\int_0^1 R_{n,m}(\rho) \cdot R_{n',m'}(\rho) \cdot \rho \, d\rho = 1/2(n+1) \cdot \delta_{nn'}$$

Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι τα πολυώνυμα του Zernike είναι μία ομάδα πολυωνύμων που προκαλούνται από την ανάπτυξη της συνάρτησης του wavefront σε οπτικά συστήματα με κυκλική κόρη.

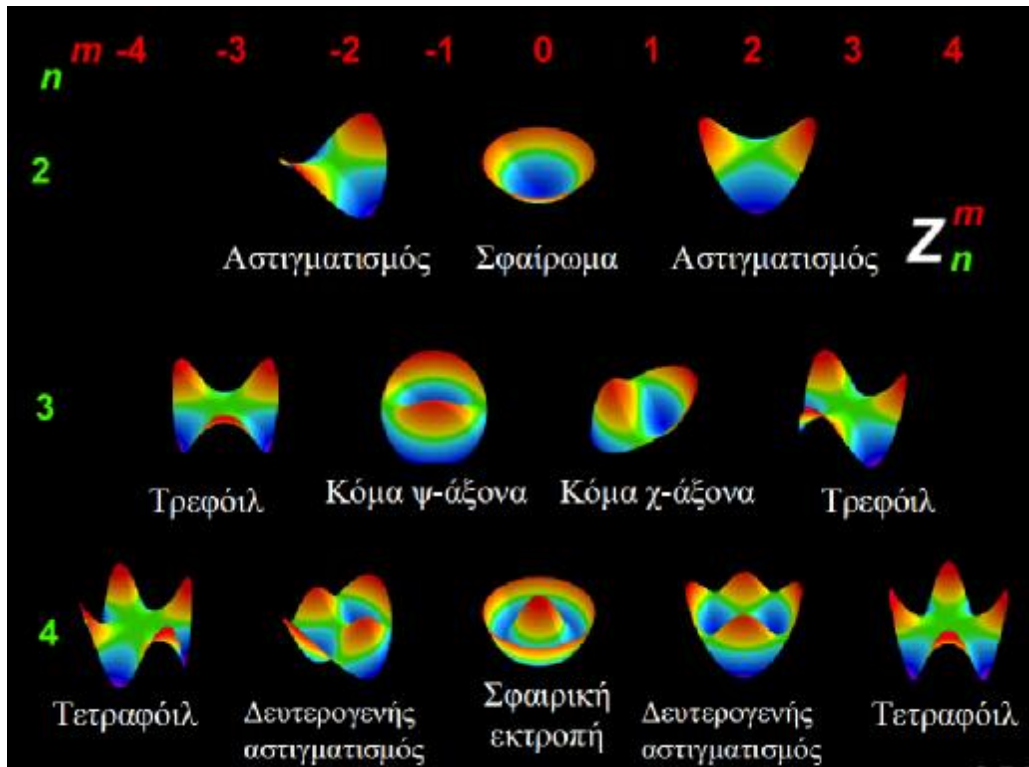
2.6.1 Η Πρακτική σημασία των πολυωνύμων του Zernike

Το wavefront του εκάστοτε οφθαλμού έχει διαφορετικό σχήμα το οποίο εξαρτάται από τον τύπο και το εύρος του διαθλαστικού σφάλματος. Λόγω λοιπόν της μοναδικότητας του wavefront, τα αρχικά δεδομένα του είναι δύσκολο να συγκριθούν και να κατηγοριοποιηθούν. Υπάρχουν άπειρα σχήματα που μπορεί να πάρει μια επιφάνεια wavefront.

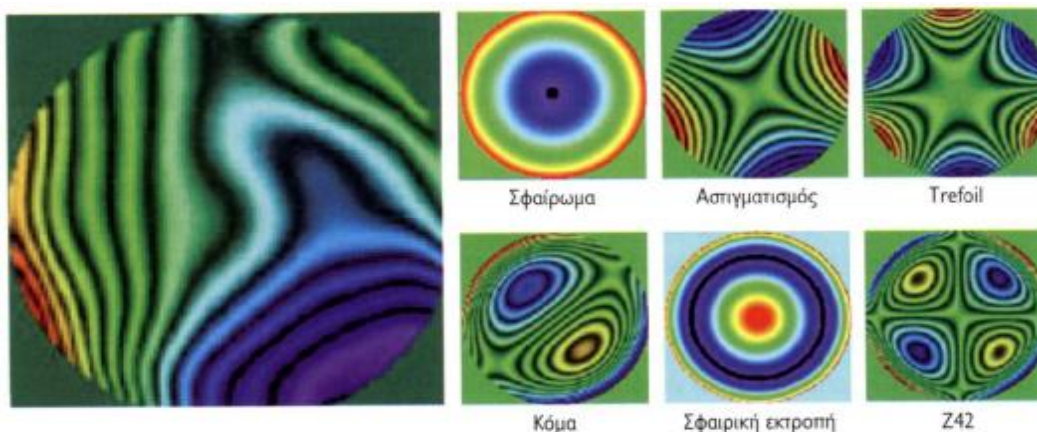
Τα πολυώνυμα Zernike κατηγοριοποιούν οποιοδήποτε wavefront σε διαφορετικές ομάδες από καθορισμένες εκτροπές οι οποίες αναπαριστώνται από ένα καθορισμένο τύπο εκτροπής, όπως για παράδειγμα υπάρχουν καθορισμένες μορφές εκτροπών για το σφαιρώμα, τον αστιγματισμό, το κόμα, την σφαιρική εκτροπή (Εικόνα 2.19).

Οι περισσότεροι οφθαλμοί έχουν ένα συνδυασμό διαθλαστικών σφαλμάτων που μπορεί να έχουν ανώμαλο και ασύμμετρο σχήμα όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.20. Αριστερά απεικονίζεται χρωματικά ο τοπογραφικός χάρτης ενός οφθαλμού. Το wavefront που απεικονίζεται, είναι το ολικό καθώς περιλαμβάνει το σφαιρώμα και τον κύλινδρο και τις εκτροπές υψηλής τάξης (trefoil, coma, spherical aberration, Z_{42} αλλά και άλλες εκτροπές). Δεξιά απεικονίζονται οι τοπογραφικοί χάρτες με τα στοιχεία αποδόμησής τους σε συγκεκριμένες μορφές Zernike. Κάθε περιγραφή πολυωνύμου περιλαμβάνει αριθμούς που δίνουν στοιχεία για

το εύρος, το πρόθεμα κάθε εκτροπής (coefficients) καθώς και τις τιμές RMS (Μαγουλάς, 2000).



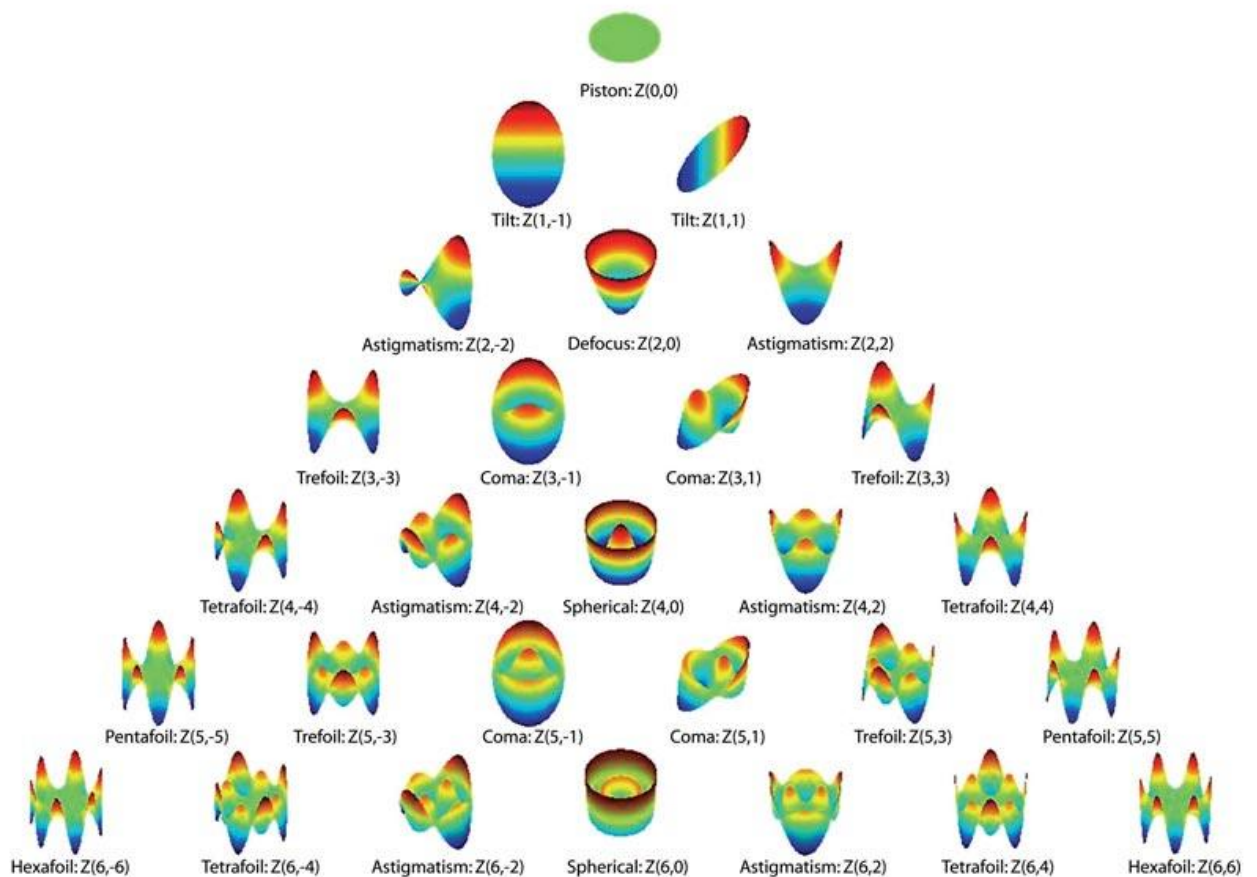
Εικόνα 2.19: Παραδείγματα διαφόρων μορφών πολωνύμων Zernike (2ης, 3ης και 4ης τάξης). Κάθε μορφή έχει ένα καθορισμένο σχήμα.



Εικόνα 2.20: Αριστερά : ο εκτροπομετρικός χάρτης του ολικού σφάλματος. Δεξιά : οι χάρτες με τα σφάλματα που αποτελούν τον ολικό χάρτη.

2.6.2 Η σχηματική απόδοση

Τα πολυώνυμα Zernike θεωρητικά είναι άπειρα. Όμως μόνο οι πρώτες **27** μορφές των πολυωνύμων παρουσιάζουν κλινική σημασία στην ποιότητα της οπτικής επίδοσης. Στην εικόνα 2.21 απεικονίζεται η πυραμιδική κατάταξη των πολυωνύμων μέχρι και της 6^{ης} τάξης. Κάθε μορφή Zernike παρουσιάζεται και ως μονοχρωματικό γράφημα. Ανά τάξη υπάρχει κοινό όνομα αναφερόμενο στο κύριο πολυώνυμο κάθε τάξης και σε κάθε τάξη προσδιορίζεται η γωνιακή συχνότητα τους. Κάθε σειρά αποτελείται από τις εκτροπές που της ίδιας τάξης και κάθε τάξη μπορεί να ονομαστεί από ένα αύξοντα αριθμό η από την γνωστότερη εκτροπή(π.χ. σφαιρική εκτροπή, κόμα κτλ.) (Μαγουλάς, 2000).



Εικόνα 2.21 :Η πυραμιδική κατάταξη των πολυωνύμων Zernike.

Κεφάλαιο 3

Η εκτροπομετρία στην πράξη

3.1 Εισαγωγή

Η εκτροπομετρία έχει προχωρήσει ταχύτατα, από ερευνητικό εργαλείο στην κλινική πράξη. Τα εκτροπόμετρα μπορούν να αξιοποιηθούν κλινικά σε κάθε περίπτωση που απαιτείται λεπτομερής έλεγχος των οπτικών μέσων του οφθαλμού, όπως η διαχείριση μιας post LASIK μειωμένης όρασης, ο κερατόκωνος, ή μια οπτική οξύτητα που δεν μπορεί να διορθωθεί για κάποιον ανεξήγητο λόγο.

Η εκτροπομετρία παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την οπτική κατάσταση των ασθενών που παραπονούνται για θάμβος και συγκεκριμένα, αν το θάμβος δεν διορθώνεται με γυαλιά ή φακούς επαφής και δεν συνδέεται με την παρουσία καταρράκτη, ξηροφθαλμίας, αμβλυωπίας ή άλλης κλινικής παθολογίας. Σε περιπτώσεις ασθενών που δεν παρουσιάζουν κάποιο σφαιροκυλινδρικό σφάλμα, αλλά παραπονιούνται για την μειωμένη ποιότητα στην όρασή τους, η εκτίμηση των μονοχρωματικών εκτροπών υψηλής τάξης μπορεί να είναι διαφωτιστική και να λύσει το πρόβλημα. Κατά προσέγγιση το 50% του πληθυσμού έχουν εκτροπές υψηλής τάξης που προκαλούν μείωση της οπτικής οξύτητας και κακής ποιότητας όραση (Μαγουλάς, 2000).

Οι πληροφορίες που μπορούμε να λάβουμε από την σε βάθος ανάλυση του κερατοειδούς και των μονοχρωματικών εκτροπών, αποτελούν σημαντικό εργαλείο και έναυσμα ώστε να δημιουργηθούν θεραπείες ικανές να διορθώσουν τόσο την οπτική οξύτητα, όσο και την ποιότητα στην όραση, κάτι που μέχρι στιγμής δεν καθίσταται εφικτό. Οι πληροφορίες αυτές, βρίσκουν εφαρμογή στο πεδίο της οφθαλμολογίας, αλλά και των οπτικών επιστημών.

Όσο αφορά το πεδίο της οφθαλμολογίας, οι μέχρι τώρα διαθλαστικές επεμβάσεις (**LASIK- laser in situ keratomileysis, PRK- photorefractive keratectomy**), οι οποίες κατευθύνονταν και θέραπευαν αποκλειστικά το διαθλαστικό σφάλμα του ασθενούς, μετατράπηκαν σε εξατομικευμένες θεραπείες οι οποίες κατευθύνονται από τον wavefront του οφθαλμού (**Wavefront guided LASIK, Wavefront guided PRK**). Δεν διορθώνονται δηλαδή μόνο οι εκτροπές χαμηλής τάξης, μα και οι υψηλής. Έτσι εκτός από την οπτική οξύτητα, βελτιώνεται και η ποιότητα της όρασης του ασθενούς.

Η εκτροπομετρία εφαρμόζεται και στις οπτικές επιστήμες, καθώς οι φακοί επαφής και οι οφθαλμικοί φακοί δεν είναι ικανοί να διορθώσουν παρά μόνον το σφαιροκυλινδρικό σφάλμα. Με την ανάλυση του wavefront μπορούν να κατασκευαστούν φακοί επαφής και οφθαλμικοί φακοί οι οποίοι είναι απόλυτα εξατομικευμένοι και συμπεριλαμβάνουν διόρθωση για εκτροπές υψηλής τάξης (Charman, 2005).

3.2 Διαθλαστική χειρουργική

Τα γυαλιά και οι φακοί επαφής είναι ένας συνηθισμένος και κλασικός τρόπος διόρθωσης των διαθλαστικών σφαλμάτων. Για ποικίλους λόγους όμως (είτε γιατί οι χρήστες κουράστηκαν από την χρόνια χρήση, είτε για αισθητικούς λόγους, όσο αφορά τα γυαλιά, ή ακόμα γιατί παρουσίασαν κάποια δυσανεξία στους φακούς επαφής), πολλοί στρέφονται σε μια πιο αποτελεσματική και μόνιμη λύση, την διαθλαστική χειρουργική.

Οι τεχνικές που περιλαμβάνει επιτρέπουν την διόρθωση των διαθλαστικών σφαλμάτων μεταβάλλοντας την κυρτότητα τα κερατοειδούς, ή τοποθετώντας ειδικούς φακούς μέσα στον οφθαλμό. Το πεδίο της διαθλαστικής χειρουργικής δεν ήταν ποτέ στάσιμο. Οι χειρουργοί και οι επιστήμονες συνεχίζουν να εξερευνήσουν νέες λεπτομέρειες προκειμένου να αυξηθεί η ασφάλεια, η βελτίωση των αποτελεσμάτων, καθώς και να διευρυνθούν οι εφαρμογές που ωφελούν τον πληθυσμό των ασθενών (Dhaliwal and Mather, 2003).

Στη διαθλαστική χειρουργική χρησιμοποιούνται Excimer Lasers ώστε να πραγματοποιηθούν φωτοεκτομές στην κερατοειδή χιτώνα. Ο όρος Excimer προέρχεται από την σύντμηση του *excited dimmer*, που μεταφράζεται ως διεγερμένο διμερές. Τα Excimer Lasers αποτελούν πηγές υπεριώδους ακτινοβολίας.

Οι διαθλαστικές επεμβάσεις έκαναν την εμφάνισή τους το 1980 και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι επιφανειακές κερατεκτομές PRK και EPI-LASIK και στην δεύτερη η κερατεκτομή που πραγματοποιείται κάτω από την επιφάνεια του κερατοειδούς, LASIK (Δημητρίου, 2011).

3.2.1 Επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή (Photo-Refractive Keratectomy - PRK)

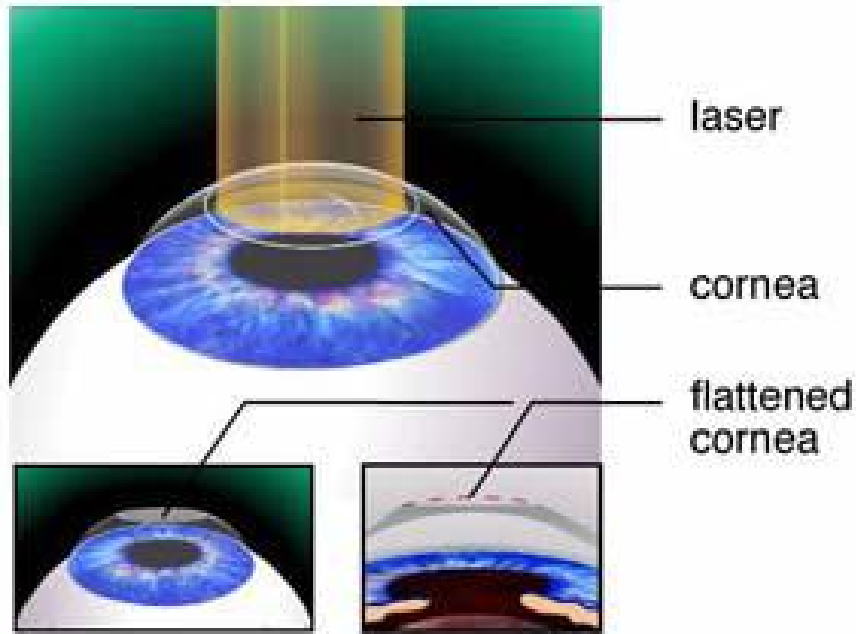
Η διαθλαστική κερατεκτομή PRK αποτελεί την πρώτη και τεχνικά απλούστερη θεραπεία διόρθωσης του διαθλαστικού σφάλματος. Είναι μια ακριβής μέθοδος η οποία κάνει χρήση argon fluoride excimer laser, με μήκος κύματος 193 nm, ώστε να επιπεδώσει τον κερατοειδή φθείροντας τον στο κέντρο (Azar and Koch, 2003; Grosvenor, 2000).

Πιο συγκεκριμένα, το επιφανειακό στρώμα του κερατοειδούς (δηλαδή το επιθήλιο) αποξάινεται και εφαρμόζεται excimer laser στο στρώμα.

Ο ασθενής τοποθετείται σε ύπτια θέση κάτω από το μικροσκόπιο του Laser και πληροφορείται από τον ιατρό για το φως που θα πρέπει να εστιάζει την προσοχή του κατά την διάρκεια της επέμβασης. Στον οφθαλμό ενσταλάζεται αναισθητικό κολλύριο και με την χρήση βλεφαροδιαστολέα, τα βλέφαρα του ασθενή παραμένουν ανοιχτά.

Πριν την επέμβαση πραγματοποιείται ο απαραίτητος προεγχειρητικός έλεγχος ο οποίος περιλαμβάνει εξετάσεις όπως τοπογραφία, ανάλυση του wavefront, κυκλοπληγική όραση, παχυμετρία, βυθοσκόπηση και μέτρηση διαθλαστικού σφάλματος. Έχοντας συλλέξει όλες αυτές τις πληροφορίες, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής που συνδέεται με το laser τροφοδοτείται με τα δεδομένα των εξετάσεων. Στη συνέχεια υπολογίζεται, με τη χρήση ενός ειδικού προγράμματος ο βαθμός της διόρθωσης, και εφόσον έχει απομακρυνθεί από την επιφάνεια του κερατοειδούς το επιθήλιο, απελευθερώνεται η δέσμη laser και διαμορφώνει την επιφάνεια του κερατοειδούς (Εικόνα 3.1).

Μόλις ολοκληρωθεί η θεραπευτική διαδικασία, τοποθετείται για λίγες μέρες ένας ειδικός θεραπευτικός φακός επαφής στον κερατοειδή, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η επούλωση του επιθηλίου. Ο οφθαλμός παρακολουθείται συνήθως ανά τρεις μήνες μέχρι την πλήρη σταθεροποίηση της όρασης. Η PRK θεωρείται ασφαλής και αποτελεσματική μέθοδος για την διόρθωση χαμηλών και μέσων διαθλαστικών σφαλμάτων (Azar and Koch, 2003; Δημητρίου, 2011; Δεμέστιχα, 2010)



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση διαδικασίας PRK.

3.2.2 Ενδοστρωματική κερατοσμίλευση με Laser (Laser in-Situ Keratomileusis - LASIK)

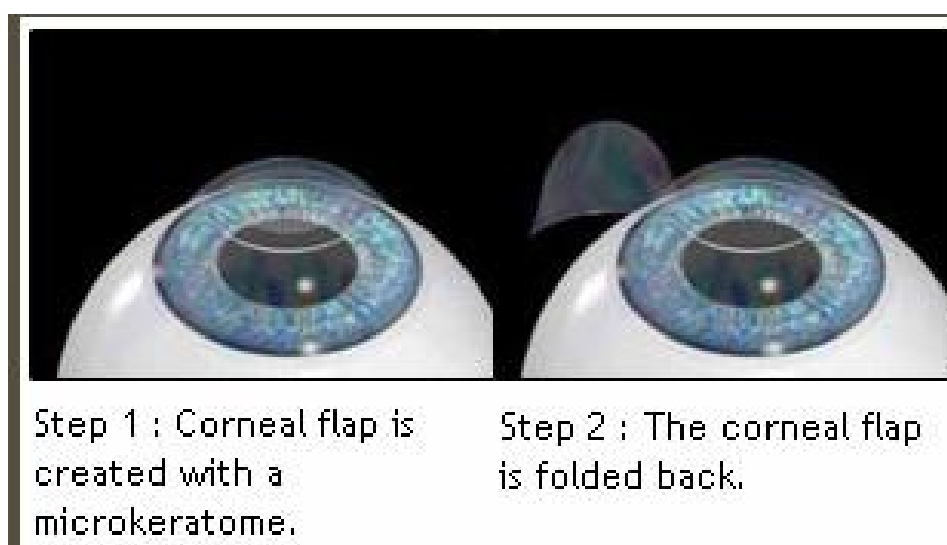
Η πλειοψηφία του πληθυσμού, διαθέτει ασφαιρικό κερατοειδή. Με γνώμονα αυτή την πληροφορία, η κύρια θεωρία της διαθλαστικής χειρουργικής, βασίζεται στην μεταβλητότητα της οπτικής ισχύς του οφθαλμού, τροποποιώντας την καμπυλότητα του κερατοειδούς και συγκεκριμένα, επιπεδώνοντας τον μυωπικό κερατοειδή και κάνοντας περισσότερο κυρτό τον υπερμετρωπικό. Η χειρουργική επέμβαση LASIK είναι η πιο συνηθισμένη διαδικασία που χρησιμοποιείται για την διόρθωση διαθλαστικών σφαλμάτων (Tuan and Chernyak, 2006; Alió and Montes-Mico, 2006).

Η επέμβαση LASIK είναι λίγο πιο πολύπλοκη από την PRK αλλά αποτελεί την πιο δημοφιλή και ευρύτερα αποδεκτή μέθοδο διαθλαστικής χειρουργικής από τους διαθλαστικούς χειρουργούς, αλλά και τους ασθενείς. Η LASIK παρέχει γρήγορη οπτική αποκατάσταση μετεγχειρητικά, έλλειψη μετεγχειρητικών συμπτωμάτων, γρήγορη

επούλωση του κερατοειδή και δυνατότητα διόρθωσης μεγαλύτερων διαθλαστικών σφαλμάτων (Azar and Koch, 2003).

Όπως και στην PRK, ενσταλάζεται στον οφθαλμό τοπικό αναισθητικό και τα βλέφαρα παραμένουν ανοιχτά με την βοήθεια του βλεφαροδιαστολέα. Η μέθοδος περιλαμβάνει το σχηματισμό ενός κρημνού κερατοειδούς (με διάμετρο 8-10 mm και πάχος 100-180 μm). Ο κερατοειδής μαρκάρεται με ειδικό εργαλείο, ώστε να επανατοποθετηθεί σωστά ο κρημνός στο φωτοαποδομημένο στρώμα. Στη συνέχεια τοποθετείται ένας δακτύλιος αναρρόφησης στον οφθαλμό, με τον οποίο εξασφαλίζεται η επαρκής ενδοφθάλμια πίεση (περίπου 65mmHg) για την κατασκευή του κρημνού. Με την χρήση του μικροκερατόμου (ειδική συσκευή) ανασηκώνεται ένα πολύ μικρό κομμάτι στην μπροστινή επιφάνεια του κερατοειδούς, παραμένοντας όμως στη μία άκρη του συνδεδεμένο με τον κερατοειδή (Εικόνα 3.2).

Αφού έχει περαστεί στον ηλεκτρονικό υπολογιστή ο βαθμός της διαθλαστικής ανωμαλίας, υπολογίζεται με τη χρήση ειδικού προγράμματος το τμήμα του ιστού που θα αφαιρεθεί. Ύστερα πραγματοποιείται η φωτοαποδόμηση στο στρώμα του κερατοειδούς. Μετά το πέρας της φωτοεκτομής, το στρώμα καθαρίζεται με ένα στεγνό σπόγγο και ο κρημνός επανατοποθετείται στον κερατοειδή με μία βελόνα αέρος με ταυτόχρονο ξέπλυμα του στρώματος με ισότονο αλατούχο διάλυμα. Ο κρημνός επανατοποθετείται πάνω στο φωτοαποδομημένο στρώμα του κερατοειδούς χωρίς να χρειαστούν ράμματα και με γρηγορότερο ρυθμό επούλωσης από αυτόν της PRK (Εικόνα 3.3) (Δημητρίου, 2011; Δεμέστιχα, 2010).



Εικόνα 3.2: Δημιουργία κρημνού.



Step 3 : Excimer laser beam reshapes the cornea.

Step 4 : The corneal flap is folded back in place.

Εικόνα 3.3: Πραγματοποίηση φωτοαποδόμησης και επανατοποθέτηση κρημνού.

Για την πραγματοποίηση της χειρουργικής αυτής επέμβασης, δεν πληρούν όλοι οι οφθαλμοί τις προϋποθέσεις. Για παράδειγμα, μυωπικές διορθώσεις μεγαλύτερες από 10 διοπτρίες και προβλεπόμενη κερατομετρία μικρότερη από 32 διοπτρίες είναι μη αποδεκτές, καθώς αυξάνεται ο κίνδυνος της εκτασίας του κερατοειδούς, όπως και οι οπτικές εκτροπές, ενώ ελαττώνεται η λειτουργική οπτική ζώνη του κερατοειδούς. Επιπλέον, υπερμετρωπικές διορθώσεις μεγαλύτερες από 5 διοπτρίες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των οπτικών εκτροπών και υψηλό ποσοστό υποστροφής. Επίσης ακατάλληλοι καθίστανται οι ασθενείς με ηλικία μικρότερη των 18 ετών, με ασταθή διάθλαση, παχυμετρία κερατοειδούς μικρότερη από 500 μm , καθώς και με οποιαδήποτε πάθηση του κερατοειδούς, όπως δυστροφίες, υποξία λόγω χρήσης φακών επαφής, καταρράκτη, γλαύκωμα, παθήσεις αμφιβληστροειδούς, και τέλος, συστηματικές παθήσεις, όπως το σύνδρομο Sjogren και ο σακχαρώδης διαβήτης (Δημητρίου, 2011).

3.2.3 Η εφαρμογή του wavefront στην διαθλαστική χειρουργική - Wavefront guided Lasik

Τα αποτελέσματα των περισσότερων ασθενών ύστερα από μια επέμβαση LASIK είναι εξαιρετικά. Ωστόσο, παρά τα καλά αυτά αποτελέσματα υπάρχουν αναφορές για οπτικές εκτροπές, όπως φωτοστέφανα ή θάμβος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ύστερα από την επέμβαση παρουσιάζεται αύξηση των εκτροπών υψηλής τάξης και ιδιαίτερα της σφαιρικής εκτροπής, η οποία μειώνει την ποιότητα της όρασης κυρίως όταν η κόρη είναι διεσταλμένη ή σε χαμηλό φωτισμό (Russel et al., 2003). Όσο λοιπόν οι εξελίξεις τις τεχνολογίας προχωρούν, και η ανάλυση του μετώπου κύματος βρίσκει κλινική εφαρμογή, ανακαλύπτεται μια νέα τεχνική ικανή να εξαλείψει αυτές τις εκτροπές.

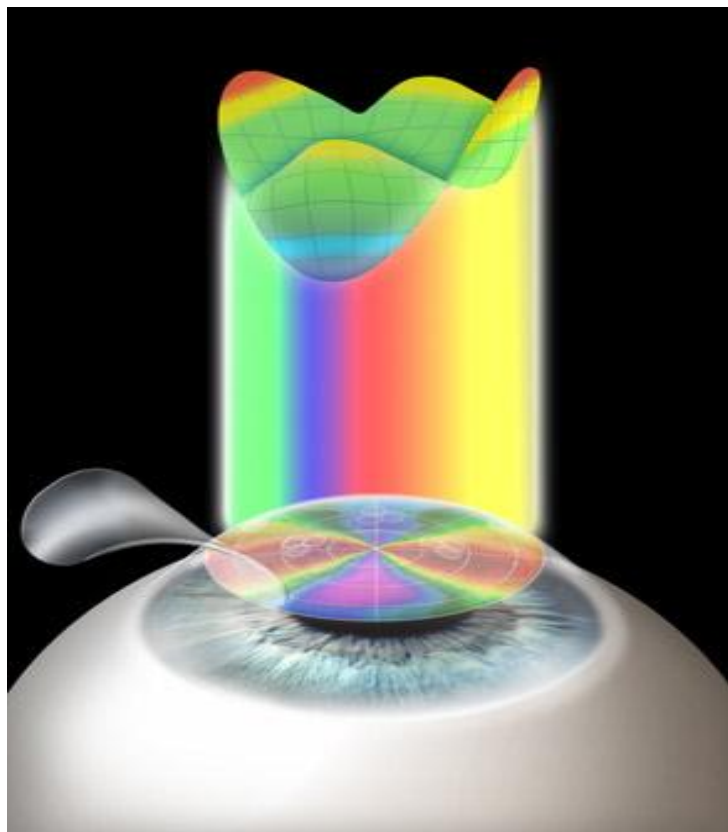
Όταν η χειρουργική επέμβαση **Wavefront guided LASIK** ή **Wavefront LASIK** ή **Custom LASIK**, διατέθηκε για πρώτη φορά πριν από λίγα χρόνια, οι χειρουργοί οφθαλμίατροι διατηρούσαν επιφυλάξεις για το ποιό ασθενείς πρέπει να υποβληθούν σε αυτή, ή την συμβατική LASIK. Ύστερα όμως από την περαιτέρω εξέλιξη του wavefront η επικρατούσα αντίληψη είναι κάθε ασθενής, που πληρεί τις προϋποθέσεις, να υποβάλλεται σε αυτή την χειρουργική επέμβαση (Chou, 2007).

Η Wavefront guided LASIK αποτελεί μια παραλλαγή της συμβατικής επέμβασης LASIK. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία του μετώπου κύματος και με βάση το wavefront του εκάστοτε οφθαλμού, δημιουργείται μια εξατομικευμένη θεραπεία. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και τις πληροφορίες που προκύπτουν από τους τρισδιάστατους χάρτες wavefront, καθοδηγείται η θεραπεία για την αναδιαμόρφωση της κερατοειδικής επιφάνειας. Αποτελεί δηλαδή μια απόλυτα εξατομικευμένη θεραπεία που καθοδηγείται από την εις βάθος ανάλυση του κερατοειδούς.

Η θεραπεία πραγματοποιείται με excimer laser και οι διαγνωστικές εξετάσεις γίνονται από μια μονάδα νέας τεχνολογίας από την οποία αποσπώνται πληροφορίες σχετικά με το μέτωπο κύματος, το διαθλαστικό σφάλμα, την τοπογραφία, την κερατομετρία και το μέγεθος της κόρης. Η συσκευή αυτή ενσωματώνει έναν υψηλής ευκρίνειας αισθητήρα Hartmann-Shack η οποία έχει πολύ υψηλή ανάλυση (5x) και μεγάλη δυναμική περιοχή (σφαίρωμα μέχρι -16 Dpt και κύλινδρο έως 8 Dpt) (Jackson, 2012)

Σε σύγκριση με την θεραπεία LASIK, η Wavefront guided LASIK είναι πολύ ακριβής, καθώς δεν διορθώνει μόνο το διαθλαστικό σφάλμα του οφθαλμού, προσφέροντας έτσι άριστη ή βελτιωμένη οπτική οξύτητα, αλλά και τις εκτροπές υψηλής τάξης όπως για παράδειγμα την κόμη. Ακόμα και αν με την Lasik έχει επιτευχθεί άριστη οπτική οξύτητα, όπως

προαναφέρθηκε, ο ασθενής μπορεί να παραπονιέται για μειωμένη ποιότητα στην όραση του, όπως θάμβος, ενοχλήσεις στην νυχτερινή όραση και έντονο φωτισμό και χαμηλή ευαισθησία αντίθεσης (Charman, 2005:78). Οι περιορισμοί αυτοί της ποιότητας στην όραση προέρχονται από την ύπαρξη (ή ακόμα και επιδείνωση ύστερα από μια χειρουργική θεραπεία διόρθωσης διαθλαστικού σφάλματος, λόγω της τεχνητής αλλαγής του σχήματος του κερατοειδή) των εκτροπών υψηλής τάξεως οι οποίες μπορούν να επαλειφθούν με την Custom LASIK (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4: Η Wavefront LASIK δημιουργεί μια εξαιρετικά εξατομικευμένη διόρθωση λέιζερ που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του οφθαλμού και καθοδηγείται από ακριβή ανάλυση των σφαλμάτων του οφθαλμού που εμφανίζονται όταν το φως διέρχεται κατά μήκος του οφθαλμού

3.3 Φακοί επαφής

Η ιστορία των φακών επαφής ξεκινά το 1508 όπου ο Λεονάρντο ντα Βίντσι σκιαγράφησε πρώτος την αρχή της τοποθέτησης ενός φακού κατευθείαν στην επιφάνεια του οφθαλμού. Ο πρώτος μαλακός φακός κατασκευάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1950 από τους Τσέχους χημικούς Otto Wichterle και Drahoslav Lim, οι οποίοι παράλληλα εφεύραν και το πρώτο gel για την παραγωγή τους (Ασημέλλης και συνεργάτες, 2008).

Από τότε λοιπόν οι φακοί επαφής χρησιμοποιούνται για την διόρθωση αμετροπιών μετατρέποντας έτσι έναν μυωπικό, υπερμετροπικό ή αστιγματικό οφθαλμό σε εμμετροπικό.

3.3.1. Κατηγορίες φακών επαφής

Οι φακοί επαφής, αποτελούν ένα μέσο διόρθωσης των διαθλαστικών ανωμαλιών το οποίο συνεχώς αυξάνεται σε διάδοση και εφαρμογή. Προσφέρουν εξαιρετική διόρθωση και όραση (συνήθως καλύτερη από τα γυαλιά) και μεγαλύτερο οπτικό πεδίο. Δεν επιδρά πάνω τους η βροχή, ακολουθούν την κίνηση των ματιών και παρόλα τα πλεονεκτήματα που παρέχουν στον χρήστη και την όραση του, έχουν και μειονεκτήματα (προκαλούν μολύνσεις αν δεν τηρούνται οι κανόνες υγιεινής) και απαιτούν καθημερινή, σχολαστική φροντίδα.

Από τα είδη των φ.ε., το 85% περίπου αποτελούν οι μαλακοί φ.ε., το 8% οι φακοί μιας χρήσης, το 14% οι αεροδιαπερατοί, ενώ οι ημίσκληροι και οι σκληροί μόνο το 1% (Κολιόπουλος, 1997).

Οι φακοί επαφής κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- 1) Μαλακοί φακοί επαφής.
- 2) Σκληροί αεροδιαπερατοί- ημίσκληροι

1) Μαλακοί φακοί επαφής

Οι μαλακοί, είναι φακοί που αλλάζουν εύκολα σχήμα και υφίστανται παραμόρφωση με τους χειρισμούς. Αποκτούν το αρχικό τους σχήμα

χωρίς να υποστούν βλάβη μόλις πάψει να ενεργεί πάνω τους η δύναμη που προκάλεσε την παραμόρφωσή τους. Υπερτερούν σε άνεση και αποτελούν την πρώτη επιλογή στην πλειοψηφία των διοπτροφόρων.

Οι μαλακοί φακοί επαφής με την σειρά τους διακρίνονται σε :

1.1) *Φακοί υδρογέλης*: Οι φακοί από υδρογέλες αποτελούνται από υδρόφιλες πολυμερείς χημικές ενώσεις οι οποίες με την προσρόφηση ύδατος σχηματίζουν μαλακές και ελαστικές ουσίες. Στους φακούς σιλικόνης ανήκουν οι εξής φακοί:

α) Λεptoί υδρόφιλοι φακοί.

Οι λεπτοί υδρόφιλοι φακοί είναι κατασκευασμένοι από HEMA ή πολυμερείς

ενώσεις του. Η περιεκτικότητά τους σε νερό είναι 38-43%. Έχουν κεντρικό πάχος κάτω από 0,10 χιλ. και χρησιμοποιούνται ως φακοί καθημερινής χρήσης.

β) Φακοί μεγάλης περιεκτικότητας σε νερό.

Οι φακοί μεγάλης περιεκτικότητας σε νερό προκύπτουν από ενώσεις του HEMA με άλλες πολυμερείς ουσίες. Η περιεκτικότητά τους σε νερό είναι 70-85 %, έχουν κεντρικό πάχος σχετικά μεγάλο, ενώ χρησιμοποιούνται ως φακοί συνεχούς χρήσης (αρκετά εύθραυστοι).

γ) Λεptoί φακοί μέσης περιεκτικότητας σε νερό.

Οι φακοί μέσης περιεκτικότητας σε νερό αποτελούνται από το ίδιο υλικό με τους προηγούμενους. Η υδροφιλία τους είναι 55-58%, ενώ χρησιμοποιούνται ως φακοί συνεχούς παρατεταμένης χρήσεως (όχι τόσο εύθραυστοι) (Κολιόπουλος, 2007).

1.2) *Φακοί σιλικόνης υδρογέλης*.

Το υλικό αυτό εμφανίστηκε την δεκαετία του 90. Προέκυψαν από την χημική σύνδεση της σιλικόνης με τα οργανικά πολυμερή όπως το MMA και το NVP. Πιο συγκεκριμένα, συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα ενός μαλακού φακού με την εξαιρετική διαλυτότητα του οξυγόνου στην σιλικόνη. Το κύριο υλικό της υδρογέλης είναι το HEMA και άλλα μονομερή που προστίθενται για να αλλάξουν την ιοντικότητα και την περιεκτικότητα σε νερό, προκειμένου ο φακός επαφής να έχει την κατάλληλη διαβροχή. Οι φακοί σιλικόνης υδρογέλης θεωρήθηκαν επαναστατικοί καθώς παρείχε καλή διαπερατότητα σε οξυγόνο (το οξυγόνο διέρχεται μέσα από τις αλυσίδες σιλικόνης) και πολύ υψηλή

μεταβιβαστικότητα σε οξυγόνο. Η περιεκτικότητά τους σε νερό είναι 24-48% (Κατσούλος και Μακρυνιώτη, 2010).

2) Σκληροί αεροδιαπερατοί- ημίσκληροι

Οι σκληροί αεροδιαπερατοί εμφανίστηκαν περίπου το 1977 και αντικατέστησαν τους σκληρούς από PMMA. Αποκαλούνται και ως ημίσκληροι. Σε σύγκριση με τους μαλακούς, υπερέχουν στον φακό δακρύων που δημιουργείται της έξω στιβάδας του κερατοειδούς και τις οπίσθιας του φακού. Η στιβάδα αυτή είναι μεγάλης σημασίας διότι λιπαίνει και οξυγονώνει τον κερατοειδή ομαλοποιώντας έτσι την διάθλαση (Ασημέλλης et al., 2008).

Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τα υλικά κατασκευής τους:

α) Φακοί επαφής από PMMA: Είναι υλικό παρόμοιο με αυτό που κατασκευάζεται το plexiglass. Δεν απορροφά καθόλου νερό και η οξυγόνωση του κερατοειδούς είναι μηδενική. Προκαλεί δυσανεξία και είναι υλικό που δεν χρησιμοποιείται πια.

β) Φακοί επαφής από CAB: Το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για τους πρώτους φακούς. Είναι σκληρό ενώ η πρόσληψη σε νερό και η διαπερατότητα σε οξυγόνο μικρή. Δεν προκαλούν εναποθέσεις πρωτεϊνών και δεν σπάνε εύκολα. Παρουσιάζουν ευαισθησία στην τριβή, προκαλούν εύκολα γραμμές, καθηλώνοντας λιπίδια από τα δάκρυα και ενίοτε προσκολλούνται στον κερατοειδή.

γ) Φακοί επαφής από σιλοξάνες (σιλικόνη και μεθακρυλικό): Προκύπτει από τον συνδυασμό του υλικού PMMA και της σιλικόνης. Το ακρυλικό προσδίδει ακαμψία, ενώ η σιλικόνη διαπερατότητα σε οξυγόνο. Οι φακοί αυτοί παρουσιάζουν ως πλεονεκτήματα την μεγάλη ποικιλία σχεδιασμού και υλικού, υψηλό Dk (δείκτης περατότητας σε οξυγόνο), σταθερότητα υλικού, καλή οπτική απόδοση και υψηλή αντοχή. Παρόλα αυτά εμφανίζουν σχετική ευθραυστότητα καθώς επίσης παρουσιάζουν εναποθέσεις πρωτεϊνών και βλέννας από τα δάκρυα.

δ) Φακοί επαφής από πολυμερή βασιζόμενα στο φθόριο. Αυτή είναι η νεότερη κατηγορία υλικών που έχει ως βάση το φθόριο το οποίο

αυξάνει τη διαπερατότητα σε οξυγόνο και παράλληλα αυξάνει την αντίσταση στις εναποθέσεις. Παρέχουν την δυνατότητα παρατεταμένης χρήσης και περιορίζουν την εκδήλωση επιπεφυκίτιδων. Εμφανίζουν υψηλό κόστος, προσκόλληση ενίοτε στον κερατοειδή, ενώ με το πέρασμα του χρόνου γίνονται πιο σφικτοί.

ε) Φακοί επαφής από σιλικόνη.

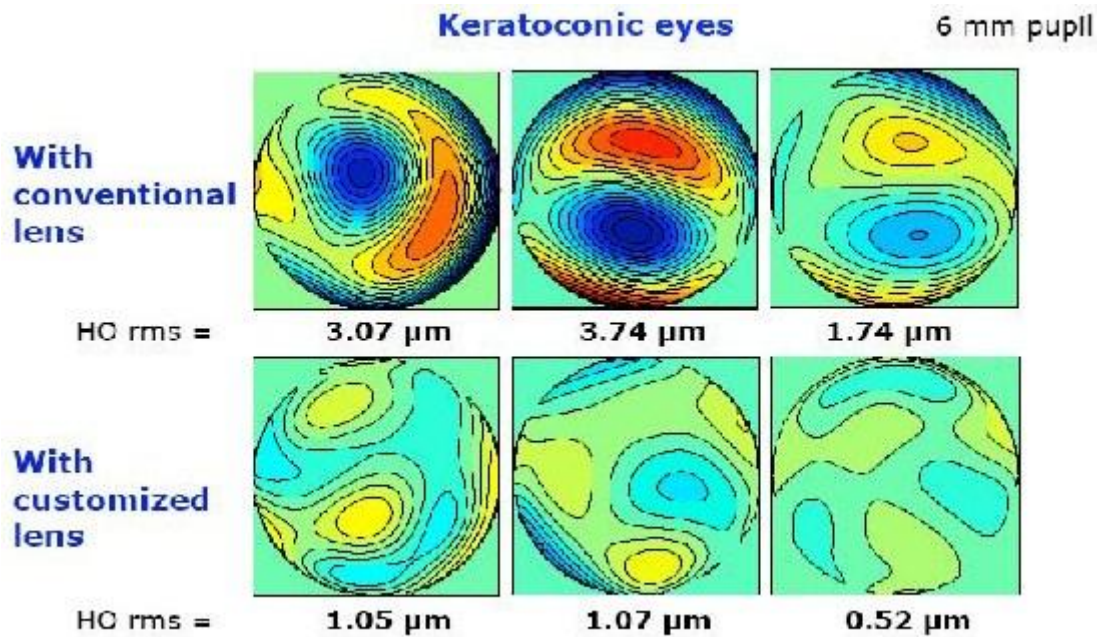
Είναι υλικό εύκαμπτο, μαλακό, ανθεκτικό, υδρόφοβο και συμβατό με τους ανθρώπινους ιστούς. Έχει μεγάλη διαπερατότητα σε οξυγόνο και δίνει τη δυνατότητα συνεχούς χρήσης ακόμα και σε πάσχοντες από δυστροφία του Fuchs, μετά από κερατοπλαστική και άλλες παθολογικές καταστάσεις (Κολιόπουλος, 1997).

3.3.2 Εξατομικευμένοι φακοί επαφής wavefront

Την τελευταία δεκαετία μελετάται και έχει αναπτυχθεί ο τρόπος με τον οποίο θα εξαιρεθούν οι μονοχρωματικές εκτροπές υψηλής τάξης, με κύριο στόχο την δημιουργία ενός τέλει αμφιβληστροειδικού ειδώλου και κατά συνέπεια την βελτίωση της ποιότητας της όρασης (Lopez-Gil et al., 2009).

Η χρήση συμβατικών φακών επαφής δεν μπορεί να παρέχει τα παραπάνω, καθώς διορθώνει μόνο τα σφάλματα πρώτης και δεύτερης τάξης, αντίθετα με έναν εξατομικευμένο φακό επαφής ο οποίος είναι σε θέση να δημιουργήσει μια πολύ καλής ποιότητας εικόνα (Εικόνα 3.6).

Η ανικανότητα των συμβατικών φακών να διορθώσουν τις εκτροπές υψηλής τάξης αφορά κατά κύριο λόγο στην κατασκευή τους, διότι με σκοπό την βελτίωση της εφαρμογής τους στον κερατοειδή, υπόκεινται σε σημαντική λέπτυνση. Αυτή η διαδικασία μπορεί να αλλάξει την οπτική ισχύ της πρόσθιας επιφάνειας. Η απρόβλεπτη αστάθεια της επεξεργασίας λείανσης των φακών αυτών, αφαιρεί την δυνατότητά τους για εξατομικευμένη εφαρμογή (Μαγουλάς, 2005).



Εικόνα 3.6: Με τους εξατομικευμένους φακούς επαφής μειώνονται οι εκτροπές υψηλής τάξης, όπως φαίνεται και στον εκτροπομετρικό χάρτη. Η τιμή RMS επίσης μειώνεται.

Στο εμπόριο υπάρχουν διαθέσιμοι αρκετοί μη προσαρμοσμένοι φακοί επαφής οι οποίοι διορθώνουν σφάλματα υψηλής τάξης και συγκεκριμένα την σφαιρική εκτροπή.

Το μειονέκτημα αυτών των φακών, είναι ότι έχουν κατασκευαστεί με δεδομένο ότι όλοι οι οφθαλμοί διαθέτουν ακριβώς το ίδιο μοτίβο σφαιρικής εκτροπής, κάτι που δεν ανταποκρίνεται όμως στην πραγματικότητα. Κάθε οφθαλμός διαθέτει ένα μοναδικό wavefront το οποίο δεν μπορεί να διορθωθεί με μαζικής κατασκευής φακούς επαφής, αλλά απαιτείται ένας απόλυτα εξατομικευμένος φακός.

Οι εξατομικευμένοι φακοί κατασκευάζονται καταγράφοντας το μέτωπο κύματος που εξέρχεται από το εκτροπόμετρο ενώ ο υποψήφιος χρήστης φοράει έναν δοκιμαστικό διαγνωστικό φακό. Τα δεδομένα του wavefront μετατρέπονται σε έναν κώδικα παραγωγής ώστε να κατασκευαστεί ο φακός (Chou, 2005).

3.4 Οφθαλμικοί φακοί

Υπάρχουν πολλοί τρόποι ώστε να αντιμετωπιστεί μια αμετροπία. Η πιο κοινή, εύκολη, ανώδυνη αλλά και υγιεινή λύση είναι τα γυαλιά.

Η χρήση αυτών των οπτικών μέσων όπου φοριούνται στο πρόσωπο για την διόρθωση της όρασης, έχει εφαρμογή από τον 13^ο αιώνα και καταγωγή την Ιταλία.

Η επιλογή του σωστού φακού όρασης είναι μεγίστης σημασίας για την διόρθωση.

3.4.1. Είδη οφθαλμικών φακών

Οι οφθαλμικοί φακοί κατηγοριοποιούνται ως εξής :

- 1) Μονοεστιακοί
- 2) Πολυεστιακοί

1) Μονοεστιακοί οφθαλμικοί φακοί.

Αναφερόμενοι παραδειγματικά σε μυωπικούς φακούς ,οι μονοεστιακοί φακοί μπορούν να διαχωριστούν σε δύο υποκατηγορίες .

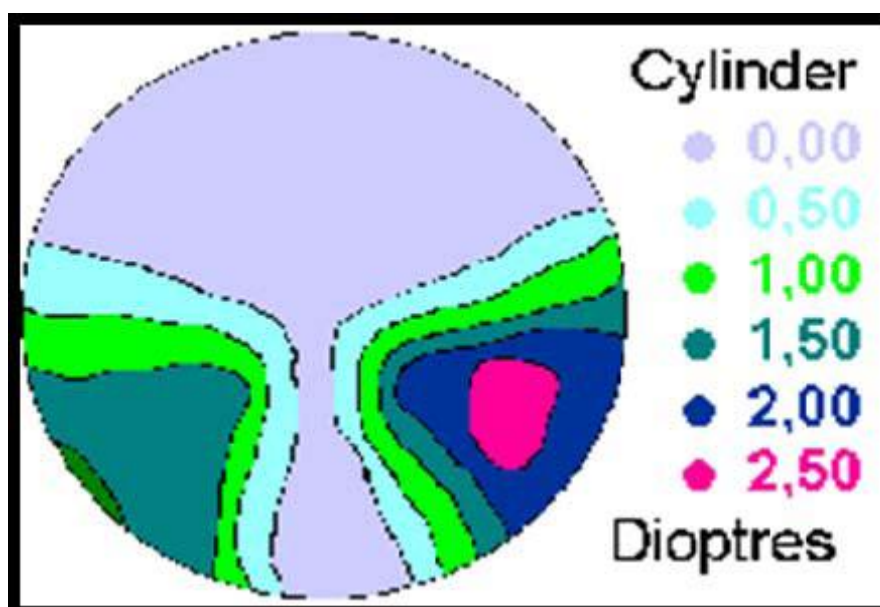
Η πρώτη προέρχεται από τον σχεδιασμό των φακών Punktal της Zeiss οι οποίοι διαθέτουν μεγαλύτερο πάχος στο κέντρο του φακού και μεγάλες πρόσθιες καμπυλότητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι περισσότερο παχείς από έναν αντίστοιχο φακό της δεύτερης υποκατηγορίας. Ωστόσο διαθέτουν μικρότερες παραμορφώσεις και περιφερειακές εκτροπές καθώς επίσης οι εκτροπές είναι μικρότερες από το κέντρο στην περιφέρεια του φακού.

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν φακοί με μικρότερο κεντρικό πάχος και πιο επίπεδες πρόσθιες καμπυλότητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πιο λεπτούς φακούς με περισσότερες όμως από την πρώτη κατηγορία περιφερειακές εκτροπές. Τέλος οι εκτροπές αυξάνονται από το κέντρο προς την περιφέρεια (Κατσούλος και Ασημέλλης, 2008).

2) Πολυεστιακοί Φακοί

Οι πολυεστιακοί ή προοδευτικοί φακοί (progressive lenses) χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια, παρά το υψηλό τους κόστος, καθώς αποτελεί την πιο χρήσιμη και σωστή λύση για την πρεσβυωπία αν αυτή συνυπάρχει με αμετροπία. Πρόκειται για φακούς οι οποίοι εκτός από την διόρθωση της πρεσβυωπίας (διόρθωση για κοντινές και ενδιάμεσες αποστάσεις) προσφέρουν ταυτόχρονα ευκρινή όραση και σε μακρινές αποστάσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με διαβάθμιση της διοπτρικής ισχύος (Ασημέλλης και συνεργάτες, 2008).

Πιο συγκεκριμένα, στο πάνω μέρος του φακού έχουμε την διοπτρική ισχύ για μακριά η οποία αυξάνεται (ή μειώνεται αντίστοιχα, ανάλογα με την αμετροπία του ασθενούς) όσο προχωράμε προς το κάτω μέρος του φακού. Το μακρινό τμήμα συνδέεται με το κοντινό με ένα κανάλι συνεχώς αυξανόμενης δύναμης. Κυρίαρχο είναι το σημείο στο χαμηλότερο μέρος, το οποίο αναφέρεται στην κοντινή όραση (Εικόνα 3.5). Με τη διαβάθμιση αυτή, ο διοπτροφόρος μπορεί κουνώντας απλά τα μάτια του να χρησιμοποιήσει την διοπτρική ισχύ που τον εξυπηρετεί κάθε φορά (Κατσούλος και Ασημέλλης, 2008).

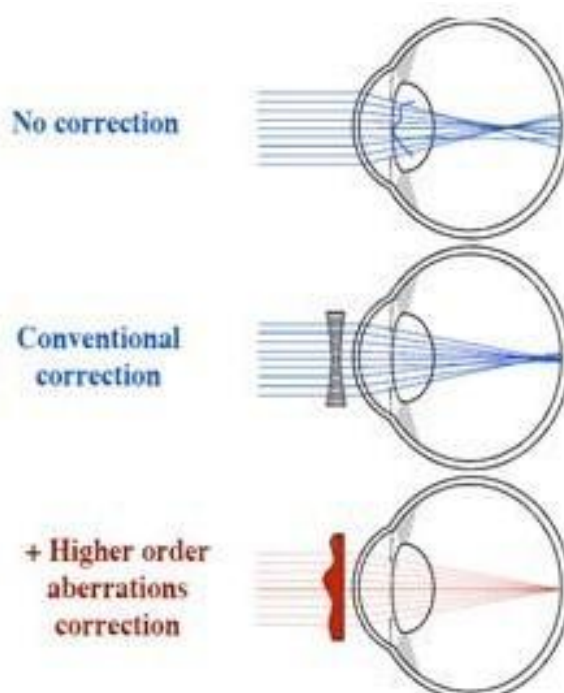


Εικόνα 3.5: Ζώνες σε πολυεστιακό φακό.

Τα πολυεστιακά γυαλιά πλεονεκτούν λειτουργικά διότι παρέχουν ικανοποιητική όραση σε μακρινές, κοντινές και ενδιάμεσες αποστάσεις, ενώ απουσιάζει η διαχωριστική γραμμή. Το μειονέκτημα που παρουσιάζουν είναι ότι ο διοπτροφόρος χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα για να 'μάθει' να βλέπει μέσα από αυτόν τον φακό αλλά και γιατί διαθέτει περιορισμένο οπτικό πεδίο και οπτικές παραμορφώσεις, οι οποίες είναι ιδιαίτερα ενοχλητικές κατά τις οριζόντιες κινήσεις των ματιών.

3.4.2 Εξατομικευμένοι οφθαλμικοί φακοί Wavefront

Είμαστε πια εξοικειωμένοι με το γεγονός ότι το μάτι δεν αποτελεί ένα τέλειο οπτικό σύστημα. Οι συμβατικοί οφθαλμικοί φακοί, ακόμα και αν περιέχουν όλη την διόρθωση μπορεί να μην ικανοποιεί ποιοτικά την όραση (Εικόνα 3.4). Για τον λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια έχει ενσωματωθεί στους οφθαλμικούς φακούς η τεχνολογία wavefront. Υπάρχει σημαντική λοιπόν πιθανότητα τα wavefront-guided γυαλιά να μπορούν να υποκαταστήσουν τα συμβατικά γυαλιά με τον ίδιο τρόπο που η wavefront-guided LASIK έχει αντικαταστήσει την συμβατικά LASIK.



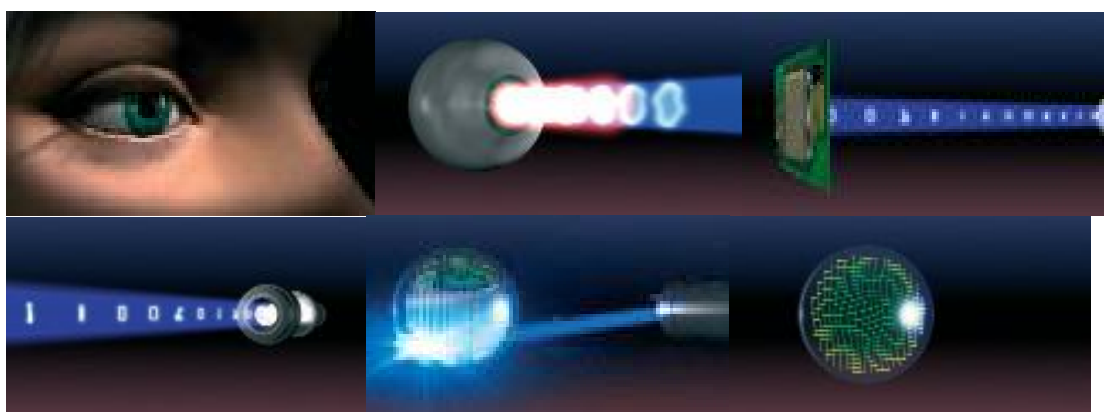
Εικόνα 3.4: Το αμφιβληστροειδικό είδωλο χωρίς διόρθωση, με συμβατικό οφθαλμικό φακό και με wavefront οφθαλμικό φακό.

Κάποιοι κατασκευαστές έχουν εισάγει την τεχνολογία wavefront δημιουργώντας wavefront-guided οφθαλμικούς φακούς με προσαρμοσμένο υψηλής ευκρίνειας φακό μόνης όρασης και πολυεστιακούς (Chou, 2005).

Οι φακοί αυτοί κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία τριών βημάτων. Αρχικά με το εκτροπόμετρο συλλαμβάνεται το μοναδικό μετώπου κύματος του ασθενούς. Στην συνέχεια οι πληροφορίες μετατρέπονται σε συνταγή, η οποία αντιστοιχεί στο μοναδικό «οπτικό αποτύπωμα» του ασθενούς.

Τέλος, η συνταγή μεταφέρεται χρησιμοποιώντας ένα υπεριώδες λέιζερ και ενσωματώνεται μεταξύ δύο οπτικών επιφανειών. Στο τελευταίο στάδιο, το UV λέιζερ μεταβάλλει τον δείκτη διάθλασης του πολυμερούς σημείο προς σημείο, προκειμένου να παραχθεί το επιθυμητό προφίλ διάθλασης (Εικόνα 3.5).

Θεωρητικά, ένας οφθαλμικός φακός ο οποίος διορθώνει το συνολικό ποσό των υψηλής τάξεως εκτροπών, θα πρέπει να κινείται μαζί με τον οφθαλμό ώστε να διατηρηθεί η τέλεια όραση. Αυτό περιορίζει το οπτικό πεδίο σε μια πολύ μικρή περιοχή. Πρακτικά όμως ένας οφθαλμικός φακός ο οποίος περιορίζει το μάτι να κοιτάει μόνο μπροστά, δεν θα έχει θετικά αποτελέσματα. Ωστόσο, αν ο φακός περιέχει ένα μικρότερο ποσοστό εκτροπών, τότε το οπτικό πεδίο επεκτείνεται (Chou, 2005).



Εικόνα 3.5: Τα τρία στάδια κατασκευής του φακού. Αρχικά καταγράφεται το wavefront, ύστερα μεταφέρεται σε συνταγή και τέλος μέσω του laser ενσωματώνεται στον οφθαλμικό φακό.

Τα τελευταία πέντε χρόνια όλο και περισσότερες εταιρείες ενσωματώνουν την τεχνολογία του wavefront στους οφθαλμικούς φακούς. Τα προηγούμενα χρόνια ο μόνος τρόπος επεξεργασίας των επιφανειών ενός φακού πραγματοποιούνταν μέσω τόνων και καλουπιών με αποτέλεσμα να παράγονται μαζικά οφθαλμικοί φακοί σφαιρικού ή ασφαιρικού σχεδιασμού. Τα τελευταία όμως χρόνια χρησιμοποιούνται μηχανές που μπορούν να κατεργαστούν τις επιφάνειες των φακών με ακίδες οι οποίες παρέχουν στην κατασκευή του φακού μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία.

Στις κατασκευαστικές μηχανές ενσωματώνεται ένα λογισμικό κυματικής φυσικής, το οποίο κατασκευάζει φακούς απόλυτα εξατομικευμένους και σύμφωνα με το wavefront του οφθαλμού. Εξιδανικεύει την απόδοσή του λαμβάνοντας υπόψη της όλες τις εκτροπές, ακόμα και τις υψηλής τάξης (για παράδειγμα της κόμης). Σχεδιάζει λοιπόν όχι μόνο μονής όρασης, αλλά και πολυεστιακούς οφθαλμικούς φακούς των οποίων η οπίσθια επιφάνεια χαράζεται σημείο προς σημείο ξεχωριστά για κάθε συνταγή (www.essilor.com).

Κεφάλαιο 4

4.1 Επίλογος

Η εκτροπομετρία έχει μετατραπεί με ταχύτητα βήματα από ερευνητικό εργαλείο σε κλινική πραγματικότητα. Το πεδίο της εκτροπομετρίας εξελίσσεται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια, εισχωρεί και επεμβαίνει στις οπτικές επιστήμες και την οφθαλμολογία με καταπληκτικά αποτελέσματα.

Η σύγχρονη έρευνα αλλάζει την νοοτροπία μας, τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε το σύστημα του οφθαλμού και καθορίζεται εκ νέου το πεδίο της οπτικής επιστήμης.

Στο παρελθόν, οπτικές ατέλειες του οφθαλμού είχαν χαρακτηριστεί ως διαθλαστικές ανωμαλίες. Στο μέλλον οι ατέλειες του ματιού θα συμπεριλαμβάνουν ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό πλαίσιο το οποίο θα εκφράζει την επίδραση όλων των οπτικών ατελειών του οφθαλμού, σε έναν δισδιάστατο εκτροπομετρικό χάρτη. Όταν ο εκτροπομετρικός χάρτης αντιμετωπίζεται σαν μαθηματική συνάρτηση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η ποιότητα της αμφιβληστροειδικής εικόνας. Στο μέλλον τέτοιοι υπολογισμοί θα αποτελέσουν οπτομετρικό εργαλείο ρουτίνας για την ολοκληρωμένη διόρθωση των εκτροπών του οφθαλμού.

Ο εκτροπομετρικός χάρτης επίσης θα αποτελέσει μια συνταγή οδηγός για την ιδανική οπτική διόρθωση που θα παρέχεται από έναν νέου είδους οφθαλμιάτρων, οπτομετρών και διορθωτικών μέσων (Thibos et al., 2003).

Η εκτροπομετρία εισχωρεί και στα οπτικά μέσα διόρθωσης καθώς οι κατασκευαστές οφθαλμικών φακών χρησιμοποιούν σύγχρονες τεχνολογίες κοπής και σχεδιασμού των φακών μονής όρασης και πολυεστιακούς, οι οποίοι είναι σε θέση να εξασφαλίσουν εξαιρετική ποιότητα όρασης σε όλη την επιφάνειά τους περιορίζοντας τις εκτροπές υψηλής τάξης. Ταυτόχρονα οι κατασκευαστές φακών επαφής, κατασκευάζουν νέα σχέδια φακών επαφής, λαμβάνοντας υπ' όψιν την μοναδικότητα του κάθε οφθαλμού.

Τέλος, η εξατομίκευση της διαθλαστικής χειρουργικής επιδιώκει, πέρα από τη διόρθωση του διαθλαστικού σφάλματος, την ταυτόχρονη διόρθωση των μονοχρωματικών εκτροπών υψηλής τάξης του οφθαλμού με στόχο όχι μόνο την αποκατάσταση φυσιολογικής οπτικής οξύτητας αλλά και τη διασφάλιση άριστης ποιότητας όρασης.

4.2. Βιβλιογραφικές παραπομπές

Ασημέλλης Γ, Κατσούλος Κ, Καραγεωργιάδης Λ, Μακρυνιώτη Δ, Βασιλείου Ν, Μουσαφειρόπουλος Θ και Μπαχάρης Κ. (2008) *Οπτική και Υπερόραση*. 2η εκδ. Αθήνα: Σύγχρονη Γνώση.

Γεωργιάδου Σ. Αποκατάσταση κερατοειδούς μετά από τη διακοπή χρήσης φακών επαφής. 2005-2006. Master's thesis, Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Δεμέστιχα Α. Η ποιότητα του ειδώλου στη περιφέρεια μετά από διαθλαστικές επεμβάσεις και ο ρόλος τους στα οπτικά πεδία. 2010. Master's thesis, Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Δημητρίου Α. Πολυώνυμα Zernike και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα στη μελέτη του σφάλματος στη διαθλαστική χειρουργική. 2011. Master's thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κατσούλος, Κ. και Ασημέλλης, Γ. (2008) *Η σύγχρονη διαθλαστική εξέταση*. Θεσσαλονίκη: Σύγχρονη γνώση.

Κολλιόπουλος, (1997) *Φακοί επαφής*. Επιστημονικές εκδόσεις 'Γρ.Παρισιάνος'.

Μαγουλάς Μιχάλης (2005) *Τοπογραφία και wavefront*. Εκδοσεις Βήτα.

Περδικάκης Ν. Μέτρηση και αξιολόγηση της δυναμικής προσαρμογής του οφθαλμού πριν και μετά από διαθλαστικές επεμβάσεις διόρθωσης μυωπίας με excimer laser. 2007-2008. Master's thesis. Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Γιαννακοπούλου Τ. Αξιολόγηση Ευαισθησίας Φωτεινής Αντίθεσης μετά από Διαθλαστική Χειρουργική. Master's thesis. 2006. Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Τσιάπα Ε. Φασματοσκοπία Υπερύθρου και εφαρμογές της στην Οφθαλμολογία. Master's thesis. 2008. Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Snell RS and Lemp MA (2006) *Κλινική ανατομία του οφθαλμού*. Ιατρικές Εκδόσεις Π. Χ. Πασχαλίδης.

Φωτεινάκης, Β. Πατέρας, Ε. και Χανδρινός, Α. (2000) *Κλινική διάθλαση*. Εκδόσεις ΕΛΛΗΝ.

Χανδρινός, ΒΑ (2009) *Διπλεστικά και πολυεστιακοί φακοί*. 2η εκδ. Αθήνα: Εκδόσεις Έλλην.

Alió JL and Montés-Mico R. Wavefront-Guided versus Standard LASIK Enhancement for Residual Refractive Errors. *Ophthalmology*. 2006;113(2):191-197.

Azar TD and Koch DD. *LASIK. Fundamentals, surgical technique and complication*. Eastern Hemisphere Distribution advancement. 2003; 1-567.

Campbell FW and Green DG. Optical and retinal factors affecting visual resolution. *The journal of physiology*. 1965;181(2):576-593.

Charman WN. Wavefront aberrations of the eye: A review. *Optometry and vision science*. 1991;66(8):574-583.

Charman WN. Optics of the human eye. *Visual optics and instrumentation*. 1991;1-26 .

Charman WN. Wavefront technology: Past, present and future. *Contact Lens & Anterior Eye*. 2005;28:75-92.

Chateau N. The prospects for super-acuity: limits to visual performance after correction of monochromatic ocular aberration. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2003; 23(6), 479-493.

Cheng XU, Himebaugh NL, Kollbaum PS and Thibos LN. Validation of a Clinical Shack-Hartmann Aberrometer. *Optometry and vision science*. 2003; 80(8): 587–595.

Available:1040-5488/03/8008-0587/0

Cheng Xu, Bradley A, Ravikumar S and Thibos LN. Visual Impact of Zernike and Seidel Forms of Monochromatic Aberrations. *Optometry and vision science*. 2011;87(5):300–312.

Chou B. Non-surgical wavefront correction. An exciting advancement. *Optometry today*. 2005;30-34.

Chou B. Wavefront Beyond Refractive Surgery. Ophthalmic lenses offer a non-invasive, less expensive way to address higher-order aberrations. *Review of optometry*. 2007;144(10):61-67.

Dhaliwal DK and Mather R. New developments in cornea and external disease-Lasik. *Ophthalmology Clinics of North America*. 2003;16(1):19-25.

Guirao A, Porter J, Williams RD and Cox GI. Calculated impact of higher-order monochroma aberrations on retinal image quality in a population of human eyes. *J. Optical Society of America*. 2002;19(1):1-9.

Guirao A and Williams DR. A Method to Predict Refractive Errors from Wave Aberration Data. *Optometry and vision science*. 2003; 80(1): 36–42.

Jackson, W.B. (2012) Alternative LASIK procedure a success. Excellent results, happy patients achieved with new advanced .*Ophthalmology times*.

Legerton JA and Chou B. Myopia Regulation: Myth or Megatrend? Many methods purportedly slow the progression of myopia. But, do they really work?. *Review of optometry*. 2009;10:68-74.

Liang J and Williams DR. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye. *Journal Opt. Soc. Am*. 1997;14(11):2873–2883.

Marcos S and Thibos LN. Aberrometry: Clinical and Research Applications. *Optometry and vision science*. 2003;80(2):85–86.
Available:1040-5488/03/8002-0085/0

Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke H and Seiler T. Principles of Tscherning Aberrometry. *Journal of Refractive Surgery*. 2000;16:570-571.

Panagopoulou SI and Pallikaris IG. Wavefront Customized Ablations With the WASCA Asclepion Workstation. *Journal of Refractive Surgery*. 2011;17:608-612.

Pallikaris IG, Panagopoulou SI, Siganos CS and Molebny VV. Objective Measurement of Wavefront Aberrations with and Without Accommodation. *Journal of Refractive Surgery*. 2011;17(5):602-607.

Russell GE, Stulting RD and Thompson KP. Postoperative LASIK Visual Aberrations and Treatment with InterWave-Guided Multipass, Multistage Correction. *Optometry and vision science*. 2003;80(2):93-96.

Sawides L, Gracia P, Dorronsoro C, Webster M and Marcos S. Adapting to blur proceduced by ocular high- order aberrations. *Journal of vision*. 2011;11:1-11.

Thibos LN. Principles of Hartmann-Shack Aberrometry. *Journal of Refractive Surgery*. 2000;16:563-565.

Thibos LN, Hong X, Bradley A and Cheng X. Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*. 2002;19(1):29-48.

Thibos LN, Applegate RA and Marcos S. Aberrometry: The past, present, and the future of optometry. *Optometry and Vision science*. 2003; 80(1):1-2.

Tuan KA and Chernyak D. Corneal Asphericity and Visual Function After Wavefront-Guided LASIK. *Optometry and vision science*. 2006;83(8): 605-610.

Wang Y, Kruger PB, Li JS, Lin PL and Stark LR. Accommodation to Wavefront Vergence and Chromatic Aberration. *Optometry and vision science*. 2011;88(5):593-600.

Wyant C.J. and Creath K. *Applied optics and optical engineering*. 5:8-39.

Zhu L, Sun P, Bartsch D, Freeman WR and Fainman Y. Wave-front generation of Zernike polynomial modes with a micromachined membrane deformable mirror. *Applied optics*. 1999;38(28):6019-6026.

Lopez-Gil N, Castejon-Mochon JF and Fernandez-Sanchez V. Limitations of the ocular wavefront correction with contact lenses. *Vision Research*. 2009;49(14):1729–1737.

<http://emedicine.medscape.com/article/1221604-overview>

<http://www.lasikinstitute.org/>

http://www.castervision.com/about_lasik.php

<http://www.wavefrontlasikinfo.net/>

http://www.allaboutvision.com/visionsurgery/custom_lasik.htm

<http://www.modernmedicine.com/modernmedicine/Ophthalmology/home/40207>

www.essilor.com