



**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ**



**Μεταπτυχιακή Εργασία:**

**“Αξιολόγηση Οφθαλμικών Φακών με εκτροπόμετρο  
Shack-Hartmann ”**

**Δρόσος Δημοσθένης**

**Επιβλέπων: Δρ. Πλαίνης Σωτήρης**



**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ**



**Μεταπτυχιακή Εργασία:**

**“ Αξιολόγηση Οφθαλμικών Φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann ”**

**Δρόσος Δημοσθένης**

**Επιβλέπων: Δρ. Πλαίνης Σωτήρης**

Η παρούσα εργασία υπεβλήθη στις 5/3/2007 ως μέρος των υποχρεώσεων για την απονομή του μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Οπτική και Όραση» και παρουσιάστηκε στην Τριμελή Επιτροπή αποτελούμενη από τους:

1. Πλαΐνη Σωτήρη, Επίτιμο Λέκτορα του Πανεπιστημίου του Manchester
2. Δρ. Μιλτιάδη Τσιλιμπάρη, Επίκουρο Καθηγητή Οφθαλμολογίας
3. Δρ. Ιωάννη Παλλήκαρη, Καθηγητή Οφθαλμολογίας

**Ακαδημαϊκό έτος 2008-2009**

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου ,  
και στον Πέτρο Οικονομέα ....

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

Κατά την διάρκεια της φοίτησής μου στο διατμηματικό μεταπτυχιακό πρόγραμμα ειδίκευσης “Οπτική και Όραση” του Πανεπιστημίου Κρήτης, και στα πλαίσια της εκπόνησης και παρουσίασης της μεταπτυχιακής μου εργασίας με τίτλο: “Αξιολόγηση Οφθαλμικών Φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann”, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, κ. κ. Δρ. Παλλήκαρη Ιωάννη, Μιλτιάδη Τσιλιμπάρη, Επίκουρο Καθηγητή της Οφθαλμολογίας και Πλαίνη Σωτήρη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν και την ανάθεση της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον κ. Άρη Παλλήκαρη για την παραχώρηση, του απαραίτητου χώρου και εξοπλισμού που χρειάστηκα για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια του σε κομβικά σημεία της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον διδακτορικό σπουδαστή του Μεταπτυχιακού προγράμματος Οπτική και Όραση Αναστάσιο Παπαδιαμάντη για τη βοήθεια του σε θέματα λογισμικού, στην ολοκλήρωση της διάταξης και στην πολύτιμη βοήθεια του σε ότι χρειάστηκα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συμμετείχαν στην πραγματοποίηση των πειραμάτων και την Ευτυχία Φελώνη για την βοήθεια της καθ’όλη την διάρκεια των σπουδών μου και την ψυχολογική στήριξη.

## Abstract

**Purpose:** To evaluate the optical aberrations of single vision ophthalmic lenses and to assess their differences based on the material, diameter, and index of refraction of each lens.

**Methods:** The evaluation of the optical aberrations of single vision lenses was based on a Shack-Hartmann wavefront sensor. Initially, the optical setup of the wavefront sensor was evaluated theoretically using Zemax and experimentally by measuring and correlating the aberrations of the optical system with the theoretical approach. Following the analysis of the optical setup, 29 single vision lenses with spherical power of  $\pm 3.00$  D and 4 astigmatic lenses were measured. The negative lenses (16) were divided into 5 categories based on their index of refraction (1.5 and 1.6) and material (simple, polycarbonate, aspheric). Similarly, the positive lenses (13) were divided into 4 categories based on their index of refraction (1.5 and 1.6) and material (simple, polycarbonate, aspheric). Measurements were taken both for photopic (3mm pupil diameter) and scotopic (6 pupil mm diameter) conditions going from the center of the lenses to the periphery at steps of 3 and 6 mm, respectively, and different angles at steps of 45 degrees. The optical aberrations were analyzed in terms of Zernike polynomials up to 4th order while the mean value of the results per category were used to compare the outcomes. Besides the analysis of the individual Zernike polynomials, the root mean square (RMS) and the sphere of Seidel were calculated.

**Results:** The theoretical and experimental optical aberrations of the optical setup were minimal while the dynamic range of the wavefront sensor was determined as  $\pm 3$  diopters. A small deviation of the theoretical and experimental approach was found, yet considered minimal and expected. With respect to the optical aberrations of the lenses, correlation of the measurements with only the distance from the center of the lenses was observed and not the angle of observation. The optical aberrations were increased with distance from the center of the lenses. With respect to the RMS analysis, the aspheric lenses exhibited the best optical quality followed by the simple lenses, the polycarbonate with index of refraction of 1.53, the polycarbonate with index of refraction of 1.59, and finally the CR-39 with index of refraction of 1.49. As expected, all the lenses exhibited higher aberrations at scotopic conditions and

deviations of the sphere of Seidel with distance from the center of the lenses. Finally, the negative lenses exhibited better consistency than the positive lenses

**Conclusions:** The results of the measurements indicated differentiation of the optical lenses that depend on the index of refraction, the material, the illumination conditions, and the dioptric power. All these parameters play an important role on the final optical quality and should be considered during the development of a new lens. The results and methodology that were applied in this work may be used in the assessment of multifocal lenses that provide a significant improvement as compared to single vision lenses and a wider applicability during normal living conditions.

## Περίληψη

**Σκοπός:** Ο σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας ήταν η αξιολόγηση των οπτικών εκτροπών σε οφθαλμικούς φακούς μονοεστιακής όρασης και η εκτίμηση τυχόν διαφορών τους ανάλογα με το υλικό την διάμετρο και τον δείκτη διάθλασης των οφθαλμικών φακών.

**Μεθοδολογία:** Η εκτίμηση των οπτικών εκτροπών των οφθαλμικών φακών μονοεστιακής όρασης πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια ενός αισθητήρα μετώπου κύματος Shack-Hartmann. Αρχικά εκτιμήθηκε η οπτική διάταξη τόσο θεωρητικά μέσω του λογισμικού προγράμματος Zemax, όσο και πειραματικά μέσω της ανάλυσης των οπτικών εκτροπών και συσχέτισης με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Κατόπιν της ανάλυσης αυτής, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 29 φακούς μονοεστιακής όρασης  $\pm 3.00$  διοπτριών και τεσσάρων αστιγματικών-κυλινδρικών φακών. Οι αρνητικοί φακοί (16) διαχωρίστηκαν σε 5 κατηγορίες με βάση των δείκτη διάθλασης (1.5 και 1.6) και το υλικό κατασκευής (simple, polycarbonate, aspheric). Παρομοίως, οι θετικοί φακοί (13) διαχωρίστηκαν σε 4 κατηγορίες με βάση τον δείκτη διάθλασης (1.5 και 1.6) και το υλικό κατασκευής (simple, polycarbonate, aspheric). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο για φωτοπικές (διάμετρος κόρης 3mm), όσο και σκοτοπικές (διάμετρος κόρης 6mm) συνθήκες ξεκινώντας από την κεντρική περιοχή του φακού προς στην περιφέρεια σε βήματα των 3 ή 6 mm, αντίστοιχα, και σε διαφορετικές γωνίες των 45 μοιρών. Η οπτικές εκτροπές μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας τα πολυώνυμα Zernike μέχρι και 4<sup>ης</sup> τάξης ενώ ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων ανά κατηγορία φακών χρησιμοποιήθηκε για την σύγκριση και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Πέραν από την ανάλυση των επιμέρους συντελεστών των Zernike πολυωνύμων, υπολογίστηκε και το RMS υψηλής τάξης και η σφαίρα του Seidel.

**Αποτελέσματα:** Η θεωρητικές και πειραματικές οπτικές εκτροπές της πειραματικής διάταξης ήταν μηδαμινές και το δυναμικό εύρος του αισθητήρα αξιολογήθηκε στις  $\pm 3$  διοπτρίες. Παρατηρήθηκε μερική απόκλιση των θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων η οποία όμως κρίθηκε αμελητέα και αναμενόμενη. Όσον αφορά τα αποτελέσματα των οπτικών εκτροπών των φακών δεν παρατηρήθηκε συσχέτιση τους με την γωνία μέτρηση αλλά μόνο με την περιοχή μέτρησης από το κέντρο προς την περιφέρεια. Οι οπτικές εκτροπές παρουσίασαν αύξηση πηγαίνοντας

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

προς την περιφέρεια. Με βάση το RMS υψηλής τάξης, οι ασφαιρικοί φακοί παρουσίασαν την καλύτερη οπτική ευκρίνεια ακολουθούμενοι από τους απλούς (simple), τους polycarbonate με δείκτη διάθλασης 1.53, τους polycarbonate με δείκτη διάθλασης 1.59, και τέλος τους CR-39 με δείκτη διάθλασης 1.49. Όλοι οι φακοί παρουσίασαν μεγαλύτερες τιμές εκτροπών σε νυχτερινές συνθήκες πράγμα που περιμέναμε καθώς και αποκλίσεις της σφαίρας του Seidel από το κέντρο στη περιφέρεια. Τέλος, οι αρνητικοί φακοί παρουσίασαν καλύτερη συμπεριφορά από τους θετικούς.

**Συμπεράσματα:** Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συνιστούν διαφοροποιήσεις των οπτικών οι οποίες εξαρτώνται από τον δείκτη διάθλασης, το υλικό κατασκευής, τις συνθήκες φωτισμού, και την διοπτρική δύναμη του φακού. Όλοι οι παραπάνω παράμετροι παίζουν σημαντικό ρόλο στην τελική οπτική ευκρίνεια των μονοεστιακών φακών οράσεως και θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την κατασκευή καινούργιων φακών. Τα αποτελέσματα και η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και σε πολυεστιακούς φακούς οράσεως οι οποίοι αποτελούν σημαντική βελτίωση σε σύγκριση με τους μονοεστιακούς και πιο χρήσιμοι στις συνήθεις συνθήκες διαβίωσης.



## **Περιεχόμενα**

<i>Πίνακας Εικόνων</i> .....	11
<i>1. Εισαγωγή</i> .....	14
1.1 Ανατομία Οφθαλμού .....	14
1.2 Οπτικά Σφάλματα .....	15
1.2.1 Διαθλαστικά Σφάλματα .....	15
1.2.1.1 Μυωπία .....	16
1.2.1.2 Υπερμετρωπία .....	17
1.2.1.3 Αστιγματισμός .....	18
1.2.2 Εκτροπές Υψηλής Τάξης .....	19
1.2.2.1 Χρωματική Εκτροπή .....	19
1.2.2.2 Σφαιρική Εκτροπή .....	21
1.2.2.3 Αστιγματισμός Λοξών Ακτίνων .....	21
1.2.2.4 Κόμα .....	22
1.2.2.5 Παραμόρφωση Ειδώλου .....	22
1.2.2.6 Καμπύλωση Πεδίου .....	23
1.2.2.7 Ανάλυση σε πολώνυμα Zernike .....	23
1.2.2.8 RMS (Root Mean Square) & Seidel Sphere .....	27
1.3 Οφθαλμικοί Φακοί και Διόρθωση .....	28
1.3.1 Κατασκευή Οφθαλμικών Φακών .....	28
1.3.2 Υλικά κατασκευής φακών .....	33
1.3.3 Πρόσθετα Χαρακτηριστικά .....	35
1.4 Μέθοδοι Αξιολόγησης Οφθαλμικών Φακών .....	38
1.4.1 Retinal Ray Tracing (RRT) .....	38
1.4.2 Εκτροπομετρία Tscherning .....	39
1.4.3 Εκτροπομετρία Shack-Hartmann .....	40
1.5 Ανασκόπηση πεδίου .....	42
1.6 Σκοπός .....	43
<i>2. Μεθοδολογία</i> .....	44

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

2.1 Περιγραφή και Αξιολόγηση Οπτικής Διάταξης.....	44
2.1.1 Χαρακτηριστικά Πειραματικής Διάταξης.....	44
2.1.2 Αξιολόγηση αισθητήρα μετώπου κύματος .....	46
2.2 Αξιολόγηση Οφθαλμικών Φακών.....	48
2.2.1 Χαρακτηριστικά Οφθαλμικών Φακών.....	48
2.2.2 Διαδικασία μέτρησης οφθαλμικών φακών .....	48
2.3 Ανάλυση Δεδομένων.....	52
3. Αποτελέσματα.....	53
3.1 Αξιολόγηση Οπτικής Διάταξης και Αξιολόγηση Αισθητήρα Μετώπου Κύματος.....	53
3.2 Αποτελέσματα Φακών.....	60
3.2.1 Εκτροπές συναρτήσει της γωνίας και της απόστασης.....	60
3.2.2 RMS ανά απόσταση και κατηγορία.....	63
3.2.3 Σφαιρική Εκτροπή ( $Z_4^0$ ) ανά απόσταση ανά κατηγορία.....	64
3.2.4 Αστιγματικές Εκτροπές ( $Z_2^{-2}, Z_2^2$ ) ανά κατηγορία.....	65
3.2.5 Seidel Sphere ανά κατηγορία.....	67
3.2.6 Κυλινδρικοί Φακοί.....	68
3.2.7 RMS ανά εταιρεία σε Polycarbonate Φακό.....	69
4. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προσεγγίσεις.....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
4.1 Οπτική Διάταξη και Λειτουργία Αισθητήρα Μετώπου Κύματος. <b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>	
4.2 Μονοεστιακοί Σφαιρικοί Φακοί Οράσεως.....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
4.3 Κυλινδρικοί Φακοί.....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
4.4 Ανακεφαλαίωση Συμπερασμάτων και Μελλοντικές Προσεγγίσεις.....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
Βιβλιογραφία.....	78

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1: Οπτικά μέσα του οφθαλμού .....	14
Εικόνα 1.2: Διόρθωση μυωπίας με χρήση αρνητικού φακού.....	16
Εικόνα 1.3 α. Φυσιολογική και β. Μυωπική όραση.....	17
Εικόνα 1.4: Διόρθωση υπερμετρωπίας με χρήση θετικών φακών.....	18
Εικόνα 1.5: Αστιγματική όραση.....	18
Εικόνα 1.6: εκτροπή σε οφθαλμικό φακό.....	20
Εικόνα 1.7: : Πορεία ακτινών σε φακό με σφαιρική εκτροπή.....	20
Εικόνα 1.8: Πορεία ακτινών σε αστιγματική εκτροπή.....	21
Εικόνα 1.9: Κόμη.....	22
Εικόνα 1.10: Παραμόρφωση σε θετικούς και αρνητικούς φακούς.....	22
Εικόνα 1.11: Καμπύλωση πεδίου.....	23
Εικόνα 1.12: Κορικό σύστημα συντεταγμένων.....	24
Εικόνα 1.13: Κυματομορφές πολώνυμων Zernike.....	26
Εικόνα 1.14: RMS σφάλμα μετώπου κύματος.....	27
Εικόνα 1.15: Είδη οφθαλμικών φακών.....	28
Εικόνα 1.16: Σφαιρικός φακός.....	29
Εικόνα 1.17: Κυλινδρικός φακός.....	29
Εικόνα 1.18: Τορικός φακός.....	30
Εικόνα 1.19: Μεταβολή της ισχύος πολυεστιακού φακού.....	31
Εικόνα 1.20: Ασφαιρικός φακός.....	36
Εικόνα 1.21: Πρισματικό φαινόμενο.....	37
Εικόνα 1.22: Retinal Ray Tracing.....	38
Εικόνα 1.23: Εκτροπόμετρο Tscherning.....	39
Εικόνα 1.24: Αρχή λειτουργίας Shack-Hartmann αισθητήρα μετώπου κύματος.....	40
Εικόνα 1.25: Απεικόνιση σημειακών κουκίδων αισθητήρα μετώπου κύματος... ..	41
Εικόνα 2.1: Πειραματική διάταξη για τον έλεγχο λειτουργίας του αισθητήρα μετώπου κύματος και του εύρους μετατόπισης των καθρεφτών.....	44

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

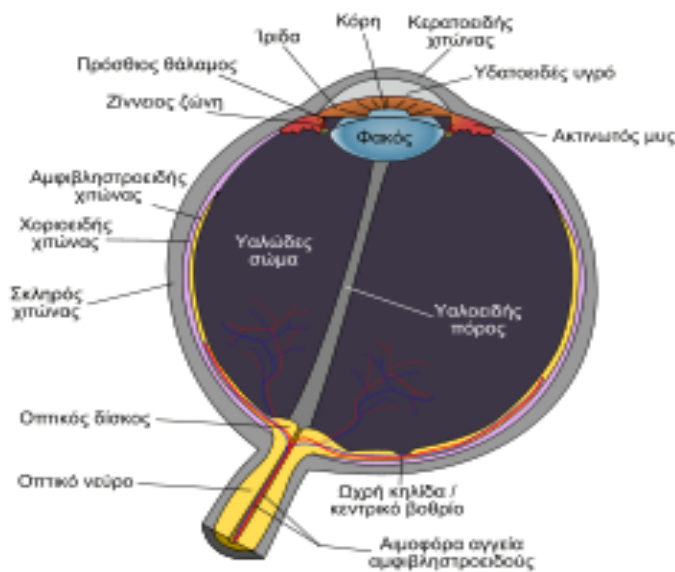
Εικόνα 2.2: α. Σχηματική παράσταση του συστήματος των μικροφακών και β. Σύστημα μικροφακών.....	45
Εικόνα 2.3: Προσομοίωση των φακών του οπτικού συστήματος στο Zemax. ....	47
Εικόνα 2.4: Σχηματική παράσταση πειραματικής διάταξης για τη μέτρηση των οφθαλμικών φακών. ....	50
Εικόνα 2.5: Πειραματική διάταξη και βάση φακών.....	50
Εικόνα 2.6: Περιοχές μετρησης οφθαλμικών φακών. ....	51
Εικόνα 3.1: Μορφή του μετώπου κύματος στο επίπεδο των μικροφακών και για τη θέση αναφοράς του συστήματος. Διάμετρος κόρης (αριστερά) 3mm και (δεξιά) 6mm. ....	53
Εικόνα 3.2: Γραφική παράσταση του αναμενόμενου σφάλματος εστίασης της οπτικής διάταξης συναρτήσει της μεταβολής του οπτικού δρόμου. Οι μετρήσεις έγιναν για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm. ....	54
Εικόνα 3.3: Εικόνες από τη CCD κάμερα για το σύστημα των μικροφακών. (α) Στη θέση αναφοράς και για μεταβολή του οπτικού δρόμου για (β) -35mm και (γ) +35mm. Οι φωτογραφίες είναι για κόρη 3mm.....	56
Εικόνα 3.4: Εικόνες από τη CCD κάμερα για το σύστημα των μικροφακών. (α) Στη θέση αναφοράς και για μεταβολή του οπτικού δρόμου για (β) -35mm και (γ) +35mm.....	56
Εικόνα 3.5: Κυματομορφή πειραματικών μετρήσεων για (δεξιά) 3mm και (αριστερά) 6mm.....	56
Εικόνα 3.6: Παράσταση του συνόλου των εκτροπών του συστήματος στη θέση μηδενισμού του σφάλματος εστίασης. Κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.....	57
Εικόνα 3.7: Γραφική παράσταση του σφάλματος εστίασης των καθρεφτών $M_4$ και $M_5$ . Για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm. ....	58
Εικόνα 3.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων του σφάλματος εστίασης για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.....	59
Εικόνα 3.9: Εκτροπές υψηλής τάξης στη κεντρική περιοχή ασφαιρικού φακού (α) +3D και (β) -3D.....	61
Εικόνα 3.10: Διάγραμμα μεταβολής του αστιγματισμού, της κόμης και της σφαιρικής εκτροπής συναρτήσει της γωνίας παρατήρησης για αρνητικό ασφαιρικό φακό και διάμετρο κόρης (α) 3mm και (β) 6mm και ασφαιρικό θετικό φακό και διάμετρο κόρης (γ) 3mm και (δ) 6mm. ....	61
Εικόνα 3.11: Διάγραμμα μεταβολής του αστιγματισμού, της κόμης και της σφαιρικής εκτροπής συναρτήσει της απόστασης παρατήρησης από τη κεντρική περιοχή για αρνητικό ασφαιρικό φακό και διάμετρο κόρης (α) 3mm και (β) 6mm και ασφαιρικό θετικό φακό και διάμετρο κόρης (γ) 3 και (δ) 6mm.....	62

Εικόνα 3.12: Διάγραμμα μεταβολής του υψηλής τάξης RMS από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη θετικών φακών. Για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm. .....	63
Εικόνα 3.13: Σφαιρική Εκτροπή (Z40) ανά απόσταση ανά κατηγορία.....	64
Εικόνα 3.14: Διάγραμμα μεταβολής της σφαιρικής εκτροπής από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη θετικών φακών. Για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm. .....	64
Εικόνα 3.15: Διάγραμμα μεταβολής της σφαιρικής εκτροπής από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη αρνητικών φακών. Για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm. ....	65
Εικόνα 3.16: Διάγραμμα μεταβολής των αστιγματικών εκτροπών. (α) $Z_2^{-2}$ και (β) $Z_2^2$ από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη θετικών φακών και για κόρη 3mm. ....	65
Εικόνα 3.17: Διάγραμμα μεταβολής των αστιγματικών εκτροπών (α) $Z_2^{-2}$ και (β) $Z_2^2$ από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη θετικών φακών και για κόρη 6mm. Ο οριζόντιος άξονας εκφράζει τη απόσταση από το κέντρο του φακού, ενώ ο κατακόρυφος τον αστιγματισμό ανάλογα με τον άξονα.....	66
Εικόνα 3.18: Διάγραμμα μεταβολής των αστιγματικών εκτροπών (α) $Z_2^{-2}$ και (β) $Z_2^2$ από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη αρνητικών φακών και για κόρη 3mm. Ο οριζόντιος άξονας εκφράζει τη απόσταση από το κέντρο του φακού, ενώ ο κατακόρυφος τον αστιγματισμό ανάλογα με τον άξονα. ....	66
Εικόνα 3.19: Διάγραμμα μεταβολής των αστιγματικών εκτροπών (α) $Z_2^{-2}$ και (β) $Z_2^2$ από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη αρνητικών φακών και για κόρη 6mm. Ο οριζόντιος άξονας εκφράζει τη απόσταση από το κέντρο του φακού, ενώ ο κατακόρυφος τον αστιγματισμό ανάλογα με τον άξονα. ....	67
Εικόνα 3.20: Διάγραμμα μεταβολής του Seidel Sphere από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη θετικών φακών και κόρη (α) 3mm και (β) 6mm. ....	68
Εικόνα 3.21: Διάγραμμα μεταβολής του Seidel Sphere από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη αρνητικών φακών και για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm. ....	68
Εικόνα 3.22: Διάγραμμα μεταβολής των αστιγματικών εκτροπών από το κέντρο προς τη περιφέρεια για αρνητικό κυλινδρικό φακό και για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm. ....	69
Εικόνα 3.23: Διάγραμμα μεταβολής του RMS High Order από το κέντρο προς τη περιφέρεια για αρνητικούς polycarbonate με δείκτη διάθλασης 1.6 φακούς διαφορετικών εταιριών και για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.....	69

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Ανατομία Οφθαλμού

Τα οπτικά μέσα του οφθαλμού είναι οργανωμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπουν την διάδοση των ακτίνων φωτός στον οφθαλμό με πολύ χαμηλά επίπεδα σκέδασης. Η γεωμετρία τους είναι τέτοια ώστε να σχηματίζεται ευκρινές είδωλο στον αμφιβληστροειδή με χαμηλές εκτροπές. Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζεται σε τομή ο οφθαλμός και μερικά από τα σημαντικότερα οπτικά του μέσα.



Εικόνα 1.1: Οπτικά μέσα του οφθαλμού

Η πορεία των ακτίνων του φωτός προς τον αμφιβληστροειδή συναντά 4 βασικές διαθλαστικές επιφάνειες. Η πρώτη επιφάνεια είναι η πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή με σχήμα ελλειπτικό. Η δεύτερη επιφάνεια είναι η οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδή που έχει σφαιρικό σχήμα. Το συνολικό πάχος του κερατοειδή κυμαίνεται από 480-550  $\mu\text{m}$  και έχει δείκτη διάθλασης 1.376. Στην συνέχεια συναντάται ο πρόσθιος θάλαμος που περιέχει υδατοειδές υγρό δείκτη διάθλασης 1.336 και έχει αξονικό μήκος περίπου 3mm. Η ίριδα αποτελεί ουσιαστικά το διάφραγμα καθώς ρυθμίζει την ποσότητα του φωτός που θα φτάσει στον αμφιβληστροειδή. Πίσω από την ίριδα βρίσκεται ο κρυσταλοειδής φακός που ρυθμίζει την συνολική διοπτρική ισχύ του οφθαλμού ώστε να έχει ευκρίνεια στην παρατήρηση μακρινών αλλά και κοντινών αντικειμένων (προσαρμογή). Έχει δείκτη διάθλασης 1.41 και κατάλληλο σχήμα ώστε

να αντισταθμίζεται η σφαιρική εκτροπή που εισάγεται από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή.

Ο αμφιβληστροειδής, τέλος, έχει κατά προσέγγιση σχήμα σφαιρικό, με ακτίνα καμπυλότητας 12mm. Εκεί βρίσκονται και οι φωτοϋποδοχείς τα κωνία και τα ραβδία. Από τον κρυσταλλοειδή φακό ως τον αμφιβληστροειδή παρεμβάλλεται το υαλοειδές σώμα που έχει δείκτη διάθλασης 1.337.

## 1.2 Οπτικά Σφάλματα

Τα οπτικά σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την διάθλαση του φωτός σε έναν οφθαλμικό φακό ή και άμεσα στον οφθαλμό δυσκολεύουν συχνά την όραση ακόμα και σε εμμετρικούς οφθαλμούς. Τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται κυρίως σε σκοτοπικές συνθήκες όπου η κόρη είναι αισθητά μεγαλύτερη και αφήνει περισσότερες ακτίνες φωτός να εισέλθουν στον οφθαλμό. Τα σφάλματα αυτά ονομάζονται εκτροπές και διακρίνονται σε τάξεις ανάλογα με την παραμόρφωση και το πρόβλημα που δημιουργούν.

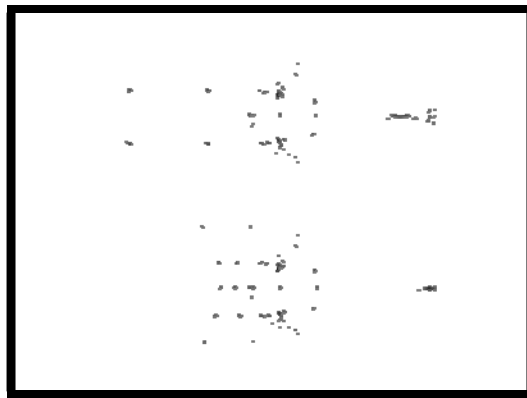
Οι εκτροπές χαμηλής τάξης είναι ο αστιγματισμός και η αδυναμία κοντινής ή και μακρινής εστίασης. (μυωπία-υπερμετροπία.) Οι εκτροπές υψηλής τάξης όμως είναι πιο πολύπλοκα οπτικά σφάλματα που επηρεάζουν όμως σημαντικά την όραση. Προκαλούν ειδικά την νύχτα θολή όραση, διπλωπία, θάμβος κ.ά. Στις εκτροπές υψηλής τάξης κατατάσσονται το κόμα, οι σφαιρικές εκτροπές, χρωματική εκτροπή, το trefoil.

### 1.2.1 Διαθλαστικά Σφάλματα

Είναι σφάλματα που οφείλονται στην μη εστίαση του φωτός στον αμφιβληστροειδή από τα οπτικά του ματιού. Τα διαθλαστικά σφάλματα κατηγοριοποιούνται συχνά σε σφαιρικά και κυλινδρικά. Σφαιρικά είναι αυτά που συμβαίνουν όταν η ισχύς του ματιού είναι είτε πολύ μεγάλη ή πολύ μικρή για να εστιάσει τις φωτεινές ακτίνες στον αμφιβληστροειδή. Η όραση στην περίπτωση αυτή είναι θολή. Τα διαθλαστικά σφάλματα είναι η μυωπία, η υπερμετροπία και ο αστιγματισμός.

### 1.2.1.1 Μυωπία

Μυωπία είναι το σφάλμα εκείνο κατά το οποίο το είδωλο του υπό παρατήρηση αντικειμένου σχηματίζεται μπροστά από το επίπεδο του αμφιβληστροειδή και όχι ακριβώς πάνω σε αυτόν. Αποτέλεσμα είναι ο μη σχηματισμός ευκρινούς ειδώλου για μακρινά αντικείμενα ενώ τα κοντινά αντικείμενα φαίνονται καθαρά λόγω προσαρμογής. Η διόρθωσή της επιτυγχάνεται με αρνητικούς οφθαλμικούς φακούς (εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: Διόρθωση μυωπίας με χρήση αρνητικού φακού.

Τα αίτια της μυωπίας είναι είτε ανατομικά είτε διαθλαστικά. Υπάρχουν πέντε βασικοί τύποι μυωπίας: α) απλής μορφής (αξονική – διαθλαστική), β) εκφυλιστική, γ) νυχτερινή, δ) ψευδομυωπία, και ε) επίκτητη. Η πρώτη μπορεί να οφείλεται είτε στο ότι το αξονικό μήκος του οφθαλμού είναι μεγαλύτερο από το φυσιολογικό (αξονική μυωπία), είτε στο ότι η καμπυλότητα του κερατοειδή ή άλλων διαθλαστικών μέσων του οφθαλμού, είναι μικρότερη του φυσιολογικού (διαθλαστική μυωπία). Η εκφυλιστική μυωπία είναι μια πραγματική πάθηση και συνοδεύεται από εκφυλίσεις και ατροφίες στο βυθό του ματιού με την πάροδο του χρόνου. Είναι μεγάλου βαθμού (πάνω από 10 διοπτρίες). Νυχτερινή μυωπία ονομάζεται η μείωση της ευκρίνειας της όρασης που συμβαίνει τις απογευματινές και τις βραδινές ώρες. Είναι απόλυτα φυσιολογικό φαινόμενο που οφείλεται στον χαμηλό φωτισμό και στην αύξηση της διαμέτρου της κόρης, που οδηγεί σε αυξημένη σφαιρική εκτροπή. Η ψευδομυωπία οφείλεται σε στιγμιαίες συσπάσεις του προσαρμοστικού μυ. Τέλος η επίκτητη οφείλεται σε φαρμακευτική αγωγή, σε αύξηση των επιπέδων γλυκόζης στον οργανισμό καθώς και σε άλλες περιβαλλοντολογικές ανωμαλίες.





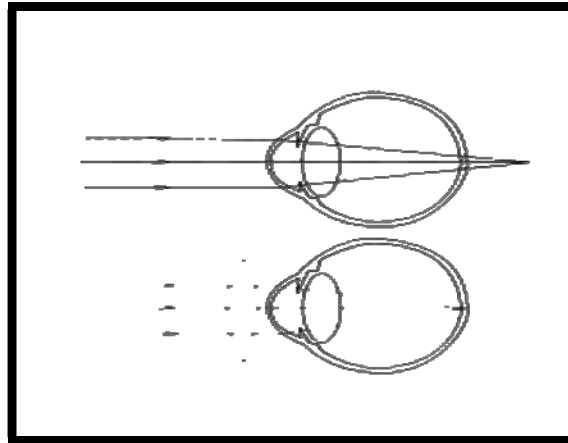
Εικόνα 1.3 α. Φυσιολογική και β. Μυωπική όραση.

### 1.2.1.2 Υπερμετροπία

Διαθλαστική ανωμαλία, που δημιουργεί τα ακριβώς αντίθετα προβλήματα σε σχέση με τη μυωπία. Ο υπερμετρωπικός οφθαλμός μπορεί να διακρίνει καθαρά μόνο τα αντικείμενα που βρίσκονται σε μακρινή απόσταση. Στη περίπτωση αυτή το είδωλο σχηματίζεται πίσω από το επίπεδο του αμφιβληστροειδή (εικόνα 1.4). Ο υπερμετρωπικός οφθαλμός είναι κοντύτερος από τον φυσιολογικό. Ασθενείς με υπερμετροπία ενδέχεται να έχουν συμπτώματα όπως θολερότητα στην όραση, δυσλειτουργίες κατά την προσαρμογή, δυσλειτουργίες στην διόφθαλμη όραση, αμβλυωπία και στραβισμό. Διορθώνεται με θετικούς οφθαλμικούς φακούς.

Πολύ συχνά η υπερμετροπία συγγέεται με την πρεσβυωπία γιατί και στις δύο περιπτώσεις επηρεάζεται η κοντινή όραση. Η υπερμετροπία όμως οφείλεται σε καθαρά διαθλαστικούς ή ανατομικούς λόγους, ενώ η πρεσβυωπία σε προβλήματα του φακού. Κατατάσσεται ανάλογα με τα αίτια και τα συμπτώματα σε απλή, παθολογική και εξωγενής υπερμετροπία.

Η απλή υπερμετροπία διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Την διαθλαστική κατά την οποία το μήκος του οφθαλμού είναι κανονικό αλλά η ισχύς του πολύ μικρή και την αξονική κατά την οποία η ισχύς του οφθαλμού είναι κανονική αλλά το μήκος του πολύ μικρό. Η παθολογική υπερμετροπία μπορεί να οφείλεται σε ατελή ανάπτυξη των οφθαλμών.



Εικόνα 1.4: Διόρθωση υπερμετροπίας με χρήση θετικών φακών.

### 1.2.1.3 Αστιγματισμός

Πρόκειται για μια διαθλαστική ανωμαλία η οποία μπορεί να συνυπάρχει με την μυωπία ή την υπερμετροπία. Συνήθως οφείλεται σε κερατοειδική ανωμαλία. Ο κερατοειδής δηλαδή δεν έχει την σωστή καμπυλότητα σε κάποιο σημείο και αντί να είναι σφαιρικός είναι πιο οβάλ (κερατοειδικός αστιγματισμός). Η μη σφαιρικότητα του κερατοειδή κάνει το εισερχόμενο στον οφθαλμό φως να εστιάζεται σε δύο σημεία του αμφιβληστροειδή αντί για ένα σημείο που είναι το φυσιολογικό.

Σε άλλες περιπτώσεις ο αστιγματισμός οφείλεται σε ανωμαλία του φακού (φακικός αστιγματισμός). Συμπτώματα είναι πονοκέφαλος και θολερότητα στην όραση σε όλες τις αποστάσεις.



Εικόνα 1.5: Αστιγματική όραση.

Ο αστιγματισμός χωρίζεται σε:

**A. Σύμφωνα με τω κανόνα** αστιγματισμό κατά τον οποίο τα δυο σημεία στα οποία εστιάζεται το φώς στον οφθαλμό έχουν διαφορά 180 μοιρών.

**B. Παρά τω κανόνα** αστιγματισμό κατά τον οποίο τα σημεία εστίασης μπορεί να έχουν διαφορά μεγαλύτερη ή μικρότερη των 180 μοιρών ή ακόμα χειρότερα να μην είναι καν δυο σημεία αλλά περισσότερα.

Ο αστιγματισμός υπάρχει συνήθως από την γέννηση του ατόμου και μπορεί να παραμείνει στα ίδια επίπεδα ή και να χειροτερέψει με την πάροδο του χρόνου. Ο σύμφωνα με τω κανόνα αστιγματισμός είναι συνήθως απλός στην διόρθωσή του με οφθαλμικούς φακούς, φακούς επαφής (τορικούς ή μη ανάλογα το μέγεθος του προβλήματος) ή διαθλαστική χειρουργική σε αντίθεση με τον αστιγματισμό παρά τω κανόνα που είναι πολύ πιο πολύπλοκος στη φύση του και η διόρθωσή του είναι δυσκολότερη.

Εκτός της φυσιολογικής ύπαρξης αστιγματισμού, υπάρχουν περιπτώσεις τραυματισμού του οφθαλμού που δημιουργούν αστιγματισμό και φυσικά υπάρχει και η περίπτωση του κερατόκωνου η οποία είναι ανωμαλία στον κερατοειδή του ματιού. Στη περίπτωση αυτή ο κερατοειδής όχι μόνο χάνει την καμπυλότητά του αλλά αρχίζει να παίρνει και την μορφή “κόνου” προκαλώντας μεγάλα προβλήματα στην όραση, λόγω της μεγάλης διαφοράς στην καμπυλότητα του κερατοειδή την οποία δημιουργεί.

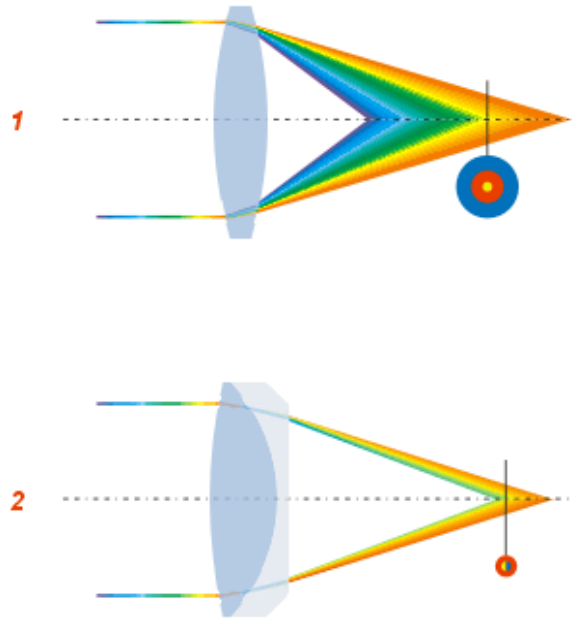
## **1.2.2 Εκτροπές Υψηλής Τάξης**

### **1.2.2.1 Χρωματική Εκτροπή**

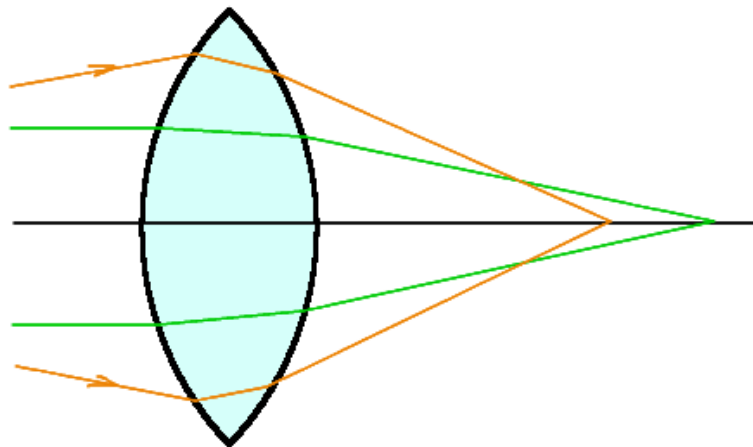
Ο δείκτης διάθλασης του φωτός ποικίλλει στα διάφορα μήκη κύματος και είναι μεγαλύτερος για τις ακτίνες με μικρό μήκος κύματος και μικρότερος για τις ακτίνες με μεγάλο μήκος κύματος. Το λευκό φώς αποτελείται από ακτινοβολίες με διάφορα μήκη κύματος (πολυχρωματικό) και όταν το φώς αυτό περνάει μέσα από έναν σφαιρικό φακό, η διάθλαση που υφίστανται οι διάφορες ακτινοβολίες που το συνιστούν διαφέρει και το φως αναλύεται. Οι ακτίνες με μικρό μήκος κύματος σχηματίζουν εστία πιο κοντά στο φακό και οι ακτίνες με μεγάλο μήκος κύματος πιο

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

μακριά. Έτσι, δεν σχηματίζεται σημειακή εστία αλλά μια έγχρωμη κηλίδα. Οι περισσότερες διαθλώμενες ακτίνες είναι οι ιώδεις και λιγότερο οι ερυθρές.



Εικόνα 1.6: εκτροπή σε οφθαλμικό φακό.



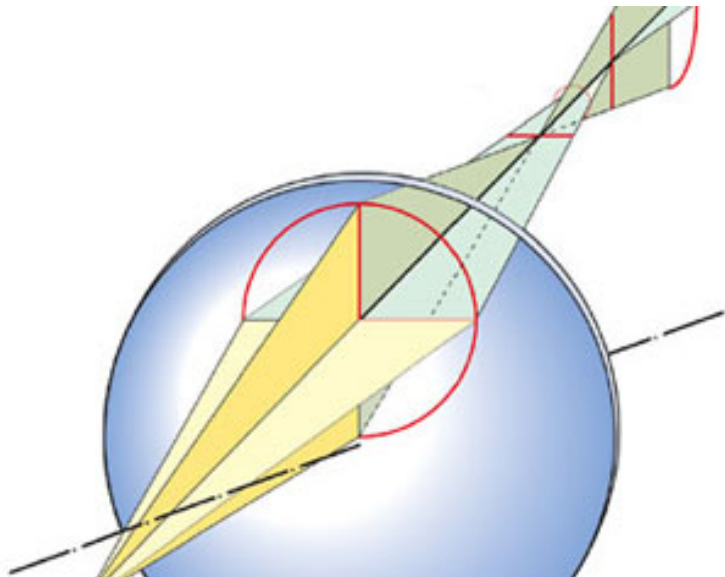
Εικόνα 1.7: : Πορεία ακτινών σε φακό με σφαιρική εκτροπή.

### 1.2.2.2 Σφαιρική Εκτροπή

Οι φωτεινές ακτίνες που περνάνε από την περιφέρεια ενός φακού διαθλώνται περισσότερο από τις κεντρικές με αποτέλεσμα να σχηματίζουν εστία πιο κοντά στον φακό. Έτσι, οι διερχόμενες από τον φακό ακτίνες δεν σχηματίζουν σημειακή εστία αλλά έναν κύκλο σύγχυσης. Η σφαιρική εκτροπή μπορεί να μειωθεί με διάφραγμα που εμποδίζει τις περιφερικές ακτίνες, με κατάλληλη επιλογή των ακτινών καμπυλότητας του φακού και με ασφαιρική κατασκευή του φακού όπου οι επιφάνειες του δεν αποτελούν ακριβώς τμήμα σφαίρας.

### 1.2.2.3. Αστιγματισμός Λοξών Ακτίνων

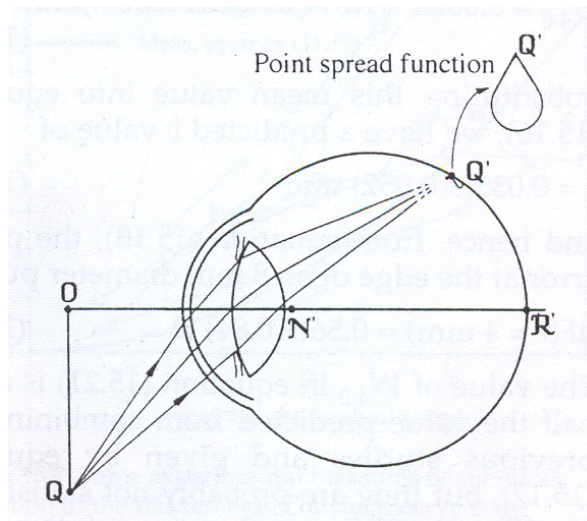
Όταν μια δέσμη ακτίνων διασχίζει τον φακό όχι παράλληλα με τον οπτικό άξονα, αλλά λοξά, δεν συγκεντρώνεται σε μια σημειακή εστία αλλά διαμορφώνεται σε κωνοειδές του Sturm και σχηματίζονται δυο εστιακές γραμμές κάθετες μεταξύ τους και ένας κύκλος ελάχιστης σύγχυσης μεταξύ αυτών. Στην περίπτωση αυτή η δράση του σφαιρικού φακού μοιάζει με την δράση ενός σφαιροκυλινδρικού φακού.



Εικόνα 1.8: Πορεία ακτίνων σε αστιγματική εκτροπή.

#### 1.2.2.4. Κόμα

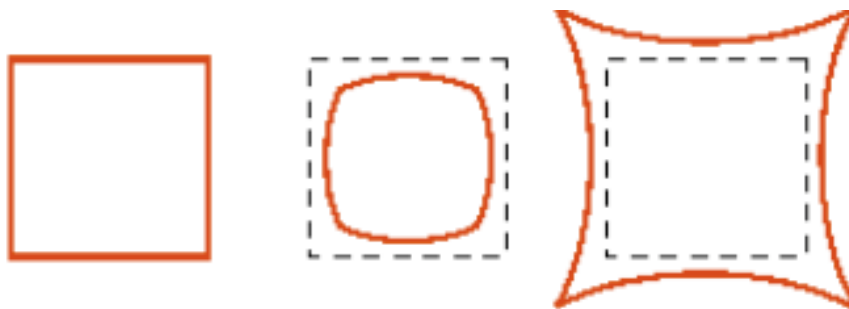
Το κόμα οφείλεται στην επίδραση της σφαιρικής εκτροπής στις λοξές ακτίνες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το είδωλο ενός σημείου που σχηματίζεται από ακτίνες που περνάνε έξω από τον οπτικό άξονα να αποτελείται από αλληλοεπικαλυπτόμενους κύκλους που παίρνουν ένα σχήμα σαν του κομήτη, με φωτεινό κέντρο και λιγότερο φωτεινή ουρά.



Εικόνα 1.9: Κόμη.

#### 1.2.2.5 Παραμόρφωση Ειδώλου

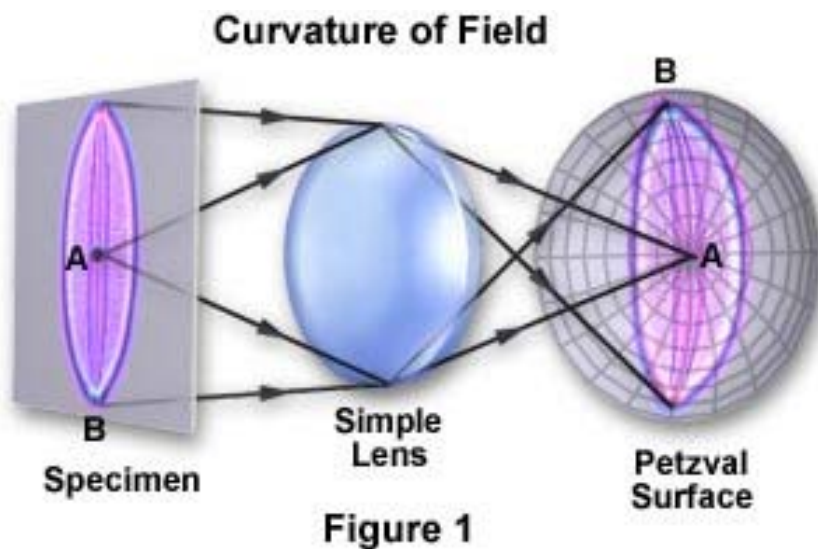
Η μεγέθυνση των αντικειμένων διαφέρει ανάλογα με την απόστασή τους από τον οπτικό άξονα. Ένα αντικείμενο μεγενθυνόμενο περισσότερο στο κέντρο παρά στην περιφέρεια, ή αντίστροφα, παραμορφώνεται. Οι υψηλοί θετικοί φακοί μεγενθύνουν περισσότερο τα περιφερικά τμήματα ενός αντικειμένου, ενώ οι υψηλοί αρνητικοί φακοί τα μικραίνουν.



Εικόνα 1.10: Παραμόρφωση σε θετικούς και αρνητικούς φακούς.

### 1.2.2.6 Καμπύλωση Πεδίου

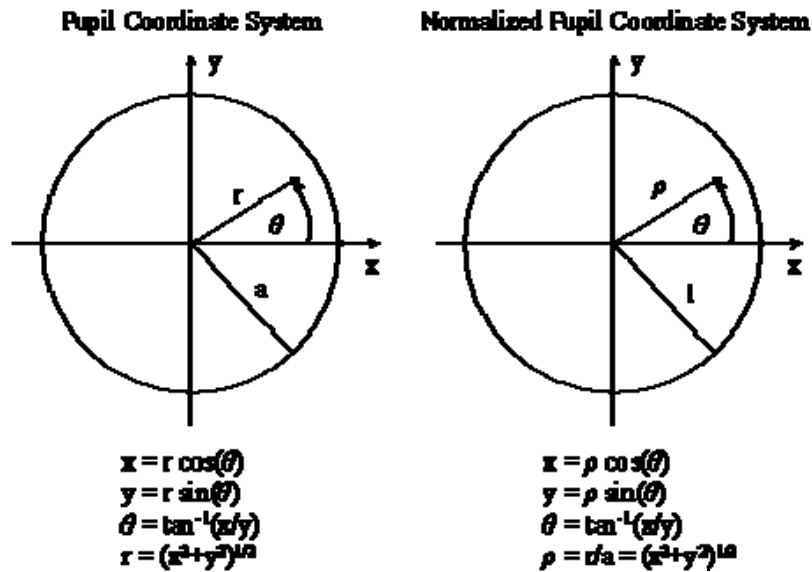
Όλα τα τμήματα ενός επίπεδου αντικειμένου δεν μπορεί να απέχουν εξίσου από μια σφαιρική διαθλαστική επιφάνεια. Σε έναν θετικό φακό οι περιφερικές ακτίνες εστιάζονται πιο κοντά στο φακό και οι κεντρικές πιο μακριά. Έτσι, η εικόνα του αντικειμένου φαίνεται κυρτωμένη προς τα άκρα του φακού. Το αντίθετο συμβαίνει με έναν αρνητικό φακό. Η καμπύλωση αυτή του πεδίου έχει σαν αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο σχηματισμός της εικόνας του αντικειμένου πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια. Προκειμένου να εστιαστούν ακριβώς όλα τα σημεία του αντικειμένου, η επιφάνεια πρέπει να είναι κυρτή.



Εικόνα 2.11: Καμπύλωση πεδίου.

### 1.2.2.7. Ανάλυση σε πολώνυμα Zernike

Ο πλέον συνηθισμένος τρόπος για την αναπαράσταση των εκτροπών ενός οπτικού συστήματος είναι με τη μορφή των εκτροπών ενός μετώπου κύματος. Για τον υπολογισμό των εκτροπών αυτών χρησιμοποιείται το ανάπτυγμα των πολωνύμων Zernike. Τα πολώνυμα αυτά ορίζονται σε πολικές συντεταγμένες ( $\rho, \theta$ ) με  $0 \leq \rho \leq 1$  και  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ , είναι ορθογώνια κανονικοποιημένα και αποτελούν τη βάση του χώρου των συνεχών συναρτήσεων που είναι ορισμένες μέσα στον μοναδιαίο κύκλο (εικόνα 1.12).



Εικόνα 1.12: Κορικό σύστημα συντεταγμένων.

Κάθε πολυώνυμο αποτελείται από τρία στοιχεία. Τον παράγοντα κανονικοποίησης, ένα ακτινικά εξαρτώμενο πολυώνυμο και ένα γωνιακά εξαρτώμενο ημίτονο. Για την κατηγοριοποίηση των πολυωνύμων Zernike χρησιμοποιείται ένα σύστημα συντεταγμένων  $n, m$ . Το  $n$  εκφράζει την τάξη του ακτινικού μέρους, ενώ το  $m$  την συχνότητα του γωνιακού. Χωρίζονται σε μονά και ζυγά και οι σχέσεις που τα περιγράφουν είναι:

$$Z_n^m(\rho, \theta) = N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \cos(m\theta) \quad (1) \quad \text{για } m \geq 0, \quad 0 \leq \rho \leq 1, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad \text{και}$$

$$Z_n^m(\rho, \theta) = -N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \sin(m\theta) \quad (2) \quad \text{για } m < 0, \quad 0 \leq \rho \leq 1, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi.$$

Για κάθε  $n$  το  $m$  μπορεί να πάρει συγκεκριμένες τιμές οι οποίες είναι:  $-n, -n+2, -n+4, \dots, n$ .

Το  $N_n^m$  είναι ο παράγοντας κανονικοποίησης και ισούται με:

$$N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1 + \delta_{m_0}}} \quad (3) \quad \text{με } \delta_{m_0} = 1 \text{ για } m=0 \text{ και } \delta_{m_0} = 0 \text{ για } m \neq 0.$$

Ο πίνακας 1.1 περιέχει τα, μέχρι και 4<sup>ης</sup> τάξης, πολυώνυμα Zernike.

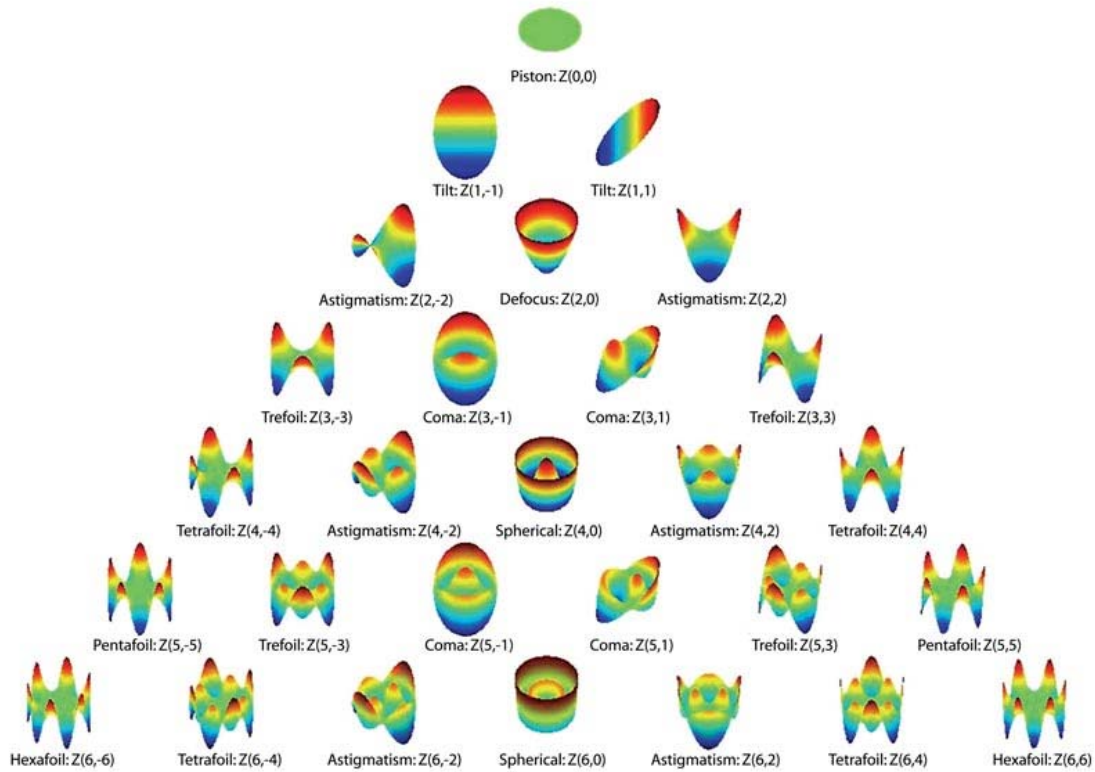


mode	order	frequency		
$j$	$n$	$m$	$Z_n^m(\rho, \theta)$	Meaning
0	0	0	1	Constant term, or Piston
1	1	-1	$2\rho \sin(\theta)$	Tilt in $y$ -direction, Distortion
2	1	1	$2\rho \cos(\theta)$	Tilt in $x$ -direction, Distortion
3	2	-2	$\sqrt{6}\rho^2 \sin(2\theta)$	Astigmatism with axis at $\pm 45^\circ$
4	2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Field curvature, Defocus
5	2	2	$\sqrt{6}\rho^2 \cos(2\theta)$	Astigmatism with axis at $0^\circ$ or $90^\circ$
6	3	-3	$\sqrt{8}\rho^3 \sin(3\theta)$	
7	3	-1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin(\theta)$	Coma along $y$ -axis
8	3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos(\theta)$	Coma along $x$ -axis
9	3	3	$\sqrt{8}\rho^3 \cos(3\theta)$	
10	4	-4	$\sqrt{10}\rho^4 \sin(4\theta)$	
11	4	-2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin(2\theta)$	Secondary Astigmatism
12	4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Spherical Aberration, Defocus
13	4	2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos(2\theta)$	Secondary Astigmatism
14	4	4	$\sqrt{10}\rho^4 \cos(4\theta)$	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	

Πίνακας 1.1 Πολυώνυμα Zernike.

Υπάρχουν, βέβαια, περιπτώσεις κατά τις οποίες χρειάζεται να εκφραστούν τα πολυώνυμα Zernike σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Μία τέτοια περίπτωση είναι οι μετρήσεις με χρήση ενός Shack-Hartmann αισθητήρα μετώπου κύματος. Στη περίπτωση αυτή η πληροφορία από τον αισθητήρα αναπαριστά τις μερικές παραγώγους των εκτροπών του μετώπου κύματος σαν συνάρτηση των  $x, y$ .

Για μετατροπή των πολικών σχέσεων σε καρτεσιανές χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις:  $x = \rho \cos(\theta), y = \rho \sin(\theta)$  και  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ . Επίσης από την τριγωνομετρία είναι γνωστό ότι:  $\cos(m\theta) = 2 \cos[(m-1)\theta] \cos \theta - \cos[(m-2)\theta]$  και ότι  $\sin(m\theta) = 2 \sin[(m-1)\theta] \cos \theta - \sin[(m-2)\theta]$ .



Εικόνα 1.13: Κυματομορφές πολυώνυμων Zernike.

Το σύνολο των εκτροπών ενός μετώπου κύματος εκφράζεται (χρησιμοποιώντας τα παραπάνω) σαν το άθροισμα όλων των επιμέρους εκτροπών που περιέχονται σε αυτό:

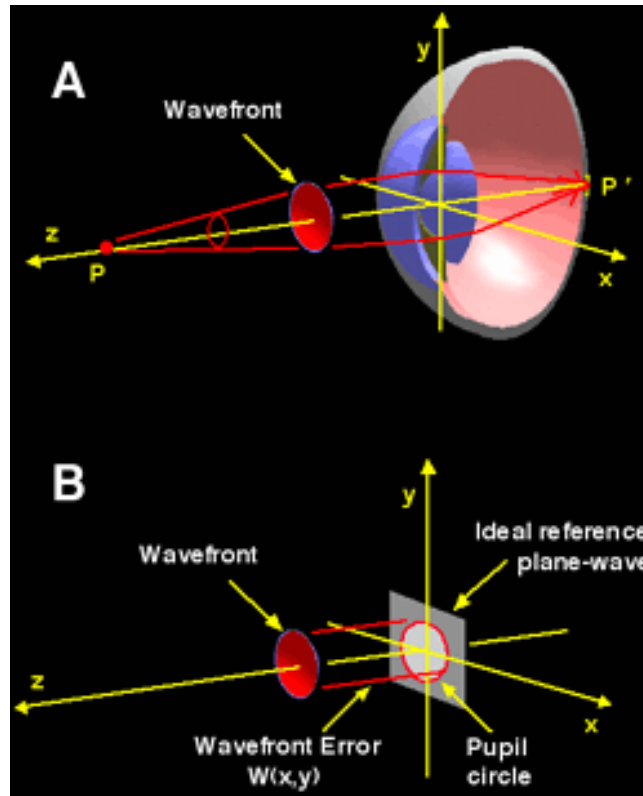
$$W(\rho, \theta) = \sum_n^k \sum_{m=-n}^n W_n^m Z_n^m(\rho, \theta) =$$

$$= \sum_n^k \left\{ \sum_{m=-n}^n W_n^m (-N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \sin(m\theta)) + \sum_{m=-n}^n W_n^m (N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \cos(m\theta)) \right\} \quad (4)$$

Στις παραπάνω σχέσεις k είναι η τάξη του πολυωνύμου του αναπτύγματος,  $W_n^m$  είναι ο συντελεστής του κάθε όρου  $Z_n^m$  και ισούται με το rms (root mean square) σφάλμα αυτού.

### 1.2.2.8 RMS (Root Mean Square) & Seidel Sphere

Ένας τρόπος για να εκτιμήσουμε το σύνολο των εκτροπών ενός μετώπου κύματος είναι το RMS σφάλμα. Το RMS εκφράζει ουσιαστικά την απόκλιση ανάμεσα στο πραγματικό (παρατηρούμενο) και το ιδανικό μέτωπο κύματος.



Εικόνα 1.14: RMS σφάλμα μετώπου κύματος.

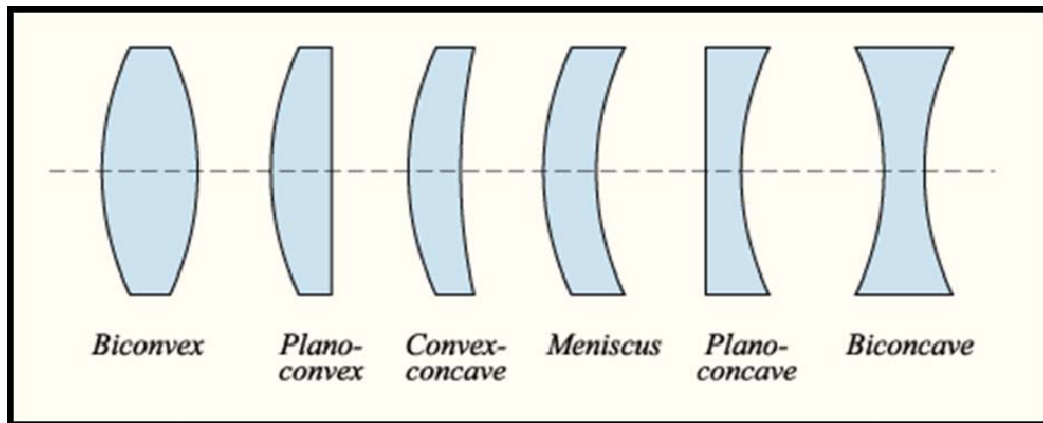
Το RMS σφάλμα ισούται με την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των συντελεστών των πολυωνύμων Zernike των υπάρχουσών εκτροπών. Αν στον υπολογισμό εισαχθούν όλες οι εκτροπές υπολογίζεται το ολικό RMS, Στην περίπτωση που εισαχθούν μόνο οι χαμηλής ή υψηλής τάξης εκτροπές, υπολογίζεται το RMS χαμηλής και υψηλής τάξης αντίστοιχα:  $RMS = \sqrt{\sum (W_n^m)^2}$  (5)

Τέλος ένας παράγοντας που δίνει ακριβείς προβλέψεις για τη διάθλαση είναι η σφαίρα του Seidel. Δίνεται από τη σχέση Seidel Sphere =  $\frac{-c_2^0 4\sqrt{3} + c_4^0 12\sqrt{5}}{r^2}$ . (6)

Τα  $c_2^0$  και  $c_4^0$  εκφράζουν τους συντελεστές των πολυωνύμων Zernike για το σφάλμα εστίασης και τη σφαιρική εκτροπή αντίστοιχα και το  $r$  την ακτίνα της εξεταζόμενης κόρης.

### 1.3 Οφθαλμικοί Φακοί και Διόρθωση

Οι οφθαλμικοί φακοί μαζί με τους φακούς επαφής είναι η συνηθέστερη μέθοδος διόρθωσης των διαθλαστικών σφαλμάτων του οφθαλμού. Ο σχεδιασμός των εμπορικά διαθέσιμων οφθαλμικών φακών διαφέρει ανάλογα με την επιθυμητή διόρθωση (εικόνα 1.15).



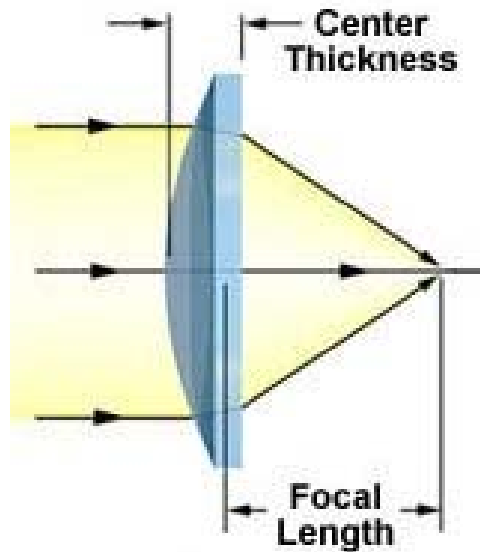
Εικόνα 1.15: Είδη οφθαλμικών φακών.

#### 1.3.1 Κατασκευή Οφθαλμικών Φακών

Οι περισσότεροι φακοί που κυκλοφορούν σήμερα στο εμπόριο είναι οργανικοί. Στο ευρύ κοινό αναφέρονται και ως πλαστικοί. Οι οργανικοί φακοί επικράτησαν των κρυστάλλινων λόγω μεγαλύτερης ασφάλειας και ανθεκτικότητας. Μειονεκτήματά είναι το μεγαλύτερο πάχος και η μεγαλύτερη ευκολία στις χαραγές, τα οποία αντιμετωπίστηκαν με διάφορες τεχνικές. Τέτοιες είναι οι αντιχαρακτικές επιστρώσεις και η λέπτυνση. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζονται φακοί με διαφορετικό δείκτη διάθλασης που δίνει μικρότερο πάχος στις ίδιες διοπτρίες.

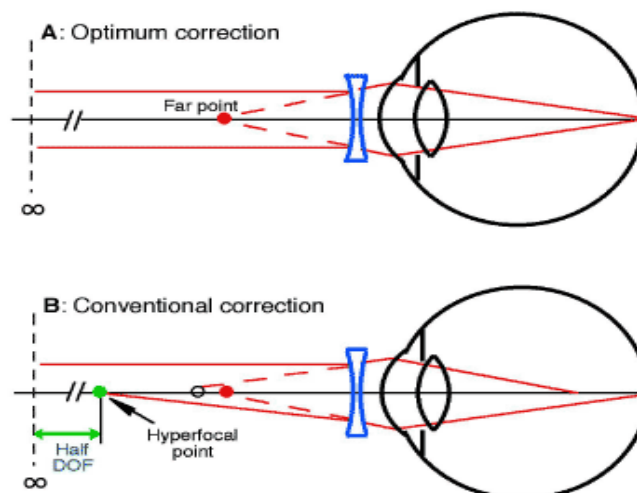
Οι οφθαλμικοί φακοί χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

**Α. Σφαιρικοί Φακοί:** Διακρίνονται σε θετικούς και αρνητικούς. Οι θετικοί είναι παχύτεροι στο κέντρο και λεπτότεροι στην περιφέρεια και προκαλούν σύγκλιση των ακτινών που τους διαπερνούν. Οι αρνητικοί, αντίθετα, είναι λεπτότεροι στο κέντρο και παχύτεροι στην περιφέρεια και προκαλούν απόκλιση των ακτινών που τους διαπερνούν. Κατασκευάζονται σε διάφορους τύπους ανάλογα με την μορφή των επιφανειών τους. Η διαθλαστική δύναμη ενός φακού ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των διαθλαστικών δυνάμεων των δύο επιφανειών του.



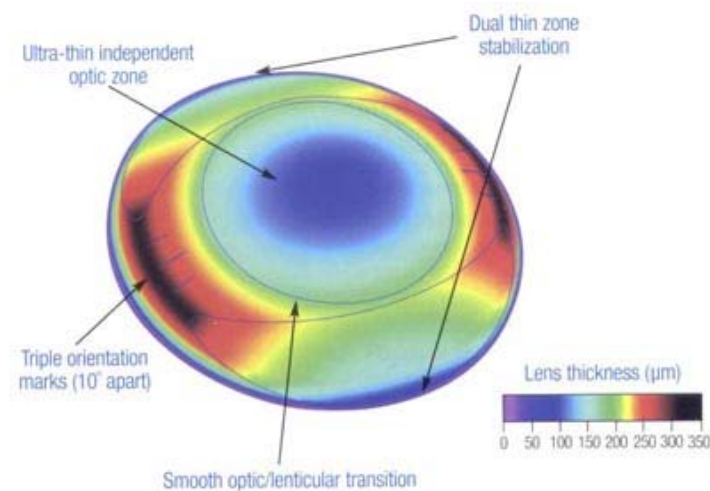
Εικόνα 1.16: Σφαιρικός φακός.

**Β. Κυλινδρικοί:** Οι κυλινδρικοί φακοί έχουν έναν άξονα χωρίς διαθλαστική δύναμη και έναν κάθετο προς αυτόν άξονα που φέρει την μέγιστη διαθλαστική δύναμη του φακού. Κύριος άξονας του φακού θεωρείται αυτός που δεν έχει διαθλαστική δύναμη. Μια παράλληλη δέσμη ακτινών που περνά μέσα από έναν κυλινδρικό φακό δεν συγκεντρώνεται σε ένα σημείο όπως στους σφαιρικούς αλλά κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής παράλληλης προς τον κύριο άξονα του φακού (εστιακή γραμμή). Σαν διαθλαστική δύναμη του φακού θεωρείται η διαθλαστική δύναμη του περισσότερο διαθλαστικού άξονα. Οι κυλινδρικοί φακοί μπορεί να είναι είτε θετικοί είτε αρνητικοί.



Εικόνα 1.17: Κυλινδρικός φακός.

**Γ. Σφαιροκυλινδρικοί ή Τορικοί Φακοί:** Οι φακοί αυτοί αποτελούν συνδυασμό σφαιρικού και κυλινδρικού φακού. Ένας σφαιροκυλινδρικός φακός χαρακτηρίζεται από δύο άξονες με μέγιστη και ελάχιστη διαθλαστική δύναμη. Οι δύο άξονες του σφαιροκυλινδρικού φακού είναι κάθετοι μεταξύ τους. Ο σφαιροκυλινδρικός φακός δεν μεταβάλλει ομοιόμορφα την κλίση μιας φωτεινής δέσμης που τον διαπερνά αλλά της δίνει μια ιδιάζουσα μορφή που ονομάζεται κωνοειδές του Sturm. Το φως δεν εστιάζεται σε ένα σημείο αλλά σχηματίζονται δύο ξεχωριστές εστιακές γραμμές που είναι κάθετες μεταξύ τους. Η απόσταση που χωρίζει τις δύο εστιακές γραμμές ονομάζεται διάστημα του Sturm.

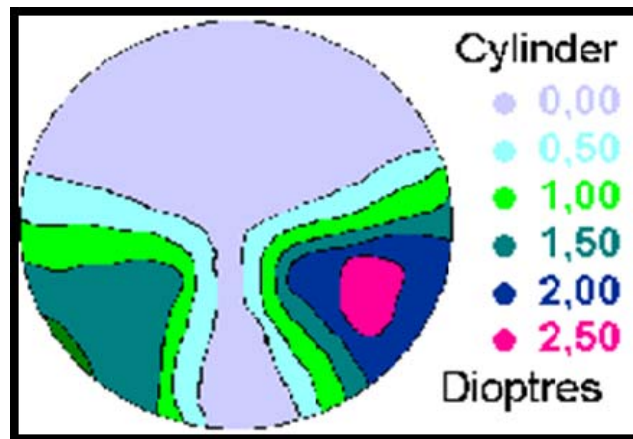


**Εικόνα 1.18: Τορικός φακός.**

**Δ. Πολυεστιακοί Φακοί:** Οι πολυεστιακοί ή προοδευτικοί φακοί χρησιμοποιούνται σε έναν ολοένα και αυξανόμενο αριθμό διοπτροφόρων τα τελευταία χρόνια. Πρόκειται για φακούς που εκτός από την πρεσβυωπική διόρθωση (εστίαση αντικειμένων σε κοντινές και ενδιάμεσες αποστάσεις) προσφέρουν ταυτόχρονα ευκρινή όραση και για μακρινές αποστάσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με διαβάθμιση της διοπτρικής ισχύς που χαρακτηρίζει τον φακό αυτό. Πιο συγκεκριμένα, στο πάνω μέρος του φακού αυτού έχουμε μικρή (ή μεγάλη, όση απαιτείται από τον διοπτροφόρο) διοπτρική ισχύ η οποία όμως αυξάνεται (ή μειώνεται αντίστοιχα) όσο προχωράμε προς το κάτω μέρος του φακού. Κυρίαρχο σημείο είναι το χαμηλότερο μέρος που χρησιμοποιείται για λειτουργίες που απαιτούν κοντινή όραση (π.χ. διάβασμα). Με τη διαβάθμιση αυτή, ο διοπτροφόρος μπορεί κουνώντας απλά πάνω ή κάτω τους οφθαλμούς του να χρησιμοποιήσει την διοπτρική ισχύ που τον εξυπηρετεί κάθε φορά .

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

Στους φακούς αυτούς δεν υπάρχει ο διαχωρισμός σε μακρινό και κοντινό τμήμα, αλλά η διαθλαστική δύναμη παρουσιάζει μια συνεχή προοδευτική αύξηση κατά μήκος του κάτω τμήματος του φακού. Το μακρινό τμήμα συνδέεται με το κοντινό με ένα διάδρομο (corridor) συνεχώς αυξανόμενης δύναμης. Η μεταβολή αυτής της δύναμης προκαλεί προς τα πλάγια του κάτω τμήματος σημαντικές αστιγματικές παραμορφώσεις αλλά και άλλες εκτροπές υψηλής και χαμηλής τάξης. Στην εικόνα 1.19 παρουσιάζεται η μεταβολή της διαθλαστικής δύναμης σε έναν πολυεστιακό φακό.



Εικόνα 1.19: Μεταβολή της ισχύος πολυεστιακού φακού.

Τα πολυεστιακά γυαλιά πλεονεκτούν από λειτουργικής πλευράς γιατί παρέχουν ικανοποιητική όραση στις ενδιάμεσες αποστάσεις, ενώ είναι απαλλαγμένα από τα οπτικά φαινόμενα της διαχωριστικής γραμμής. Ταυτόχρονα προσφέρουν και καλύτερα αισθητικά αποτελέσματα. Μειονεκτούν, όμως, στο περιορισμένο πεδίο και στις οπτικές παραμορφώσεις που είναι ιδιαίτερα ενοχλητικές κατά τις οριζόντιες κινήσεις των ματιών.

Η πρώτη απόπειρα κατασκευής πολυεστιακών φακών καταγράφεται το 1907 στην Μ. Βρετανία. Οι φακοί αυτοί δεν είχαν καμία σχέση με τους μοντέρνους πολυεστιακούς φακούς. Για να επιτύχουν την διαβάθμιση στην διοπτρική ισχύ είχαν κωνική οπίσθια και κυλινδρική πρόσθια επιφάνεια. Το μοντέλο δε γνώρισε καμία επιτυχία σε διοπτροφόρους και εγκαταλείφτηκε. Το 1922 και μετά από αρκετές απόπειρες βελτίωσης του σχεδιασμού και της πρακτικότητας στην εφαρμογή τους, ο δούκας Elder πρότεινε ένα φακό που βασιζόταν σε κατάλληλα διαμορφωμένες σφαιρικές επιφάνειες (Ultrifo).

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

Το επόμενο εμπορικό προϊόν εμφανίζεται το 1950 στην Ιταλία. Ονομαζόταν Varifocal και βασιζόταν στο πρώτο μοντέλο πολυεστιακών που αναφέρθηκε παραπάνω. Παρουσίαζε όμως αρκετές παραλλαγές, όπως το ότι μόνο η πρόσθια επιφάνεια του φακού επεξεργαζόταν.

Ο πρώτος μοντέρνας τεχνολογίας πολυεστιακός φακός ήταν ο Varilux που δημιουργήθηκε από τον Bernard Maitenaz το 1959. Ο φακός αυτός έφερε την επανάσταση στη τεχνολογία των πολυεστιακών φακών και εξυπηρετούσε σε πολύ μεγάλο βαθμό τους διοπτροφόρους, καλύπτοντας μεγάλο ποσοστό των απαιτήσεων τους. Βασιζόμενοι στο μοντέλο αυτό, οι κατασκευαστές, από το 1980 μέχρι σήμερα, έχουν επιτύχει σημαντική μείωση των εμφανιζόμενων εκτροπών, σημαντικές βελτιώσεις στην κατασκευαστική τους μέθοδο, μεγάλη ανεκτικότητα από τους διοπτροφόρους και τεράστια ευκολία και ακρίβεια στην κατασκευή τους.

Ένας πολυεστιακός φακός είναι σχεδιασμένος να παρέχει ευκρινή όραση σε όλες τις αποστάσεις, σε αντίθεση με τις προκαθορισμένες αποστάσεις που χρησιμοποιούνται στους διπλοεστιακούς και τριπλοεστιακούς φακούς. Ένας τριπλοεστιακός φακός ποτελείται από 3 ξεχωριστές εστίες. Την εστία για μακρυά, την προοδευτική εστία ή αλλιώς εστία των μεσαίων αποστάσεων και την εστία για κοντινές αποστάσεις. Σε αντίθεση με τους τριπλοεστιακούς φακούς, στους πολυεστιακούς φακούς η ενδιάμεση “ζώνη” παρέχει αυξανόμενη διοπτρική ισχύ από την μακρινή προς την κοντινή εστίαση και κάνει την εναλλαγή μεταξύ αυτών των αποστάσεων προσήλωσης πιο ομαλή. Το ποσοστό κατά το οποίο αυξάνεται η διοπτρική ισχύς μετά την ενδιάμεση ζώνη (addition) εξαρτάται από τον κανόνα στον οποίο υπακούει ο σχεδιασμός του πολυεστιακού φακού. Μπορεί δηλαδή η αύξηση της διοπτρικής ισχύος να είναι γραμμικής μορφής, ή πιο πολύπλοκη επιτυγχάνοντας μικρότερη ή μεγαλύτερη διοπτρική ισχύ μετά την ενδιάμεση εστία, ανάλογα με τις απαιτήσεις του διοπτροφόρου.

Υπάρχουν 2 βασικές κατηγορίες σχεδιασμού πολυεστιακών φακών.

1. “**Σκληρού**” σχεδιασμού
2. “**Μαλακού**” σχεδιασμού.

Οι κατηγορίες αυτές είναι άμεσα εξαρτώμενες από το ποσοστό θολερότητας και παραμορφώσεων που παρουσιάζεται στις περιφερικές εστίες του φακού. Οι



## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

πρόσθιες επιφάνειες των φακών αποτελούνται από πολύπλοκες σειρές καμπυλών οι οποίες και “ενώνονται” στις λιγότερο χρήσιμες και απαιτητικές περιοχές του φακού, δηλαδή στην περιφέρεια.

Οι φακοί σκληρού σχεδιασμού έχουν πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις στην περιφέρεια, γεγονός που προσφέρει πολύ καθαρότερη μακρινή όραση και καλύτερη όραση κατά την ανάγνωση. Από την άλλη υστερεί στις ενδιάμεσες αποστάσεις και δίνει την αίσθηση της κίνησης σε νερό. Οι πολύ μεγάλες και ενοχλητικές παραμορφώσεις των φακών αυτών επιδιορθώθηκαν με τη κατασκευή των “μαλακών” φακών. Οι φακοί αυτοί έχουν αυξημένες περιφερικές διαμέτρους με αποτέλεσμα η θολούρα και οι εκτροπές να βρίσκονται στην ουσία έξω από το οπτικό πεδίο του διοπτροφόρου σε πολύ μεγάλο ποσοστό και έτσι να μην γίνονται αντιληπτές.

Οι διαφορετικές ανάγκες, ανάλογα με το είδος του διαθλαστικού σφάλματος, δεν επιτρέπουν την επικράτηση κάποιου είδους σε σχέση με το άλλο. Εκεί που υστερεί η μια πλεονεκτεί η άλλη και το αντίθετο. Για παράδειγμα, ένας μύωπας έχει καλύτερη προσαρμογή από έναν υπερμέτρωπα και δεν χρήζει διόρθωσης για κοντινές αποστάσεις όσο για μακρινές. Το αντίθετο ισχύει για τον υπερμέτρωπα. Έτσι ένας συνδυασμός των 2 τύπων κατασκευής θα αποτελούσε τον ιδανικότερο πολυεστιακό φακό. Ένα γεγονός που μείωνε την εμπορικότητα των πολυεστιακών φακών ήταν ότι ο σκελετός στον οποίο θα εφαρμόζονταν οι φακοί δεν μπορούσε να έχει μέγεθος μικρότερο από αυτό που ήταν απαραίτητο για να χωρέσει επαρκώς και τις 3 βασικές εστίες του φακού. Το γεγονός αυτό οδηγούσε τους ενδιαφερόμενους σε μεγάλους, αντιαισθητικούς και πολλές φορές μη πρακτικούς σκελετούς. Με τη πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη της τεχνολογίας το πρόβλημα ξεπεράστηκε, “στριμώχνοντας” ολοένα και περισσότερο τις εστίες μεταξύ τους.

### 1.3.2 Υλικά κατασκευής φακών

Τα υλικά κατασκευής των οφθαλμικών φακών μπορούν να χωριστού σε υλικά από γυαλί και υλικά από πλαστικό.

#### α. Οφθαλμικοί φακοί από γυαλί:

**Στεφανύαλος (crown glass):** Αποτελεί το τυπικό είδος γυαλιού για την κατασκευή οφθαλμικών φακών. Λόγω του χαμηλού δείκτη διάθλασης σε σχέση με

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

άλλα υλικά (εκτός του CR39), οι φακοί από στεφανύαλο είναι παχύς και βαρείς, στη περίπτωση μεγάλων διορθώσεων. Η χρήση αυτού του υλικού έχει τελευταία περιοριστεί.

**Γυαλί με υψηλό δείκτη διάθλασης.** Κατασκευάστηκε για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του πάχους των ισχυρών φακών. Είναι διαθέσιμο σε 1.6, 1.7 και 1.8 δείκτες διάθλασης. Τα υλικά με υψηλό δείκτη διάθλασης μειώνουν το περιφερικό πάχος των αρνητικών φακών και το κεντρικό πάχος των θετικών. Στους φακούς αυτούς, ωστόσο, χρησιμοποιείται οξειδίο του τιτανίου και έχουν μεγαλύτερο ειδικό βάρος από την στεφανύαλο. Έτσι, ένας φακός από γυαλί με υψηλό δείκτη διάθλασης μπορεί να είναι πολύ λεπτότερος και ταυτόχρονα βαρύτερος από ένα φακό από στεφανύαλο. Άλλο μειονέκτημα των φακών αυτών είναι ο χαμηλός αριθμός του Abbe, κάτι που συνεπάγεται μεγάλη χρωματική εκτροπή στην περιφέρεια στη περίπτωση υψηλών διορθώσεων. Για τους παραπάνω λόγους συνίσταται η τοποθέτηση των φακών αυτών σε μικρούς σκελετούς.

**Flint.** Παλαιότερος τύπος γυαλιού με υψηλό δείκτη διάθλασης. Κατασκευάζεται με προσθήκη οξειδίων του μολύβδου στο μίγμα του γυαλιού. Σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι δεν είναι δυνατή η επεξεργασία για αύξηση της αντοχής του στη θραύση, όπως το γυαλί με οξείδια τιτανίου. Σήμερα χρησιμοποιείται μόνο εργαστηριακά για προστασία των τεχνικών ακτινολογικών μηχανημάτων από τις ακτίνες X.

### **β. Οφθαλμικοί φακοί από πλαστικό**

**CR-39.** Το υλικό αυτό αποτελεί το τυπικό είδος πλαστικού για την κατασκευή οφθαλμικών φακών. Το CR-39 έχει πιο χαμηλό δείκτη διάθλασης από την στεφανύαλο και οι φακοί από αυτό το υλικό είναι παχύτεροι. Ωστόσο, το CR-39 έχει το μισό, περίπου, ειδικό βάρος από την στεφανύαλο, με αποτέλεσμα οι φακοί τελικά να έχουν το μισό, σχεδόν, βάρος.

Οι φακοί από CR-39 όπως και αυτοί από στεφανύαλο έχουν τους μεγαλύτερους αριθμούς Abbe από όλα τα υλικά οφθαλμικών φακών κάτι που μεταφράζεται σε μικρότερη χρωματική εκτροπή, κάτι που δεν έχει σημασία για φακούς με δύναμη χαμηλότερη από  $\pm 5.00 \pm 6.00D$ .

**Polycarbonate.** Το υλικό αυτό έχει μεγάλη αντοχή στη θραύση, υψηλό δείκτη διάθλασης (1.59) και χαμηλό ειδικό βάρος (1.20). Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν την κατασκευή πολύ λεπτών και ελαφρών φακών. Η μεγάλη αντοχή στη θραύση επιτρέπει την κατασκευή αρνητικών φακών με πολύ μικρό κεντρικό πάχος (έως και 1mm) κάτι που μειώνει ακόμα περισσότερο το ολικό πάχος και βάρος του φακού. Παρουσιάζει χαμηλό αριθμό Abbe και συνεπώς μεγαλύτερη περιφερική χρωματική εκτροπή από άλλα υλικά, που γίνεται αισθητή σε υψηλές διορθώσεις.

**Πλαστικά με υψηλό δείκτη διάθλασης.** Τα πλαστικά αυτά διατίθενται με δείκτες διάθλασης 1.54, 1.56, 1.58, 1.60 και 1.67. Έχουν πολύ χαμηλό ειδικό βάρος. Οι αριθμοί Abbe των υλικών αυτών ποικίλλουν. Όλα όμως έχουν χαμηλότερους αριθμούς Abbe από την στεφανύαλο και το CR-39 και υψηλότερους από το polycarbonate. Για τη κατασκευή θετικών φακών οι περισσότεροι κατασκευαστές χρησιμοποιούν ασφαιρικές πρόσθιες επιφάνειες. Οι φακοί που προκύπτουν είναι ελαφρύτεροι και λεπτότεροι, λόγω του υψηλού δείκτη διάθλασης και του χαμηλού ειδικού βάρους. Ταυτόχρονα η ασφαιρική πρόσθια επιφάνεια επιτρέπει ένα λεπτότερο προφίλ του φακού κάτι που μειώνει τις περιφερικές εκτροπές των υψηλών θετικών φακών.

### 1.3.3 Πρόσθετα Χαρακτηριστικά

Ένας οπτικός φακός εκτός από την διοπτρική ισχύ και τον τρόπο κατασκευής του, χαρακτηρίζεται και από άλλα στοιχεία τα οποία τον προσδιορίζουν και του προσδίδουν τις ιδιότητες του.

#### α. Δείκτης Διάθλασης

Ο δείκτης διάθλασης καθορίζει το πόσο μειώνεται η ταχύτητα της ακτίνας του φωτός καθώς περνάει μέσα από ένα υλικό. Πιο συγκεκριμένα είναι η αριθμητική έκφραση του πηλίκου της ταχύτητας του φωτός μέσω ενός διαφανούς υλικού προς την ταχύτητα του φωτός στον αέρα. Καθώς ο δείκτης διάθλασης αυξάνεται, μειώνεται το πάχος του φακού για μια δεδομένη διαθλαστική δύναμη. Ο απλός φακός CR39 έχει δείκτη διάθλασης 1.49. Στο εμπόριο οι φακοί φτάνουν μέχρι έως 1.71 ή και περισσότερο κάτω από ειδικές συνθήκες. Κατά την ανάλυση των μετρήσεων θα αναφερθούν τα μειονεκτήματα των φακών αυτών, οι οποίοι έχουν μικρό πάχος αλλά

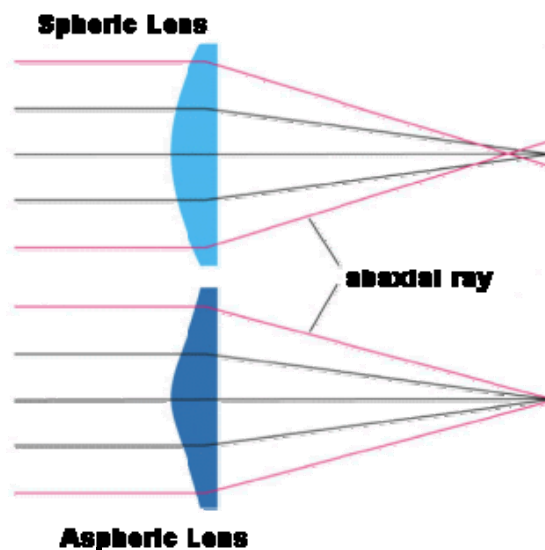
αυξημένες εκτροπές, κυρίως περιφερικά. Η χρήση των φακών αυτών προτείνεται, για αισθητικούς λόγους, στη περίπτωση πολύ υψηλών διορθώσεων.

### **β. Abbe Number**

Ο αριθμός Abbe είναι μια σταθερά που εξαρτάται από το υλικό του φακού. Ισούται με το αντίστροφο της δύναμης χρωματικής διασποράς. Όσο πιο μικρός είναι ο αριθμός αυτός τόσο μεγαλύτερη είναι η χρωματική διασπορά του φακού.

### **γ. Ασφαιρική Επιφάνεια**

Οι οφθαλμικοί φακοί είναι κατά βάση σφαιρικοί. Είναι δηλαδή διαμορφωμένοι κατά την παραγωγή τους από μια απλή σφαιρική επιφάνεια. Ο μόνος τρόπος για να διαμορφώσουμε τα χαρακτηριστικά ενός απλού σφαιρικού φακού είναι με την αλλαγή της καμπυλότητας του. Στον σχεδιασμό των φακών χρησιμοποιείται και μια μέθοδος κατασκευής μη σφαιρικών φακών. Η μέθοδος αυτή δίνει την ασφαιρική επιφάνεια. Οι φακοί με ασφαιρικές επιφάνειες είναι συμμετρικοί στην περιφέρεια και την διάμετρο τους αλλά όχι και σφαιρικοί. Ενώ ο σφαιρικός φακός αποτελεί τμήμα μιας σφαιρικής επιφάνειας, ο ασφαιρικός είναι ουσιαστικά ελλειπτικός. Πιο συγκεκριμένα αποτελεί σημείο της τομής ενός κώνου. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι μια πολύ πιο επίπεδη και συμμετρική επιφάνεια, όσον αφορά την καμπυλότητα σε όλα τα τμήματα του φακού.



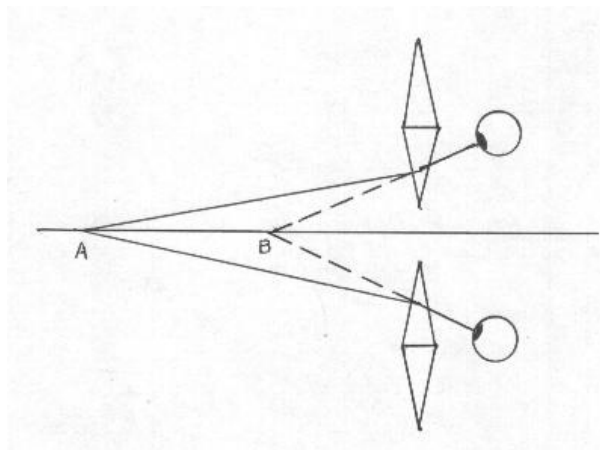
Εικόνα 1.20: Ασφαιρικός φακός.

#### **δ. Ατορικοί φακοί**

Οι ατορικοί φακοί προϋποθέτουν την ύπαρξη κυλίνδρου για την διόρθωση αστιγματισμού. Ατορικοί είναι οι φακοί με αστιγματική διόρθωση στους οποίους τουλάχιστον ένα τεταρτημόριό τους δεν είναι σφαιρικής κατασκευής.

#### **ε. Πρισματικό Φαινόμενο**

Ένας φακός αποτελείται, ουσιαστικά, από άπειρο αριθμό πρισμάτων των οποίων η δύναμη αυξάνει προοδευτικά από το κέντρο προς την περιφέρεια. Ένα αντικείμενο που παρατηρείται από ένα περιφερικό σημείο ενός φακού φαίνεται παρεκτοπισμένο προς την περιφέρεια του, αν ο φακός είναι θετικός, ή προς το κέντρο αν ο φακός είναι αρνητικός. Η πρισματική εκτροπή που υφίσταται η εικόνα ενός αντικειμένου αυξάνει όσο περιφερικότερο είναι το σημείο του φακού μέσα από το οποίο φαίνεται το αντικείμενο και όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη του φακού. Η πρισματική δράση ενός φακού στο οπτικό του κέντρο είναι 0. Η πρισματική δράση, σε οποιοδήποτε σημείο του φακού, ισούται με το γινόμενο της απόστασης του σημείου αυτού από το οπτικό κέντρο (σε cm) επί την διαθλαστική δύναμη του φακού. (Τύπος του Prentice). Παραδείγματος χάριν η πρισματική εκτροπή ενός φακού +10.0D σε απόσταση 5mm κάτω από το οπτικό κέντρο του είναι 5Δ (όπου Δ είναι η μονάδα μέτρησης πρισματικού φαινομένου) βάση άνω. Αν ο φακός ήταν αρνητικός, η πρισματική δράση στο ίδιο σημείο θα ήταν βάση κάτω. Η πρισματική δράση στους κυλινδρικούς και σφαιροκυλινδρικούς φακούς υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την απόσταση του σημείου αυτού από το οπτικό κέντρο με την διαθλαστική δύναμη του μεσημβρινού του φακού που περνάει από το σημείο αυτό.



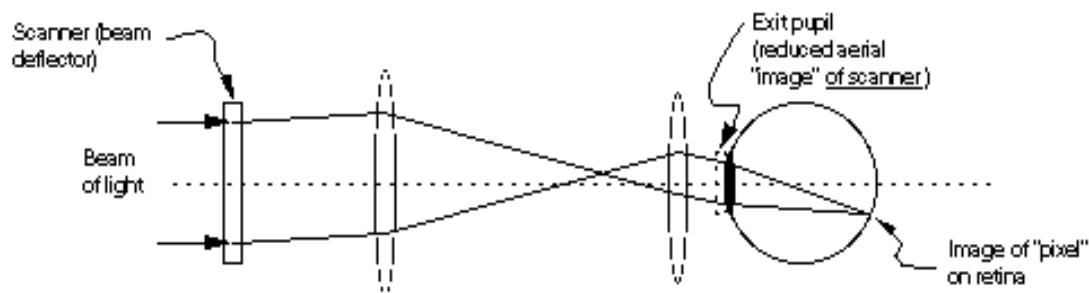
**Εικόνα 1.21: Πρισματικό φαινόμενο.**

## 1.4 Μέθοδοι Αξιολόγησης Οφθαλμικών Φακών

Το οπτικό σύστημα του οφθαλμού σε κάθε περίπτωση πάσχει από οπτικές εκτροπές οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα της όρασης. Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την μέτρηση των οπτικών εκτροπών οι οποίες δίνουν, εν γένει, αντίστοιχα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιηθούν συγκριτικά στους ίδιους οφθαλμούς. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας των βασικότερων μεθόδων για την απευθείας μέτρηση των συνολικών οπτικών εκτροπών στον ανθρώπινο οφθαλμό. Σε όλες τις περιπτώσεις άξονας αναφοράς για τη μέτρηση και την απεικόνιση των εκτροπών είναι η γραμμή όρασης του μετρούμενου οφθαλμού.

### 1.4.1 Retinal Ray Tracing (RRT)

Στην τεχνική αυτή η δέσμη ενός διοδικού laser εισάγεται στον οφθαλμό παράλληλα με τον οπτικό άξονα διαδοχικά από διαφορετικά σημεία εισόδου (εικόνα 1.22) . Λόγω των εκτροπών η δέσμη δεν θα συναντήσει τον αμφιβληστροειδή στο σημείο τομής του με τη γραμμή όρασης (κεντρικό βοθρίο) αλλά σε κάποιο άλλο σημείο στο οποίο θα δημιουργήσει μια δευτερογενή πηγή σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Η κατεύθυνση διάδοσης του επιστρέφοντος κύματος εξαρτάται από την θέση της δευτερογενούς πηγής. Με χρήση συστήματος φακών των οποίων ο ρόλος είναι να συζεύξουν οπτικά το επίπεδο του αμφιβληστροειδή με αυτό του δέκτη μιας CCD camera μετράται η απόσταση του κεντροειδούς της δευτερογενούς πηγής από το κεντρικό βοθρίο. Από την απόσταση αυτή υπολογίζεται η εγκάρσια εκτροπή για το σημείο εισόδου της δέσμης. Μέσω της διαδοχικής μέτρησης των εγκάρσιων εκτροπών για διαφορετικά σημεία εισόδου χαρτογραφούνται οι συνολικές εκτροπές του οπτικού συστήματος του οφθαλμού.



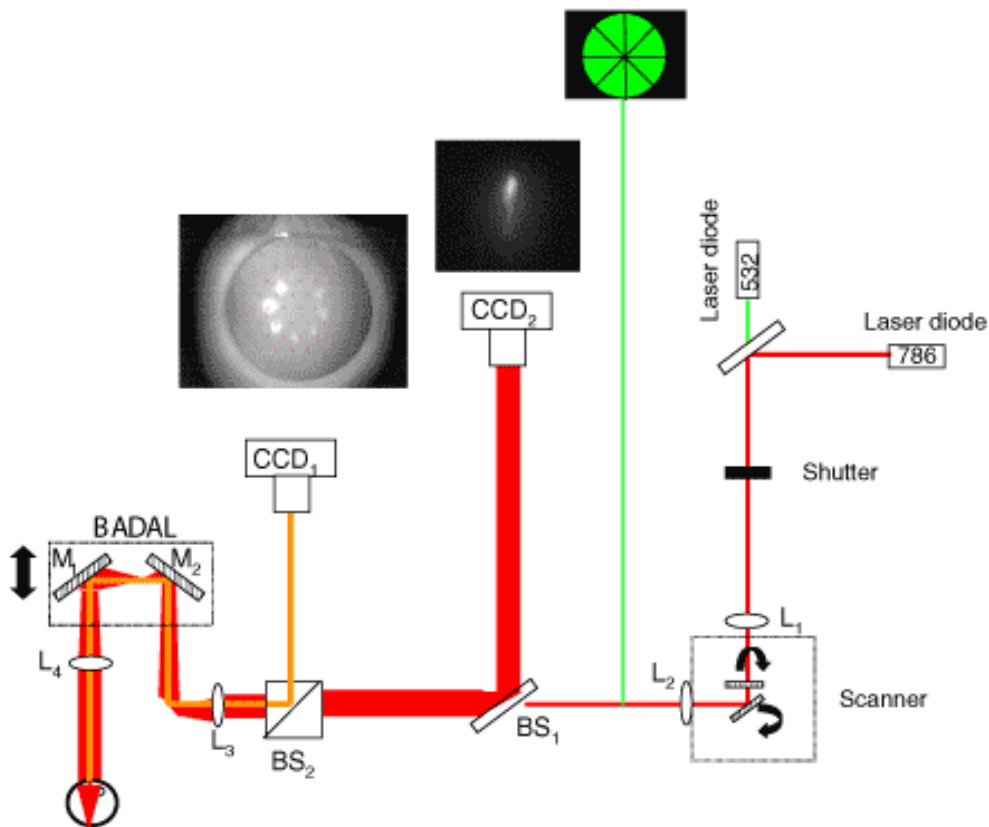
Εικόνα 1.22: Retinal Ray Tracing.

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

Για την λήψη μιας μέτρησης χρησιμοποιούνται 95 διαφορετικά σημεία εισόδου ενώ ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την διαδοχική σάρωση των σημείων αυτών είναι της τάξης των 20msec.

### 1.4.2. Εκτροπομετρία Tscherning

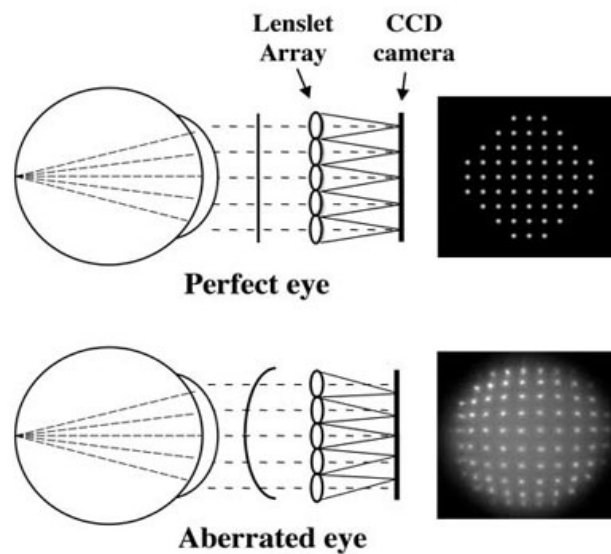
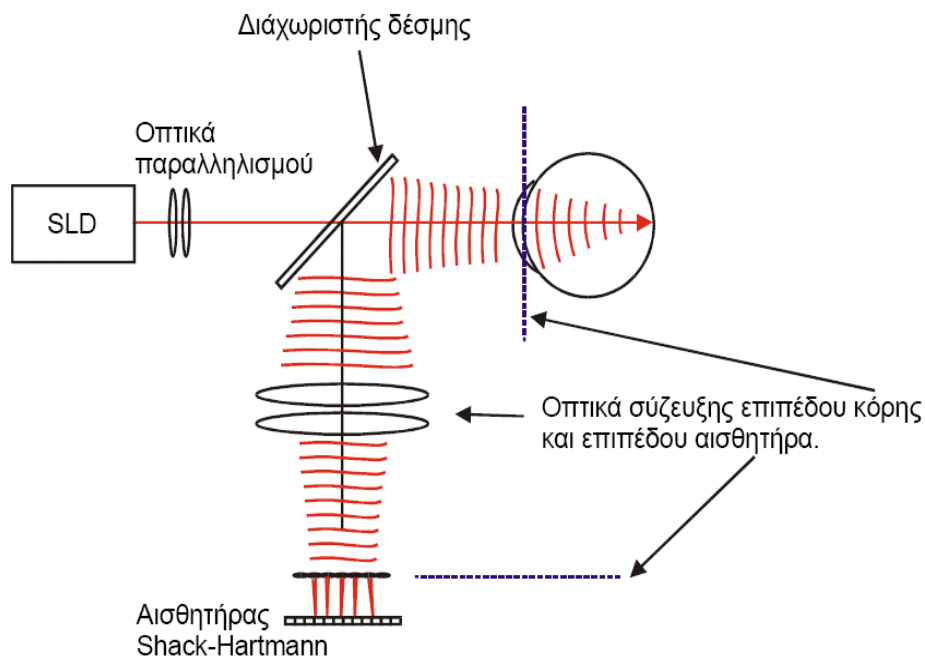
Η εκτροπομετρία Tscherning είναι μια μέθοδος παρόμοια με την προηγούμενη με την διαφορά ότι οι δέσμες αντί να προβάλλονται διαδοχικά, προβάλλονται και ανιχνεύονται όλες ταυτόχρονα. Προκειμένου να είναι σαφής η αντιστοιχία των σημείων τομής των δεσμών εισόδου με τις κηλίδες στον αμφιβληστροειδή, οι δέσμες εστιάζονται πριν τον αμφιβληστροειδή με την χρήση ενός φακού. Το σύνολο των κηλίδων στον αμφιβληστροειδή απεικονίζεται σε μια κάμερα υψηλής ευαισθησίας. Η επεξεργασία των εικόνων με χρήση ειδικού λογισμικού οδηγεί στον υπολογισμό των οπτικών εκτροπών του οφθαλμού.



Εικόνα 1.23: Εκτροπόμετρο Tscherning.

### 1.4.3 Εκτροπομετρία Shack-Hartmann

Η εκτροπομετρία Shack – Hartmann χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τη μέτρηση των εκτροπών που προκαλούνται στα αστρονομικά τηλεσκόπια από διαταραχές του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας. Για τη μέτρηση των οφθαλμικών εκτροπών χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1994 από τον Liang και τους συνεργάτες του. Κεντρικό εξάρτημα αυτών των συστημάτων είναι ο αισθητήρας Shack – Hartmann η λειτουργία του οποίου παρουσιάζεται σχηματικά στην ακόλουθη εικόνα.



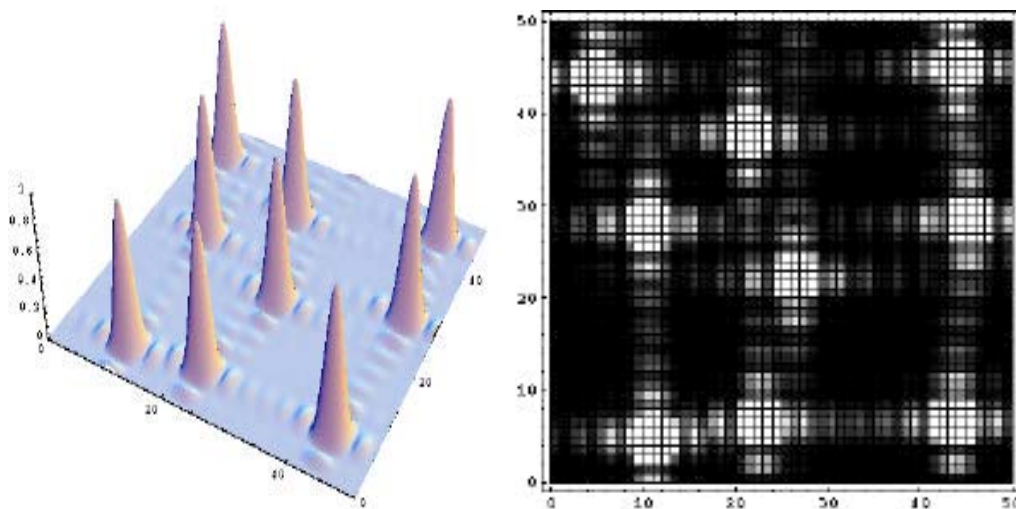
Εικόνα 1.24: Αρχή λειτουργίας Shack-Hartmann αισθητήρα μετώπου κύματος.



## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

Στα συστήματα μέτρησης των εκτροπών του οφθαλμού που η λειτουργία τους βασίζεται σε αισθητήρα Shack – Hartmann, χρησιμοποιείται μια φωτοδίοδος υπερυψηλής λαμπρότητας (SLD: Super Luminance Photodiode) η ακτινοβολία της οποίας εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή μέσω κατάλληλων οπτικών στοιχείων. Η ανακλώμενη ακτινοβολία οδηγείται στον αισθητήρα μέσω οπτικού συστήματος το οποίο απεικονίζει το επίπεδο της κόρης του οφθαλμού στο επίπεδο της διάταξης των μικροφακών του αισθητήρα. Από την διάταξη των κηλίδων στο επίπεδο της κάμερας του αισθητήρα, υπολογίζεται η παραμόρφωση του μετώπου κύματος. Η γεωμετρική θέση του κάθε εστιακού αυτού σημείου σχετίζεται με την τοπική κλίση του μετώπου κύματος και είναι ανάλογη της παραγώγου του μετώπου κύματος σε αυτή την θέση. Με τον τρόπο αυτό η παραμόρφωση του μετώπου κύματος που μετράται από τον αισθητήρα αντιστοιχεί στις εκτροπές του οφθαλμού όταν αυτές έχουν αναχθεί στο επίπεδο της κόρης.

Η διακριτική ικανότητα του συστήματος καθορίζεται από το πλήθος των μικροφακών που χρησιμοποιούνται για την δειγματοληψία του μετώπου κύματος. Η παρακάτω εικόνα 1.25 παριστά το αποτέλεσμα από την διαδρομή της ακτίνας μέσα από ένα σύστημα 9 οπτικών. Εάν το σύστημα έχει μικρές εκτροπές τότε αποκλίνει από το κέντρο του συστήματος των κουκίδων αλλά σε περίπτωση μεγάλων εκτροπών οι αποκλίσεις από το εστιακό σημείο είναι τεράστιες και είναι δύσκολο να ταξινομηθούν (σχήμα 1.25β).



Εικόνα 1.25: Απεικόνιση σημειακών κουκίδων αισθητήρα μετώπου κύματος.

## 1.5 Ανασκόπηση πεδίου

Στο παρελθόν έχουν γίνει προσπάθειες αξιολόγησης των εκτροπών σε έναν φακό είτε με Hartmann-Shack εκτροπόμετρο είτε με απλό φακόμετρο. Οι πρώτες έρευνες δεν έγιναν με κανενός είδους εκτροπόμετρο αλλά με αυτοματοποιημένα φακόμετρα και στόχευαν στην μέτρηση κυρίως του αστιγματισμού που αναπτύσσεται όσο απομακρυνόμαστε από την κύρια εστία του φακού. Ένα τέτοιο φακόμετρο ήταν και το Humphrey Lens Analyzer. Οι μετρήσεις που παίρνονταν με τον τρόπο αυτό ήταν αρκετά αξιόπιστες αλλά για φακούς από 3 διοπτρίες και κάτω. Για παράδειγμα, για περιστροφή ενός φακού 3 διοπτριών κατά 30 μοίρες είχαμε 0.1 διοπτρία απόκλιση. Για την αντίστοιχη περιστροφή όμως σε έναν φακό 6 διοπτριών η απόκλιση ήταν πολύ υψηλή, της τάξης των 0.5 διοπτριών. Μια τέτοια έρευνα έγινε το 1991 στην αμερικανική ακαδημία οπτομετρίας από τον David Atchison και τους συνεργάτες του. Οι μετρήσεις με το Humphrey Lens Analyzer έγινε με τρεις διαφορετικούς τρόπους: α) με οριζόντια σάρωση του προς μέτρηση φακού από το φακόμετρο για 81 σημεία (Topcon LM6), β) με ειδική περιστρεφόμενη βάση που έστρεφε τον φακό οριζόντια ή κάθετα και απόσταση 27 χιλιοστών από το φακόμετρο για να εξομοιώσει το περιστρεφόμενο μάτι (οι μετρήσεις έγιναν και εδώ για 81 σημεία), και γ) με μέτρηση των επιφανειακών αντανakλάσεων του φακόμετρου για τα 81 ίδια σημεία.

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας για τους πολυεστιακούς φακούς και για τις τρεις μεθόδους μας δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα όσων αφορά τις αστιγματικές εκτροπές. Θεωρητικά οι μετρήσεις με την περιστρεφόμενη βάση στο φακόμετρο είναι οι καλύτερες γιατί είναι οι μόνες που προσπαθούν να εξομοιώσουν την κίνηση του ανθρώπινου οφθαλμού. Το φακόμετρο διάθλασης της επιφάνειας του φακού έχει το πλεονέκτημα ότι μετράει μόνο τις εκτροπές στην επιφάνεια του φακού ακόμα και αν υπάρχουν διαφορές στην διοπτρική ισχύ στην πίσω επιφάνεια του φακού.

Έρευνες για τις εκτροπές σε μονοεστιακής όρασης φακούς αλλά και σε πολυεστιακούς με εκτροπόμετρο Hartmann-Shack έγιναν από τους Elloy A. Villegas και Pablo Artal στο πανεπιστήμιο της Μούρθια στην Ισπανία. Στην εν λόγω εργασία, μετρήθηκαν 3 διαφορετικού σχεδιασμού πολυεστιακοί φακοί για 20 σχετικές μεταξύ τους περιοχές με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann. Οι μετρήσεις αφορούσαν τις εκτροπές στους φακούς, το RMS και το point spread function. Σε γραφικές

παραστάσεις παρατίθενται τα αποτελέσματα για το RMS τον αστιγματισμό και τις εκτροπές χαμηλής και υψηλής τάξης. Συγκρίνεται το μέσο RMS για όλες τις ζώνες όρασης και η τυπική απόκλιση χρησιμοποιείται σαν παράμετρος διαφοροποίησης του σκληρού και μαλακού σχεδιασμού. Το συμπέρασμα για τις εκτροπές σε αυτή την εργασία είναι ότι οι εκτροπές σε έναν πολυεστιακό φακό είναι σαν ένα στρώμα νερού. Μπορούν να κινηθούν οπουδήποτε ανάλογα με τον σχεδιασμό αλλά δεν μπορούν να εξαλειφθούν.

### **1.6 Σκοπός**

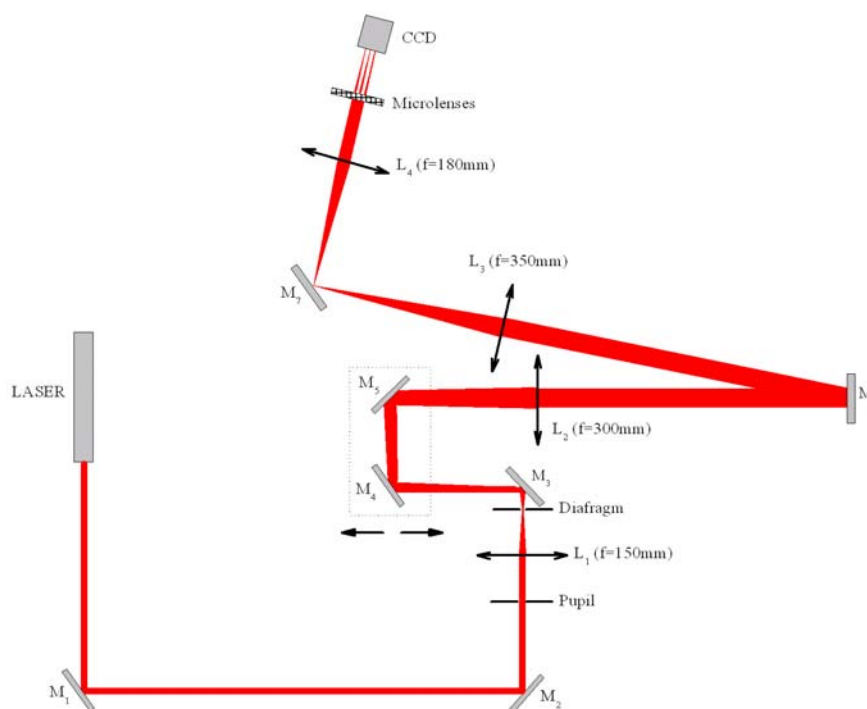
Ο σκοπός της εργασίας και της έρευνας είναι να αξιολογηθούν οι τιμές των εκτροπών σε οφθαλμικούς φακούς μονοεστιακής όρασης και να εκτιμηθούν τυχόν διαφορές στις τιμές των εκτροπών αυτών ανάλογα με το υλικό την διάμετρο και τον δείκτη διάθλασης των οφθαλμικών φακών.

## 2. Μεθοδολογία

Για την μέτρηση των οπτικών εκτροπών των μονοεστιακών φακών οράσεως χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας μετώπου κύματος Hartmann-Shack. Αρχικά έγινε προσομοίωση και εκτίμηση λειτουργίας του μετώπου κύματος και κατόπιν έγινε η μέτρηση των οπτικών εκτροπών των φακών.

### 2.1 Περιγραφή και Αξιολόγηση Οπτικής Διάταξης

#### 2.1.1 Χαρακτηριστικά Πειραματικής Διάταξης

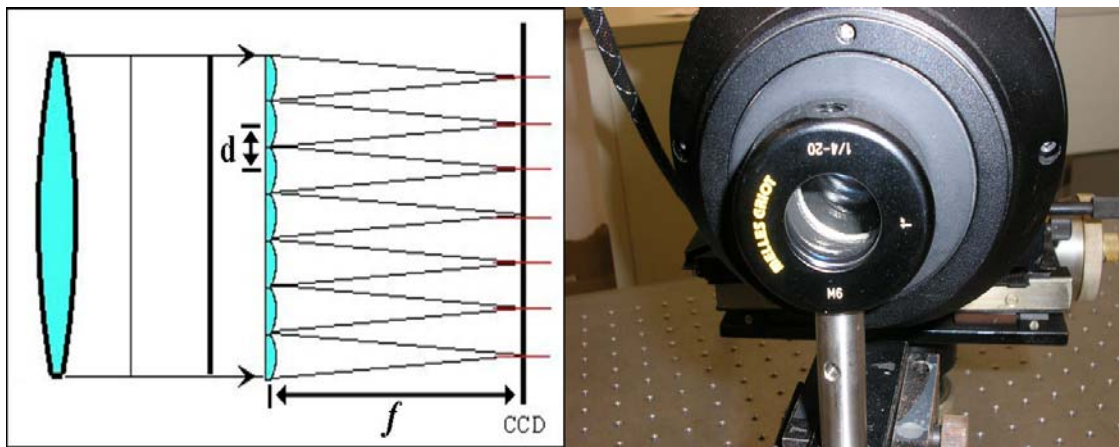


Εικόνα 2.1: Πειραματική διάταξη για τον έλεγχο λειτουργίας του αισθητήρα μετώπου κύματος και του εύρους μετατόπισης των καθρεφτών.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 2.1. Η δέσμη ενός laser He-Ne (632.8nm) οδηγείται με τη βοήθεια των κατόπτρων M1 και M2 μέσα στο οπτικό σύστημα παράλληλα με τον οπτικό του άξονα. Μπροστά από το δεύτερο κάτοπτρο και σε απόσταση 15cm από το πρώτο φακό ( $L_1$ ) έχει τοποθετηθεί ένα διάφραγμα, μεταβλητής διαμέτρου, το οποίο παίζει το ρόλο της κόρης. Στην συνέχεια απεικονίζεται η κυματομορφή από το επίπεδο της κόρης πάνω στους μικροφακούς και με τη βοήθεια κατάλληλων οπτικών η ακτίνα οδηγείται σε μία CCD camera. Οι καθρέφτες M4 και M5 έχουν δυνατότητα

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

ταυτόχρονης κίνησης μεταβάλλοντας τον οπτικό δρόμο που ακολουθεί η ακτίνα στο σύστημα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ελεγχθεί και να διορθωθεί το σφάλμα εστίασης (defocus) που εμφανίζεται στο σύστημα. Η σημαντικότερη όμως λειτουργία του συστήματος των καθρεφτών αυτών είναι η αύξηση του δυναμικού εύρους λειτουργίας (dynamic range) του αισθητήρα μετώπου κύματος. Τέλος, ο αισθητήρας μετώπου κύματος αποτελείται από ένα σύστημα 65x65 μικροφακών με εστιακή απόσταση 24mm και απόσταση 400μm μεταξύ τους (εικόνα 2.2). Η εισερχόμενη, στους μικροφακούς, κυματομορφή δειγματοληπτείται με σκοπό να γίνει υπολογισμός της διαφοράς της τοπικής κλίσης του μετώπου κύματος σε κάθε θέση (σε σχέση με τη αυτή στη θέση αναφοράς) με τη βοήθεια μίας CCD κάμερας. Ο αριθμός των μικροφακών που χρησιμοποιούνται εξαρτάται κάθε φορά από το μέγεθος της κόρης. Οι ενεργοί μικροφακοί είναι 37 και 157 για κόρη 3 και 6mm αντίστοιχα, ενώ η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιείται με μία CCD κάμερα (Princeton Instruments). Ο αισθητήρας της αποτελείται από ένα σύστημα 512x512 pixels, με μέγεθος 15x15μm και εσωτερική μεγέθυνση 1:1.5.



(α)

(β)

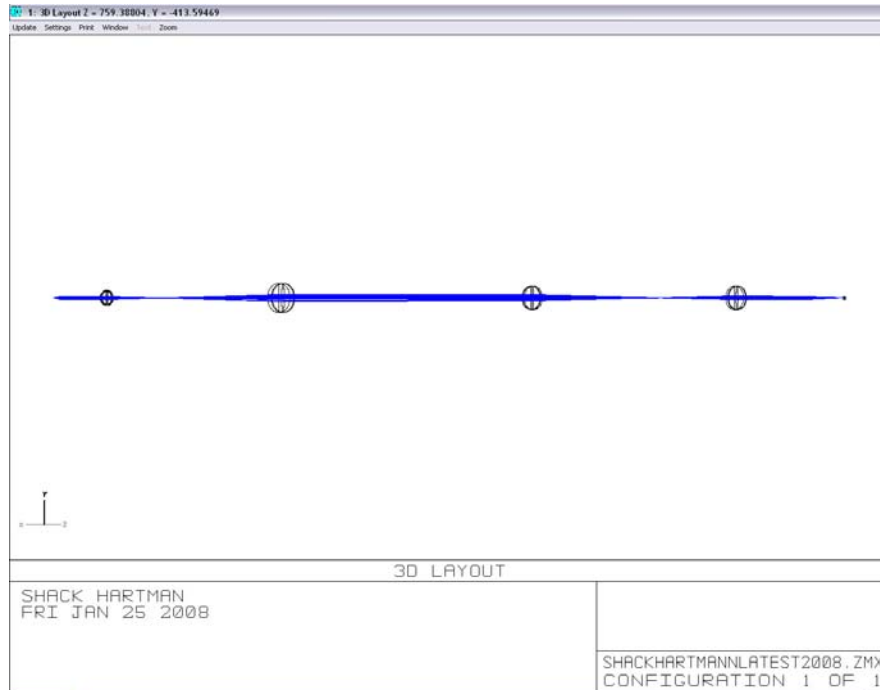
Εικόνα 2.2: α. Σχηματική παράσταση του συστήματος των μικροφακών και β. Σύστημα μικροφακών.

### 2.1.2 Αξιολόγηση αισθητήρα μετώπου κύματος

Ο έλεγχος του σχεδιασμού και των εμφανιζόμενων εκτροπών του συστήματος έγινε τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά για να συσχετισθούν και να αναλυθούν τυχόν διαφορές.

Η θεωρητική προσέγγιση πραγματοποιήθηκε με προσομοίωση του συστήματος των φακών στο Zemax (εικόνα 2.3). Μέσω του προγράμματος αυτού είναι δυνατός ο υπολογισμός των εκτροπών που εμφανίζονται στο σύστημα με χρήση πολωνύμων Zernike. Για τον έλεγχο του δυναμικού εύρους λειτουργίας του αισθητήρα μετώπου κύματος έγινε υπολογισμός του αναμενόμενου μέσω του Zemax σφάλματος εστίασης (defocus) του συστήματος μεταβάλλοντας τον οπτικό δρόμο μεταξύ των φακών  $L_1$  και  $L_2$ . Ως θέση αναφοράς θεωρήθηκε η θέση εκείνη στην οποία οι φακοί  $L_1$  και  $L_2$  απέχουν απόσταση ίση με το άθροισμα των εστιακών τους αποστάσεων ( $L_1+L_2=450\text{mm}$ ). Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε για 25 τιμές διαφορετικών αποστάσεων των φακών  $L_1$  και  $L_2$  (από 390mm έως 510mm, με θέση αναφοράς τα 450mm) και για δύο διαμέτρους κόρης (3mm και 6mm). Για κάθε θέση ξεχωριστά έγινε υπολογισμός των εκτροπών του συστήματος, καθώς και της μορφής του μετώπου κύματος στην εκάστοτε θέση. Στη συνέχεια έγινε γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων. Ειδικά για το σφάλμα εστίασης πραγματοποιήθηκε, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προσαρμογή ευθείας και συσχέτιση αυτού με τη μεταβολή του οπτικού δρόμου της ακτίνας στο σύστημα.

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann



**Εικόνα 2.3: Προσομοίωση των φακών του οπτικού συστήματος στο Zemax.**

Όσον αφορά την πειραματική ανάλυση, ο έλεγχος λειτουργίας του Hartman-Shack αισθητήρα μετώπου κύματος έγινε με λήψη εικόνων αρχικά για το σύστημα στη θέση αναφοράς και στη συνέχεια μεταβάλλοντας την απόσταση ανάμεσα στους φακούς  $L_1$  και  $L_2$  μετακινώντας το σύστημα των καθρεφτών  $M_4$  και  $M_5$ . Οι μετρήσεις έγιναν για δύο τιμές κόρης (3 και 6mm) και για μετατόπιση από -35 έως +35mm, με βήμα 5mm από τη θέση αναφοράς που περιγράφεται σε προηγούμενη παράγραφο. Για κάθε βήμα ελήφθησαν 3 φωτογραφίες ενώ κατά τη διάρκεια των μετρήσεων λήφθηκαν, επίσης, 10 φωτογραφίες με κλειστό το LASER με σκοπό να υπολογιστεί ο θόρυβος υποβάθρου (background noise) και το σκοτεινό ρεύμα (dark current) από τα ηλεκτρονικά της κάμερας. Από τις εικόνες αυτές χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος ο οποίος αφαιρέθηκε από τις εικόνες με το LASER ανοιχτό. Ο υπολογισμός των εκτροπών του συστήματος έγινε με χρήση ειδικών αλγορίθμων (Matlab) και εκφράστηκαν με τη μορφή, έως τέταρτης τάξης, πολωνύμων Zernike. Παρόμοια με την θεωρητική προσέγγιση, ειδικά για το σφάλμα εστίασης, πραγματοποιήθηκε, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προσαρμογή ευθείας και συσχέτιση αυτού με τη μεταβολή του οπτικού δρόμου της ακτίνας στο σύστημα.

## 2.2 Αξιολόγηση Οφθαλμικών Φακών

### 2.2.1 Χαρακτηριστικά Οφθαλμικών Φακών

Στην έρευνα μελετήθηκαν 30 φακοί μονοεστιακής όρασης γνωστής διαθλαστικής ισχύος ( $\pm 3.00$  Dpt) των εταιριών Zeiss, Hoya, Unilens, Nikon, Rodenstock, Essilor. Η διάμετρος των φακών ήταν 65mm. Οι προς μέτρηση φακοί χωρίστηκαν σε κατηγορίες για ευκολότερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Οι φακοί χωρίστηκαν ανάλογα με την ισχύ ( $\pm 3D$ ), το υλικό κατασκευής (CR39, polycarbonate, trivex), το σχεδιασμό (spherical, aspherical) και το δείκτη διάθλασης (1.49, 1.53, 1.59, 1.60, 1.67). Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η λίστα με τους προς μέτρηση φακούς.

### 2.2.2 Διαδικασία μέτρησης οφθαλμικών φακών

Για τη πραγματοποίηση της αξιολόγησης των οφθαλμικών έγινε εξομοίωση της κίνησης του ματιού ενός διοπτροφόρου που θα παρατηρούσε ένα αντικείμενο χωρίς να στρέψει το κεφάλι του αλλά μόνο τον οφθαλμό του. Η βάση πάνω στην οποία τοποθετήθηκαν οι προς μέτρηση φακοί τοποθετήθηκε 13mm μπροστά από τη κόρη με σκοπό να εξομοιωθεί η κατάσταση ενός διοπτροφόρου (Εικόνα 2.4). Η απόσταση αυτή ονομάζεται vertex distance και υπολογίζεται πάντα κατά τη συνταγογράφηση ενός καινούριου ζευγαριού γυαλιών. Η βάση είχε δυνατότητα κίνησης σε 4 άξονες ( $0^\circ$ - $180^\circ$ ,  $45^\circ$ - $225^\circ$ ,  $90^\circ$ - $270^\circ$  και  $135^\circ$ - $315^\circ$ ), καθώς και σε μία ακτίνα κύκλου 24 και 27.5mm που αντιστοιχεί στο κέντρο περιστροφής του οφθαλμού για τη περίπτωση θετικών και αρνητικών φακών, αντίστοιχα (Εικόνα 2.5). Οι ακτίνες κύκλου των 24 και 27.5mm χρησιμοποιήθηκαν σε αντιστοιχία μίας έρευνας σχετικά με το αξονικό μήκος του ματιού σε μύωπες και εμμέτρωπες από τον D Atchison και τους συνεργάτες του που δημοσιεύτηκε το 2004.



Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

Δείκτης Διάθλασης	Simple	Polycarbonates	Aspheric
1.5	a11 a50	a67	
1.6	a37.a40.a48. a52 a69	a13.a24.a44.a56	a16.a30.a61
	16 φακοί	-3.00 Dpt	

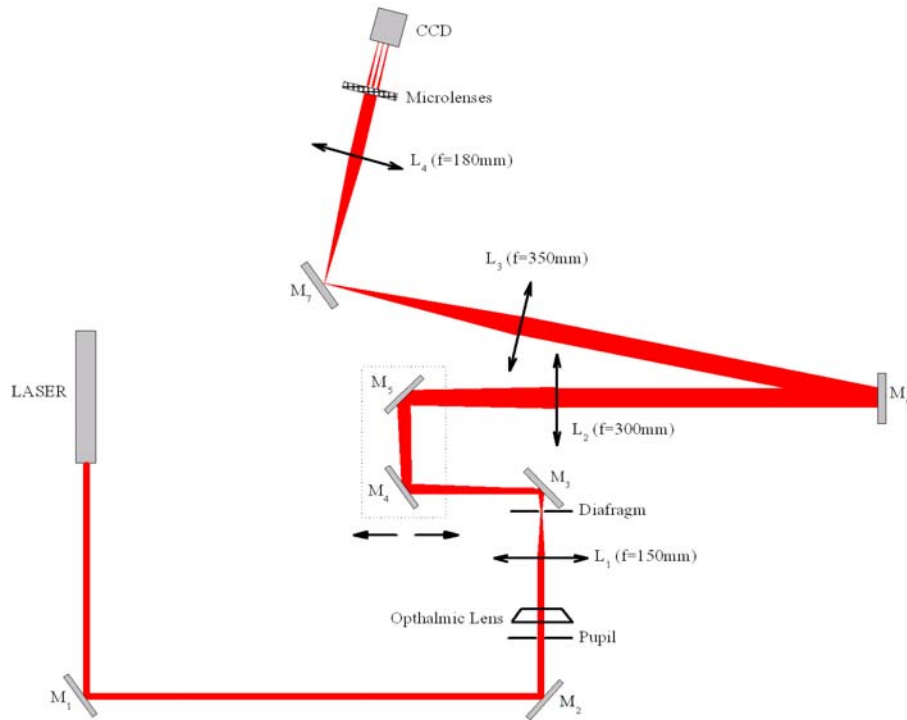
(α)

Δείκτης Διάθλασης	Simple	Polycarbonates	Aspheric
1.5		a68	
1.6	a36 a54	a18 a25 a43 a58	a14 a29 a32 a45 a63 a71
	13 φακοί	+3.00 Dpt	

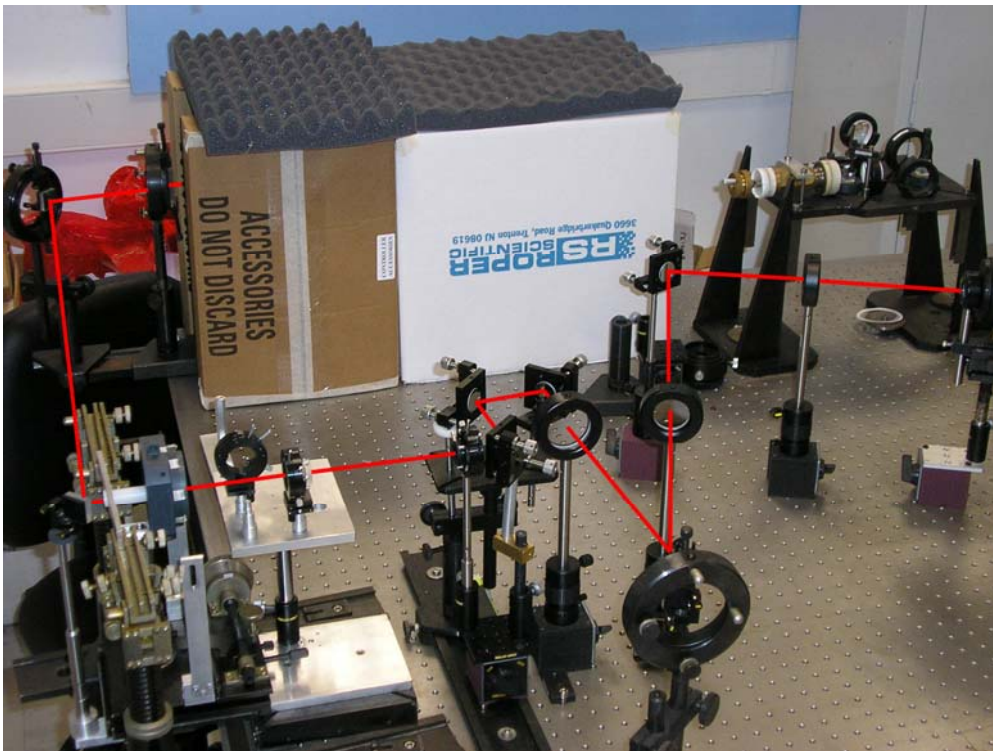
(β)

**Πίνακας 2.1. Διαχωρισμός οφθαλμικών φακών ανάλογα με την ισχύ, το δείκτη διάθλασης, το υλικό και το σχεδιασμό αυτών. (α) 16 φακοί με διοπτρική ισχύ -3 και (β) 13 φακοί με διοπτρική ισχύ +3.**

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann



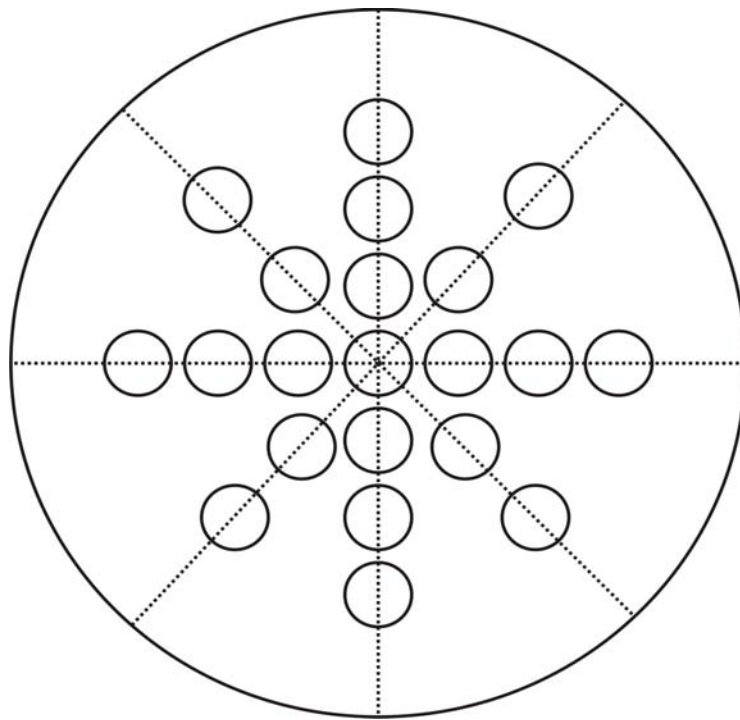
Εικόνα 2.4: Σχηματική παράσταση πειραματικής διάταξης για τη μέτρηση των οφθαλμικών φακών.



Εικόνα 2.5: Πειραματική διάταξη και βάση φακών.

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

Για την προσομοίωση φωτοπικών και σκοτοπικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν κόρες 3 και 6mm αντίστοιχα. Για φωτοπικές συνθήκες η κόρη για την οποία μετρήσαμε τις εκτροπές των οφθαλμικών φακών ήταν διαμέτρου 3 χιλιοστών. Οι περιοχές τις οποίες μετρήσαμε πάνω στον οφθαλμικό φακό ήταν ανά 3 χιλιοστά ξεκινώντας από το κέντρο και πηγαινόντας προς την περιφέρεια, καλύπτοντας έτσι μια περιοχή 24mm (χωρίς να υπολογίζουμε την κεντρική περιοχή) στην περιφέρεια του φακού η οποία και είναι η συνηθέστερη επιφάνεια στην οποία κινείται το μάτι ενός διοτροφόρου αλλά και το μέγεθος το οποίο έχουν οι περισσότεροι σκελετοί οράσεως που εφαρμόζονται οι φακοί. Αντίστοιχες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και για σκοτοπικές συνθήκες (διάμετρος κόρης 6mm ). Η εικόνα 2.6 παρουσιάζει σχηματικά τις περιοχές μέτρησης του εκάστοτε υπό εξέταση φακού.



**Εικόνα 2.6: Περιοχές μέτρησης οφθαλμικών φακών.**

Για κάθε περιοχή ελήφθησαν τρεις εικόνες και από αυτές υπολογίστηκε ο μέσος όρος. Πρέπει να αναφερθεί ότι στην αρχή και το τέλος κάθε κύκλου μετρήσεων λαμβάνονταν 6 εικόνες χωρίς την παρουσία φακού με ανοιχτή την δέσμη φως και 10 εικόνες εντελώς σκοτεινές. Από τις εικόνες αυτές υπολογιζόταν ο μέσος όρος των εκτροπών του συστήματος ο οποίος αφαιρείτο από τις μετρήσεις των φακών.

## 2.3 Ανάλυση Δεδομένων

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των εικόνων. Όπως προαναφέρθηκε ελήφθησαν 3 εικόνες για κάθε περιοχή. Μέσω του Matlab γινόταν υπολογισμός των εκτροπών με τη μορφή πολυωνύμων Zernike έως τέταρτης τάξης. Από τις 3 μετρήσεις αυτές υπολογιζόταν ο μέσος όρος των εκτροπών, η τυπική απόκλιση καθώς και το Seidel sphere, το Rms Coma, το RMS High Order και το ολικό RMS. Για την μέτρηση των εκτροπών αυτών χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι τύποι:

$$RMS_{HighOrder} = \sqrt{(c_2^{-2})^2 + \dots + (c_4^4)^2} \quad (7)$$

$$RMS_{HighOrder} = \sqrt{(c_3^{-3})^2 + \dots + (c_4^4)^2} \quad (8)$$

$$RMS_{Coma} = \sqrt{(c_3^{-1})^2 + (c_3^1)^2} \quad (9)$$

$$\text{Seidel Sphere} = \frac{-c_2^0 4\sqrt{3} + c_4^0 12\sqrt{5}}{r^2} \quad (10)$$

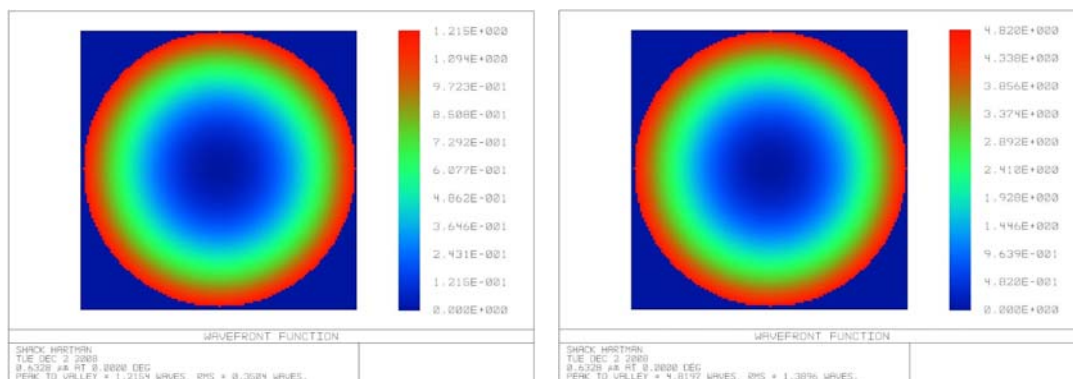
Επίσης, ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στις εκτροπές του defocus ( $Z_2^0$ ), τη σφαιρική εκτροπή ( $Z_4^0$ ), τη κόμη ( $Z_3^{-1}, Z_3^1$ ) και τον αστιγματισμός ( $Z_2^{-2}, Z_2^2$ ).

Τα αποτελέσματα τόσο για το σύνολο των εκτροπών, όσο και για το σφάλμα εστίασης παραστάθηκαν γραφικά ανά κατηγορία φακού, θέση του φακού, την αντικειμενική του ισχύ, την ύπαρξη ή όχι κυλίνδρου, το μέγεθος των εκτροπών υψηλής τάξης αλλά και συνολικά των εκτροπών του φακού σε κάθε του σημείο αλλά και άλλες εκτροπές όπως το κόμμα. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις δύο συνθήκες μετρήσεων, φωτοπικές και σκοτοπικές. Κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα συγκριτικά γραφήματα ώστε να βγουν σαφή συμπεράσματα για το μέγεθος και το είδος των εκτροπών σε έναν φακό, καθώς και για το πόσο αλλάζουν τα μεγέθη αυτά κατά τη μετακίνηση από το κέντρο προς την περιφέρεια του φακού.

### 3. Αποτελέσματα

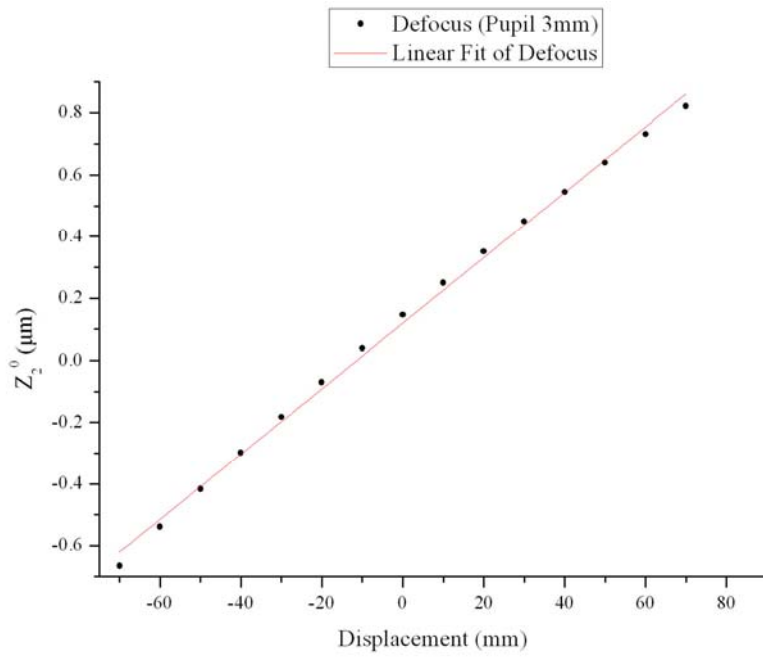
#### 3.1 Αξιολόγηση Οπτικής Διάταξης και Αξιολόγηση Αισθητήρα Μετώπου Κύματος.

Η προσομοίωση του συστήματος των τεσσάρων φακών με το Zemax παρείχε μικρές τιμές των εκτροπών όπως αυτές υπολογίστηκαν με τους συντελεστές των Zernike. Η εικόνα 3.1 δείχνει την κυματομορφή του συστήματος των τεσσάρων φακών για τη θέση αναφοράς για διάμετρο κόρης 3mm και 6mm αριστερά και δεξιά στην εικόνα αντίστοιχα. Παράλληλα, τα διαγράμματα στην εικόνα 3.2 περιέχουν την ανάλυση του σφάλματος εστίασης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των πρώτων δύο φακών για κόρη 3mm (Εικ. 3.2α) και 6mm (Εικ. 3.2β). Γραμμική ανάλυση του σφάλματος εστίασης έδειξε στατιστικά σημαντική συσχέτιση ( $R^2 \sim 1$ ) με κλίση 0.011 $\mu\text{m}/\text{mm}$  και 0.042 $\mu\text{m}/\text{mm}$  για κόρες 3 και 6mm αντίστοιχα, ενώ η σταθερά της γραμμικής ανάλυσης ήταν 0.13 $\mu\text{m}$  και 0.50 $\mu\text{m}$  για 3 και 6mm διάμετρο αντίστοιχα.

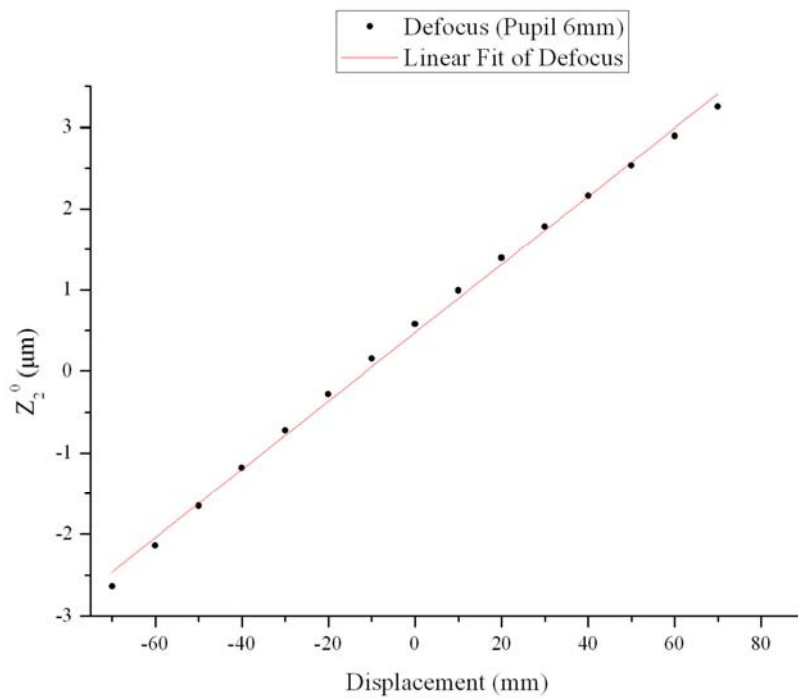


Εικόνα 3.1: Μορφή του μετώπου κύματος στο επίπεδο των μικροφακών και για τη θέση αναφοράς του συστήματος. Διάμετρος κόρης (αριστερά) 3mm και (δεξιά) 6mm.

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann



(α)



(β)

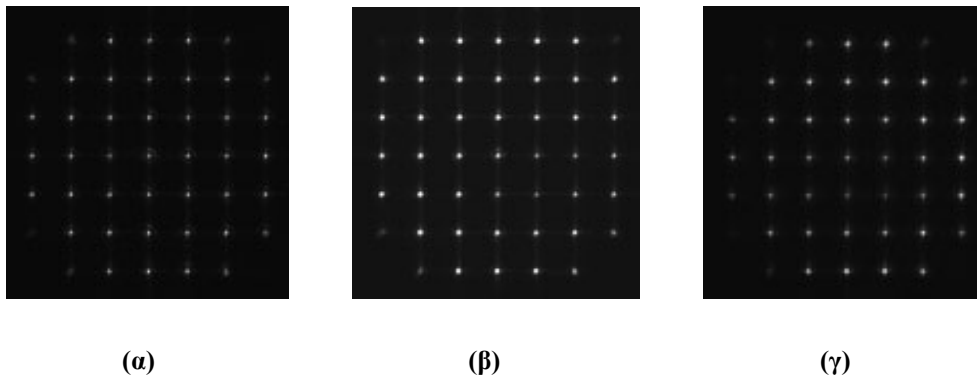
Εικόνα 3.2: Γραφική παράσταση του αναμενόμενου σφάλματος εστίασης της οπτικής διάταξης συναρτήσει της μεταβολής του οπτικού δρόμου. Οι μετρήσεις έγιναν για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

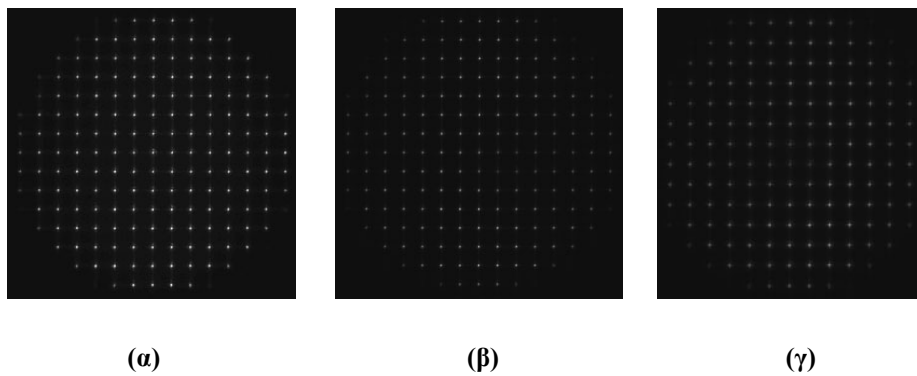
Όσον αφορά τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για την αξιολόγηση του αισθητήρα μετώπου κύματος, οι εικόνες 3.3 και 3.4 απεικονίζουν τα σημειακά είδωλα των μικροφακών ενώ η εικόνα 3.5 απεικονίζει τις κυματομορφή του οπτικού συστήματος στο επίπεδο της κόρης εισόδου για διάμετρο 3 και 6mm. Επίσης, τα αποτελέσματα τόσο για το σύνολο των εκτροπών, όσο και για το σφάλμα εστίασης που μας ενδιαφέρει παραστάθηκαν γραφικά και φαίνονται στα διαγράμματα των εικόνων 3.7 και 3.8 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δείχνουν τις εκτροπές συγκεντρωμένες γύρω από το μηδέν και για τις δύο τιμές κόρης με αυξημένες τιμές του αστιγματισμού. Παράλληλα, τα διαγράμματα στην εικόνα 3.7 περιέχουν την ανάλυση του σφάλματος εστίασης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των πρώτων δύο φακών για κόρη 3mm (Εικ. 3.2α) και 6 mm (Εικ. 3.2β). Γραμμική ανάλυση του σφάλματος εστίασης έδειξε και σε αυτήν την περίπτωση στατιστικά σημαντική συσχέτιση ( $R^2 \sim 1$ ) με κλίση  $0.015\mu\text{m}/\text{mm}$  και  $0.058\mu\text{m}/\text{mm}$  για κόρες 3 και 6mm αντίστοιχα, ενώ η σταθερά της γραμμικής ανάλυσης ήταν  $0.16\mu\text{m}$  και  $0.70\mu\text{m}$  για 3 και 6mm διάμετρο κόρης αντίστοιχα.

Στη συνέχεια παραστάθηκαν σε κοινό γράφημα (Εικόνα 3.8) τα αποτελέσματα για το defocus που προέκυψαν από τη προσομοίωση του συστήματος και τη πειραματική διάταξη συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των δύο φακών. Συγκρίνοντας τα πειραματικά με τα θεωρητικά, τα αποτελέσματα δείχνουν μία απόκλιση στις κλίσεις των ευθειών αλλά και στις σταθερές που για διάμετρο κόρης 3mm ήταν  $0.004\mu\text{m}/\text{mm}$  και  $0.03\mu\text{m}$ , αντίστοιχα ενώ για διάμετρο κόρης 6mm ήταν  $0.016\mu\text{m}/\text{mm}$  και  $0.20\mu\text{m}$ , αντίστοιχα.

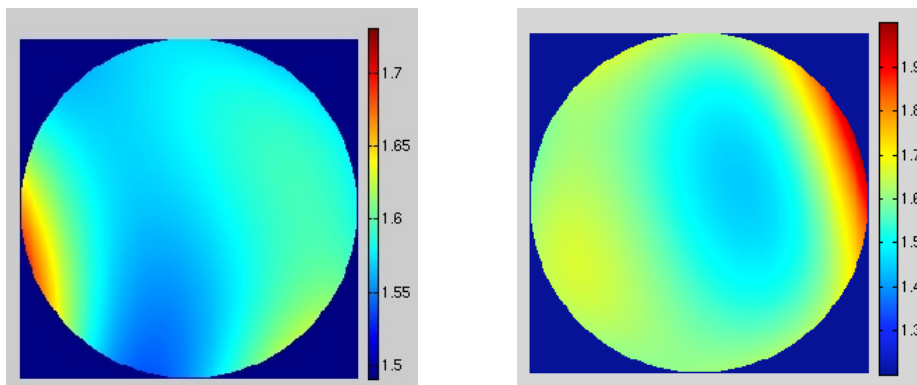
## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann



Εικόνα 3.3: Εικόνες από τη CCD κάμερα για το σύστημα των μικροφακών. (α) Στη θέση αναφοράς και για μεταβολή του οπτικού δρόμου για (β)  $-35\text{mm}$  και (γ)  $+35\text{mm}$ . Οι φωτογραφίες είναι για κόρη  $3\text{mm}$ .



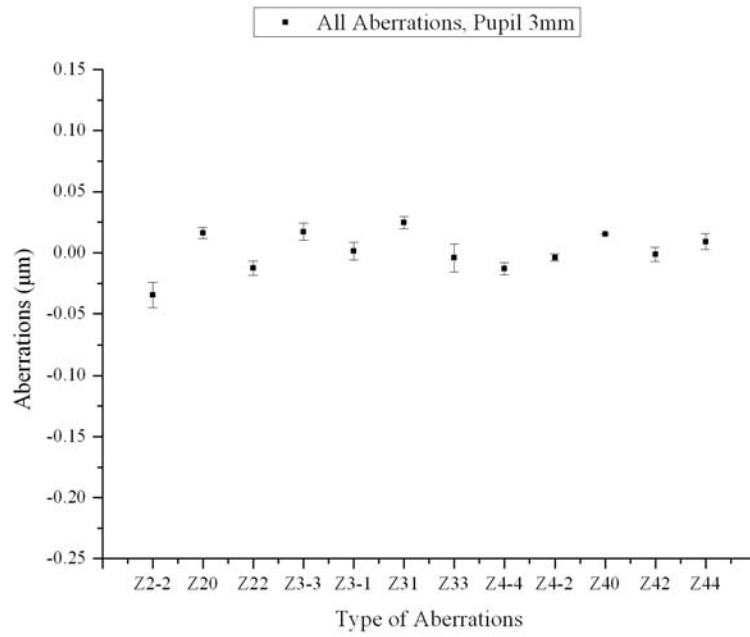
Εικόνα 3.4: Εικόνες από τη CCD κάμερα για το σύστημα των μικροφακών. (α) Στη θέση αναφοράς και για μεταβολή του οπτικού δρόμου για (β)  $-35\text{mm}$  και (γ)  $+35\text{mm}$ . Οι φωτογραφίες είναι για κόρη  $6\text{mm}$ .



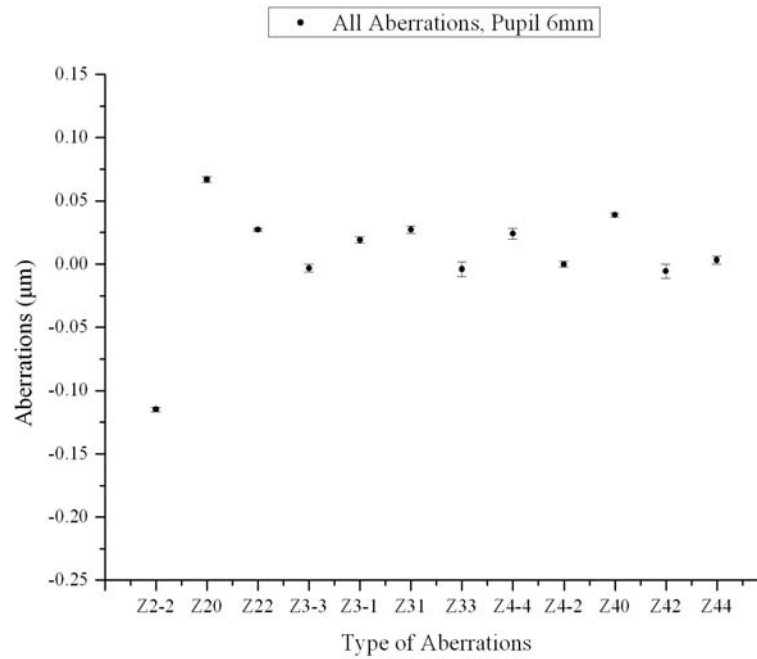
Εικόνα 3.5: Κυματομορφή πειραματικών μετρήσεων για (δεξιά)  $3\text{mm}$  και (αριστερά)  $6\text{mm}$ .



## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann



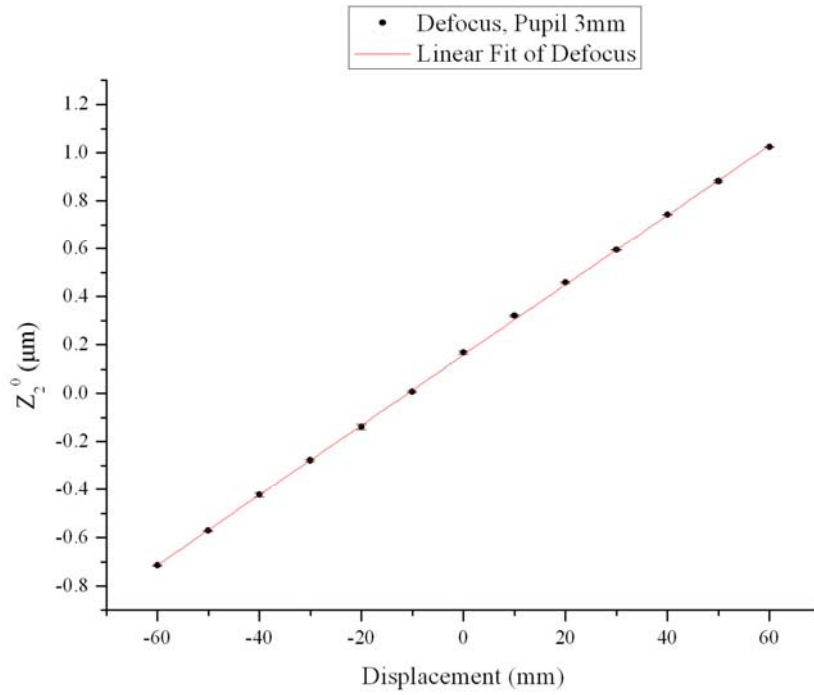
( $\alpha$ )



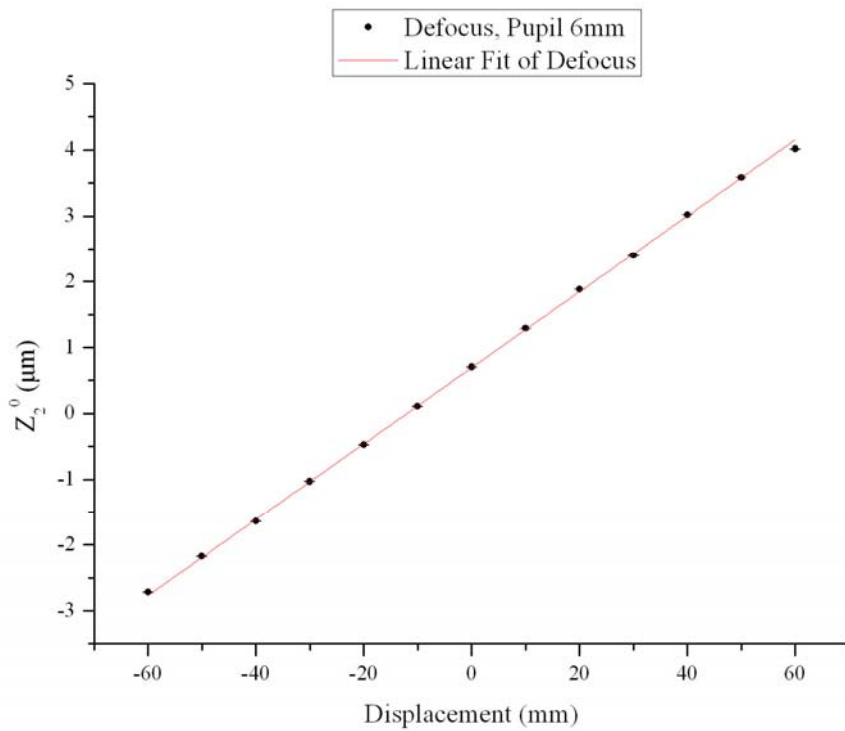
( $\beta$ )

Εικόνα 3.6: Παράσταση του συνόλου των εκτροπών του συστήματος στη θέση μηδενισμού του σφάλματος εστίασης. Κόρη ( $\alpha$ ) 3mm και ( $\beta$ ) 6mm.

Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

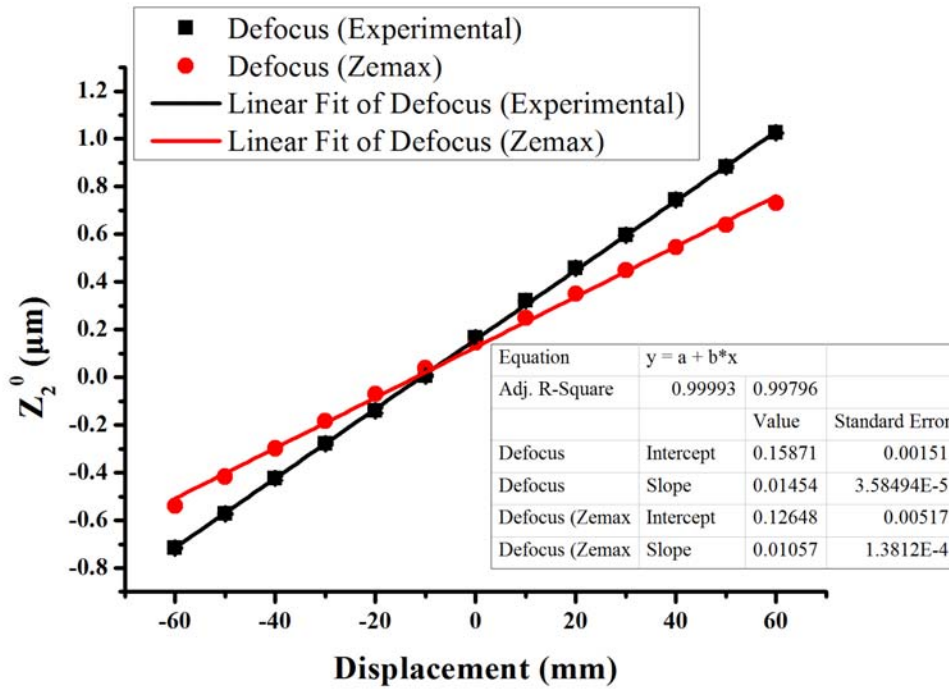


(α)

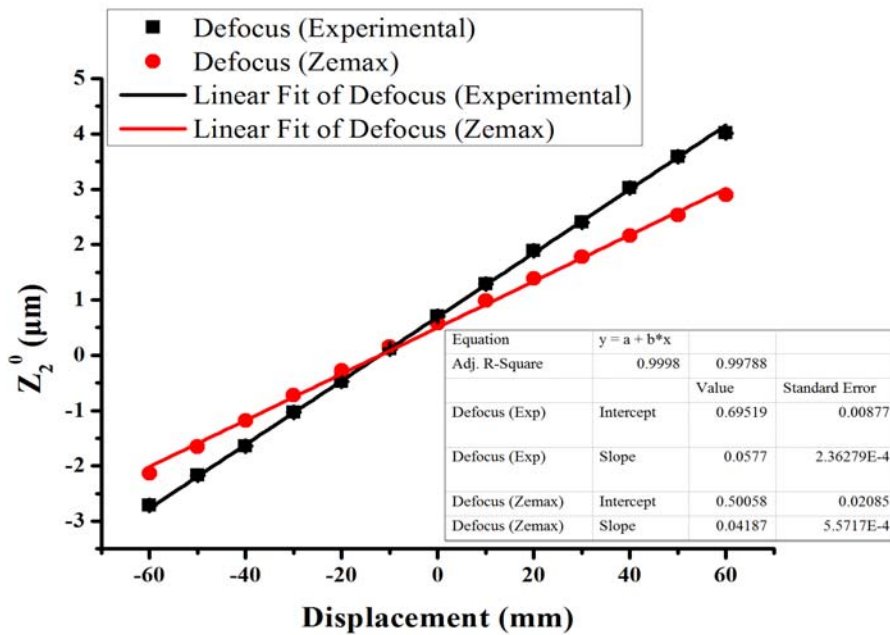


(β)

Εικόνα 3.7: Γραφική παράσταση του σφάλματος εστίασης των καθρεφτών  $M_4$  και  $M_5$ . Για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.



(α)



(β)

Εικόνα 3.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων του σφάλματος εστίασης για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.

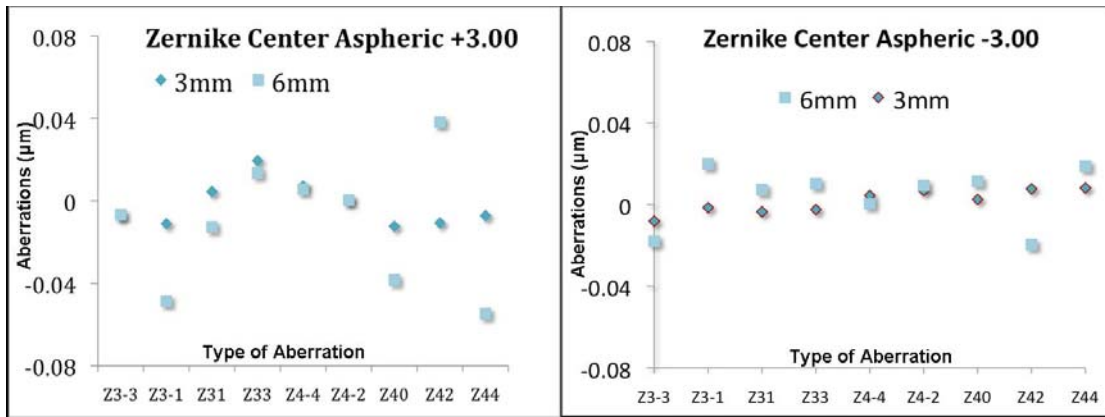
### 3.2 Αποτελέσματα Φακών

Κατά την διαδικασία μέτρησης των εκτροπών στους μονοεστιακής όρασης φακούς, τους διαχωρίσαμε σε κατηγορίες με βάση τον δείκτη διάθλασης, τον τρόπο κατασκευής, το υλικό, την διοπτρική ισχύ τους και για τις δύο συνθήκες φωτισμού. Μια πρώτη ενδεικτική μέτρηση-σύγκριση έγινε για ασφαιρικούς φακούς δείκτη διάθλασης 1.6,  $\pm 3.00$  διοπτριών. Η μέτρηση αφορά τις εκτροπές υψηλής τάξης στην κεντρική περιοχή του φακού. Παρατηρούμε μεγαλύτερες τιμές εκτροπών στους θετικούς φακούς και κυρίως στις σκοτοπικές συνθήκες. Επίσης χαρακτηριστικές είναι οι μικρότερες τιμές εκτροπών και στους δύο φακούς για την μικρότερης διαμέτρου κόρης.

#### 3.2.1 Εκτροπές συναρτήσει της γωνίας και της απόστασης

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των οπτικών εκτροπών συναρτήσει της γωνίας μέτρησης πάνω στον φακό, δεν παρατηρήθηκε συσχέτιση μεταξύ των συντελεστών του πολωνύμων Zernike και της γωνίας μέτρησης πάνω στον φακό. Τα γραφήματα στην εικόνα 3.10 αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα των μεταβολών στις τιμές της σφαιρικής εκτροπής ( $Z_4^0$ ), της κόμης ( $Z_3^{-1}, Z_3^1$ ) και του αστιγματισμού ( $Z_2^{-2}, Z_2^2$ ), για έναν αρνητικό και ένα θετικό ασφαιρικό φακό με δείκτη διάθλασης 1.6 και συγκεκριμένη περιοχή παρατήρησης ως προς την απόσταση από την κεντρική περιοχή των φακών. Ως συνέπεια, οι τιμές και τα αποτελέσματα που αναφέρονται από εδώ και στο εξής σχετίζονται με μία συγκεκριμένη γωνία παρατήρησης των φακών καθώς είναι αντιπροσωπευτικά για όλες τις γωνίες. Παρ' όλα αυτά, διαφορές παρατηρήθηκαν ως προς τις τιμές των συντελεστών για κάθε φακό ξεχωριστά καθώς και στη σύγκριση των τιμών των συντελεστών μεταξύ των φακών. Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται στα παρακάτω κεφάλαια συγκεντρωτικά ανά κατηγορία φακών.

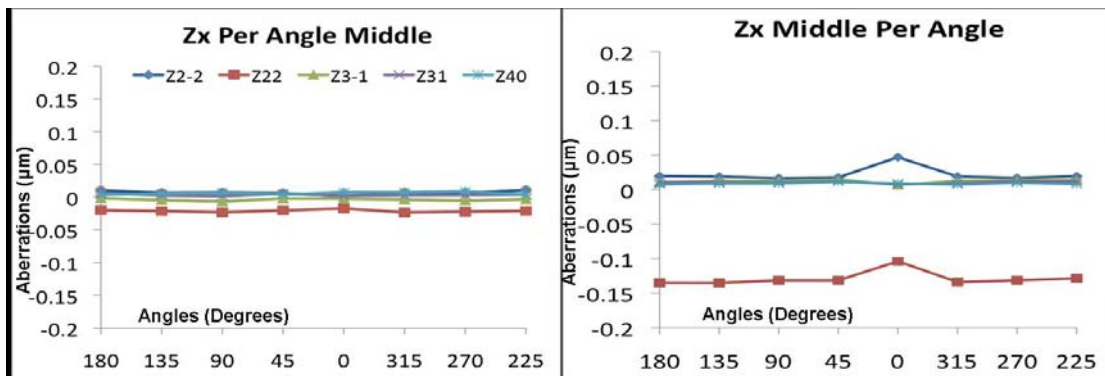
Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann



(α)

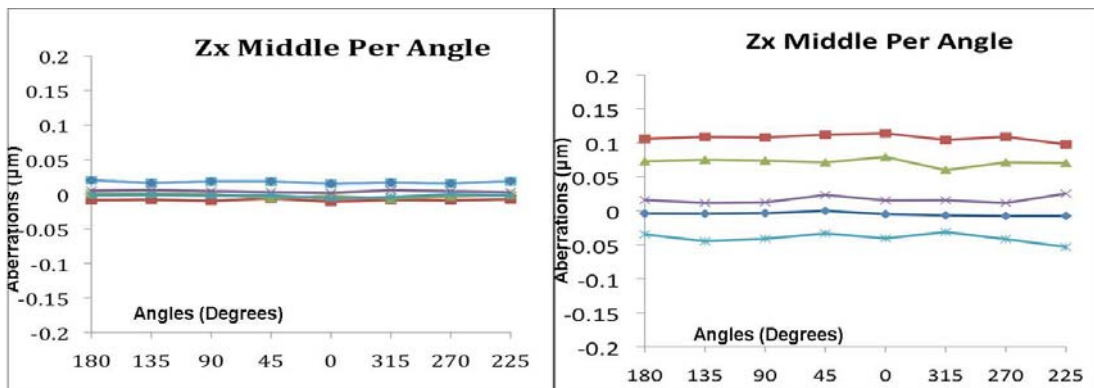
(β)

Εικόνα 3.9: Εκτροπές υψηλής τάξης στη κεντρική περιοχή ασφαιρικού φακού (α) +3D και (β) -3D.



(α)

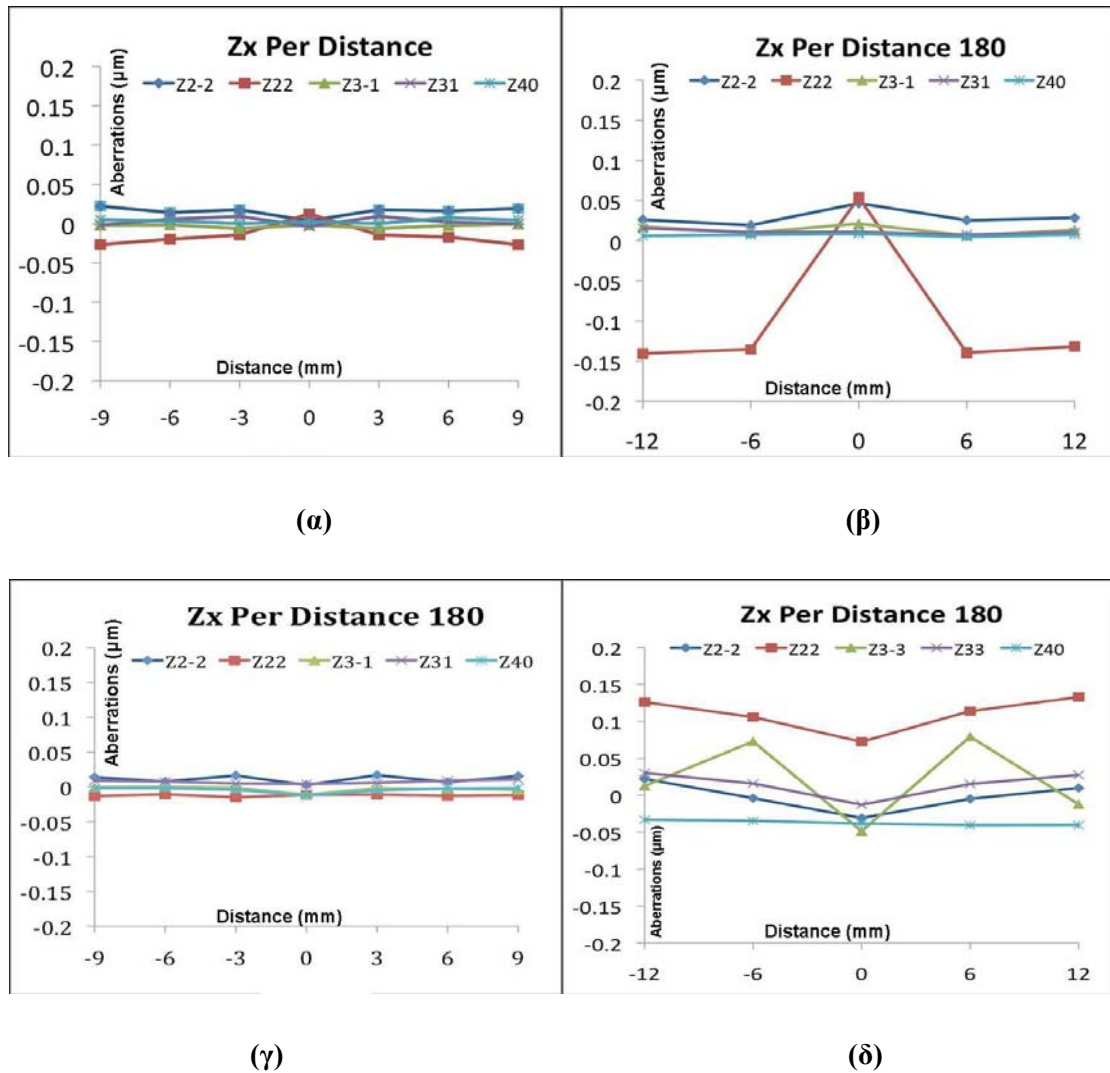
(β)



(γ)

(δ)

Εικόνα 3.10: Διάγραμμα μεταβολής του αστιγματισμού, της κόμης και της σφαιρικής εκτροπής συναρτήσει της γωνίας παρατήρησης για αρνητικό ασφαιρικό φακό και διάμετρο κόρης (α) 3mm και (β) 6mm και ασφαιρικό θετικό φακό και διάμετρο κόρης (γ) 3mm και (δ) 6mm.



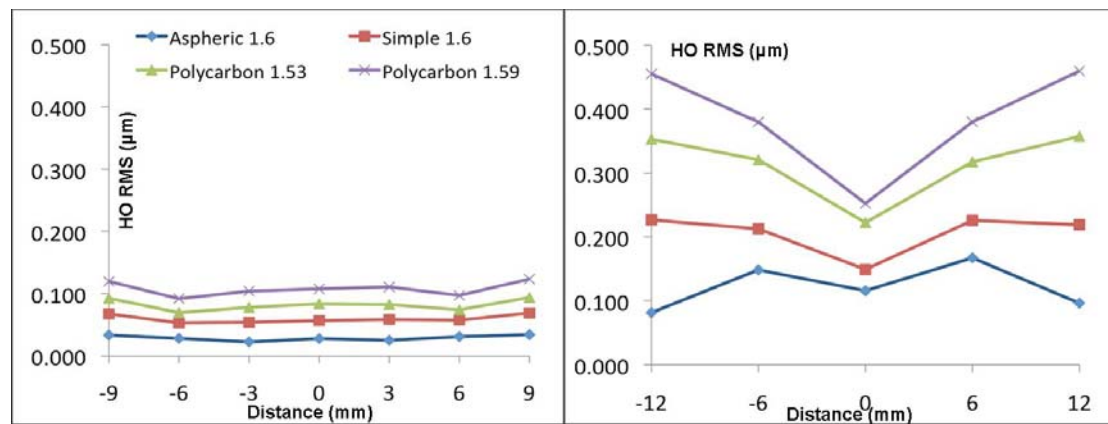
**Εικόνα 3.11:** Διάγραμμα μεταβολής του αστιγματισμού, της κόμης και της σφαιρικής εκτροπής συναρτήσει της απόστασης παρατήρησης από τη κεντρική περιοχή για αρνητικό σφαιρικό φακό και διάμετρο κόρης (α) 3mm και (β) 6mm και σφαιρικό θετικό φακό και διάμετρο κόρης (γ) 3 και (δ) 6mm.

Όσον αφορά τις τιμές των συντελεστών των Zernike πολωνύμων συναρτήσει της περιοχής παρατήρησης μεταβολές παρατηρήθηκαν στο πλήθος των συντελεστών και κατά κύριο λόγο για διάμετρο κόρης 6 mm. Παρά όλα αυτά δεν παρατηρήθηκε συγκεκριμένη τάση ως προς τις αλλαγές πλην του γεγονότος ότι το πλήθος των συντελεστών των Zernike πολωνύμων παρουσίασε αύξηση στις μετρήσεις των περιφερικών περιοχών εν συγκρίσει με την κεντρική περιοχή του φακού. Τα γραφήματα στην εικόνα 3.11 αποτελούν παραδείγματα των μεταβολών στις τιμές της σφαιρικής εκτροπής ( $Z_4^0$ ), της κόμης ( $Z_3^{-1}, Z_3^1$ ) και του αστιγματισμού ( $Z_2^{-2}, Z_2^2$ ),

για έναν αρνητικό και ένα θετικό ασφαιρικό φακό με δείκτη διάθλασης 1.6 συναρτήσει της απόστασης παρατήρησης από την κεντρική περιοχή του φακού.

### 3.2.2 RMS ανά απόσταση και κατηγορία

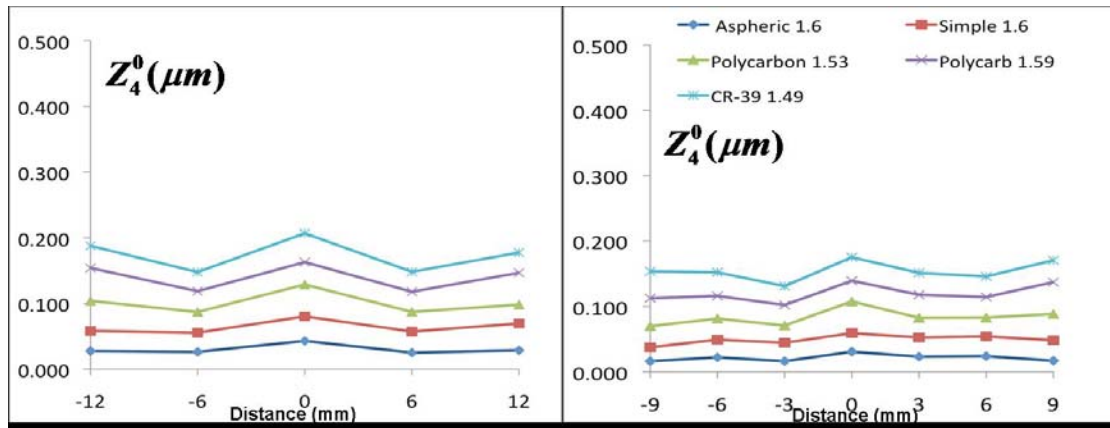
Όσον αφορά τα αποτελέσματα του RMS σε φωτοπικές συνθήκες (3mm διάμετρο κόρης) τα αποτελέσματα ήταν παραπλήσια για όλους τους τύπους φακών με τις χαμηλότερες τιμές να εμφανίζονται για τους αρνητικούς ασφαιρικούς κατασκευής φακούς. Σημαντικές μεταβολές παρατηρούνται για τις ίδιες κατηγορίες φακών σε σκοποπικές συνθήκες (6 mm διάμετρο κόρης). Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις στις τιμές μεταξύ των φακών είναι κυρίως στην περιφέρεια με τις χαμηλότερες τιμές στον ασφαιρικό φακό. Στα γραφήματα 3.12 παίρνουμε μια εικόνα των προαναφερθέντων όπως επίσης και στα γραφήματα 3.13 για τις αντίστοιχες μετρήσεις για τους αρνητικούς φακούς. Εδώ οι τιμές του RMS είναι σταθερές και για τις δύο συνθήκες φωτισμού με χαμηλότερες αυτές του ασφαιρικού φακού. Οι κατηγορίες των φακών διαφέρουν μόνο στο ότι εδώ μετρήθηκε και ο απλός φακός 1.49 δδ.



(α)

(β)

Εικόνα 3.12: Διάγραμμα μεταβολής του υψηλής τάξης RMS από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη θετικών φακών. Για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.



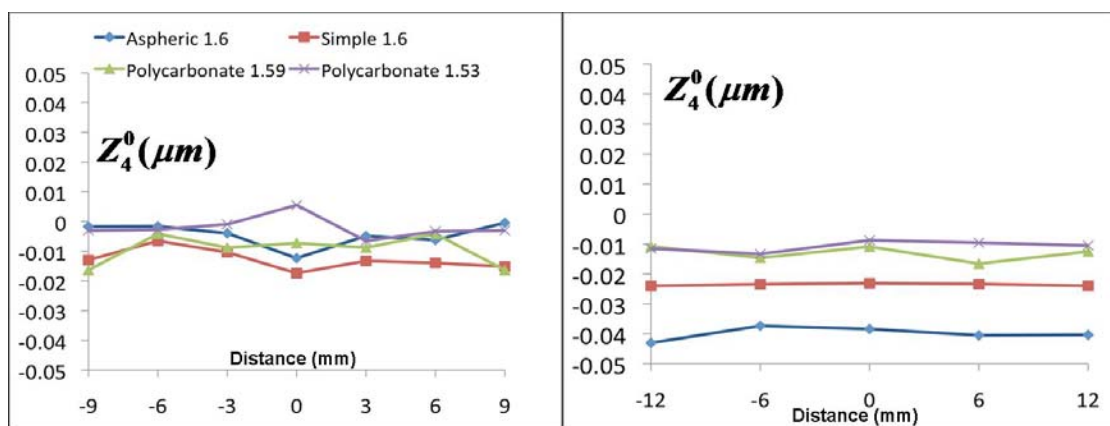
(α)

(β)

Εικόνα 3.13: Σφαιρική Εκτροπή ( $Z_4^0$ ) ανά απόσταση ανά κατηγορία.

### 3.2.3 Σφαιρική Εκτροπή ( $Z_4^0$ ) ανά απόσταση ανά κατηγορία

Ο υπολογισμός της σφαιρικής εκτροπής όσο απομακρυνόμαστε από την κεντρική περιοχή του φακού για όλες τις κατηγορίες φακών φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Στην περίπτωση των θετικών φακών, παρατηρήθηκε μικρή μεταβολή της σφαιρικής εκτροπής από το κέντρο προς την περιφέρεια του φακού και για τις δύο συνθήκες φωτισμού. Διαφορά παρατηρούμε στις συνολικές τιμές ανά κατηγορία φακού, π.χ. μεγαλύτερες αρνητικές τιμές για σκοτοπικές συνθήκες παίρνουμε από τον ασφαιρικής κατασκευής φακό. Για τους αρνητικούς φακούς οι τιμές της σφαιρικής εκτροπής από το κέντρο προς την περιφέρεια του φακού είναι αισθητά μεγαλύτερες. Ο ασφαιρικός φακός έχει και εδώ συνολικά τις καλύτερες τιμές.

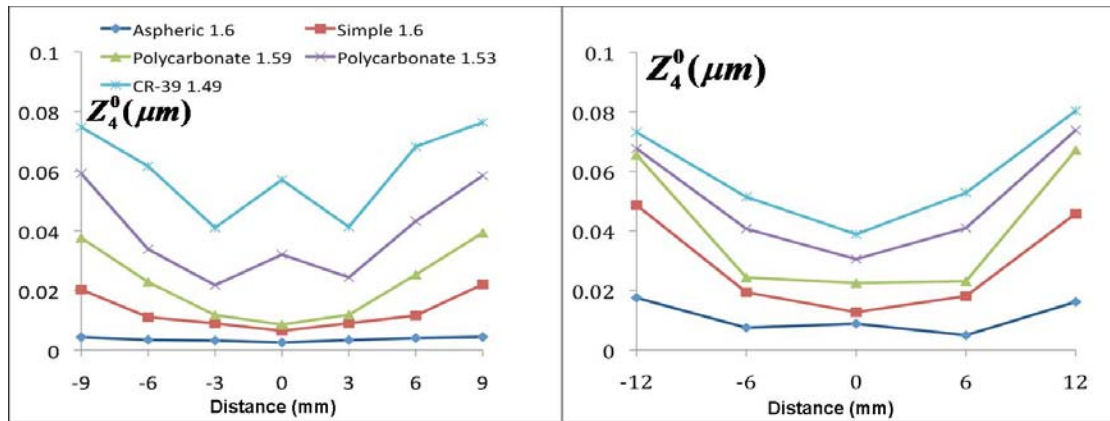


(α)

(β)

Εικόνα 3.14: Διάγραμμα μεταβολής της σφαιρικής εκτροπής από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη θετικών φακών. Για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.





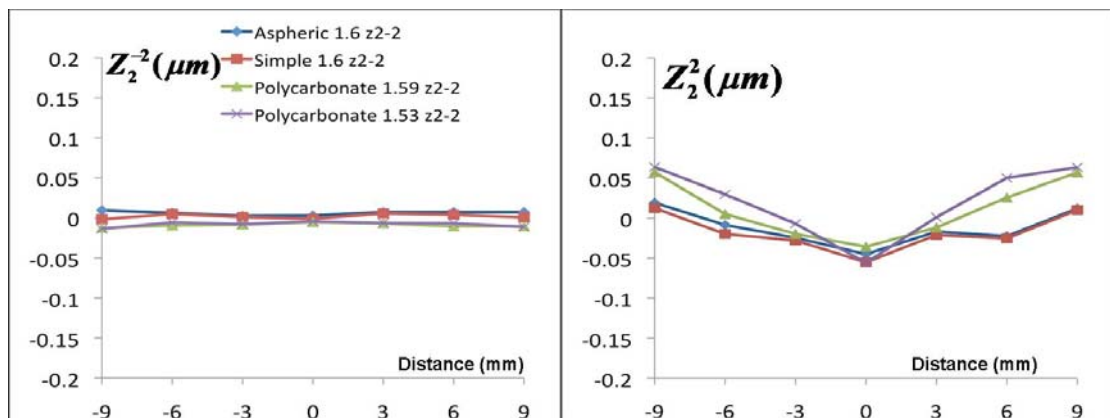
(α)

(β)

Εικόνα 3.15: Διάγραμμα μεταβολής της σφαιρικής εκτροπής από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη αρνητικών φακών. Για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.

### 3.2.4 Αστιγματικές Εκτροπές ( $Z_2^{-2}, Z_2^2$ ) ανά κατηγορία

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι αστιγματικές εκτροπές οι οποίες είναι δύο ειδών, και χωρίζονται ανάλογα τον άξονα οριζόντιο ή κάθετο που παρουσιάζονται οι εκτροπές αυτές. Οι τιμές του αστιγματισμού στον ένα άξονα έχουν σταθερές τιμές, σχεδόν μηδενικές τόσο για θετικούς όσο και αρνητικούς φακούς και στις δύο συνθήκες φωτισμού. Στη περίπτωση όμως του αστιγματισμού στον άλλο άξονα μικρές μεταβολές και διαφοροποιήσεις παρατηρήθηκαν τόσο σε φωτοπικές όσο και σε σκοτοπικές συνθήκες φωτισμού.

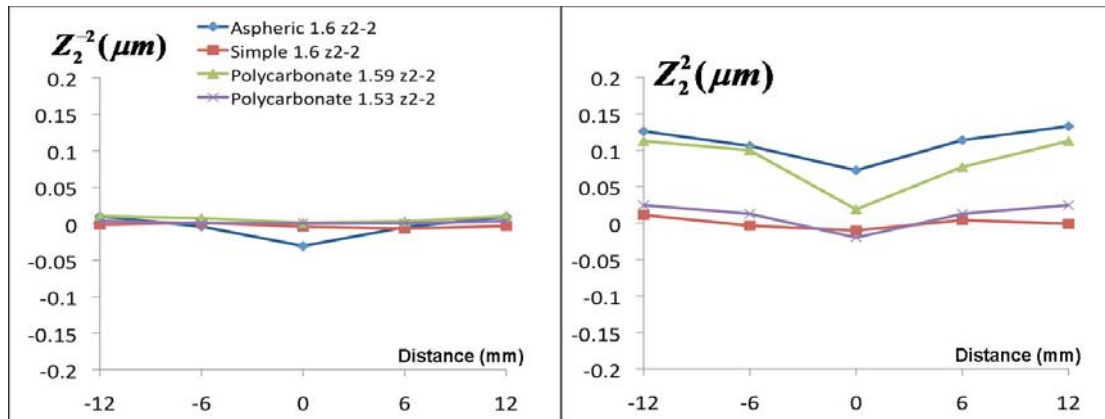


(α)

(β)

Εικόνα 3.16: Διάγραμμα μεταβολής των αστιγματικών εκτροπών. (α)  $Z_2^{-2}$  και (β)  $Z_2^2$  από το κέντρο προς τη περιφέρεις για όλα τα είδη θετικών φακών και για κόρη 3mm.

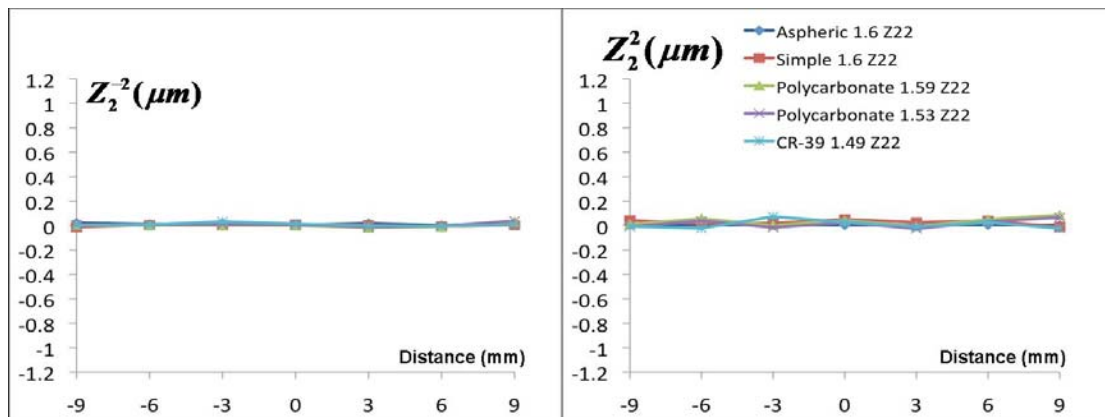
## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann



(α)

(β)

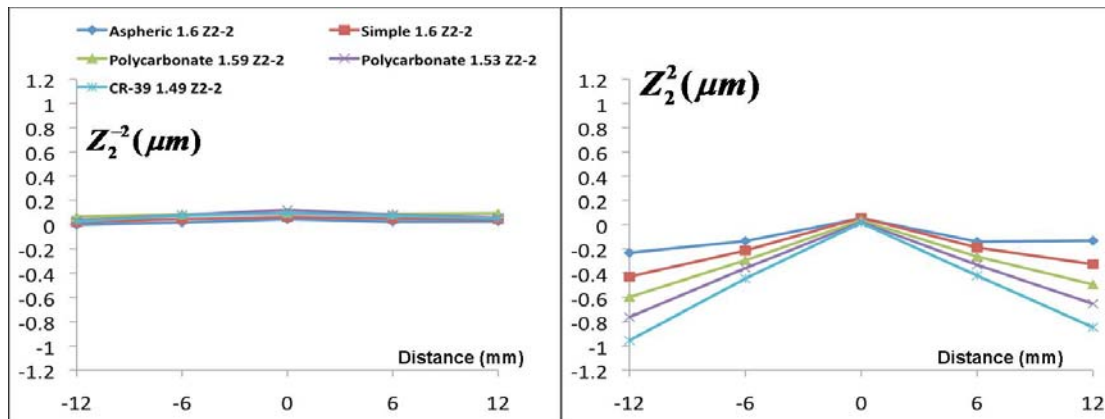
Εικόνα 3.17: Διάγραμμα μεταβολής των αστιγματικών εκτροπών (α)  $Z_2^{-2}$  και (β)  $Z_2^2$  από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη θετικών φακών και για κόρη 6mm. Ο οριζόντιος άξονας εκφράζει τη απόσταση από το κέντρο του φακού, ενώ ο κατακόρυφος τον αστιγματισμό ανάλογα με τον άξονα.



(α)

(β)

Εικόνα 3.18: Διάγραμμα μεταβολής των αστιγματικών εκτροπών (α)  $Z_2^{-2}$  και (β)  $Z_2^2$  από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη αρνητικών φακών και για κόρη 3mm. Ο οριζόντιος άξονας εκφράζει τη απόσταση από το κέντρο του φακού, ενώ ο κατακόρυφος τον αστιγματισμό ανάλογα με τον άξονα.



(α)

(β)

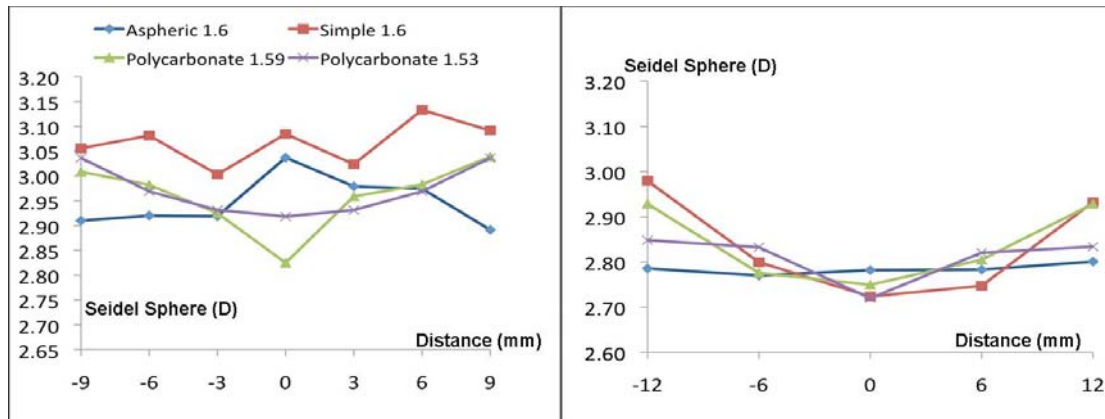
Εικόνα 3.19: Διάγραμμα μεταβολής των αστιγματικών εκτροπών (α)  $Z_2^{-2}$  και (β)  $Z_2^2$  από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη αρνητικών φακών και για κόρη 6mm.

Ο οριζόντιος άξονας εκφράζει τη απόσταση από το κέντρο του φακού, ενώ ο κατακόρυφος τον αστιγματισμό ανάλογα με τον άξονα.

### 3.2.5 Seidel Sphere ανά κατηγορία

Οι μετρήσεις για το αντικειμενικό σφαιρώμα των φακών ανά περιοχή για όλες τις κατηγορίες φακών φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα. Το αντικειμενικό σφαιρώμα στις επιφάνειες των φακών που μετρήσαμε βλέπουμε ότι διαφέρει από τις τιμές που δόθηκαν από τις εταιρείες. Στα γραφήματα 3.20 για τους θετικούς φακούς για φωτοπικές και σκοτοπικές συνθήκες βλέπουμε ότι το αντικειμενικό σφαιρώμα των φακών κυμαίνεται από 2.80 διοπτρίες έως και 3.15 για κόρη 3 χιλιοστών και από 2.75 έως 3.05 για κόρη 6 χιλιοστών. Στο γράφημα 3.21 που αφορά τους αρνητικούς φακούς βλέπουμε ότι οι τιμές του σφαιρώματος είναι αισθητά διαφορετικές από 3 διοπτρίες για φωτοπικές συνθήκες φωτισμού. Σημαντικότερη μεταβολή βλέπουμε στην περιφέρεια των αρνητικών φακών για κόρη 3mm όπου οι τιμές του σφαιρώματος φτάνουν μέχρι και τις 4 διοπτρίες. Μικρότερη η μεταβολή και τιμές κοντά στις -3D παρατηρήθηκε για την κόρη 6mm στους αρνητικούς φακούς.

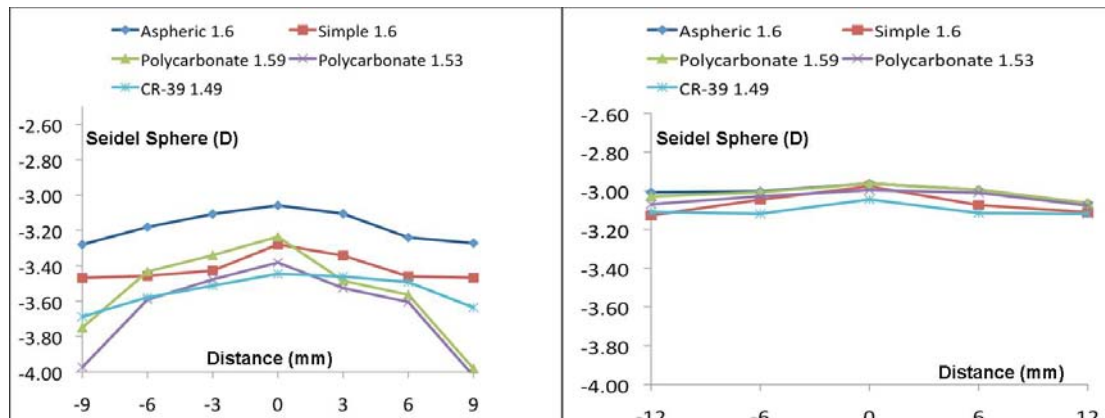
## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann



(α)

(β)

Εικόνα 3.20: Διάγραμμα μεταβολής του Seidel Sphere από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη θετικών φακών και κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.



(α)

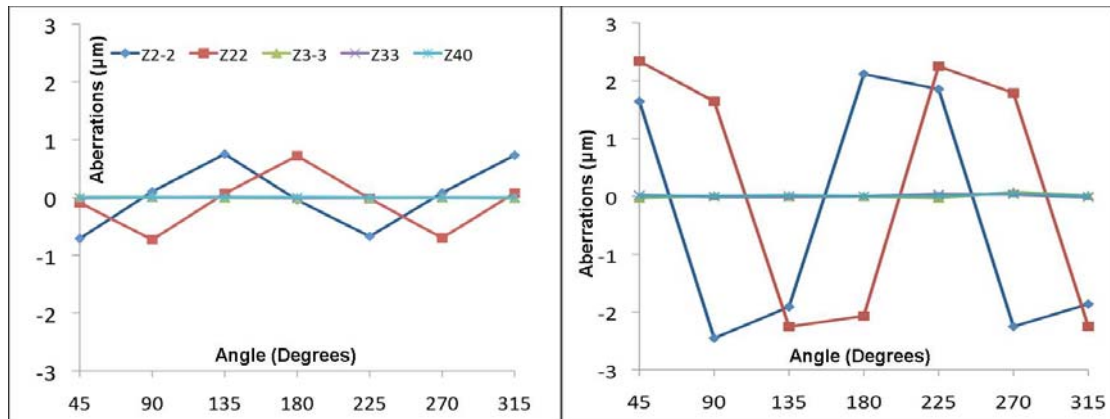
(β)

Εικόνα 3.21: Διάγραμμα μεταβολής του Seidel Sphere από το κέντρο προς τη περιφέρεια για όλα τα είδη αρνητικών φακών και για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.

### 3.2.6 Κυλινδρικοί Φακοί

Εκτός από τους σφαιρικούς φακούς στο πείραμα συμμετείχαν και μερικοί κυλινδρικοί φακοί που χρησιμοποιούνται για την διόρθωση του αστιγματισμού. Τα γραφήματα που προέκυψαν δείχνουν καθαρά τη συμπεριφορά των φακών αυτών ανάλογα με τη γωνία παρατήρησης. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των αστιγματικών εκτροπών σε έναν κυλινδρικό φακό είχαν περίπου 90 μοίρες διαφορά με μεγαλύτερες μεταβολές στην τιμή του αστιγματισμού για συνθήκες χαμηλού φωτισμού (6mm διάμετρο κόρης).

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann



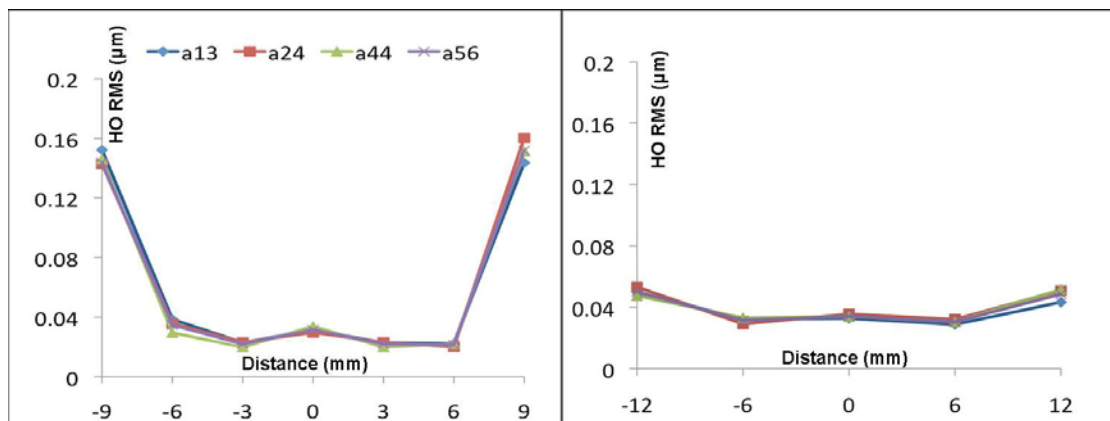
(α)

(β)

Εικόνα 3.22: Διάγραμμα μεταβολής των αστιγματικών εκτροπών από το κέντρο προς τη περιφέρεια για αρνητικό κυλινδρικό φακό και για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.

### 3.2.7 RMS ανά εταιρεία σε Polycarbonate Φακό

Τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση της ίδιας κατηγορίας φακών διαφορετικών εταιρειών. Η σύγκριση έγινε για το Rms Higher Order όπου παρατηρήθηκαν παραπλήσιες τιμές σε όλους τους φακούς. Ωστόσο υπάρχουν επικρατέστεροι φακοί όσον αφορά τις εκτροπές υψηλής τάξης τις οποίες μετρήσαμε.



(α)

(β)

Εικόνα 3.23: Διάγραμμα μεταβολής του RMS High Order από το κέντρο προς τη περιφέρεια για αρνητικούς polycarbonate με δείκτη διάθλασης 1.6 φακούς διαφορετικών εταιριών και για κόρη (α) 3mm και (β) 6mm.

## 4. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προσεγγίσεις

### 4.1 Οπτική Διάταξη και Λειτουργία Αισθητήρα Μετώπου Κύματος

Τόσο η θεωρητική (προσομοίωση με το Zemax) όσο και η πειραματική ανάλυση της οπτικής διάταξης κατέδειξαν ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο για το εύρος των εκτροπών όσο και για τη λειτουργία του μετώπου κύματος. Στη περίπτωση της θεωρητικής προσέγγισης, όλες οι εκτροπές πλην του σφάλματος εστίασης ( $Z_2^0$ ) και της σφαιρικής εκτροπής ( $Z_4^0$ ) παρείχαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα και για τις δύο συνθήκες διαμέτρου κόρης. Η μηδενικές τιμές των εκτροπών αυτών ήταν αναμενόμενες μιας και τα οπτικά που χρησιμοποιήθηκαν για την οπτική διάταξη είχαν πολύ καλή ποιότητα (οπτική ευκρίνεια λιγότερη του  $\lambda/20$  σύμφωνα πάντα με την εταιρία παραγωγής). Όσον αφορά την μεταβολή του σφάλματος εστίασης και της σφαιρικής εκτροπής συναρτήσει της απόστασης των δύο πρώτων φακών επίσης ήταν αναμενόμενη βάση της απλής θεωρίας των τηλεσκοπικών συστημάτων. Ειδικότερα, η γραμμική ανάλυση του σφάλματος εστίασης συναρτήσει της απόστασης των δύο πρώτων φακών παρείχε ικανοποιητικά αποτελέσματα ενώ ακόμα και το γεγονός της μικρής απόκλισης της σταθεράς της γραμμικής ανάλυσης είναι αποδεκτή και πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι τα οπτικά έχουν ένα συγκεκριμένο πάχος το οποίο θα μπορούσε να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό της θέσης αναφοράς. Η συγκεκριμένη παρατήρηση αιτιολογείται και από το γεγονός ότι η απόλυτη θέση αναφοράς όπου το σφάλμα εστίασης είναι μηδενικό βρίσκεται σε αρνητική θέση σύμφωνα με την γραμμική ανάλυση, δηλαδή σε μικρότερη απόσταση από το εστιακό μήκος των δύο φακών. Τέλος το γεγονός ότι η κλίση της γραμμικής συνάρτησης μεγαλώνει με την διάμετρο κόρης της ανάλυσης αιτιολογείται από το γεγονός ότι οι εκτροπές κατά βάση αυξάνονται καθώς αυξάνεται η διάμετρος της κόρης σε οποιοδήποτε εκ περιστροφής συμμετρικό οπτικό σύστημα

Όσον αφορά τα πειραματικά δεδομένα της αξιολόγησης του οπτικού συστήματος και του αισθητήρα μετώπου κύματος, παρατηρήθηκαν μικρές τιμές των συντελεστών των πολωνύμων Zernike για τις θέσεις αναφοράς, οι οποίες κρίνονται ικανοποιητικές μιας και το εύρος τους δεν ξεπερνούσε τα  $\pm 0.05 \mu\text{m}$  με εξαίρεση το σφάλμα εστίασης ( $Z_2^0$ ) και τον αστιγματισμό ( $Z_2^{-2}$ ) στον έναν άξονα για διάμετρο

κόρης 6mm. Αυτό οφείλεται σε πιθανά μικρά λάθη στην ευθυγράμμιση, στη παρουσία των καθρεφτών και την όχι και τόσο καλή ποιότητα τους εν αντιθέσει με τα οπτικά του συστήματος. Και στην περίπτωση των πειραματικών δεδομένων παρατηρήθηκε καλή συσχέτιση του σφάλματος εστίασης συναρτήσει της απόστασης των δύο πρώτων φακών (η οποία ήταν αναμενόμενη βάση της θεωρίας των τηλεσκοπικών συστημάτων) καθώς και μικρή αύξηση των εκτροπών σε μεγαλύτερες κόρες (αναμενόμενο βάση της παραπάνω επισήμανσης).

Συγκρίνοντας τα θεωρητικά (Zemax) και πειραματικά αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης του σφάλματος εστίασης ( $Z_2^0$ ) συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των δύο πρώτων φακών είναι φανερό ότι υπάρχει συμφωνία ανάμεσα τους. Μία μικρή απόκλιση που παρουσιάζεται, οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στη ποιότητα των οπτικών που έχουν χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη οπτική διάταξη και σε πιθανά λάθη στην ευθυγράμμιση. Άλλος ένας πιθανός παράγοντας που προκάλεσε απόκλιση ανάμεσα στα πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα είναι ότι στο Zemax έγινε προσομοίωση ενός απλουστευμένου οπτικού συστήματος (συμπεριλήφθηκαν οι 4 βασικοί φακοί του συστήματος και όχι όλα τα οπτικά αυτού). Τέλος άλλη μία παράμετρος που πιθανώς ευθύνεται για τυχόν αποκλίσεις είναι ότι στη περίπτωση του Zemax υπάρχει μία μικρή μεταβολή της μεγέθυνσης, με την μεταβολή της απόστασης των δύο πρώτων φακών. Η μεταβολή αυτή κυμαίνεται από -0.44 έως 0.42% για κόρη 3mm και από -0.54 έως 0.46% για αυτή των 6mm. Η αλλαγή στη διάμετρο της κόρης γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα κατά τη προσομοίωση. Αντίθετα κατά την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων η κόρη θεωρείται σταθερή και ίση με 3 και 6mm.

## 4.2 Μονοεστιακοί Σφαιρικοί Φακοί Οράσεως

Τα αποτελέσματα των φακών οράσεως κατά κανόνα κρίθηκαν ικανοποιητικά με σημαντικές διακυμάνσεις στις μετρήσεις παρ' όλα αυτά. Σε γενικές γραμμές οι μετρήσεις παρείχαν αναμενόμενα αποτελέσματα όπως αναλύονται στις επόμενες παραγράφους, με κάποιες όμως αποκλίσεις σε συγκεκριμένες μετρήσεις.

Ως προς την συμπεριφορά των συντελεστών των Zernike πολυωνύμων συναρτήσει της γωνίας παρατήρησης, η μη συσχέτιση ανεξαρτήτου θετικής ή αρνητικής διοπτρικής ισχύς ήταν αναμενόμενη εάν αναλογιστεί κανείς ότι οι υπό

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

μέτρηση φακοί βασίζονται σε εκ περιστροφής συμμετρική κατασκευή ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρατήρηση του οπτικού πεδίου ενός ανθρώπινου οφθαλμού. Επίσης αναμενόμενη ήταν και η αύξηση των συντελεστών με την αύξηση της διαμέτρου της κόρης από 3 σε 6mm καθώς αναφερόμαστε σε εκ περιστροφής συμμετρικούς φακούς οράσεως. Επί τούτου μάλιστα, η συμπεριφορά αυτή μεταξύ φωτοπικών και σκοτοπικών συνθηκών (3 και 6mm διάμετρο κόρης) όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρήθηκε σε όλες τις μετρήσεις ανεξαρτήτου είδους φακού, δείκτη διάθλασης, εταιρίας και διοπτρικής ισχύς. Παρά όλα αυτά όμως, η συμπεριφορά αυτή δεν ήταν ανάλογη σε όλες τις περιπτώσεις όπως συζητείται παρακάτω.

Όσον αφορά τώρα την μεταβολή των οπτικών εκτροπών συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του φακού, όλοι οι φακοί παρουσίασαν μεταβολές ειδικά στην περίπτωση των σκοτοπικών συνθηκών. Η πιο αντιπροσωπευτική εικόνα των μεταβολών αυτών παρέχεται από το RMS των υψηλών εκτροπών. Από την ανάλυση των τιμών αυτών κανείς συμπεραίνει ότι την καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά τις υψηλές εκτροπές την έχει ο σφαιρικός φακός ακολουθούμενος από τον απλό με δείκτη διάθλασης 1.6, τον polycarbon με δείκτη διάθλασης 1.53, τον polycarbon με δείκτη διάθλαση 1.59, και τέλος τον CR-39 με δείκτη διάθλασης 1.49 τόσο σε φωτοπικές όσο και σκοτοπικές συνθήκες. Συμπερασματικά λοιπόν πέραν της σφαιρικής κοπής, ο δείκτης διάθλασης είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τις εκτροπές ενός φακού συντελώντας πιθανότατα και στην μεταβολή της καμπυλότητας ή/και το πάχος του φακού ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη διοπτρική δύναμη με ότι συνέπειες συνεπάγονται από αυτά, ενώ και το υλικό παίζει σημαντικό ρόλο όπου για παράδειγμα ο polycarbonate φακός με δείκτη διάθλασης είτε 1.59 είτε 1.53 παρουσιάζει χειρότερη οπτική συμπεριφορά ακόμα και από τον απλό φακό παρόλο που το υλικό αυτό φημίζεται για την αντοχή και την ασφάλεια του.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των επιμέρους συντελεστών των πολωνύμων Zernike μας δίνουν τη δυνατότητα επιμέρους κατανόησης των διαφορών φακών οράσεως που παρατηρούνται σε σχέση με το RMS. Όσον αφορά τις εκτροπές χαμηλής τάξης πέραν του σφαιρώματος, οι αστιγματικές εκτροπές στον ένα άξονα ( $Z_2^{-2}$ ) ήταν μηδαμινές και ανεξάρτητες από την περιοχή παρατήρησης, τη διάμετρο κόρης και την διοπτρική δύναμη του φακού (είτε ήταν θετικός είτε ήταν



αρνητικός). Παρά ταύτα, οι αστιγματικές εκτροπές στον άλλο άξονα ( $Z_2^2$ ) ήταν μηδαμινές μόνο στην περίπτωση των αρνητικών φακών με κόρη 3mm, ενώ παρατηρήθηκε αύξηση σε όλες τις άλλες περιπτώσεις προς την περιφέρεια του φακού και κυρίως σε σκοτοπικές συνθήκες. Στη περίπτωση των αρνητικών φακών παρατηρείται μία συσχέτιση της αύξησης αυτής για σκοτοπικές συνθήκες η οποία εξαρτάται τόσο από το υλικό του φακού όσο και από το δείκτη διάθλασης. Η αύξηση αυτή επαληθεύεται και από την καθημερινότητα ενός διοπτροφόρου του οποίου οι αστιγματικές εκτροπές αυξάνονται αισθητά την νύχτα, και ένα καλό παράδειγμα είναι τα φώτα των απέναντι αυτοκινήτων κατά την οδήγηση. Στη περίπτωση όμως των θετικών φακών, οι μετρήσεις δε οδηγούν σε σαφή συμπεράσματα καθώς παρατηρούνται αυξημένες τιμές τόσο σε μικρή όσο και σε μεγάλη διάμετρο κόρης. Παρά το γεγονός το ότι παρατηρείται μερική συσχέτιση με την περιοχή παρατήρησης και για τις δύο διαμέτρους κόρης, η μη διαφοροποίηση των τιμών μεταξύ 3 και 6mm μας οδηγεί στο συμπέρασμα περί σφάλματος των μετρήσεων στην περίπτωση των θετικών φακών το οποίο συζητείται παρακάτω. Αυτό επαληθεύεται και από την συμπεριφορά της ασφαιρικής εκτροπής στην περίπτωση των θετικών φακών, όπου οι τιμές δεν παρέχουν το αναμενόμενο αποτέλεσμα μειωμένων τιμών ασφαιρικής εκτροπής στην κατηγορία των ασφαιρικών φακών. Αναμενόμενα συμπεράσματα όμως παρατηρούνται στην περίπτωση των αρνητικών φακών, όπου το ασφαιρικό προφίλ των ασφαιρικών φακών έχει σαν αποτέλεσμα την σταθερότητα και μειωμένη τιμή του συντελεστή της σφαιρικής εκτροπής  $Z_4^0$ . Και σ' αυτή την περίπτωση ο ασφαιρικός φακός εξακολουθεί να παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές, ο απλός φακός με δείκτη διάθλασης 1.6 να τον ακολουθεί και τους polycarbonate να κινούνται στα ίδια επίπεδα αν και ο polycarbonate με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα. Ο απλός CR-39 φακός είναι σταθερά πολύ υψηλότερα σε σχέση με τους άλλους και για την σφαιρική εκτροπή. Εκτός λοιπόν από το προφίλ σημαντικό είναι και ο ρόλος του δείκτη διάθλασης και του υλικού κατασκευής στην περίπτωση της σφαιρικής εκτροπής  $Z_4^0$ .

Μια εξίσου σημαντική μέτρηση στους σφαιρικούς φακούς, αφού η ύπαρξη αστιγματικών εκτροπών στις κεντρικές περιοχές είναι αμελητέα, είναι το κατά πόσο ένας σφαιρικός φακός  $\pm 3.00$  διοπτριών έχει την ίδια διοπτρική ισχύ στο σφαίρωμα του σε όλη την επιφάνεια του. Υπολογίστηκαν λοιπόν οι αντικειμενικές τιμές της

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

διοπτρικής δύναμης του σφαιρικού φακού χρησιμοποιώντας τη σφαίρα του Seidel η οποία παρέχει μία αρκετά καλή προσέγγιση της δύναμης του φακού αφού λαμβάνει υπ' όψιν εκτός από το σφάλμα εστίασης  $Z_2^0$  και την σφαιρική εκτροπή  $Z_4^0$ . Από τις γραφικές παραστάσεις της σφαίρας του Seidel παρατηρείται ότι τόσο οι θετικοί όσο και οι αρνητικοί φακοί δεν παρουσιάζουν σταθερότητα στη διοπτρική τους ισχύ και για διάμετρο κόρης 3mm. Ο ασφαιρικός φακός παρουσιάζει την πιο ήπια μεταβολή καθώς μεταφερόμαστε στην περιφέρεια, ενώ αξιοπρόσεχτη είναι και η μικρή μεταβολή του CR-39 και του απλού φακού. Επίσης αξιοσημείωτη είναι η παρέκκλιση των αρνητικών φακών ως επί των πλείστον από την τιμή της διοπτρικής ισχύος των 3 διοπτριών. Εν τούτοις, σε διάμετρο κόρης 6mm όλοι οι φακοί συμπεριφέρονται πιο κοντά στο αναμενόμενο τουλάχιστον σε ότι αφορά τη σταθερότητα της διοπτρικής ισχύος σε όλη του την επιφάνεια. Οι αυξημένες τιμές και οι μεταβολές της σφαιρικής εκτροπής  $Z_4^0$  στην περιφέρεια και για διάμετρο κόρης 6mm προφανώς έχουν σαν αντίκτυπο την σταθερότητα αυτή της διοπτρικής ισχύος.

Σημαντικές διαφοροποιήσεις επίσης παρατηρούνται όταν συγκρίνουμε αρνητικούς και θετικούς φακούς. Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, οι θετικοί φακοί φαίνεται να εμφανίζουν χειρότερη οπτική συμπεριφορά σε σύγκριση με τους αρνητικούς. Τόσο το RMS υψηλής τάξης όσο και οι επιμέρους αστιγματικές και σφαιρικές εκτροπές εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές όταν συγκριθούν με τους αρνητικούς φακούς. Η μόνη περίπτωση στην οποία οι θετικοί φακοί εμφανίζουν καλύτερη και αναμενόμενη συμπεριφορά σε σύγκριση πάντα με τους αρνητικούς φακούς είναι στις τιμές της διοπτρικής ισχύος όπως αυτές μετρήθηκαν με τη σφαίρα του Seidel για διάμετρο κόρης 3mm. Ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση όμως, η συμπεριφορά των τιμών της διοπτρικής ισχύος παρουσίασε έντονες διακυμάνσεις. Οι διαφορές αυτές ενδεχομένως να οφείλονται στην διαφορετική κατασκευή των φακών καθώς ένας αρνητικός φακός παρουσιάζει αύξηση του πάχους στην περιφέρεια εν συγκρίσει με ένα θετικό φακό. Θεωρώντας, λοιπόν, ότι το πάχος ενός φακού επηρεάζει τις τιμές των εκτροπών αναμένεται διαφορετική συμπεριφορά ανάμεσα στα δύο είδη φακών. Παράλληλα, η διαφοροποιήσεις μπορεί να οφείλονται και σε σφάλμα των μετρήσεων τουλάχιστον σε ότι αφορά στις μετρήσεις των θετικών φακών. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί από το περιορισμένο δυναμικό εύρος του αισθητήρα μετώπου κύματος και το γεγονός ότι η θέση αναφοράς του αισθητήρα μετώπου κύματος παρουσίασε

τιμές ελάχιστα υπερμετρωπικές από το απόλυτο μηδέν, παρέχοντας κατά αυτόν το τρόπο μία μερική ασυμμετρία στο σύστημα και κατ' επέκταση στις μετρήσεις μεταξύ θετικών και αρνητικών φακών.

Τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση της ίδιας κατηγορίας φακών διαφορετικών εταιρειών. Η σύγκριση έγινε με χρήση του Rms Higher Order. Από τις γραφικές παραστάσεις είναι φανερό ότι οι διαφορές στον συγκεκριμένο τύπο φακού ανά εταιρεία είναι ελάχιστες και όπου αυτές υπάρχουν είναι κυρίως περιφερικά του φακού. Το polycarbonate είναι ένα ιδιαίτερο υλικό που χρησιμοποιούν οι εταιρείες και χρησιμοποιείται κυρίως σε γυαλιά griff και nylon λόγω της αυξημένης αντοχής του στο σπάσιμο καθώς επίσης και σε διοπτροφόρους μικρών ηλικιών. Πέρα από το polycarbonate οι εταιρείες πειραματίζονται συνεχώς με άλλες πρώτες ύλες για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα και κάθε εταιρεία στον χώρο έχει την δική της ποιότητα και αξιοπιστία. Αυτό που κάνει κάποια εταιρεία να ξεχωρίζει από τον ανταγωνισμό δεν είναι το υλικό του φακού που χρησιμοποιεί αλλά η ποιότητα των αντιανακλαστικών, αντιχαρακτικών και υδρόφοβων επιστρώσεων που χρησιμοποιεί στον εκάστοτε φακό. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλοι φακοί που μετρήθηκαν ήταν επιστρωμένοι με απλές αντιχαρακτικές επιστρώσεις. Οι επιστρώσεις υψηλής ποιότητας ίσως έδιναν καλύτερα αποτελέσματα και οδηγούσαν σε διαφορετικά συμπεράσματα.

### 4.3 Κυλινδρικοί Φακοί

Εκτός από τους σφαιρικούς φακούς στο πείραμα συμμετείχαν και μερικοί κυλινδρικοί φακοί που χρησιμοποιούνται για την διόρθωση του αστιγματισμού. Τα γραφήματα που προέκυψαν δείχνουν καθαρά τη συμπεριφορά των φακών αυτών ανάλογα με τη γωνία παρατήρησης. Οι τιμές της αστιγματικής εκτροπής αυξάνονται αισθητά από φωτοπικές σε σκοτοπικές συνθήκες. Χαρακτηριστικό είναι επίσης ότι η μέγιστη με την ελάχιστη τιμή των εκτροπών έχουν σε όλες τις περιπτώσεις 90 μοίρες διαφορά, κάτι που βοηθά στον εντοπισμό του κύριου άξονα του δευτερεύοντος άξονα του φακού.

## 4.4 Ανακεφαλαίωση Συμπερασμάτων και Μελλοντικές Προσεγγίσεις

Συνοψίζοντας και ανακεφαλαιώνοντας τα συμπεράσματα που εκπονήθηκαν από την εργασία αυτή θα λέγαμε ότι είχαμε ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τις μετρήσεις των φακών και σε πρώτη προσέγγιση η ερευνητική εργασία αποτελεί μία καλή βάση για την περαιτέρω βελτίωση και μέτρηση ενός πλήθους φακών.

Σημαντικοί παράγοντες στον ρόλο και την απόδοση των φακών είναι ο δείκτης διάθλασής τους (1.49 , 1.53 , 1.59 , 1.60 κλπ) , το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο κάθε φακός (CR-39, Polycarbonate , Απλή οργανική ύλη) όπου η ύλη του φακού προσδίδει και την δική της ‘συμπεριφορά’ στις μετρήσεις, και η κοπή του φακού (ασφαιρική ή σφαιρική) η οποία συντελεί σε διαφοροποιήσεις της οπτικής ευκρίνειας των φακών. Οι συνθήκες φωτισμού κατά τις οποίες ελήφθησαν οι μετρήσεις παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο καθώς παρατηρήθηκαν διαφοροποιήσεις των οπτικών εκτροπών μεταξύ φωτοπικών και σκοτοπικών συνθηκών οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπ’ όψιν καθώς η χρησιμοποίηση των φακών είναι συνήθης σε όλες τις συνθήκες φωτισμού.

Σε σχέση με προγενέστερες έρευνες, οι οποίες και αναφέρθηκαν στα παραπάνω κεφάλαια, κάνοντας μια στοιχειώδη σύγκριση βλέπουμε αρκετές διαφορές. Σημαντικότερη είναι η διαφορά στο αντικείμενο μετρήσεων όπου μετρήθηκαν πολυεστιακοί φακοί ενώ εμείς μετρήσαμε φακούς μονοεστιακής όρασης. Ομοιότητες υπάρχουν στον τρόπο μέτρησης όπου χρησιμοποιήθηκε σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις ο Shack-Hartmann αισθητήρας μετώπου κύματος. Τα αποτελέσματα είναι πολύ λογικό να διαφέρουν γιατί οι συνθήκες των πειραμάτων διαφέρουν σημαντικά όπως επίσης δεν είναι δυνατόν να υπήρχαν και τα ίδια οπτικά υλικά.

Μελλοντικά η έρευνά μας θα συνεχιστεί για την αξιολόγηση πολυεστιακών φακών. Πρέπει να αναφερθεί ότι θα βελτιωθεί η διάταξη με καλύτερα οπτικά υλικά, καλύτερες συνθήκες φωτισμού και μεγαλύτερο εύρος αισθητήρα μετώπου κύματος. Οι πολυεστιακοί φακοί είναι πολύ σημαντικό κεφάλαιο στον χώρο της οπτικής και η έρευνα θα μας δώσει την ευκαιρία να εξάγουμε πολύ χρήσιμα συμπεράσματα για την βελτίωση της όρασης των διοπτροφόρων. Στις μετρήσεις των πολυεστιακών φακών

## Αξιολόγηση οφθαλμικών φακών με εκτροπόμετρο Shack-Hartmann

πρέπει να προσεχθούν οι περιοχές μέτρησης λόγω της τελείως διαφορετικής δομής τους. Θα πρέπει να διαχωριστούν οι περιοχές μετρήσεων για τις τρεις οπτικές ζώνες (μακριά, μεσαία, κοντά) αρχικά ώστε να μπορούν να συγκριθούν και μεταξύ τους και στην συνέχεια να μετρηθούν συνολικά όπως και με τους μονοεστιακής όρασης φακούς για την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων και τυχόν παρατηρήσεις εκτροπών κατά μήκος του ισοκυλίνδρου ενός πολυεστιακού φακού. Τέλος, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ερευνητική εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί και στην μέτρηση των φακών σε συνδυασμό με πραγματικούς οφθαλμούς όπου θα μπορεί να μελετηθεί και η πλήρης οπτική ευκρίνεια όλων των οπτικών ατελειών (αυτές του φακού αλλά και του εκάστοτε οφθαλμού).

## Βιβλιογραφία

1. [http://en.wikipedia.org/wiki/Visual\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Visual_system)
2. David A. Atchison, George Smith: “Optics of the Human Eye”
3. Batterbury Mark, Bowling Brad: “Οφθαλμολογία”.
4. [http://en.wikipedia.org/wiki/Refractive\\_error](http://en.wikipedia.org/wiki/Refractive_error).
5. Κιλιντάρη Μαρίνα: “Ποιότητα αμφιβληστροειδικού ειδώλου”. Εργασία στο μάθημα “Ποιότητα ειδώλου και επεξεργασία οπτικού σήματος”.
6. W. N. Charman: “The retinal image of the human eye”, (1983)
7. <http://www.wikipedia.org/wiki/Zernike>
8. Patrick Y. Maeda: “Zernike Polynomials and Their Use in Describing the Wavefront Aberrations of the Human Eye”.
9. Χαρίλαος Γκίνης : “Το Οπτικό Σύστημα του Οφθαλμού”
10. Χαρίλαος Γκίνης : “Μέτρηση των εκτροπών του οφθαλμού”
11. Χαρίλαος Γκίνης : “Εκτροπόμετρα”
12. Ben C Platt, Roland Shack: “History and Principles of Shack-Hartmann Wavefront Sensor”.
13. D.R. Neal, D.M. Topa James Copland: “The Effects of Lenslet Resolution on the Accuracy of Occular Wavefront Measurements”.
14. Daniel R Neal, James Copland, David Neal: “Shack-Hartmann Wavefront Sensor Precision and Accuracy”.
15. CW Fowler, CM Sullivan: “A comparison of three methods for the measurement of progressive addition lenses”.
16. Eloy A. Villegas, Pablo Artal: “Comparison of aberrations in different types of progressive power lenses”
17. Eloy A Villegas, Pablo Artal: “Spatially Resolved Wavefront Aberrations of Ophthalmic Progressive Power Lenses In Normal Viewing Conditions”
18. David Atchison, Michy Kris, James E Sheedy, Ian L Bailley: “Use Of The Humphrey Lens Analyzer for Off-Axis Measurements of Spectacle Lenses”
19. Michel Guillon, Philip Cooper, Timothy R Poling: “Visual Performance of a multi-zone bifocal and progressive multifocal contact lens”.

20. Daryll Meister: “Ophthalmic Lens Design”.
21. Eloy A Villegas, Pablo Artal: “Visual Acuity and Optical Parameters in Progressive-Power Lenses”.
22. James E. Sheedy, O.D., Ph.D. and Raymond F. Hardy: “Optics of Occupational Progressive Lenses”.
23. Daryll Meister: “Optics Of Progressive Lenses”.
24. CW Fowler: “Apparatus for comparison of progressive addition spectacle lenses”.
25. David A Atchison et al: “Eye Shape in Emmetropia and Myopia”.
26. S Plainis, H S Ginis, A Pallikaris: “The Effect of Ocular Aberrations on Steady State Errors of Accommodative Response”.



Ανάπτυξη παντού. Ανάπτυξη για όλους.

**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ**  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ

**ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ**  
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



**Η ΠΑΙΔΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ**  
Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Εκπαίδευσης και Αρχικής  
Επαγγελματικής Κατάρτισης