



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΣΤΗΝ
ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

ΦΡΑΝΣΕΣ ΣΟΛΟΜΩΝ

A.M.: 15027



ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΦΡΑΝΣΕΣ ΣΟΛΟΜΩΝ του ΔΑΥΙΔ, με αριθμό μητρώου 15027, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Βιοϊατρικών Επιστημών του Τμήματος Οπτικής και Οπτομετρίας, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Φρανσές Σολομών



ΤΑ ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΣΤΗΝ
ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

ΦΡΑΝΣΕΣ ΣΟΛΟΜΩΝ

A.M.: 15027

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Νίνος Γεώργιος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

ΑΘΗΝΑ, 2021



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF HEALTH AND CARE SCIENCES
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL SCIENCES
DIVISION OF OPTICS AND OPTOMETRY

APPLICATIONS OF GEOMETRIC OPTICS IN THE CORRECTION OF REFRACTIVE ANOMALIES

DISSERTATION

FRANSES SOLOMON

C.N.: 15017

SUPERVISOR:

NINOS GEORGIOS, PROFESSOR OF THE UNIVERISTY OF WEST ATTICA

ATHENS, 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας και την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές και φίλους που με στήριξαν κατά την περίοδο φοίτησής μου, και με βοήθησαν με το δικό τους ξεχωριστό τρόπο να διευρύνω τους ορίζοντες μου.

Πρώτα απ' όλα, αξίζουν ιδιαίτερες ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Νίνο, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ πρώτη φορά με το κομμάτι της συγγραφής μιας πτυχιακής διατριβής και έρευνας, και την υποστήριξή του καθ' όλη την διάρκεια προσπάθειας αυτής. Οι παρατηρήσεις και η επιστημονική του καθοδήγηση ήταν ζωτικής σημασίας για την διαμόρφωση της τελικής δομής της συγκεκριμένης εργασίας.

Τέλος και πάνω απ' όλα, ευχαριστώ την οικογένειά μου που με την οικονομική και ψυχολογική υποστήριξή τους, μου πρόσφεραν τη δυνατότητα να παρακολουθήσω ένα πλούσιο πρόγραμμα σπουδών και να προετοιμαστώ καταλλήλως για την επαγγελματική ενασχόληση μου στον τομέα της Οπτικής και Οπτομετρίας.

*Στον πατέρα μου,
Στην οικογένειά μου,
Στους φίλους μου*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διόρθωση των αμετρωπιών του οπτικού συστήματος του ανθρώπου αποτελεί βασική ασχολία των οφθαλμολόγων και οπτομέτρων εδώ και χρόνια. Για να γίνουν κατανοητές οι τεχνικές και οι τρόποι αντιμετώπισης αυτών, θα πρέπει να κατανοηθούν ενδελεχώς οι νομοί και οι βασικοί κανόνες που διέπουν την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη, κυριότεροι εξ αυτών η *Αρχή Ελάχιστου Χρόνου* και η *Αντίστροφη Πορεία Φωτός*. Επίσης, βασικό για την μελέτη και αντιμετώπιση των ανωμαλιών, είναι η γνώση της ανατομίας του οφθαλμού από τα κύρια διαθλαστικά στοιχεία αυτού, δηλαδή του κερατοειδή και του κρυσταλλοειδή φακού, μέχρι και τον τρόπο λειτουργίας του μηχανισμού της όρασης, και πως μεταφέρεται το οπτικό ερέθισμα στο κέντρο αποκωδικοποίησης. Στην παρούσα πτυχιακή διατυπώθηκαν, ο τρόπος αλληλεπίδρασης των φακών με το οπτικό σύστημα, πως οι φακοί διορθώνουν τις αμετρωπίες, καθώς επίσης με ποιον τρόπο γίνεται η καταλληλότερη επιλογή φακού για θα κάθε τύπο και βαθμό αμετρωπίας.

ABSTRACT

Correcting the ametropies of the human visual system has been a major concern of ophthalmologists and optometrists for years. In order to understand the techniques and the ways of dealing with them, one must thoroughly understand the laws and the basic rules that govern the interaction of light with matter, the most important of which are the Minimum Time Principle and the Reverse Light Path. Also essential for the study and treatment of the abnormalities, is the knowledge of the anatomy of the eye, its main refractive elements, i.e. the cornea and the crystalline lens, up to the mode of operation of the mechanism of vision, and how the visual stimulus is transferred to the visual center. . In the present dissertation were formulated, the way the lenses interact with the optical system, how the lenses correct the ammetropies, as well as the way the most appropriate lens is selected for each type and degree of ametropia.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	18
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	20
1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΣ.....	22
1.1. ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ Ή ΑΡΧΗ ΤΟΥ FERMAT.....	22
1.2. ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ.....	23
1.3. Η ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ	23
1.3.1. Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ	24
1.3.2. Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ SNELL.....	25
1.3.3. ΦΑΚΟΙ.....	27
1.3.4. ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	30
1.3.5. ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΑΚΩΝ.....	32
1.3.6. ΣΥΜΒΑΣΕΙΣ ΠΡΟΣΗΜΩΝ	33
1.3.7. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΙΔΩΛΟΥ ΣΕ ΘΕΤΙΚΟ ΦΑΚΟ	34
1.3.8. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΙΔΩΛΟΥ ΣΕ ΑΡΝΗΤΙΚΟ ΦΑΚΟ.....	35
1.3.9. ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΤΥΧΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΣΕ ΛΕΠΤΟ ΦΑΚΟ (WILD RAY TRACING) 36	
2. ΟΙ ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΩΜΑΛΙΕΣ.....	39
2.1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΤΟΜΙΑΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΟΦΘΑΛΜΟΥ.....	39
2.2. ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΟΦΘΑΛΜΟΥ.....	44
2.3. ΚΥΚΛΟΙ ΣΥΓΧΥΣΗΣ.....	45
2.4. ΟΙ ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΤΟΥ ΟΦΘΑΛΜΟΥ	46
2.4.1. Η ΜΥΩΠΙΑ.....	46
2.4.2. Η ΥΠΕΡΜΕΤΡΩΠΙΑ.....	48
2.4.3. Ο ΑΣΤΙΓΜΑΤΙΣΜΟΣ	50
3. Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΡΑΣΗΣ	53
3.1. Η ΠΟΡΕΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΟΦΘΑΛΜΟ.....	53
3.1.1. Ο ΑΜΦΙΒΛΗΣΤΡΟΕΙΔΗΣ.....	56

3.1.2.	Η ΟΠΤΙΚΗ ΟΔΟΣ.....	59
3.1.3.	ΤΑ ΕΞΩ ΓΩΝΑΤΩΔΗ ΣΩΜΑΤΑ.....	59
3.1.4.	ΟΙ ΟΠΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ.....	60
3.1.5.	Ο ΟΠΤΙΚΟΣ ΦΛΟΙΟΣ.....	61
3.2.	ΟΠΤΙΚΗ ΟΞΥΤΗΤΑ.....	63
3.3.	ΣΧΗΜΑΤΙΚΟΙ ΟΦΘΑΛΜΟΙ	64
4.	ΟΙ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ	67
4.1.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΑΚΩΝ (ΛΕΠΤΩΝ).....	67
4.1.1.	ΟΠΙΣΘΙΑ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ	70
4.2.	ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ.....	71
4.2.1.	ΕΞΟΥΔΕΤΕΡΩΣΗ ΜΥΩΠΙΑΣ	74
4.2.2.	ΕΞΟΥΔΕΤΕΡΩΣΗ ΥΠΕΡΜΕΤΡΩΠΙΑΣ	75
4.2.3.	ΕΞΟΥΔΕΤΕΡΩΣΗ ΑΣΤΙΓΜΑΤΙΣΜΟΥ	80
4.2.4.	ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΗ ΔΙΟΘΡΩΣΗ ΑΜΕΤΡΩΠΙΩΝ.....	82
5.	ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	84
5.1.	Η ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ	84
5.1.1.	ΟΡΘΟΚΕΡΑΤΟΛΟΓΙΑ (Orthokeratoly).....	84
5.1.2.	Η ΕΠΙΔΗΜΙΑ ΤΗΣ ΜΥΩΠΙΑΣ.....	85
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	91

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η οπτική είναι ο κλάδος της Φυσικής που ασχολείται με την συμπεριφορά του φωτός και οποιουδήποτε ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Οι τρεις τομείς της Οπτικής μπορούν να διαχωριστούν σε Φυσική, Γεωμετρική και Κβαντική Οπτική. Ο πρώτος μελετά φαινόμενα που σχετίζονται με την κυματική φύση του φωτός όπως συμβολή και πόλωση. Η Γεωμετρική Οπτική θεωρεί ότι το φως ταξιδεύει ευθύγραμμα και εμπεριέχει τους νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης. Η Κβαντική Οπτική διαπραγματεύεται τους νόμους που διέπουν την αλληλεπίδραση τους φωτός με την υλη σε κβαντικό επίπεδο υπό την αιγίδα της Κβαντομηχανικής Θεωρίας. Η ανάπτυξη του κλάδου της Οπτικής είναι συνώνυμη με την εξέλιξη του *δυτικού* πολιτισμού και χωρίς αυτή ο κόσμος του σήμερα θα ήταν πολύ διαφορετικός. (H.D Young, 2010)

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί τις φυσικές ιδιότητες του γυαλιού, είτε αυτό είναι διορθωτικός φακός, είτε φακός που χρησιμοποιείται για την παρατήρηση μακρινών αντικειμένων, για περίπου 600 χρόνια! Η εκμάθηση της αξιοποίησης των φυσικών ιδιοτήτων του γυαλιού είναι από τις πιο πρόσφατες και πιο σημαντικές ανακαλύψεις του σύγχρονου ανθρώπου. (Χανδρινός Α. , 2010) Η ύπαρξη ανθρώπινης ανάγκης για διόρθωση της όρασης, ιδιαίτερα της κοντινής, ξεκίνησε από την ανάπτυξη της τυπογραφίας από τον Γουτεμβέργιο και την μαζική εκτύπωση βιβλίων και συγγραμμάτων. Αυτό ώθησε στην προσπάθεια κατανόησης των νόμων, της λειτουργίας και της αλληλεπίδρασης του φωτός με το γυαλί, καθώς και του ίδιου του φωτός.

Η κατανόηση των βασικών κανόνων της Οπτικής είναι υψίστης σημασίας για την κατανόηση της λειτουργίας της όρασης και της προσπάθειας διόρθωσης των ατελειών του οπτικού συστήματος του ανθρώπου.

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η προσπάθεια του ανθρώπου να κατανοήσει την φύση του φωτός ξεκίνησε από τα αρχαία χρόνια με τους Έλληνες φιλόσοφους να είναι από τους πρώτους που το δοκίμασαν. Καταξιωμένα ονόματα όπως ο Πυθαγόρας ο Σάμιος, ο Δημόκριτος, ο Εμπεδοκλής κ.α. προσπάθησαν να διατυπώσουν ολοκληρωμένες θεωρίες. Χωρίς, όμως, την σύγχρονη επιστημονική σκέψη και έρευνα, δεν μπορούσαν να αποκτήσουν ποτέ πλήρη υπόσταση. (Μήτσου)

Ακλουθώντας την έξοδο από τον μεσαιωνικό σκοταδισμό και την πνευματική σιγή της εποχής, επιστήμονες όπως ο Roger Bacon (1214-1294), ο Leonardo Da Vinci (1452-1519), ο Galileo Galilei (1564-1642), ο Rene Descartes (1596-1620) κ.α. έθεσαν τις βάσεις της επιστημονικής έρευνας και της ορθοκρισίας που βοήθησαν στην καλύτερη και σωστότερη παρατήρηση του κόσμου γύρω μας. Ο πρώτος που συνέθεσε μια ολοκληρωμένη, για την τότε εποχή, θεωρία ήταν ο Sir Isaac Newton ή Νεύτων (1643-1727) στο βιβλίο του Optiks, 1704. Η θεωρία του εξηγούσε ικανοποιητικά ορισμένα από τα φαινόμενα που έχουν σχέση με το φως και δεχόταν ότι τα φωτεινά σώματα εκπέμπουν σωματίδια, τα οποία κινούνται ευθύγραμμα και με μεγάλη ταχύτητα. Τα σωματίδια ανακλώνται στο μάτι και προκαλούν την ανάλογη αίσθηση. Η θεωρία του μπορεί να περιγράψει όλα τα φαινόμενα που σχετίζονται με την ευθύγραμμη διάδοση του φωτός, αλλά αδυνατεί να περιγράψει φαινόμενα όπως η διάθλαση, οι κυματικές ιδιότητες του φωτός κ.λπ. και γι' αυτό το λόγο εγκαταλείφθηκε. (Χανδρινός Α. , 2010)

Την ίδια περίπου εποχή, ο Ολλανδός φυσικός Christiaan Huygens (1629-1695) περιέγραψε το φως ως κύμα. Η θεωρία του Huygens στηρίζεται σε ένα απλό πρότυπο που περιγράφει την διάδοση των κυμάτων και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλων των ειδών τα κύματα, όχι μόνο στα οπτικά. Η Αρχή του Huygens, αναφέρει ότι: *Κατά την διάδοση του κύματος κάθε σημείο μιας ισοφασικής επιφάνειας (μέτωπο κύματος) μπορεί να θεωρηθεί σαν σημειακή πηγή, που εκπέμπει δευτερογενή κύματα, τα οποία διαδίδονται με την ταχύτητα διάδοσης του μέσου.* Η θεωρία του Huygens ερμηνεύει πιο πολλά οπτικά φαινόμενα, όπως η διάθλαση, η περίθλαση κλπ, αλλά αδυνατεί να περιγράψει φαινόμενα όπως το φωτοηλεκτρικό. (Χανδρινός Α. , 2010)

Την ίδια πεποίθηση , ότι το φως αποτελεί κύμα, υιοθέτησε και ο άγγλος φυσικός James Clerk Maxwell (1831-1879), ο οποίος κατάφερε θεωρητικά να αποδείξει ότι το φως αποτελείται από δυο συνιστώσες, μια ενός ηλεκτρικού και μια ενός μαγνητικού πεδίου, οι οποίες ταλαντεύονται χρονικά και τοπικά ταυτοχρόνως. Με

την πειραματική απόδειξη της θεωρίας από τον Heinrich Hertz (1857-1894) εδραιώθηκε η ηλεκτρομαγνητική φύση των κυμάτων του φωτός. Όμως υπήρχε ένα φαινόμενο, ονόματι φωτοηλεκτρικό, το οποίο δεν μπορούσε να ερμηνεύσει η κυματική θεωρία του Huygens και Maxwell.

Το 1900 στο Πανεπιστήμιο του Βερολίνου ο Max Karl Ludwig Planck (1858-1947) διατύπωσε την θεωρία των κβάντων (Quanta). Σύμφωνα με τον Planck η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μεταδίδεται ασυνεχώς στον χώρο κατά στοιχειώδη ποσά – κβάντα – ενέργειας. Ο Albert Einstein (1879-1955) διεύρυνε την θεωρία του Planck και στην περίπτωση του φωτός και ονόμασε τα κβάντα φωτός, *φωτόνια*. Έτσι, υιοθετήθηκε η διττή φύση του φωτός, δηλαδή ότι εμφανίζει σωματιδιακή και κυματική φύση ταυτόχρονα.

Ειδικότερα, στα μικρά μήκη κύματος, η συμπεριφορά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι κατά βάση *σωματιδιακή*, ενώ στα μεγάλα μήκη κύματος *κυματική*. Στην περίπτωση του ορατού φωτός που καταλαμβάνει ενδιαμέση θέση στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα – το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στα μοντέλα αυτής της πτυχιακής εργασίας – εκδηλώνονται συνάμα κυματικές και σωματιδιακές συμπεριφορές. (Χανδρινός Α. , 2010)

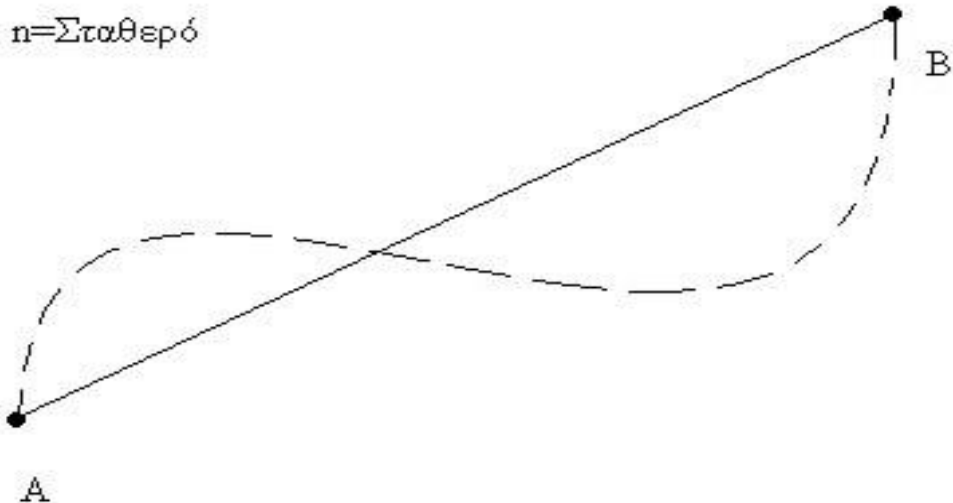
1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΣ

Μέχρι τα τελευταία χρόνια η ευθύγραμμη διάδοση του φωτός στο διάστημα ήταν δεδομένη. Με την πορεία της Φυσικής όμως αποδείχτηκε ότι αυτό δεν είναι απόλυτα ακριβές. Παρόλα αυτά για διδακτικούς λόγους σε αυτή την πτυχιακή μελέτη θα θεωρηθεί ότι το φως κινείται σε ευθείες γραμμές. Ο κλάδος της φυσικής που ασχολείται με τους νομούς που διέπουν την κίνηση του φωτός, ανεξαρτήτως θεωρίας, στον χώρο καθώς και την αλληλεπίδραση του με διάφορα υλικά, πχ τα φαινόμενα ανάκλασης και διάθλασης ή πως λειτουργεί η αίσθηση της όρασης, ονομάζεται γεωμετρική οπτική. Αυτήν την διάδοση του φωτός διέπουν συγκεκριμένοι νομοί και αρχές. Αυτοί είναι οι έξης:

1.1. ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ Ή ΑΡΧΗ ΤΟΥ FERMAT

Η διάδοση του φωτός υπακούει σε μια γενική αρχή, την αρχή του *ελάχιστου χρόνου* (*principle of least time*), που διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον Pierre de Fermat το 1657, ο οποίος εξέφρασε το φαινόμενο της συντομότερης οδού του φωτός. *Από όλους του πιθανούς δρόμους που μπορεί να μεταδοθεί από ένα σημείο στο άλλο, το φως «διαλέγει» το δρόμο που χρειάζεται τον ελάχιστο χρόνο.* Από την γενική αυτή αρχή πηγάζουν οι νόμοι της ανάκλασης, της διάθλασης, αλλά και η αρχή της αντιστροφής πορείας του φωτός, που αποτελούν το 'Σύνταγμα' της Γεωμετρικής Οπτικής (Σχ. 1.1). Το φαινόμενο της ανάκλασης και συγκεκριμένα της διάθλασης, που θα μελετήσουμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία, είναι η εκδήλωση του φαινομένου του ελαχίστου χρόνου. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012)

$n = \text{σταθερό}$



Σχήμα 1.1 Αρχή Ελάχιστου Χρόνου ή Αρχή του Fermat [31]

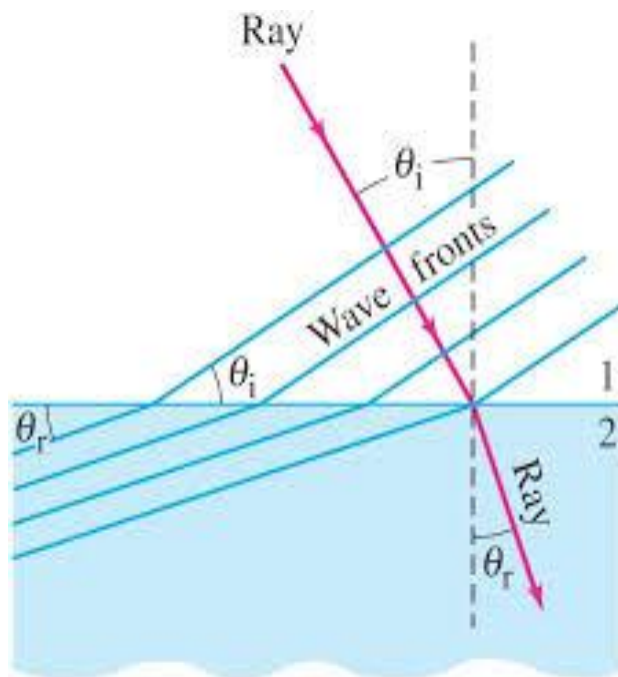
1.2. ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ.

Η αρχή της αντίστροφης πορείας φωτός ορίζει ότι όταν το φως διαδίδεται σε ορισμένη πορεία τότε μπορεί να την αντιστρέψει. Δηλαδή από το σημείο B στο σημείο A, το φως ακλουθεί ακριβώς την ίδια πορεία που ακολουθεί από το A στο B. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012)

1.3. Η ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Τρία πράγματα μπορούν να συμβούν όταν μια φωτεινή ακτίνα συναντά ένα αντικείμενο στον χώρο. Πρώτον, το φως μπορεί να απορροφηθεί από το αντικείμενο και στην περίπτωση αυτή λέμε ότι το αντικείμενο είναι αδιαφανές. Δεύτερον, το φως μπορεί να ανακλαστεί προς τα πίσω όπως συμβαίνει με τον καθρέπτη και, τρίτον το φως ή μέρος αυτού, να διαδοθεί μέσω του αντικείμενου, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση ενός διαφανούς σώματος όπως το γυαλί. Στο κενό η ταχύτητα του φωτός είναι ≈ 300000 χιλιόμετρα ανά δευτερόλεπτο. Όταν το φως διέρχεται από υλικό πιο πυκνό από τον αέρα (ή γενικά πιο πυκνό από το προηγούμενο μέσο διάδοσης) επιβραδύνεται διότι συναντά μεγαλύτερη αντίσταση. Ταυτοχρόνως, σε περίπτωση που το φως προσπέφτει υπό γωνία στην διαχωριστική επιφάνεια τότε παρατηρείται αλλαγή στην διεύθυνση διάδοσης του. Το φαινόμενο της αλλαγής κλίσης του φωτός όταν αλλάζει μέσο διάδοσης ονομάζεται διάθλαση. (Στάγκος, 2002) Πιο σωστά, διάθλαση ονομάζεται το φυσικό φαινόμενο εκτροπής της ευθύγραμμης διάδοσης των φωτεινών ακτινών όταν αυτές διέρχονται από ένα μέσο διάδοσης σε ένα άλλο,

με διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή της ταχύτητας διάδοσης του φωτός όταν εισέρχεται σε διαφορετικό μέσο με διαφορετική πυκνότητα. Το φαινόμενο αποδεικνύεται με την θεωρία των μετώπων κύματος του Huygens, (Σχ. 1.2, Σχ. 1.3, Σχ. 1.4) καθώς και με την απόδειξη του νομού του Snell. (βλ. Σχ. 1.3.3.)



Σχήμα 1.2 Σχηματική απεικόνιση διάθλασης με μέτωπα κύματος. [32]

1.3.1. Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

Ο δείκτης διάθλασης παίζει έναν καθοριστικά κυρίαρχο ρόλο στην γεωμετρική οπτική. Η πρώτη και βασικότερη παράμετρος που καθορίζει την αλλαγή κατεύθυνσης είναι η πυκνότητα του μέσου. Η πυκνότητα ενός μέσου εκφράζεται με τον δείκτη διάθλασης που είναι ένα σχετικό μέγεθος και ορίζεται ως το πηλίκο της ταχύτητας του φωτός στο πρώτο μέσο προς την ταχύτητά του στο δεύτερο. Όταν το πρώτο μέσο είναι το κενό τότε το πηλίκο αυτό εκφράζει τον απολυτό δείκτη διάθλασης του εκάστου μέσου (Στάγκος, 2002). Ο δείκτης διάθλασης (n) ενός μέσου ορίζεται ως:

$$n = \frac{c}{u} \quad (1.1)$$

Όπου u : η ταχύτητα του φωτός στο μέσο διάδοσης και

C : η ταχύτητα του φωτός στο κενό

Ο δείκτης διάθλασης του κενού έχει οριστεί παγκοσμίως και ισούται με 1. Ο δείκτης διάθλασης του αέρα, λόγω της αμελητέας πυκνότητας του έχει οριστεί και αυτός ως ≈ 1 (Στάγκος, 2002). Αφού το n είναι λόγος δυο ταχυτήτων είναι ένας καθαρός αριθμός χωρίς μονάδα μέτρησης. Η ταχύτητα του φωτός μέσα σε ένα υλικό είναι πάντα μικρότερη από την ταχύτητά του στο κενό, άρα ο n , για οποιοδήποτε υλικό είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας. (H.D Young, 2010)

1.3.2. Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ SNELL

Ο νόμος του Snell ή νόμος διάθλασης περιγράφει την συμπεριφορά των ακτινών όταν περάσουν την διαχωριστική επιφάνεια ενός μέσου, αλλιώς γνωστή και ως διαθλαστική επιφάνεια.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.2)$$

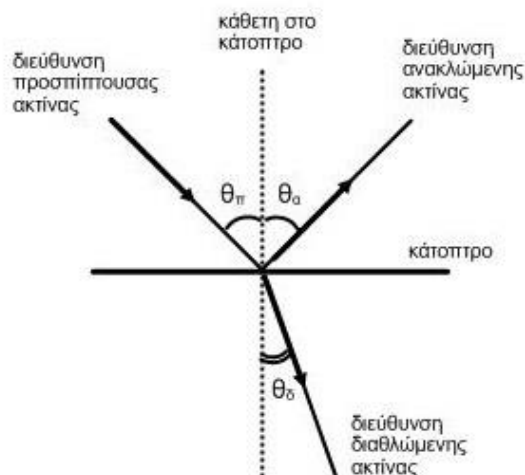
Όπου n_1 : ο δείκτης διάθλασης του μέσου της προσπίπτουσας ακτίνας

θ_1 : η γωνία πρόσπτωσης

n_2 : ο δείκτης διάθλασης του μέσου της διαθλώμενης ακτίνας

θ_2 : η γωνία διάθλασης

Ένα βασικό γνώρισμα που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπ' όψη είναι ότι η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα δημιουργούν ένα επίπεδο ονομάζεται επίπεδο πρόσπτωσης που είναι πάντα κάθετη στην διαθλαστική επιφάνεια των δύο οπτικών μέσων. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012)



Σχήμα 1.3 Σχηματική Αναπαράσταση Διάθλασης από αραιό σε πυκνότερο μέσο [1]

Ο νομός του Snell μπορεί να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας την αρχή του Huygens για την κυματική θεωρία. Στο Σχ. 1 θεωρούμε ένα κυματομέτωπο που παρίσταται από την ευθεία AB της οποίας το σημείο μόλις έφτασε στην συνοριακή επιφάνεια των δυο διαφανων υλικών a και b με δείκτες διάθλασης n_a και n_b και κυματικές ταχυτητες u_a και u_b αντίστοιχα. Η ευθεία $A'B'$ αναπαριστά το μέτωπο κύματος μετά από χρόνο διάδοσης t . Η γωνίες θ_1 και θ_2 μεταξύ των μετωπων του προσπιπτοντος και του διαθλωμενου κυματος είναι η γωνια προσπτωσης και διαθλασης αντιστοιχα. Για την εύρεση αυτών των γωνιών φέρεται η $BB' = u_a t$ κάθετη προς AB και η $AA' = u_b t$ κάθετη προς την $A'B'$. Από το ορθογώνιο τρίγωνο ABB' έχουμε

$$\sin \theta_1 = \frac{u_1 t}{AB'}$$

ενώ από το ορθογώνιο τρίγωνο $AA'B'$ έχουμε αντίστοιχα

$$\sin \theta_2 = \frac{u_2 t}{AB'}$$

Διαιρώντας κατά μελή της δυο αυτές σχέσεις, φθίνουμε στην

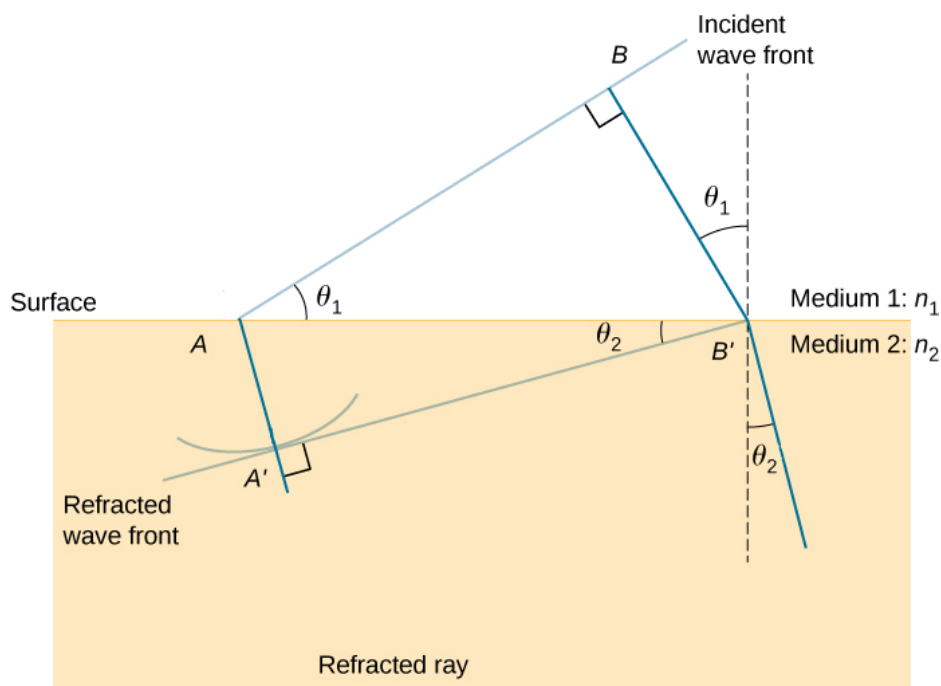
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{u_1}{u_2} \quad (1.3)$$

Συμφώνα με την Σχ. (1) $n_1 = c/u_1$ και $n_2 = c/u_2$. Επομένως, μπορούμε να γράψουμε την Εξ. (3) ως εξής:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

ή αλλιώς $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

(H.D Young, 2010)

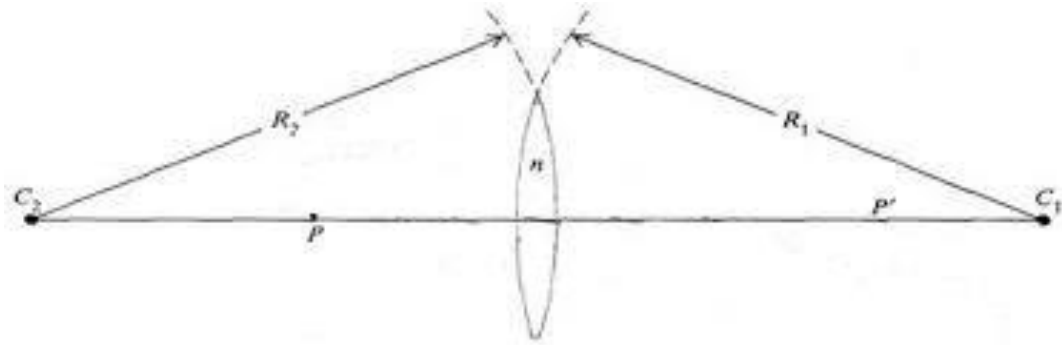


Σχήμα 1.4 Διαδοχικές θέσεις ενός επίπεδου κύματος AB καθώς διαθλάται από μια επίπεδη επιφάνεια. [9]

1.3.3. ΦΑΚΟΙ

Διαθλαστικό μέσο καλείται κάθε διαφανές σώμα που αλλάζει την κατεύθυνση ή την κλίση μιας φωτεινής δέσμης που το διαπερνά. Το διαθλαστικό μέσο που αλλάζει την κλίση της δέσμης αλλά όχι την κατεύθυνση της, ονομάζεται φακός,

Φακός είναι ένα διαφανές, ομογενές και ισότροπο μέσο που περατώνεται σε δυο διαθλαστικές επιφάνειες. (Πατέρας, Οφθαλμικοί Φακοί I, 2010)



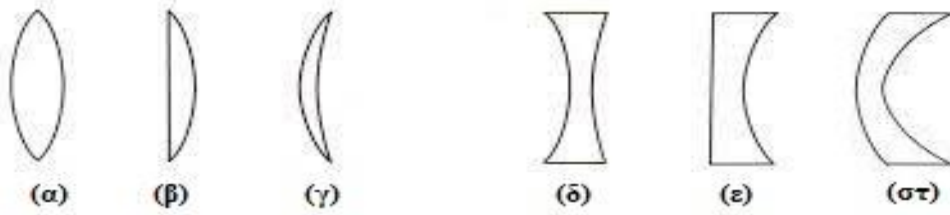
Σχήμα 1.5 Σχηματική απεικόνιση της ακτίνας καμπυλότητας ενός φακού [32]

Υπάρχουν πολλά και διάφορα είδη φακών ανάλογα με το σχήμα και το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι. Εμείς θα εστιάσουμε κυρίως στους φακούς που έχουν συμμετρία στον οριζόντιο άξονα, γνωστός και ως *κύριος άξονας* του φακού, και οι δυο επιφάνειες των φακών είναι τμήματα ενός κύκλου (τόξα) με συγκεκριμένη ακτίνα. Αυτή η ακτίνα του κύκλου αναφέρεται και ως *ακτίνα καμπυλότητας*. Οι φακοί που οι επιφάνειες τους αποτελούν τόξα κύκλων ονομάζονται *σφαιρικοί φακοί*. (Σχ. 1.5) (Henderson, Refraction and the Ray Model of Light, 2000)



Σχήμα 1.6 Παράδειγμα κατασκευής φακών με τόξα κύκλων [4]

Οι δυο κατηγορίες φακών είναι οι θετικοί που προκαλούν σύγκλιση των ακτινών του φωτός προς τον κύριο άξονα και οι αρνητικοί φακοί απόκλιση των ακτινών από τον κύριο άξονα του φακού. Οι θετικοί ή συγκλίνοντες φακοί είναι παχύτεροι στο κέντρο, ενώ οι αρνητικοί οι αποκλίνοντες φακοί είναι λεπτότεροι στο κέντρο. (Σχ.1.6, Σχ. 1.7)

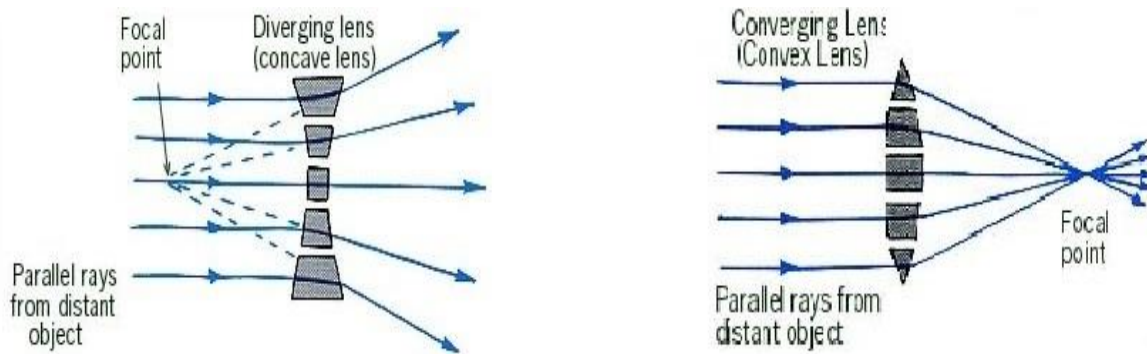


Σχήμα 1.7 Σφαιρικοί Φακοί

Συγκλίνοντες: (α) αμφίκυρτος ($R_1 > 0, R_2 > 0$), (β) επιπεδόκυρτος ($R_1 > 0, R_2 = \infty$), (γ) συγκλίνων μηνίσκος

Αποκλίνοντες: (δ) αμφίκοιλος ($R_1 < 0, R_2 < 0$), (ε) επιπεδόκοιλος ($R_1 = \infty, R_2 < 0$), (στ) αποκλίνων μηνίσκος¹ [2]

Η λειτουργία των φακών μπορεί να περιγράψει από μια επαλληλία «άπειρων» πρισμάτων με μεταβαλλόμενη γωνία κορυφής A για έναν αμφίκυρτο ή αμφίκοιλο φακό. Έτσι, λόγω την μεταβολής την γωνίας A η έκτροπη των ακτινών είναι μεγαλύτερη στα τα ακραία τμήματα του φακού προς το κέντρο του. Ως αποτέλεσμα είναι η σύγκλιση ή απόκλιση των ακτινών του φωτός να τείνουν να συγκεντρωθούν σε μια περιοχή όπου οι διαστάσεις της εξαρτώνται από την γεωμετρία και το σχήμα του κάθε φακού. (Σχ. 1.8) (Henderson, Reflection and the Ray Model of Light, 2000)

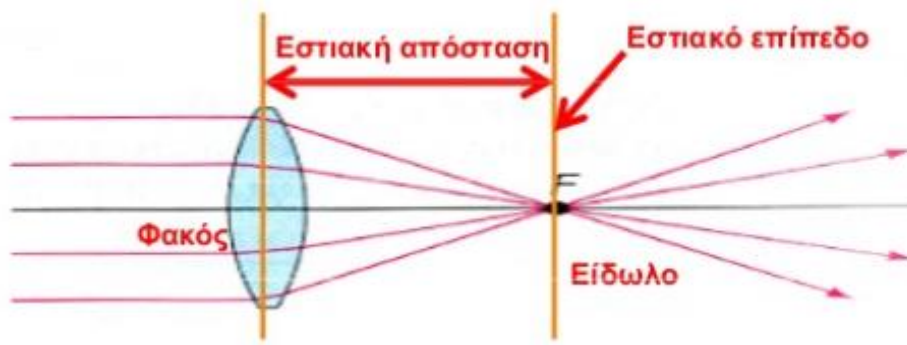


Σχήμα 1.8 Σύνθεση θετικού και αρνητικού φακού από πρίσματα [3]

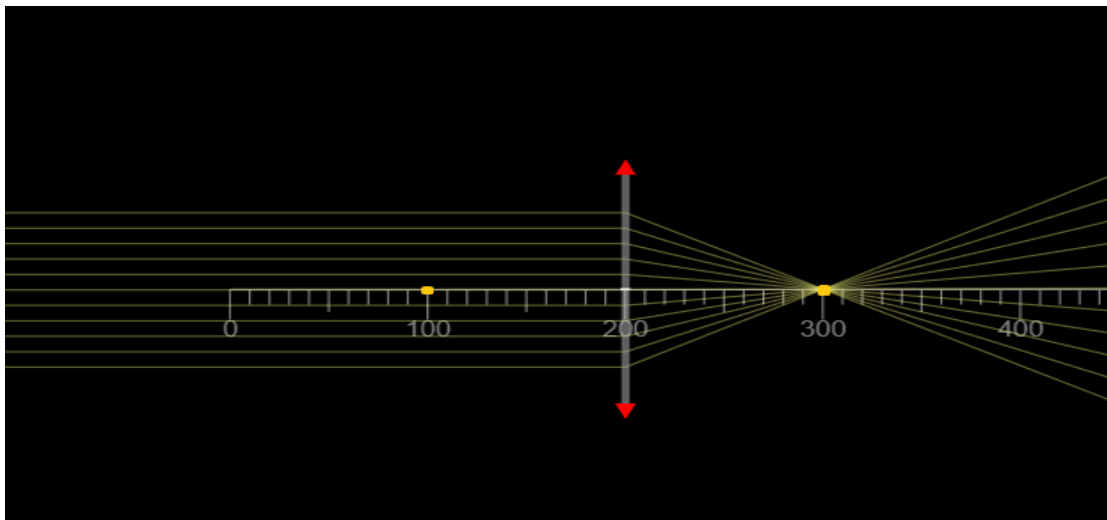
¹ R_1 η ακτίνα καμπυλότητας της πρώτης επιφάνειας που συναντά το φως και R_2 της δεύτερης.

1.3.4. ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

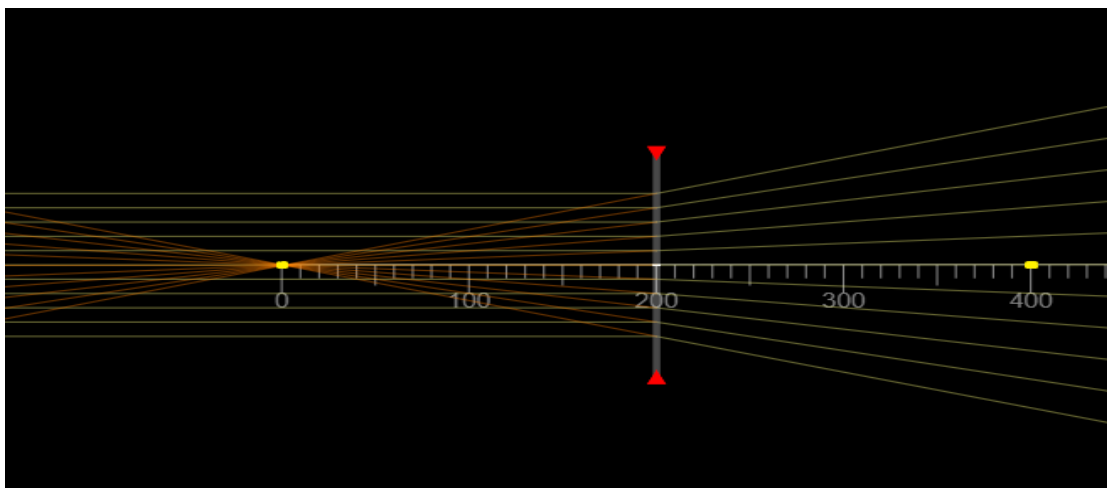
Για την καλύτερη περιγραφή ενός φακού θα πρέπει να αποσαφηνιστούν διαφορές έννοιες και οροί. *Κύριος ή οπτικός άξονας* είναι ο οριζόντιος άξονας συμμετρίας του φακού, και είναι η ευθεία που συνδέει τα δυο κέντρα καμπυλότητας των επιφανειών του φακού. Μια παράλληλη δέσμη προς τον κύριο άξονα εισερχόμενη σε έναν θετικό φακό, διαθλάται συγκλίνοντας σε ένα σημείο πάνω στον κύριο άξονα. Αυτό το σημείο ονομάζεται η *κύρια εστία (E)* του φακού. Στην περίπτωση ενός αρνητικού φακού η κύρια εστία εντοπίζεται στο σημείο σύγκλισης των προεκτάσεων των διαθλώμενων ακτινών. Η κύρια εστία βρίσκεται πάντα πάνω στον κύριο άξονα. Αντιστρόφως όταν μια δέσμη (ή η προέκταση αυτής) έχει σαν πηγή την κύρια εστία τότε μετά την διάθλαση, θα είναι παράλληλη στον κύριο άξονα. Επειδή το φως διαδίδεται και αντίστροφα κάθε φακός έχει δυο εστίες (μετά από τον φακό για θετικούς και πριν για τους αρνητικούς) και την *δευτερεύουσα εστία E'* (πριν από τον θετικό και μετά τον αρνητικό) (Σχ. 1.6, Σχ. 1.7) . Η κύρια και η δευτερεύουσα εστία ανταλλάσσουν θέση στην αντίστροφη πορεία φωτός και γι' αυτό το λόγο λέγονται συζυγή σημεία. *Εστιακή απόσταση (f)* ονομάζεται η απόσταση την κύριας εστίας από το κέντρο του φακού. Η *οπτική ισχύς (Dpt ή D)* είναι το αντίστροφο της εστιακής απόστασης και το μέγεθος που εκφράζει την δύναμη ενός φακού. Κάθε άλλη ευθεία που διέρχεται από το κέντρο του φακού ονομάζεται *δευτερέων οπτικός άξονας* και ως εκ τούτου αν παράλληλη δέσμη σε κάποιο δευτερεύοντα άξονα προσπίπτει στον φακό εστιάζεται σε ένα σημείο πάνω σε αυτόν. Η επιφάνεια που ορίζουν τα σημεία εστίασης των δεσμών ονομάζεται *εστιακό επίπεδο*. Ένα *σημειακό αντικείμενο* είναι αυτό που προέρχεται από μια σημειακή πηγή που εκπέμπει θεωρητικά άπειρες ακτίνες προς όλες τις διευθύνσεις. Συνήθως αρκούν δυο ακτίνες για να προσδιοριστεί το είδωλο του. Ένα *εκτεταμένο αντικείμενο, ρεαλιστικό αντικείμενο* αποτελείται από θεωρητικά άπειρα σημεία. Για να οριστεί το είδωλο του εξετάζεται κάθε σημείο ξεχωριστά. Συνήθως αρκεί να εξετάσουμε μόνο κάποια ενδεικτικά σημεία στο αντικείμενο. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012)



Σχήμα 1.8 Σχηματική απεικόνιση του εστιακού επιπέδου ενός θετικού φακού [23]



Σχήμα 1.9 Η κύρια και δευτερεύουσα εστία σε ένα θετικό φακό. [6]



Σχήμα 1.10 Η κύρια και δευτερεύουσα εστία σε ένα αρνητικό φακό. [6]

1.3.5. ΟΙ ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΑΚΩΝ

Η συμπεριφορά των ακτινών διερχόμενων μέσω ενός φακού καθώς και ότι έχει να κάνει με τον σχηματισμό ειδώλου και την φύση του μπορούν να περιγραφούν με διαφόρους τύπους και σχέσεις.

- Σχέση Αντικειμένου - Ειδώλου

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (1.4)$$

Όπου: f : η εστιακή απόσταση του φακού

a : η απόσταση του αντικείμενου από τον φακό

b : η απόσταση του ειδώλου από τον φακό

- Εγκάρσια Μεγέθυνση

$$M = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{\beta}{\alpha} \quad (1.5)$$

Όπου h_i : μέγεθος ειδώλου

h_o : μέγεθος αντικειμένου

(Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι οι α, β είναι αμφοτέρως θετικές και το είδωλο είναι ανεστραμμένο)

- Σχέση Κατασκευαστών των Φακών (για λεπτό φακό)

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.6)$$

Ο παραπάνω τύπος βασίζεται στην παραδοχή ότι ένας φακός είναι ένας συνδυασμός δυο δίοπτρων με ακτίνες καμπυλωτός R_1 και R_2 περικλείοντας είναι οπτικό μέσο με δείκτη διάθλασης n_v από το περιβάλλον με n_π . Το κάθε δίοπτρα που περικλείει τον φακό θεωρείται ότι λειτουργεί ανεξάρτητα από το άλλο. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012)

Η οπτική ισχύς ενός σφαιρικού δίοπτρου με δείκτη διάθλασης n' και ακτίνα καμπυλότητας R το οποίο περιβάλλεται από οπτικό μέσο με δείκτη διάθλασης n δίνεται από την σχέση:

$$P = \frac{n' - n}{R}$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση που κατά βάση το περιβάλλον μέσο είναι ο αέρας με $n = 1$ η σχέση γίνεται:

$$P = \frac{n' - 1}{R} = \frac{1}{f} \quad (1.7)$$

Η οπτική ισχύς για τα δίοπτρα P_1 και P_2 σύμφωνα με την (1.7) δίνονται από:

$$P_1 = \frac{n_v - n_\pi}{R_1} = \frac{n - 1}{R_1} \quad \text{και} \quad P_2 = \frac{n_\pi - n_v}{R_2} = \frac{1 - n}{R_2}$$

Για να βρούμε την συνολική οπτική ισχύ του φακού απλώς προσθέτουμε τις τιμές από την οπτική ισχύ του κάθε μεμονωμένου δίοπτρου και έχουμε

$$P_{ολ} = P_1 + P_2 = \left(\frac{n - 1}{R_1} \right) + \left(\frac{1 - n}{R_2} \right) = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.8)$$

Για τις δυο παραπάνω σχέσεις θα πρέπει να γίνει η παραδοχή ότι ο φακός είναι λεπτός. Λεπτός θεωρείται ένας φακός όταν το φυσικό του πάχος, δηλαδή η απόσταση των κορυφών των δυο δίοπτρων, θεωρείται μηδαμινή συγκρινόμενη με τις ακτίνες καμπυλότητας και αγνοείται.. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012) (Richard Feynman, 1964) 27

1.3.6. ΣΥΜΒΑΣΕΙΣ ΠΡΟΣΗΜΩΝ

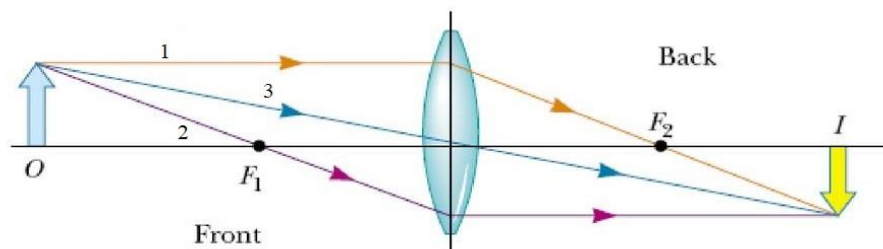
Η ακριβής μορφή των παραπάνω σχέσεων βασίζεται στην καρτεσιανή σύμβαση πρόσημων. Οι αποστάσεις, οι θέσεις, οι εστιακές αποστάσεις ακόμα και οι ακτίνες καμπυλότητας είναι διανυσματικές, έχουν δηλαδή πρόσημο. Ορίζοντας ένα οπτικό σύστημα οι ακτίνες του φωτός εισέρχονται πάντα από τα αριστερά προς τα δεξιά. Η αρχή των συντεταγμένων είναι η κορυφή του οπτικού στοιχείου και βρίσκεται στην θέση (0,0). Οι θέσεις για τις αποστάσεις του αντικείμενου και του ειδώλου βρίσκονται πάνω στον οπτικό άξονα x και είναι θετικές προς τα δεξιά και αρνητικές προς τα αριστερά του οπτικού στοιχείου. Για παράδειγμα αν a η απόσταση του αντικείμενου από τον φακό και $a = -50\text{cm}$ σημαίνει ότι το αντικείμενο βρίσκεται 50cm πριν το οπτικό στοιχείο (Ασημέλλης Β. Δ., 2012). Για χάριν ευκολίας, ο χώρος γύρω από τον φακό διαχωρίζεται σε χώρο αντικείμενου και σε χώρο ειδώλου. Αυτό σημαίνει ότι εάν το αντικείμενο βρίσκεται στον χώρο του αντικείμενου η απόσταση από τον φακό είναι θετική ενώ αν βρίσκεται στον χώρο του ειδώλου η απόσταση του από τον φακό είναι αρνητική. Το αντίθετο ισχύει για το είδωλο και τον χώρο του ειδώλου.

Εκτός από την αριθμητική λύση με την χρήση της σχέσης (4) μπορεί κανείς να βρει και να επιβεβαιώσει τη θέση, το μέγεθος και την φύση του αντικείμενου σχεδιάζοντας ένα διάγραμμα ακτινών.

1.3.7. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΙΔΩΛΟΥ ΣΕ ΘΕΤΙΚΟ ΦΑΚΟ

Για να καταφέρει κανείς να εντοπίσει την απόσταση, την φύση και την μεγέθυνση, χρειάζεται να σχεδιάσει τις ακτίνες που έχουν προκαθορισμένη πορεία. Οι ακτίνες αυτές είναι:

1. Η ακτίνα παράλληλη προς τον οπτικό άξονα διαθλάται οδεύοντας προς την κύρια εστία.
2. Η ακτίνα διερχόμενη από την δευτερεύουσα εστία, μετά τη διάθλαση γίνεται παράλληλη με τον οπτικό άξονα
3. Η ακτίνα που διέρχεται από το οπτικό κέντρο του φακού δεν αλλάζει κατεύθυνση μετά την διάθλαση.

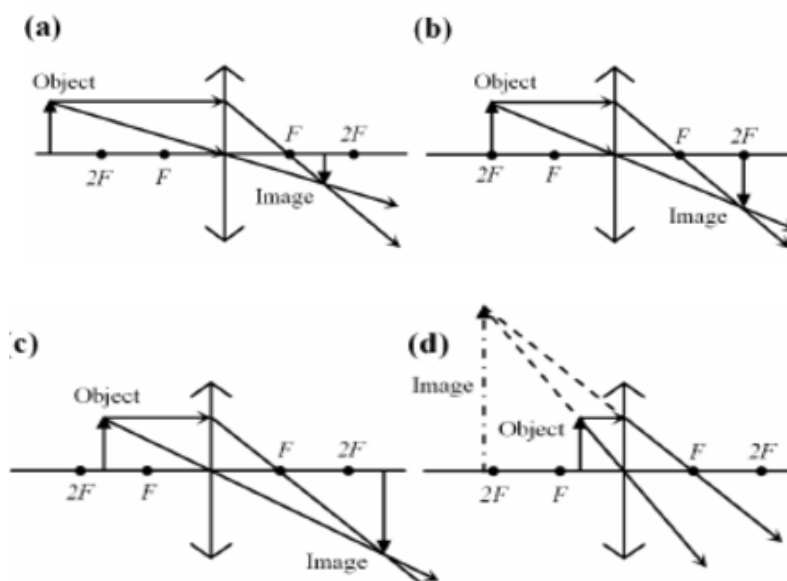


Σχήμα 1.11 Σχηματική απεικόνιση ειδώλου σε ιδανικό θετικό φακό. [8]

Σε έναν θετικό φακό η φύση και ο προσανατολισμός του ειδώλου μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με την απόσταση του αντικείμενου - φακού. Οι περιπτώσεις σχηματισμού ειδώλου σε έναν θετικό φακό μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- Για αντικείμενο μεταξύ $\infty > a > 2f$, το είδωλο είναι πραγματικό και αντεστραμμένο και σχηματίζεται μεταξύ $f > \beta > 2f$ με $|M| < 1$. (Σχ. 1.8, (a))
- Για $a = 2f$ το είδωλο που σχηματίζεται είναι πραγματικό και ανεστραμμένο στην θέση $\beta = 2f$ με μεγέθυνση $|M| = 1$. (Σχ. 1.8, (b))

- Καθώς το αντικείμενο πλησιάζει προς την εστιακή απόσταση, δηλαδή $2f > a > f$ το είδωλο του είναι πραγματικό και ανεστραμμένο και εντοπίζεται σε θέσεις $2f < \beta < \infty$ με $|M| > 1$. (Σχ. 1.8, (c))
- Όταν η απόσταση του αντικειμένου είναι ίση με την εστιακή απόσταση του φακού, το είδωλο σχηματίζεται στο άπειρο (πρακτικά δεν υπάρχει είδωλο) και η μεγέθυνση του είναι άπειρη ($|M| = \infty$)
- Για $a < f$ το αντικείμενο που σχηματίζεται είναι ορθό και φανταστικό, σχηματίζεται πίσω από το φακό με $|\beta| > f$ με $|M| > 1$. (Σχ. 1.8 (d)) (Ασημέλλης Β. Δ., 2012)



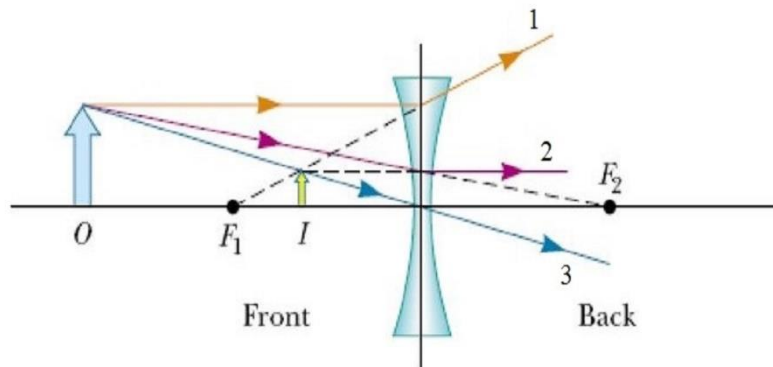
Σχήμα 1.12 Περιπτώσεις απεικόνισης ειδώλου σε ιδανικό συγκλίνων φακό. Το αντικείμενο είναι περὰ από $2f$ (a), σε απόσταση $2f$ (b), μεταξύ $2f, f$ (c) και ανάμεσα από φακό και f (d). [7]

1.3.8. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΙΔΩΛΟΥ ΣΕ ΑΡΝΗΤΙΚΟ ΦΑΚΟ.

Στην κατασκευή σχηματικής απεικόνισης ειδώλου σε έναν αρνητικό φακό ισχύει η ίδια πρακτική σχεδίασης όπως και στους θετικούς φακούς με ορισμένες διαφοροποιήσεις.

1. Η ακτίνα παράλληλη προς τον οπτικό άξονα διαθλάται με κατεύθυνση όπου η προέκτασή της διέρχεται από την εστία του φακού
2. Η ακτίνα που η προέκτασή της από το σημείο που εισέρχεται στον φακό διέρχεται από την δευτερεύουσα εστία θα διαθλαστεί παράλληλη προς τον οπτικό άξονα.
3. Η ακτίνα που διέρχεται από το οπτικό κέντρο του φακού δεν αλλάζει κατεύθυνση μετά την διάθλαση της.

Αντιθέτως στους αρνητικούς φακούς η φύση και ο προσανατολισμός και ο τύπος του ειδώλου είναι ανεξάρτητα από την απόσταση του αντικείμενου - φακού. Το είδωλο σε ένα αρνητικό φακό είναι πάντα φανταστικό, πίσω από τον φακό (δηλαδή στον χώρο του ειδώλου) και με μεγέθυνση πάντα $|M| < 1$. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012)



Σχήμα 1.13 Σχηματική απεικόνιση ειδώλου σε ένα ιδανικό αρνητικό φακό [8]

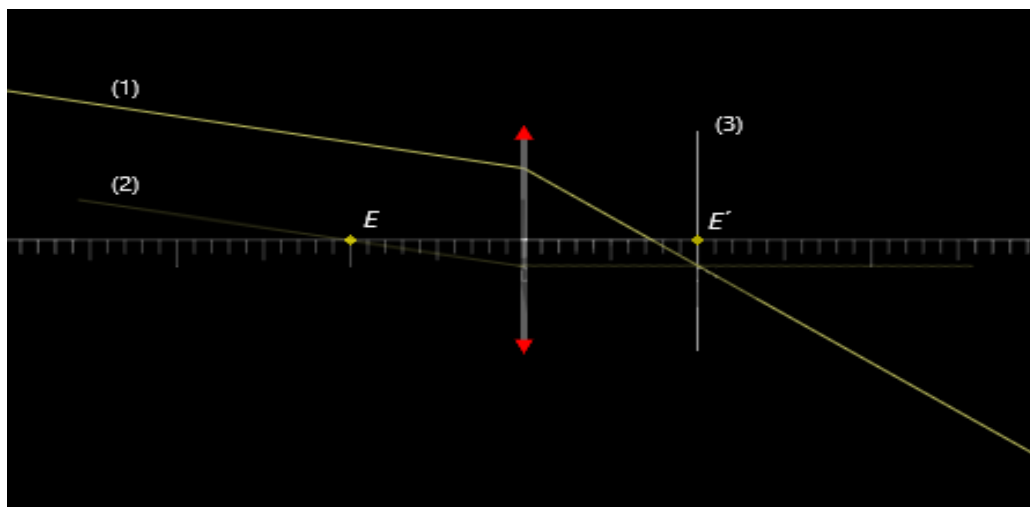
1.3.9. ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΤΥΧΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΣΕ ΛΕΠΤΟ ΦΑΚΟ (WILD RAY TRACING)

Η μέθοδος της λοξής πρόσπτωσης ή μέθοδος Listing επιτρέπουν την ιχνηλάτηση, δηλαδή την εύρεση της πορείας μια τυχαίας ακτίνας μέσα από ένα λεπτό φακό. Η λογική της μεθόδου είναι ότι κάθε ακτίνα παράλληλη προς έναν δευτερεύων οπτικό άξονα θα διέλθει υποχρεωτικά από την αντίστοιχη εστία που ορίζεται ως η τομή του συγκεκριμένου άξονα με το εστιακό επίπεδο. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012)

Η μέθοδος Listing (Σχήμα 1.14) περιγράφεται ως εξής:

- Χαράσσεται μια βοηθητική ευθεία παράλληλη της προσπίπτουσας ώστε να διέρχεται από την δευτερεύουσα εστία E' και να ακολουθεί το διάγραμμα της εστιακής ακτίνας (δηλαδή ότι ακτίνα που διέρχεται από την δευτερεύουσα εστία μετά την διάθλαση εξέρχεται παράλληλη προς τον οπτικό άξονα).

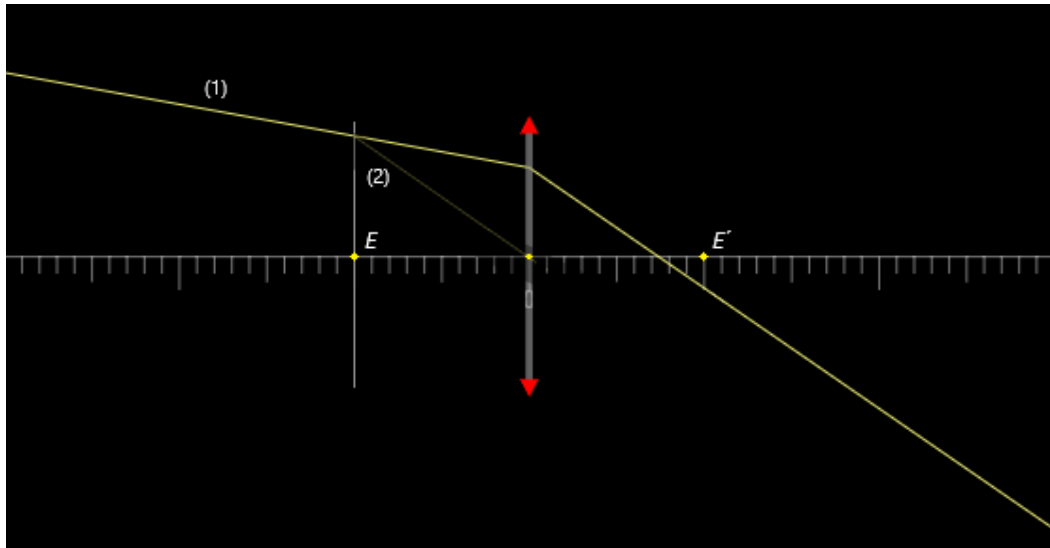
- Η εξερχόμενη ακτίνα από τον φακό διέρχεται από το σημείο που η προέκταση της βοηθητικής ευθείας τέμνει το κύριο εστιακό επίπεδο.



Σχήμα 1.14 Σχεδιασμός διαδρομής τυχαίας ακτίνας με την μέθοδο Listing. (1) Τυχαία προσπίπτουσα ακτίνα. (2) Βοηθητική ευθεία. (3) Κύριο εστιακό επίπεδο. [6]

Εναλλακτικά, από την αντίθετη πορεία του φωτός, η εύρεση της πορείας της τυχαίας ακτίνας (Σχήμα 1.13) μπορεί να γίνει ως εξής:

- Από το σημείο τομής με το δευτερεύων (πρώτο στην πορεία της ακτίνας) εστιακό επίπεδο σχεδιάζεται η βοηθητική ευθεία προς το κέντρο του φακού.
- Στο σημείο τομής της ακτίνας με το φακό η διεύθυνση της εξερχομένης ακτίνας είναι παράλληλη προς την βοηθητική ευθεία. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012)



Σχήμα 1.15 Εναλλακτικός σχεδιασμός διαδρομής τυχαίας ακτίνας με την μέθοδο λοξής πρόσπτωσης. (1) Τυχαία προσπίπτουσα ακτίνα. (2) Βοηθητική ευθεία. [6]

2. ΟΙ ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΩΜΑΛΙΕΣ

2.1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΤΟΜΙΑΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΟΦΘΑΛΜΟΥ

Η αναζήτηση και η κατανόηση των νόμων της οπτικής απεικόνισης δεν θα είχε καμία σημασία αν δεν υπήρχε η άμεση χρησιμότητα αυτών. Τα οπτικά όργανα απεικόνισης εφαρμόζουν τις αρχές που αναλύθηκαν παραπάνω. Το πρώτο, βασικότερο όλων, οπτικό όργανο απεικόνισης δεν είναι παρά ο ανθρωπινός οφθαλμός.

Ο οφθαλμός αποτελεί κύριο όργανο αντίληψης του περιβάλλοντος ενός ανθρώπου, όντας το αισθητήριο όργανο της όρασης και λειτουργεί μετατρέποντας την ενεργεία των φωτεινών κυμάτων σε ηλεκτρικές νευρικές ώσεις που μεταφέρονται, μέσω των νευρικών αξόνων της οπτικής οδού, στον ινιακό λοβό που βρίσκεται το κέντρο της όρασης, για να γίνουν αντιληπτές ως «φως». Ο βολβός του ματιού αποτελείται από τμήματα δυο σφαιρών με διαφορετικές διαστάσεις (βλ. Κεφ. 2.2). Στον ανθρωπινό οφθαλμό μπορούν να διακριθούν δυο θάλαμοι, ο πρόσθιος θάλαμος που ορίζεται ως ο χώρος μεταξύ της οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς και του κρυσταλλοειδούς φακού με μέσω βάθος 3,4 mm και ο οπίσθιος θάλαμος δηλαδή ο χώρος μεταξύ της οπίσθιας επιφάνειας της ίριδας και του αμφιβληστροειδή. Τον χώρο μεταξύ των δυο προαναφερθέντων ανατομικών στοιχείων γεμίζει το υδατοειδές υγρό και το υαλώδες σώμα -το οποίο συνδράμει στην διάδοση των ακτινών και έχει και αυτό στηρικτική λειτουργία- αντίστοιχα. (Πατέρας, Οπτομετρία I, 2010)

Ο ανθρωπινός οφθαλμός (από έξω προς τα μέσα) αποτελείται από ένα στρώμα πυκνού συνδετικού ιστού τον *σκληρό ή ινώδη χιτώνα*. Είναι κοινώς αυτό που αποκαλούμε το «λευκό» του ματιού. Βασική λειτουργία του σκληρού είναι να διατηρεί το σφαιρικό σχήμα του βολβού, είναι ανθεκτικός σε εξωτερικές και εσωτερικές δυνάμεις και περά από τον προασπιστικό αυτό ρολό χρησιμεύει για την πρόσφυση των βολβοκινητικών μυών. (Στάγκος, 2002) Ο σκληρός χιτώνας συνεχίζει προς τα εμπρός με τον *κερατοειδή χιτώνα*. Κύριες λειτουργίες του κερατοειδή είναι η διάθλαση και η μετάδοση του φωτός καθώς και η προστασία του ματιού.

Ενδότερα του βολβού υπάρχει ο *αγγειώδης ή ραγοειδής χιτώνας*. Ο συγκεκριμένος χωρίζεται σε τρεις μοίρες με διαφορετική λειτουργία και μορφολογία. Αυτές είναι από τα εμπρός προς τα πίσω η *ίριδα*, το *ακτινωτό σώμα* και ο *χοριοειδής*. Η ίριδα είναι μια κυκλική κατασκευή που βρίσκεται μπροστά από τον κρυσταλλοειδή φακό και είναι το οπτικό διάφραγμα στο οπτικό σύστημα του

οφθαλμού. Το κεντρικό άνοιγμα της ίριδας είναι η *κόρη* του ματιού. Οι κινήσεις των μυών της ίριδας μπορούν να αλλάζουν το μέγεθος της κόρης ελέγχοντας έτσι την ποσότητα του εισερχομένου φωτός στο οφθαλμό. Η μέση διάμετρος της κόρης είναι 12mm. (Στάγκος, 2002). Το ακτινωτό σώμα αποτελεί μια δακτυλιοειδής κατασκευή πίσω από την ίριδα. Κύριες λειτουργίες αυτού είναι η παράγωγή και η αποχέτευση του υδατοειδούς υγρού που έχει υποστηρικτική και θρεπτικό ρολό, καθώς και η λειτουργία της προσαρμογής του κρυσταλοειδούς φακού μέσω της σύσπασης του ακτινωτού μυ. (Βλ. Εικ 2.2) Ο χοριοειδής χιτώνας εκτείνεται από το ακτινωτό σώμα έως το οπτικό κέντρο και βρίσκεται ανάμεσα από τον σκληρό και τον αμφιβληστροειδή. Ο κρυσταλλοειδής φακός είναι μια κάψουλα που περιέχει μια μη ομοιογενή ινώδη ζελατίνη, σκληρή στο κέντρο και προοδευτικά μαλακότερη προς την περιφέρεια. (Χανδρινός Α. Β., 2009) Αυτή η διαφορά στην πυκνότητα επιφέρει και διαφορά στον δείκτη διάθλασης των στρωμάτων του φακού. (Βλ Εικ. 2.1) Ο μέσος δείκτης διάθλασης του κρυσταλλοειδούς φακού είναι 1,437. Η διαφορά στον δείκτη διάθλασης των στρωμάτων χρησιμεύει στην εξάλειψη σε μεγάλο βαθμό των σφαιρικών και χρωματικών σφαλμάτων των φακών. Επιπλέον η διαθλαστική ικανότητα του φακού αυξάνεται καθώς κάθε στρώμα από την περιφέρεια προς το κέντρο έχει μεγαλύτερη καμπυλότητα από το πιο περιφερειακό. (Στάγκος, 2002)

Η προσαρμογή επιτυγχάνεται με την συστολή ή διαστολή των λείων μυϊκών ινών του ακτινωτού σώματος. Όταν οι μυϊκές ίνες συστέλλονται οι ίνες της ζηννείου ζώνης του ακτινωτού μυός χαλαρώνουν αφήνοντας έτσι κυρτές τις επιφάνειες του φακού (κοντινή εστίαση). Αντιθέτως, όταν οι μυϊκές ίνες είναι σε χάλαση τότε οι ίνες της ζώνης βρίσκονται σε τάση επιπεδώνοντας έτσι τις επιφάνειες του φακού. (μακρινή εστίαση). Το αντικείμενο που βρίσκεται στην μέγιστη δυνατή απόσταση καθαρής όρασης, χωρίς προσαρμογή από τον φακό, λέγεται ότι βρίσκεται στο *απώτερο σημείο* (θεωρητικά το άπειρο.) Το αντικείμενο που βρίσκεται στην ελάχιστη δυνατή για καθαρό είδωλο λόγω αδυναμίας εστίασης του ειδώλου στον αμφιβληστροειδή, και της ορισμένης τιμής της οπτικής οξύτητας, όπως θα οριστεί παρακάτω (περίπου 25cm), βρίσκεται στο *εγγύτερο σημείο*. (Κόττου, 2007)

Για απώτερο σημείο με $n=1$ ισχύει:

$$\frac{1}{f_{\alpha\pi}} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{17 \times 10^{-3}}$$

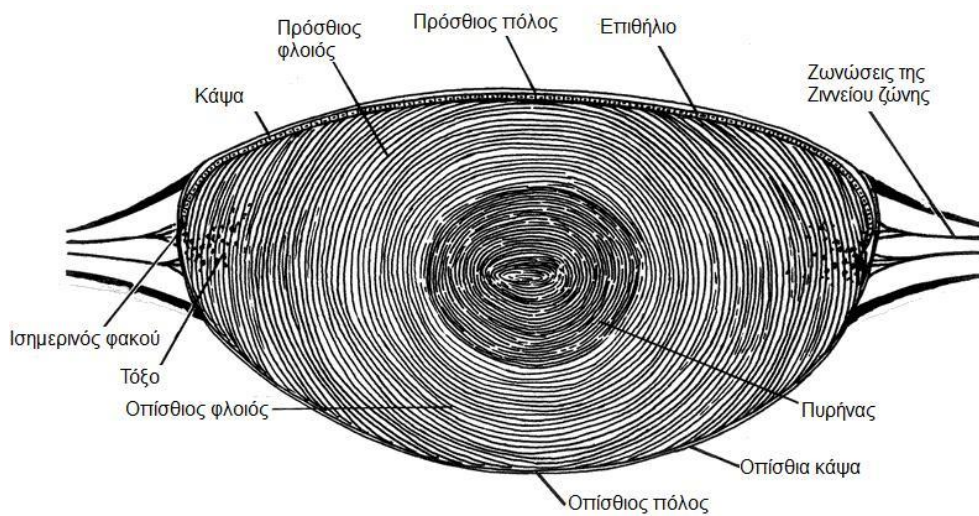
Και
$$P_{\alpha\pi} = \frac{1}{f_{\alpha\pi}} = 58,8 D$$

Για εγγύτερο σημείο με $n=1$ ισχύει:

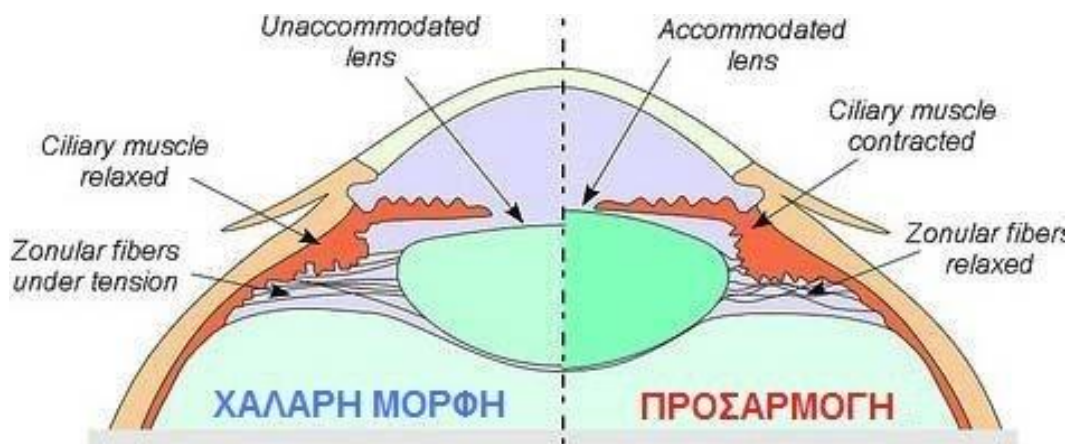
$$\frac{1}{f_{\epsilon\gamma\gamma}} = \frac{1}{25 \times 10^{-2}} + \frac{1}{17 \times 10^{-3}}$$

Και $P_{\epsilon\gamma\gamma} = 62,8 D$

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι ελάχιστη προσαρμογή για καθαρή όραση σε όλες τις αποστάσεις με ή άνευ διορθωτικού φακού είναι οι 4 dpt.



Εικόνα 2.1 Οριζόντια τομή ενός κρυσταλλοειδούς φακού με ενδείξεις ως προς τα ανατομικά διαμερίσματα του [18]



Εικόνα 2.2 Η προσαρμογή σε ένα φυσιολογικό οφθαλμό [17]

Τέλος, ο εσωτερικός χιτώνας του ματιού είναι ο *αμφιβληστροειδής*. Είναι ο χιτώνας που περιέχει τα φωτοευαίσθητα κύτταρα του οπτικού οργάνου του οφθαλμού. (Στάγκος, 2002)

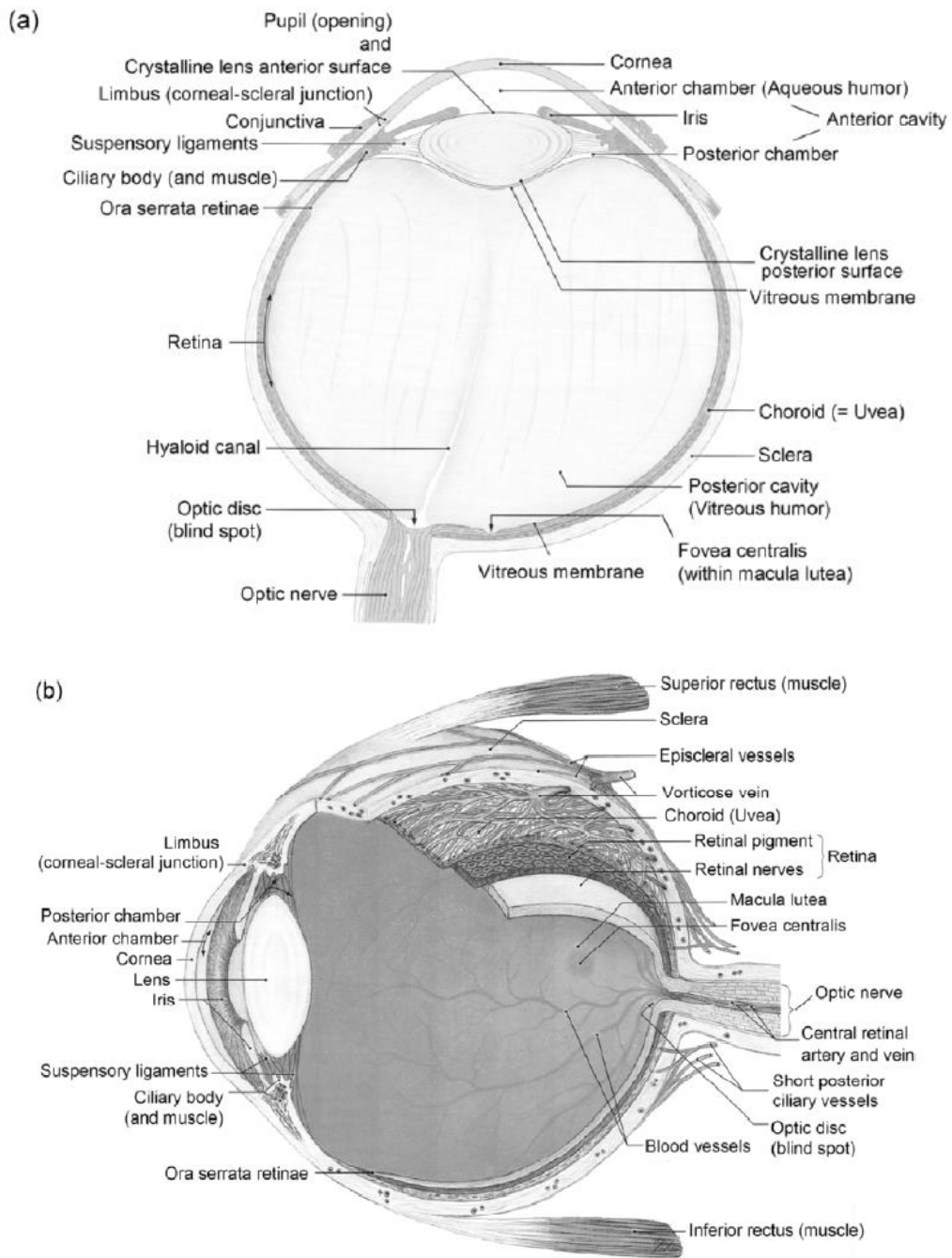
Η λειτουργία της όρασης ξεκάνει μόλις οι ακτίνες από το περιβάλλον εισέρθουν στον οφθαλμό καθώς θα πρέπει να εστιάσουν πάνω στον φωτοευαίσθητο χιτώνα του ματιού. Όπως προαναφέρθηκε στην πορεία του φωτός υπάρχουν διάφορα ανατομικά στοιχεία που λόγω της διαφορετικής σύστασης τους έχουν και διαφορά στον δείκτη διάθλασης. Αυτά τα ανατομικά στοιχεία που αλληλεπιδρούν με την πορεία της ακτίνας και είναι από τα εμπρός προς τα πίσω:

Ο κερατοειδής φακός με $\delta.\delta.^2$: 1,336 που όπως προαναφέρθηκε οι βασικές λειτουργίες του είναι η διάθλαση του φωτός και η προστασία του οφθαλμού.

- Το υδατοειδές υγρό με $\delta.\delta$: $\approx 1,336$
- Ο κρυσταλλοειδής φακός με μέσω $\delta.\delta$: 1,437
- Το υαλώδες σώμα με $\delta.\delta$: $\approx 1,336$

Όπως συμπεραίνεται η διαφορά των $\delta.\delta$ των διαφορετικών στοιχείων του οφθαλμού δεν είναι μεγάλη. Αυτό σημαίνει ότι η μεγαλύτερη εκτροπή των ακτινών γίνεται στον κερατοειδή χιτώνα λόγω της διαφοράς του $\delta.\delta$ του με αυτού του αέρα. Γι' αυτό ο κερατοειδής αποτελεί το κύριο όργανο διάθλασης. Για την απλοποίηση του οπτικού συστήματος του ματιού λέμε ότι είναι ένας σύστημα δυο μόνο φακών, του κερατοειδή και του κρυσταλλοειδή. (Στάγκος, 2002) (Fox, 2013)

² $\delta.\delta$: δείκτης διάθλασης



Εικόνα 2.3 Η δομή του ανθρώπινου οφθαλμού α) Εγκάρσια τομή του βολβού, β) Τρισδιάστατη απεικόνιση του βολβού. [16]

2.2. ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΟΦΘΑΛΜΟΥ

Όπως προαναφέρθηκε ο βολβός του ανθρωπίνου οφθαλμού αποτελείται από δυο τμήματα διαφορετικών μεταξύ του σφαιρών. Το πρόσθιο μέρος του οφθαλμού - ο κερατοειδής χιτώνας - καταλαμβάνει το 1/6 του βολβού του ματιού και έχει ακτίνα καμπυλότητας περίπου 7,8mm, ενώ η οπίσθια επιφάνεια έχει ακτίνα καμπυλότητας ίση με 6,5mm. Το οπίσθιο μέρος του οφθαλμού – ο σκληρός αδιαφανής χιτώνας – καταλαμβάνει το υπόλοιπο του βίβλου και έχει ακτίνα καμπυλότητα ίση με ≈ 12 mm. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012) Η πρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδούς φακού έχει ακτίνα καμπυλότητας 10mm, ενώ η οπίσθια είναι πιο κυρτή με ακτίνα καμπυλότητας ίση με 6mm. (Στάγκος, 2002).

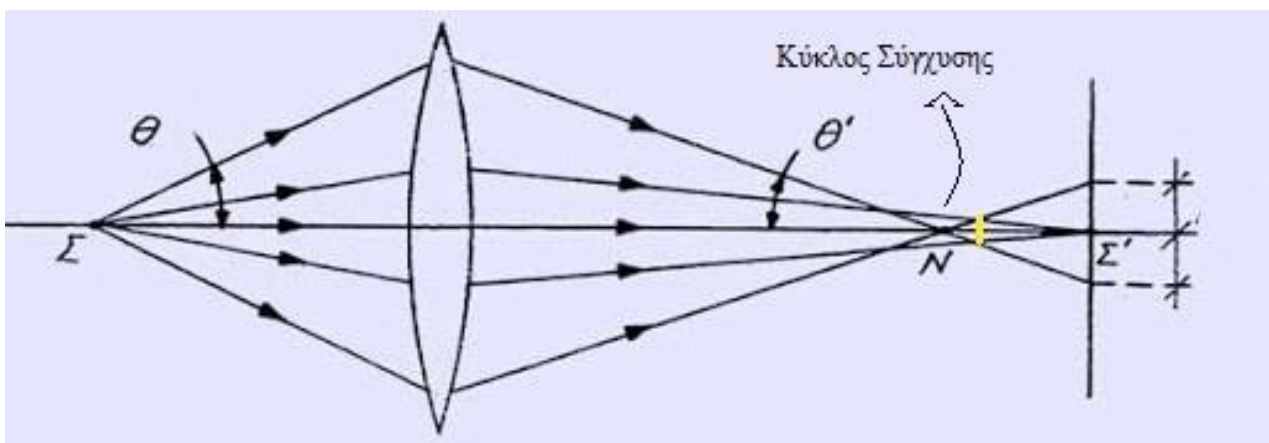
Ο πρόσθιος πόλος του ματιού είναι το κέντρο καμπυλότητας του προσθίου τμήματος του οφθαλμού ενώ ο οπίσθιος πόλος του οπίσθιου. Η ευθεία που ενώνει του δύο πόλους καλείται *γεωμετρικός η προσθοπίσθιος άξονας*. Η ευθεία που ενώνει το αντικείμενο παρατήρησης με το κεντρικό βοθρίο του αμφιβληστροειδούς ονομάζεται *οπτικός άξονας*. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012) Το αξονικό μήκος του βολβού του ματιού είναι μεταξύ 23mm και 24mm. (Στάγκος, 2002)

Η διαθλαστική ισχύς του οπτικού συστήματος του οφθαλμού στο μεγαλύτερο ποσοστό της βρίσκεται στο κερατοειδή χιτώνα, λόγω της διαφοράς του δ.δ. με το περιβάλλον (≈ 40 dpt) και στον κρυσταλλοειδή φακό, λόγω της καμπυλότητας του και της αυξανόμενης πυκνότητας οπτικού υλικού του φακού προς το κέντρο του (≈ 20 dpt). Η συνολική οπτική ισχύς του συστήματος ανέρχεται στις 60 διοπτρίες. (Στάγκος, 2002)

Με αυτά τα μεγέθη, η λειτουργία του οπτικού συστήματος του οφθαλμού είναι βέλτιστη, δηλαδή οι φωτεινές ακτίνες εστιάζονται επακριβώς επάνω στον φωτοευαίσθητο χιτώνα του ματιού δημιουργώντας μια ακριβή «εικόνα του έξω κόσμου». Η συνολική δύναμη του ματιού και η εστιακή απόσταση του συστήματος των φακών του ματιού είναι σε ισορροπία. Αυτό σημαίνει ότι μια μικρή αλλαγή σε αυτά τα μεγέθη, ανεξαρτήτως αιτίας, έχει ως αποτέλεσμα την μη καλή εστίαση των φωτεινών ακτινών στον αμφιβληστροειδή προκαλώντας έτσι θολή όραση.

2.3. ΚΥΚΛΟΙ ΣΥΓΧΥΣΗΣ

Η ακρίβεια κάθε οπτικού συστήματος να σχηματίζει ένα είδωλο ονομάζεται αναλυτική ικανότητα και είναι ένας δείκτης της επάρκειας της συσκευής. Κάθε σύστημα φακών έχει εγγενή σφάλματα και ο ανθρωπινός οφθαλμός δεν αποτελεί εξαίρεση, αλλά με την προσαρμοστικότητα και την πλαστικότητα τού μπορεί να εξαλείφει μεγάλο ποσοστό αυτών. Τα εγγενή σφάλματα θεωρούνται φυσιολογικά και προέρχονται από την κατασκευή και την κβαντική αλληλεπίδραση του φωτός με το υλικό του. Φυσιολογικά σφάλματα φακών αποτελούν η περίθλαση, η χρωματική έκτροπη, η σφαιρική έκτροπη και τα περιφερικά σφάλματα, όπως η κόμη. Το σύνολο όλων αυτών των σφαλμάτων που προαναφέρθηκαν έχει ως αποτέλεσμα την μη ακριβή εστίαση ενός απόλυτα ευκρινούς ειδώλου στον αμφιβληστροειδή, αλλά την δημιουργία ενός φωτεινού κύκλου που προκαλεί ένα ποσοστό θάμβους. Με πιο απλά λόγια, λόγω του ότι οι τέλει λεπτοί φακοί είναι μια παραδοχή, το είδωλο κάθε σημειακής πηγής απεικονίζεται ως ένα κύκλος, που ονομάζεται *κύκλος σύγχυσης*. Όσο μικρότεροι είναι οι κύκλοι σύγχυσης τόσο ακριβέστερη η όραση. Ο σκοπός στην διόρθωση των αμετροπιών είναι αν επιτευχτεί ο ελαχίστη κύκλος σύγχυσης. (Στάγκος, 2002)



Σχήμα 2.4 Η γεωμετρική αναπαράσταση του αξονικού σφάλματος και οι κύκλοι σύγχυσης. [10]

2.4. ΟΙ ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΤΟΥ ΟΦΘΑΛΜΟΥ

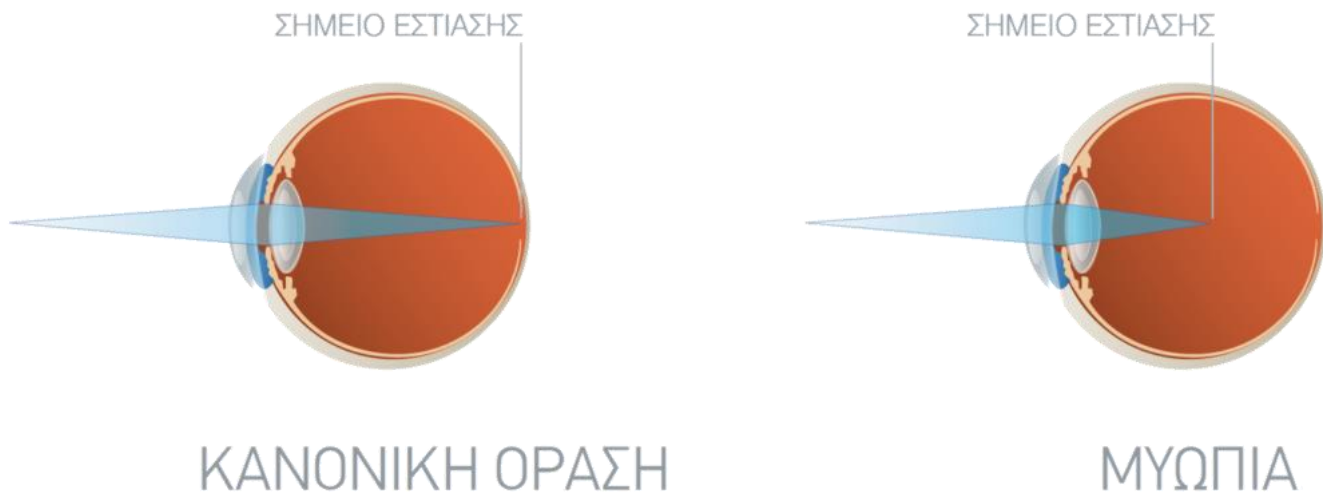
Οι συχνότερες και σημαντικότερες ανωμαλίες της διάθλασης δηλαδή η απλή μυωπία, η υπερμετρωπία και ο αστιγματισμός δεν θεωρούνται νοσήματα. Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι δεν οφείλονται σε οργανικές αλλοιώσεις ή εκπτώσεις της φυσιολογικής λειτουργιάς. (Στάγκος, 2002)

Εμμετρωπία ονομάζεται η κατάσταση του οπτικού συστήματος του οφθαλμού στην όποια οι παράλληλα προσπίπτουσες φωτεινές δέσμες εστιάζονται πάνω στον αμφιβληστροειδή καθώς ο οφθαλμός βρίσκεται σε κατάσταση χαλάρωσης, δηλαδή ο φακός δεν προσαρμόζει. (B. Φωτεινάκης, 2000) (Στάγκος, 2002)

Αμετρωπία, είναι η εκ διαμέτρου αντίθετη κατάσταση από την εμμετρωπία. Το οπτικό σύστημα οφθαλμού σε κατάσταση χαλάρωσης αδυνατεί να εστιάσει τις φωτεινές ακτίνες στον αμφιβληστροειδή. Ο οφθαλμός με αμετρωπία έχει κάποια διαθλαστική ανωμαλία. (B. Φωτεινάκης, 2000)

2.4.1. Η ΜΥΩΠΙΑ

Η Μυωπία είναι η αμετρωπία κατά την όποια το είδωλο των μακράν κείμενων αντικειμένων σχηματίζεται μπροστά από την αμφιβληστροειδή. (Στάγκος, 2002) Αυτό όμως μπορεί να οφείλεται σε διαφορές καταστάσεις και όχι μόνο στην διαθλαστικότητα του οπτικού συστήματος. Η μυωπία διαχωρίζεται σε α) *εκ κατασκευής μυωπία*, όταν ο μηχανισμός προσαρμογής δεν συμμετέχει στον καθορισμό της απόστασης της οπίσθιας κύριας εστίας του οπτικού συστήματος η όποια βρίσκεται, όπως προαναφέρθηκε, μπροστά από τον φωτοευαίσθητο χιτώνα, και σε β) *λειτουργική ή σπαστική μυωπία*, όταν η θέση της οπίσθιας κύριας εστίας είναι συνέπεια της αύξησης της ισχύος των διαθλαστικών μέσων του οφθαλμού. Η πρώτη κατηγορία μπορεί χωριστεί σε δυο ακόμα επιμέρους μορφές ανάλογα με το αίτιο της διαταραχής, σε *αξονική μυωπία* και *διαθλαστική μυωπία*. (Εικ. 2.2)



Εικόνα 2.5 Ποιοτική αναπαράσταση προσομοίωση εστίασης ακτινών σε ένα εμμετρικό μάτι (αριστερά) και σε ένα μυωπικό (δεξιά) [11]



Εικόνα 2.6 Προσομοίωση της όρασης με μυωπία -2.00D (δεξί ημμόριο) [25]

2.4.1.1. Η ΑΞΟΝΙΚΗ ΜΥΩΠΙΑ

Στην αξονική μυωπία, ο προσθοπίσθιος άξονας του βολβού είναι μεγαλύτερος από το κανονικό (24,13 mm), ενώ η οπίσθια κυρία εστία βρίσκεται σε φυσιολογική απόσταση από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή (24,13 mm) και η διαθλαστική ισχύς του διοπτρικού συστήματος είναι σε φυσιολογικά επίπεδα (60D σε ηρεμία). Συνεπώς, το σημείο όπου εστιάζονται οι προσπίπτουσες φωτεινές ακτίνες εμφανίζεται να βρίσκεται μπροστά από τον φωτοευαίσθητο χιτώνα και όχι επάνω σε αυτόν όπως θα έπρεπε, εξού και η ονομασία *αξονική μυωπία*. (Στάγκος, 2002) (B. Φωτεινάκης, 2000)

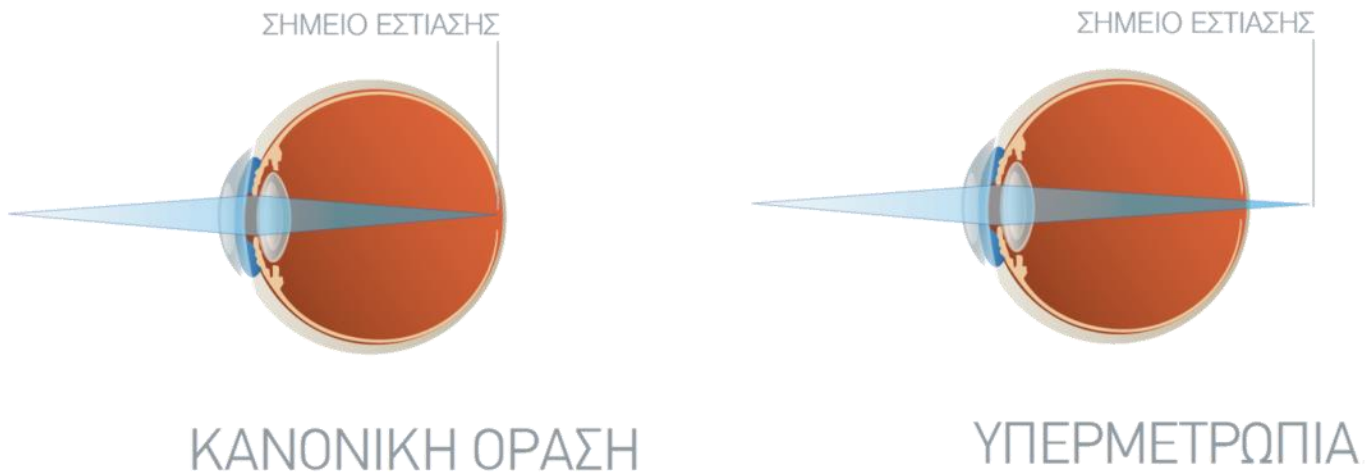
2.4.1.2. Η ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΗ ΜΥΩΠΙΑ

Στην διαθλαστική μυωπία, αντίθετα με την αξονική, το μήκος του προσθοπίσθιου άξονα του βολβού είναι φυσιολογικό (24,13 mm) ενώ η διαθλαστική ισχύς του διοπτρικού συστήματος σε ηρεμία είναι μεγαλύτερη του φυσιολογικού (>60D) και έτσι η απόσταση της οπίσθιας κύριας εστίας του συστήματος είναι μικρότερη του φυσιολογικού (<24,13 mm). Έτσι, λοιπόν, η εστία βρίσκεται μπροστά από τον αμφ/δή και το μάτι εμφανίζεται μυωπικό. (Στάγκος, 2002) (B. Φωτεινάκης, 2000) Η αύξηση αυτή της διαθλαστικής ισχύος οφείλεται σε μεταβολές του δ.δ. και της γεωμετρίας των επιμέρους ανατομικών και φυσιολογικών στοιχείων του οφθαλμού. Η πληθώρα των περιπτώσεων οφείλεται στην αύξηση της κυρτότητας του κερατοειδούς και πιο σπάνια σε αλλαγή κυρτότητας άλλων επιφανειών. Αν ο δ.δ. του φακού και του υδατοειδές υγρού αυξηθεί και όταν ο δ.δ. υαλώδους μειωθεί, τότε θα υπάρχει μυωπία. Επίσης, όταν ο δ.δ. των στοιβάδων του φακού μειωθεί ή αυξηθεί ο δ.δ. του πυρήνα του φακού τότε υπάρχει αύξηση της ισχύος του φακού και εμφάνιση μυωπίας. (B. Φωτεινάκης, 2000)

2.4.2. Η ΥΠΕΡΜΕΤΡΩΠΙΑ

Η υπερμετρωπία είναι η ανωμαλία κατά την οποία σε κατάσταση ηρεμίας της προσαρμογής (ο κρυσταλλοειδής φακός έχει την ελάχιστη δυνατή διαθλαστική ισχύς) οι παράλληλες φωτεινές ακτίνες εισερχόμενες στο οπτικό σύστημα του οφθαλμού εστιάζονται όπισθεν της φωτοδεκτικής επιφάνειας του αμφιβληστροειδούς. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική διαθλαστική ισχύς του οπτικού συστήματος της όρασης είναι μικρότερη αναλογικά με το αξονικό μήκος του. (B.

Φωτεινάκης, 2000) Όπως και στην μυωπία κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται σε μειωμένη διαθλαστική δύναμη των διαθλαστικών στοιχείων (<60D) με προσθοπίσθιο άξονα φυσιολογικού μήκους, ονόματι *αξονική υπερμετρωπία*, ή σε φυσιολογική διαθλαστική ισχύ με ένα μικρότερο του κανονικού προσθοπίσθιο άξονα, που καλείται *διαθλαστική*.



Εικόνα 2.7 Ποιοτική αναπαράσταση προσομοίωσης της εστίασης ακτίνων σε ένα υπερμετρωπία οφθαλμό (δεξιά) συγκριτικά με έναν εμμετρωπικό [12]

2.4.2.1. Η ΑΞΟΝΙΚΗ ΥΠΕΡΜΕΤΡΩΠΙΑ

Η αξονική υπερμετρωπία ως επί των πλείστων είναι συγγενής. Εμφανίζεται σχεδόν πάντα στα βρέφη τους πρώτους μήνες της ζωής τους καθώς το μεν οπτικό σύστημα είναι πλήρως ανεπτυγμένο ενώ το μέγεθος του βολβού δεν έχει λάβει ακόμα το τελικό του μέγεθος. Συνήθως αυτή η υπερμετρωπία με την ανάπτυξη του νεογνού εκμηδενίζεται πλήρως, αλλά σε μερικές περιπτώσεις σταματάει πριν ακόμα φτάσει στο φυσιολογικό και ως αποτέλεσμα εμφανίζεται η αξονική υπερμετρωπία

2.4.2.2. Η ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΗ ΥΠΕΡΜΕΤΡΩΠΙΑ

Η διαθλαστική υπερμετρωπία είναι κυρίως συγγενής. Οι αιτίες αυτής της μείωσης της διάθλασης μπορούν να συμπεριληφθούν σε τρεις κατηγορίες.

α) Η *Υπερμετρωπία εκ κυρτώσεως* - λόγω επιπέδωσης των επιφανειών του κερατοειδή, δηλαδή την αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας που έχει ως απόρροια την μείωση της διαθλαστικής ισχύος.

β) Η *Υπερμετρωπία εκ διαθλάσεως* - λόγω της αύξησης του δ.δ. του υαλοειδούς σώματος, γεγονός που ελαττώνει κατά πολύ την διαφορά των δ.δ. του φακού και του υαλοειδούς που μειώνει την ισχύ του συστήματος.

γ) *Επί αφακίας* - όταν συνήθως μετεγχειρητικά αφαιρείται ένα μέρος της διαθλαστικής ικανότητας του συστήματος (κρυσταλλοειδούς φακού). (B. Φωτεινάκης, 2000) (Στάγκος, 2002)

δ) Η υπερμετρωπία που οφείλεται στην φυσιολογική αλλαγή των δομικών υλικών του κρυσταλλοειδούς φακού καλείται *γεροντική υπερμετρωπία ή πρεσβυωπία*. Η ικανότητα προσαρμογής του φακού μειώνεται με την αύξηση της ηλικίας από 13-14 διοπτρίες στην ηλικία των 10 ετών στις περίπου 6 διοπτρίες στην ηλικία των 40 ετών και στην ηλικία των 60 πρακτικά είναι μηδενική. Αυτό συνεπάγεται ότι η δυνατότητα του ασθενούς να δει κοντινά αντικείμενα έχει εξαλειφτεί και χαρακτηρίζεται ως πλήρως υπερμετρωπικός. (Στάγκος, 2002) Αυτή η μεταβολή στην ικανότητα προσαρμογής οφείλεται κυρίως στην ελάττωση της ελαστικότητας του περιφάκιου και στην αύξηση της σκληρότητας της ουσίας του πυρήνα του φακού. Εμφανίζεται συνήθως με το 45^ο έτος της ηλικίας αλλά εξαρτάται από την διαθλαστική ικανότητα και τον βαθμό που έχει στον εκάστοτε οφθαλμού. Δηλαδή εμφανίζεται με την ηλικία των 40 στους εμμέτρωπες, αργότερα στου μύωπες και νωρίτερα στους υπερμέτρωπες. (Bλ 2.1) (Στάγκος, 2002)

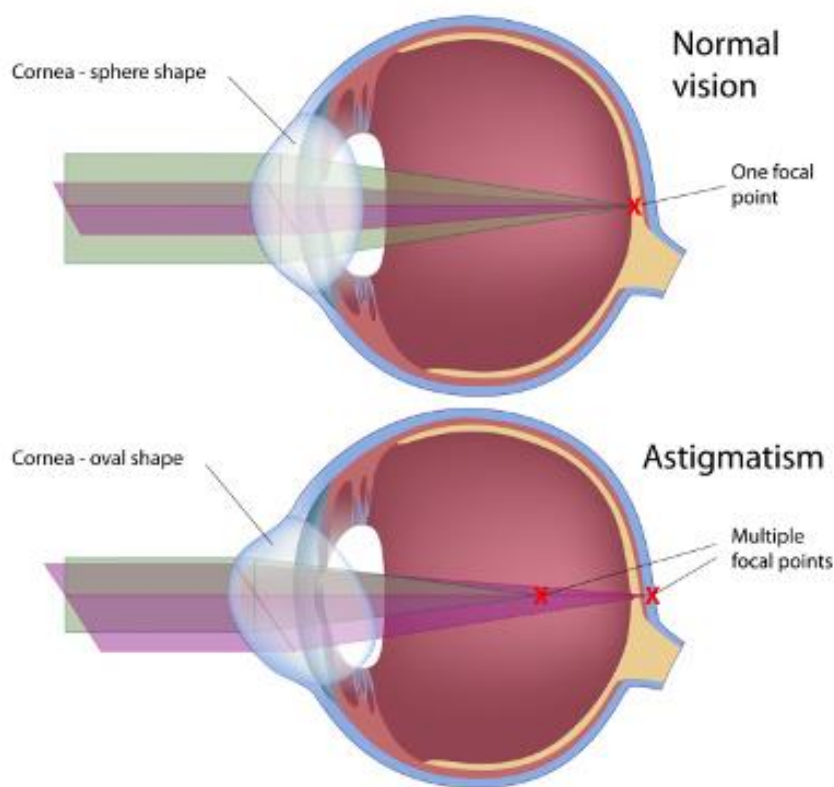
2.4.3. Ο ΑΣΤΙΓΜΑΤΙΣΜΟΣ

Αστιγματισμός ονομάζεται η διαθλαστική ανωμαλία κατά την οποία παράλληλα εισερχόμενες ακτίνες στο οπτικό σύστημα του ματιού δεν διαθλώνται εξίσου σε όλους τους μεσημβρινούς. Αυτό οφείλεται σε διαφορές της κυρτότητας κάποιας διαθλαστικής επιφάνειας του συστήματος. Για λόγους απλότητας και ταξινόμησης ένας αστιγματικός οφθαλμός θεωρείται ότι έχει δυο μεσημβρινούς που τέμνονται κάθετα στο οπτικό κέντρο του φακού. (Στάγκος, 2002)

Κατά κύριο λόγο ο υπαίτιος για την εμφάνιση αστιγματισμού είναι η πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς. Συνήθως, ο κάθετος μεσημβρινός του κερατοειδούς είναι πιο κυρτός, έχει δηλαδή μεγαλύτερη διαθλαστική δύναμη από τον οριζόντιο, που οφείλεται στην πίεση που ασκεί το άνω βλέφαρο στον κερατοειδή λόγω της βαρύτητας. Το αποτέλεσμα αυτής της πίεσης είναι η αλλαγή του σχήματος του κερατοειδούς από τμήμα σφαίρας σε τμήμα παραβολής. Αυτή η διαφορά, αν υπάρχει, που συνήθως ανέρχεται σε ύψος της τάξης του 0,75D, είναι φυσιολογική

και αντιρροπείται από την αντίστοιχη διαφορά μεσημβρινών της οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς ή από την διαθλαστική διαφορά των μεσημβρινών του φακού. (Στάγκος, 2002) (Β. Φωτεινάκης, 2000)

Η απόρροια αυτής της διαθλαστικής διαφοράς είναι η άνιση διάθλαση των ακτινών του φωτός πάνω στον οπτικό άξονα. Η διαφορά της διαθλαστικής ισχύος μειώνεται σταδιακά από τον κυρτότερο προς τον λιγότερο κυρτό μεσημβρινό είτε το αντίθετο. Οι ακτίνες του φωτός που θα διέρθουν από τον κυρτότερο μεσημβρινό θα εστιαστούν σε σημείο εμπρός από αυτές που θα διέρθουν από το επίπεδο του πλατύτερου, οι οποίες θα σχηματίσουν εστία πίσω από την πρώτη. Ενδιάμεσα αυτών βρίσκονται οι εστίες των ενδιάμεσων (λοξών) μεσημβρινών.



Εικόνα 2.8 Ποιοτική αναπαράσταση της πορείας ακτινών στην διαδικασία εστίασης ενός αστιγματικού οφθαλμού. [13]

2.4.3.1. ΤΑ ΕΙΔΗ ΑΣΤΙΓΜΑΤΙΣΜΟΥ

Ο αστιγματισμός μπορεί να διαχωριστεί σε δυο μεγάλες ομάδες ανάλογα με την αλληλουχία των κύριων μεσημβρινών στην οπτική επιφάνεια. Όταν οι δυο κύριοι μεσημβρινοί τέμνονται κάθετα μεταξύ του και η μετάβαση της ισχύος από τις δυο ακρότατες τιμές είναι ομαλή, τότε έχουμε έναν *ομαλό αστιγματισμό*. Αντίθετα όταν η

τομή των δυο μεσημβρινών δεν είναι κάθετη και η μετάπτωση της ισχύος δεν είναι ομαλή τότε αυτού του είδους ο αστιγματισμός ονομάζεται *ανώμαλος*.

Ο ομαλός αστιγματισμός μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με την κατανομή των εστιών μέσα στον οφθαλμό.

α) Ο *απλός αστιγματισμός*. Σε αυτήν την περίπτωση η μια εκ των δυο κύριων εστιών που έχει ένας αστιγματικός οφθαλμός βρίσκεται πάνω στον αμφιβληστροειδή, ενώ η άλλη μπορεί να έχει μεγαλύτερη ή μικρότερη από το φυσιολογικό ισχύ. Έτσι, διακρίνουμε δυο είδη απλού αστιγματισμού, τον απλό μυωπικό και τον απλό υπερμετρωπία. (Στάγκος, 2002)

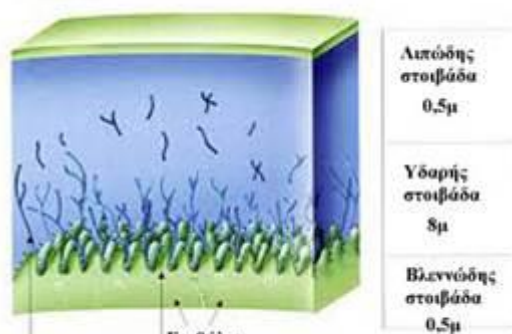
β) Ο *Σύνθετος Αστιγματισμός*. Σε αυτήν την περίπτωση καμία από τις δυο κύριες εστίες δεν βρίσκεται πάνω στον φωτοδεκτικό χιτώνα. Άρα και οι δυο θα είναι είτε μυωπικές είτε υπερμετρωπικές. Σε αυτήν την περίπτωση κάποια άλλη διαθλαστική ανωμαλία συνυπάρχει σε κάποια επιφάνεια του οπτικού συστήματος. (Στάγκος, 2002)

γ) Ο *Μεικτός Αστιγματισμός*. Στην περίπτωση αυτή, οι κύριες εστίες βρίσκονται εκατέρωθεν του αμφιβληστροειδή, δηλαδή η μία είναι μυωπική και η άλλη υπερμετρωπική. (Στάγκος, 2002)

3. Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΡΑΣΗΣ

3.1. Η ΠΟΡΕΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΟΦΘΑΛΜΟ

Η πορεία μιας εισερχομένης φωτεινής ακτίνας στον ανθρώπινο οφθαλμό είναι αρκετά περίπλοκη με πολλές και συνεχόμενες διαθλάσεις καθότι τα στρώματα και οι διαφορετικές στιβάδες των ανατομικών στοιχείων του οφθαλμού ποικίλουν – έστω και σε μικρό βαθμό. Η πρώτη στοιβάδα που προσπέφτει η ακτίνα δεν είναι το επιθήλιο του κερατοειδούς, όπως πολύ θα περίμεναν, αλλά μια πολύ λεπτή στοιβάδα δακρύων – καλουμένη *δακρυϊκή στοιβάδα* – τάξης των 34-35 μm . (Στάγκος, 2002) (βλ. Εικ 3.1) Η χρησιμότητα της στοιβάδας των δακρύων είναι η θρέψη των εξωτερικών στρωμάτων του κερατοειδούς καθώς και η εξομάλυνση τυχών ατελειών αυτού. Το επόμενο ανατομικό στοιχείο που συναντά η προελαύνουσα ακτίνα είναι ο κερατοειδής χιτώνας που εκεί, όπως προαναφέρθηκε, παθαίνει την μεγαλύτερη



Εικόνα 3.1 Η δακρυϊκή στοιβάδα [21]

αλλαγή στην κλίση της πορείας της. Ο κερατοειδής χιτώνας αποτελείτο από πέντε στιβάδες, το επιθήλιο, την μεμβράνη του Bowman, το κυρίως στρώμα ή θεμέλια ουσία του κερατοειδούς, την δεσκεμέτιο μεμβράνη, και τελικά το ενδοθήλιο. Όλα τα κύτταρα των επιμέρους στοιβάδων του κερατοειδούς καθώς και οι ίνες κολλαγόνου του στρώματος είναι παράλληλα τοποθετημένες, χαρακτηριστικό που αποδίδει την διαφάνεια του. (B.

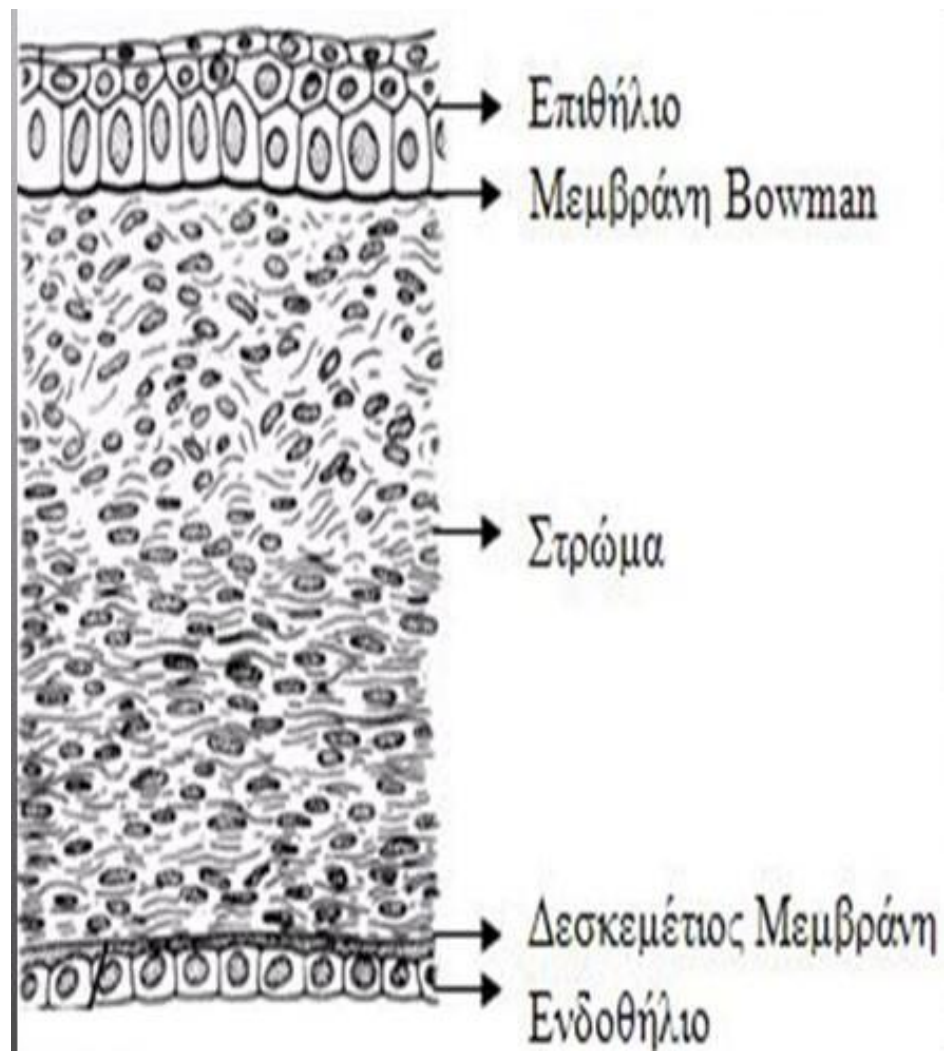
Φωτεινάκης, 2000) (βλ Εικ. 3.2) Καθώς όμως ο δείκτης διάθλασης αυτών είναι σχετικά ίδιος μπορούν να αναφερθούν ως ένας ενιαίος χιτώνας. (J.V. Forrester, 2002) Το δεύτερο ομογενές ανατομικό στοιχείο που συναντά η δέσμη είναι ο πρόσθιος θάλαμος που εσωτερικά κυκλοφορεί το υδατοειδές υγρό. Καθώς η σύσταση του αποτελείται κυρίως από νερό (99,9% νερό και 0,1% άλλες ουσίες) ο δείκτης διάθλασης του είναι 1.33 και η διάθλαση που υφίσταται εξερχομένη από τον κερατοειδή είναι αμελητέα. (Τσιρωνή, 2017) Στην συνέχεια εισέρχεται από την οπή της ίριδας – κοινώς γνωστή ως κόρη του ματιού – η όποια βρίσκεται ελάχιστα αριστερά και κάτω του κέντρου αυτής και προσπίπτει στο κρυσταλλοειδή φακό. Λόγω της διαφοράς του δ.δ. του φακού και του υδατοειδούς υγρού η δέσμη συγκλίνει την πορεία της. Το σχήμα του φακού είναι υπεύθυνο για την εστίαση της φωτεινής δέσμης στον αμφιβληστροειδή με την ικανότητα προσαρμογής του. Η

σύσταση του ΚΦ³ είναι 66% νερό και 33% γεγονός που αυξάνει κατά πολύ το δ.δ. του. (Στάγκος, 2002) Εξερχόμενη, η δέσμη προσπίπτει στην πρόσθια επιφάνεια του υαλώδους σώματος που και αυτό όπως το ΥΥ⁴ αποτελείται κυρίως από νερό (99% ύδωρ και 1% κολλαγόνο και υαλουρονικό οξύ). Το δεύτερο είναι αυτό που του προσδίδει την πυκτώδη ύφη του. (Herman, 2007). Αποτέλεσμα αυτού είναι στην δέσμη να εμφανίζει μια μικρή απόκλιση λόγω της μετάβασης σε πιο αραιό μέσο. Το επόμενο και τελευταίο ανατομικό στοιχείο που συναντά μια φωτεινή δέσμη είναι ο αμφιβληστροειδής χιτώνας. Όπως προαναφέρθηκε (βλ. Κεφ 2.1) ο αμφ/δης είναι ο αισθητηριακός χιτώνας του οπτικού συστήματος του οφθαλμού. Είναι νευροεκτοδερμικής προέλευσης και παρά την πολύπλοκη και ιδιαίτερα κυτταροβριθή οργάνωσή του, ο ιδίως αμφ/δης έχει μια ύφη λεπτού διαφανούς υμένα. (Στάγκος, 2002) (βλ. Εικ. 2.3)

Μόνο περίπου το 50% του ορατού φωτός (400-700 nm) που προσπίπτει στον οφθαλμό φτάνει στην πραγματικότητα στον αμφιβληστροειδή ως άμεσο φως, λόγω της απώλειας ενέργειας κατά την ανάκλαση στις ενδιάμεσες διαχωριστικές επιφάνειες των ανατομικών στοιχείων κυρίως στις δυο επιφάνειες του κερατοειδούς και στις δυο του φακού και στην απορρόφηση ή διάχυση στα υλικά που διαπερνά. (Herman, 2007) Η διάχυση είναι ο κύριος παράγοντας μείωσης του εισερχόμενου φωτός, απόρροια της ανομοιογένειας, που περιγράφηκε παραπάνω, του ανθρώπινου οφθαλμού. (Κόττου, 2007)

³ ΚΦ: Κρυσταλλοειδής Φακός

⁴ ΥΥ: Υδατοειδές Υγρό

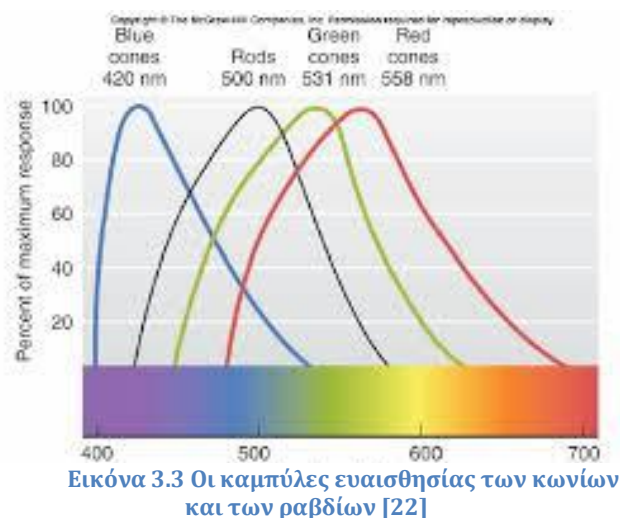


Εικόνα 3.2 Ιστολογική δομή του κερατοειδούς [19]

3.1.1. Ο ΑΜΦΙΒΛΗΣΤΡΟΕΙΔΗΣ

Ο αμφιβληστροειδής είναι ο εσώτερος από τους τρεις οφθαλμικούς χιτώνες. Βρίσκεται ακριβώς πάνω στην οπίσθια εστία του οπτικού συστήματος του ματιού (σε ένα εμμετρικό οφθαλμό) και είναι το κύριο όργανο μετατροπής της φωτεινής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικά σήματα, που αποστέλλονται, ως νευρικές ώσεις μέσω του οπτικού νεύρου και αποκωδικοποιούνται στον εγκέφαλο. (J.V. Forrester, 2002) Ο αμφιβληστροειδής αποτελείται από δέκα στοιβάδες. (Εικ. 3.2) Στην εξώτερη στοιβάδα, η οποία βρίσκεται προς τον χοριοειδή, βρίσκονται τα φωτοδεκτικά στοιχεία του αμφ/δους δηλαδή τα κωνία και τα ραβδία όπου εφάπτονται με το μελάγχρουν επιθήλιο που προσφέρει μεταβολική στήριξη στην στοιβάδα των φωτουποδοχέων καθώς και λειτουργική, απορροφώντας το φως που δεν έχει προσπέσει σε κάποιο φωτοδεκτικό κύτταρο. (Richard Feynman, 1964) (Στάγκος, 2002)

Τα κωνία και τα ραβδία είναι συνδεδεμένα με μόρια πρωτεΐνης που εμφανίζουν φωτοδεκτικές ιδιότητες δηλαδή αλλάζουν το σχήμα τους όταν απορροφούν ενεργεία από το εισερχόμενο φως. Τα κωνία διαθέτουν ταχέως αναγεννώμενες χρωστικές ουσίες όπως η ιωδοψύνη και η κυανοψίνη και είναι υπεύθυνα για την έγχρωμη όραση σε φωτοπικές συνθήκες, ενώ τα ραβδία περιέχουν βραδέως αναγεννώμενες πρωτεΐνες όπως είναι η ροδοψίνη και είναι υπεύθυνα για την όραση σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού. Το χρώμα ανιχνεύεται από τα κωνία σε φωτοπικές συνθήκες, τα οποία χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τα μακρά (Long, red), τα μέσα (Medium, green) και τα βραχέα (Short, blue). Το μήκος κύματος ενεργοποίησης διαφέρει από κωνίο σε κωνίο, με τα μακρά να είναι ευαίσθητα στην ερυθρή περιοχή του φωτεινού φάσματος, συγκεκριμένα στα 531nm, τα μέσα στην πράσινη περιοχή του φάσματος με όριο τα 581nm και τα βραχέα στην μπλε περιοχή του φωτεινού φάσματος με

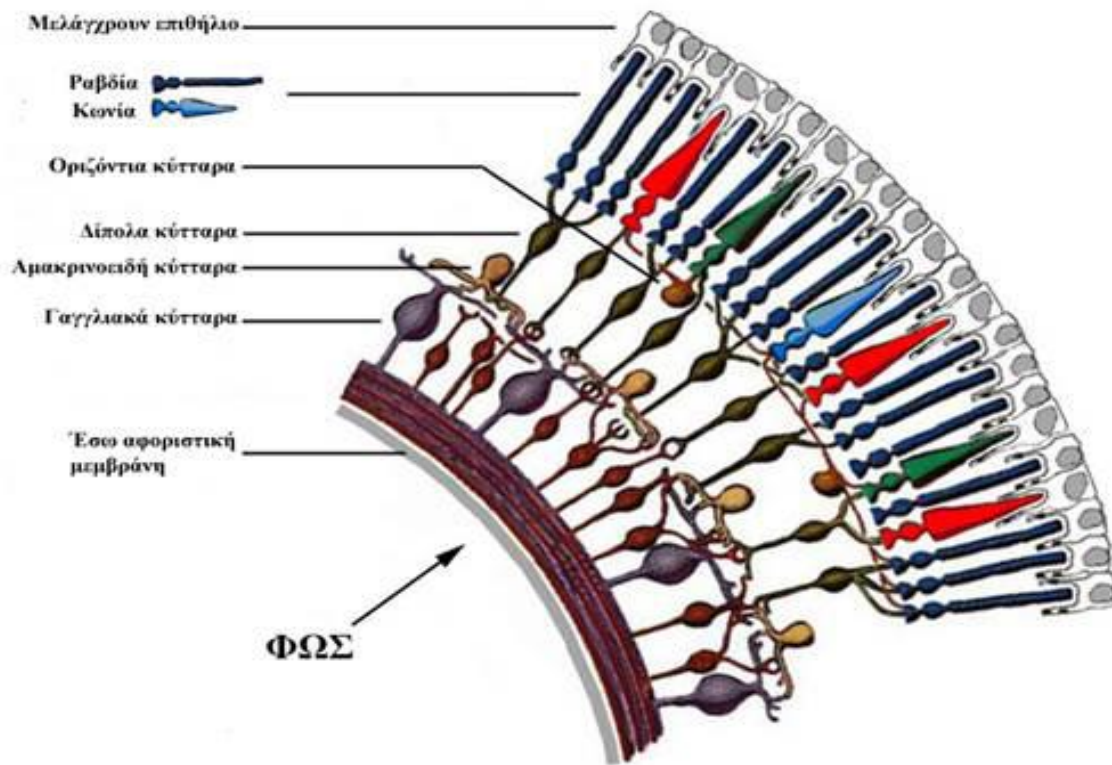


κορυφή καμπύλης ευαισθησίας τα 421nm. (βλ. Εικ. 3.3) Τα ραβδία δεν είναι ικανά να αντιληφτούν χρώματα. (B. Φωτεινάκης, 2000) Κατά μέσο όρο, ο συνολικός αριθμός κωνίων και ραβδίων στον ανθρώπινο οφθαλμό είναι 115 εκατομμύρια και 6,5 εκατομμύρια αντίστοιχα. Το φάσμα ενεργοποίησης των πρωτεϊνών των κωνίων και των ραβδίων ταιριάζει με το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά την

γήινη ατμόσφαιρα.

Η απορρόφηση του φωτός από τα κωνία και τα ραβδία περιγράφεται με την βοήθεια της κβαντομηχανικής, η οποία ορίζει ότι ένα φωτόνιο απορροφάται από το φωτοευαίσθητο μόριο, στην συγκεκριμένη περίπτωση, απολήξεις των κωνίων και των ραβδίων που διαθέτουν την φωτοευαίσθητη ουσία οψίνη, ένα παράγωγο της βιταμίνης A, (διαφορετική σε κάθε τύπο κωνίου και στα ραβδία), μόνο όταν η ενέργεια του φωτονίου αντιστοιχεί σε διαφορά ενέργειας των διακριτών ενεργειακών επιπέδων του. (Κόττου, 2007)

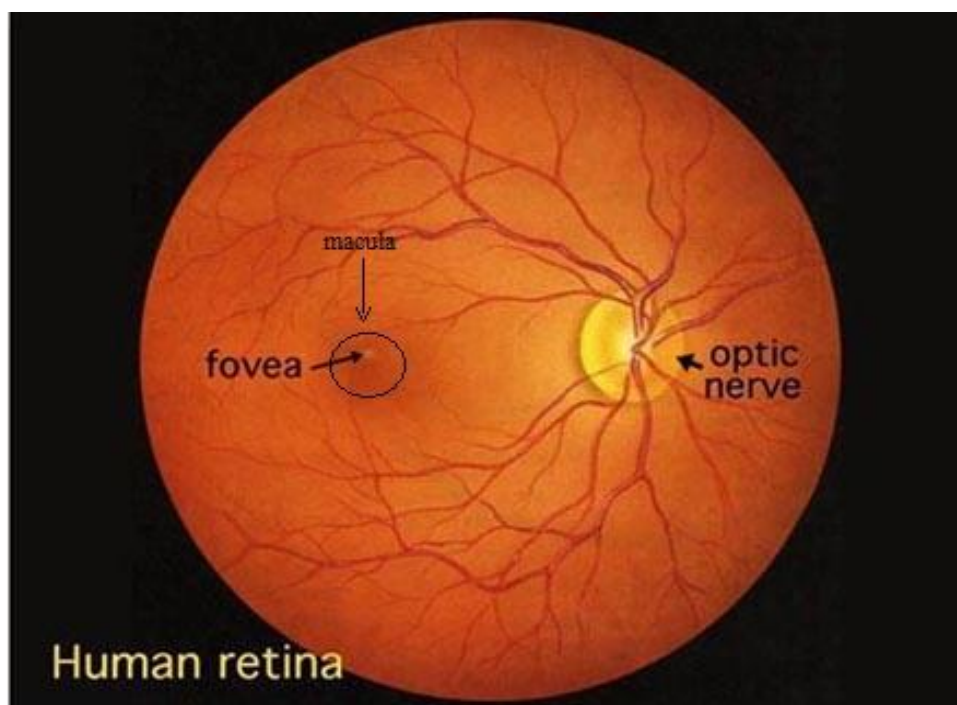
Οι υπόλοιπες στοιβάδες του αποτελούνται από εριστικά κύτταρα και πλαισιώνουν την λειτουργία αυτών των δυο ομάδων κύτταρων. Ειδικότερα είναι τα κύτταρα του Muller, τα νευρογλοιακά και τα μικρογλοιακά, και τα νευρικά κύτταρα (δίπολα και γαγγλιακά) των οποίων οι νευρώνες επεκτείνονται και δημιουργούν το οπτικό νεύρο. (Τσιρωνή, 2017)



Εικόνα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση διατομής του αμφιβληστροειδούς. [14]

Στον αμφ/δη μπορούν να διακριθούν δυο ανατομικά ευδιάκριτες περιοχές. Η οπτική θηλή (optic nerve) και η ωχρά κηλίδα (macula). Η οπτική θηλή είναι μια ευδιάκριτη κυκλική περιοχή με διάμετρο 1.5mm στην οποία καταλήγουν όλα τα στρώματα του αμφ/δους εκτός από τις νευρικές ίνες που συνεχίζουν δημιουργώντας το οπτικό νεύρο. (Τσιρωνή, 2017) (βλ Εικ. 3.5)

Η ωχρά κηλίδα είναι η περιοχή του αμφ/δους που χαρακτηρίζεται από ένα κιτρινωπό χρώμα που προσδίδει η παρουσία της ξανθοφύλλης. Ιστολογικά, χαρακτηρίζεται από την έλλειψη των περισσότερων στοιβάδων του αμφ/δους έχοντας μόνο το 1/5 του πάχους του λοιπού χιτώνα. (B. Φωτεινάκης, 2000) Είναι κυκλική με μέση διάμετρο 5,50-6,00 mm. Στο κέντρο αυτής εντοπίζεται το κεντρικό βοθρίο. Έχει μέση διάμετρο 1,50 mm και περιέχει την πλειοψηφία των 6,5 εκατομμυρίων κωνίων με την στρώση νευρικών γαγγλιακών κύτταρων να απουσιάζει εντελώς. (Τσιρωνή, 2017) Η ωχρά κηλίδα είναι υπεύθυνη για την κεντρική όραση και την αντίληψη χρωμάτων.



Εικόνα 3.5 Ένας φυσιολογικός βυθός και τα ανατομικά στοιχεία του [20]

3.1.2. Η ΟΠΤΙΚΗ ΟΔΟΣ

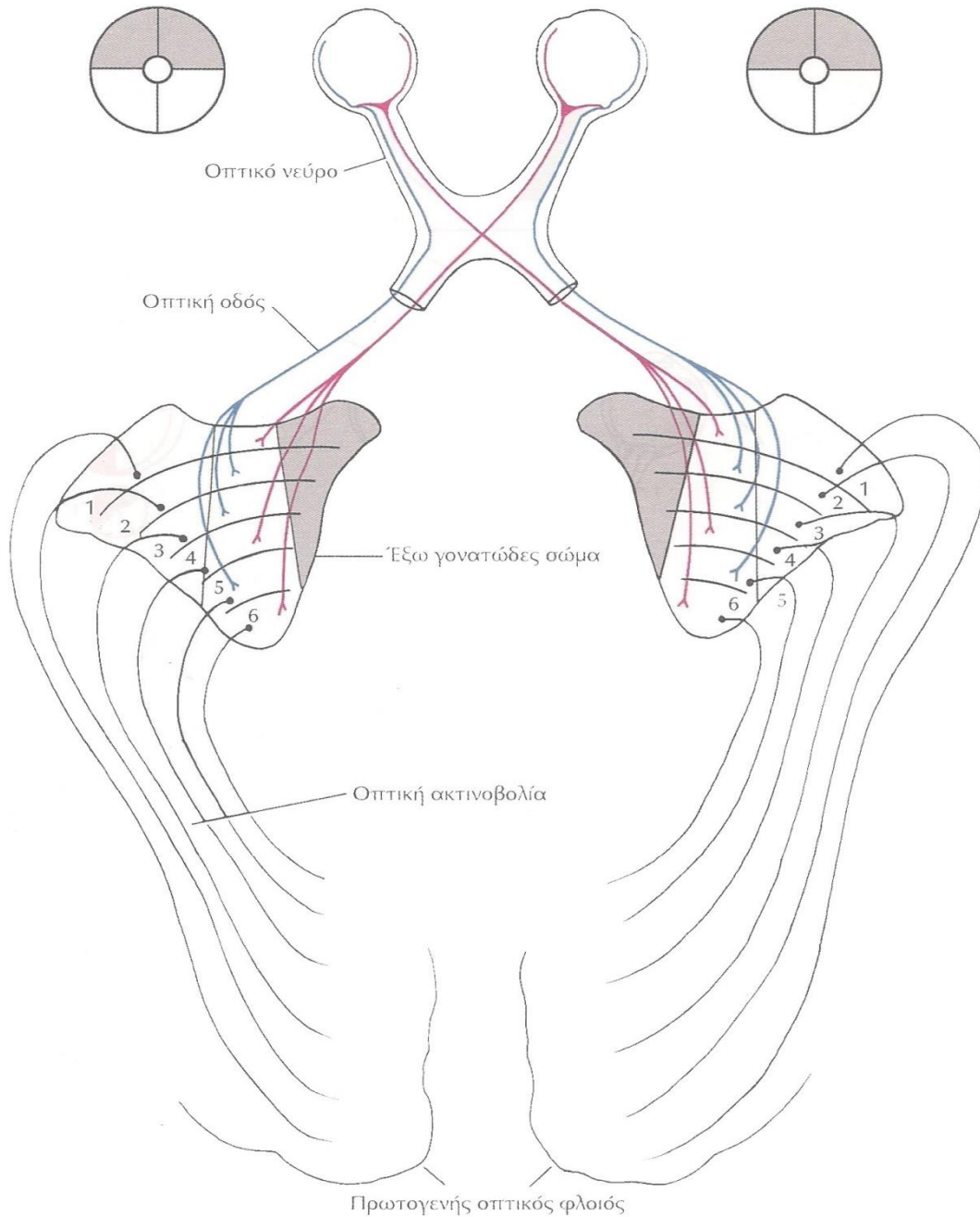
Τα δυναμικά ενέργειας που δημιουργούνται από την διέγερση των φωτοευαίσθητων κυττάρων του αμφ/δους (τα κωνία, τα ραβδία και τα γαγγλιακά κύτταρα) στην λειτουργία της όρασης ταξιδεύουν διαμέσου της οπτικής οδού για την αποκωδικοποίηση και τελικά την κατανόηση τους στον οπτικό φλοιό του ινιακού λοβού του εγκεφάλου. (Φραγκίσκος Ι. Χανιώτης, 2015) Η αρχή της οπτικής οδού περιλαμβάνει και τον αμφιβληστροειδή όπου οι άξονες των νευρώνων των γαγγλιακών κυττάρων ενώνονται, δημιουργώντας το οπτικό νεύρο. Αυτό συνεχίζει προς τα όπισθεν του βολβού εξερχόμενο από την οφθαλμική κόγχη μέσα στο εγκεφαλικό κρανίο έως το οπτικό χίασμα. Το μέσο μήκος του οπτικού νεύρου είναι 50-60 mm. (Στάγκος, 2002) (J.V. Forrester, 2002) Στο οπτικό χίασμα οι οπτικές ίνες από την ρινική πλευρά του αμφ/δους (συμπεριλαμβανομένου και του ρινικού μισού της ωχράς) διασταυρώνονται στην μέση γραμμή με τις αντίστοιχες οπτικές ίνες του άλλου οφθαλμού καταλήγοντας στις οπτικές ίνες της αντίθετης πλευράς. Οι νευρικές οπτικές κροταφικές ίνες δεν διασταυρώνονται και καταλήγουν στην ομόπλευρη οπτική ταινία αχίαστες. (Εικ. 3.6, Εικ. 3.7) (Στάγκος, 2002) Οι οπτικές ταινίες είναι κυλινδρικές πεπιεσμένες δεσμίδες οπτικών νευρικών ινών που ξεκινούν από την οπίσθια έξω περιοχή του οπτικού χιάσματος και καταλήγουν στα σύστοιχα έξω γωνιατώδη σώματα. Το 90% των νευρικών ινών καταλήγουν στα έξω γωνιατώδη σώματα. (Τσιρωνή, 2017) Το υπόλοιπο 10% των νευρικών ινών εγκαταλείπουν την κύρια οπτική οδό μεταφέροντας πληροφορίες σε άλλα μέρη του εγκεφάλου υπεύθυνα για τα αντανακλαστικά και τους βρόγχους ανατροφοδότησης συστημάτων όπως για παράδειγμα το κορικό αντανακλαστικό και η ρύθμιση παράγωγης και αποχέτευσης του υδατοειδούς υγρού. (Στάγκος, 2002) (J.V. Forrester, 2002)

3.1.3. ΤΑ ΕΞΩ ΓΩΝΑΤΩΔΗ ΣΩΜΑΤΑ

Οι οπτικές ίνες καταλήγουν στον έξω γωνιατώδη πυρήνα του έξω γωνιατώδους σώματος, δίπλα στο προσκέφαλο του θαλάμου. Ο αριστερός πυρήνας λαμβάνει τις νευρικές ίνες, οι οποίες μεταφέρουν πληροφορίες από το αριστερό οπτικό πεδίο (από τον ρινικό αμφιβληστροειδικό ημιμόριο του αριστερού οφθαλμού και το κροταφικό αμφιβληστροειδικό ημιμόριο του δεξιού οφθαλμού), ενώ, το αντίστροφο συμβαίνει για τον δεξιό πυρήνα του δεξιού γωνιατώδους σώματος. (Τσιρωνή, 2017) (Εικ. 3.6)

3.1.4. ΟΙ ΟΠΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

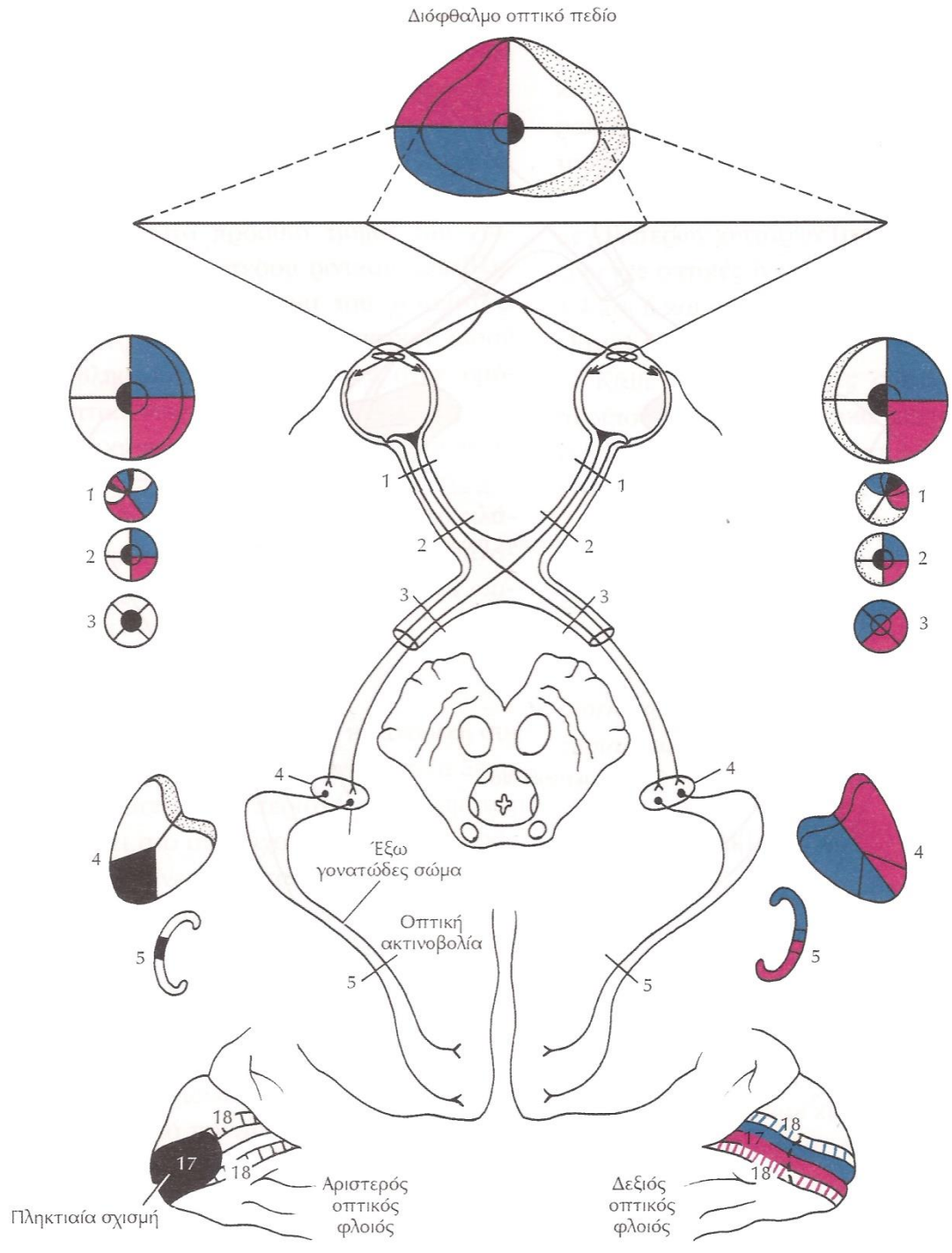
Οπτικές ακτινοβολίες καλούνται οι ομάδες νευρικών ινών που και φέρονται τοξοειδώς από τα έξω γωνιατώδη σώματα προς το οπτικό κέντρο του ινιακού λοβού. Οι νευρικοί άξονες των οπτικών ακτινοβολιών ξεκινούν από πυρήνες που βρίσκονται στα έξω γωνιατώδη σώματα. (J.V. Forrester, 2002) (Εικ. 3.6, Εικ. 3.7)



Εικόνα 3.6 Διάγραμμα των προβολών των οπτικών ινών του αμφιβληστροειδή στις διάφορες στοιβάδες των έξω γωνιατωδών σωμάτων. [27]

3.1.5. Ο ΟΠΤΙΚΟΣ ΦΛΟΙΟΣ

Οπτικός φλοιός διακρίνεται στον πρωτεύοντα (περιοχή 17 κατά Brodmann ή πιο πρόσφατα V_1), όπου επιτελείται η αντίληψη της όρασης, και στον δευτερεύοντα οπτικό φλοιό (περιοχές 18,19 κατά Brodmann ή πιο πρόσφατα V_2, V_3, V_4, V_5) που εξυπηρετεί την αντίληψη χρωμάτων και την αναγνώριση αντικειμένων. (Εικ. 3.6) (J.V. Forrester, 2002) (Στάγκος, 2002) Ο οπτικός φλοιός βρίσκεται στο άνω και κάτω χείλος της *πληκτραίας σχισμής* (εσωτερική επιφάνεια του ινιακού λοβού) και καταλαμβάνει τα τοιχώματα της σε όλο του το μήκος. (Εικ. 3.6, Εικ. 3.7) Στην τελική αυτή φάση της οπτικής οδού διενεργείται και η αντιστροφή του ειδώλου που έχει αναστραφεί από το οπτικό σύστημα του οφθαλμού) διότι το οπτικό πεδίο προβάλλει στον οπτικό φλοιό με κάθετη και οριζόντια αντιστροφή. Επίσης, σε αυτό το μέρος της οπτικής οδού γίνεται η «ένωση» των δυο ελάχιστα διαφορετικών ειδώλων που προέρχονται από την ελάχιστη διαφορά στην γωνία θέασης του κάθε οφθαλμού, με αποτέλεσμα την αίσθηση του βάθους (τρίτη διάσταση), ή αλλιώς *Στερεοσκοπική Όραση* (Τσιρωνή, 2017)



Σχήμα 3.7 Η οπτική οδός με λεπτομέρειες των οπτικών ινών σε σχέση με τα οπτικά πεδία και των οπτικών φλοιών. [27]

3.2. ΟΠΤΙΚΗ ΟΞΥΤΗΤΑ

Οπτική οξύτητα σημαίνει πόσο καθαρά βλέπουμε δυο σημεία του ίδιου αντικειμένου. Η μέτρηση της οπτικής οξύτητας είναι το πρωταρχικό βήμα μιας οφθαλμολογικής εξέτασης. Συγκεκριμένα, ποσοτικοποιεί την ικανότητα του οπτικού συστήματος της όρασης να διαχωρίζει δύο σημεία που βρίσκονται σε ορισμένη απόσταση από τον οφθαλμό. Πρακτικά, μετριέται η γωνία που σχηματίζουν οι δυο ευθείες που φέρονται από τα άκρα του στόχου στο δεσμικό σημείο του οφθαλμού (οπτική γωνία) και ουσιαστικά περιγράφεται από τον λόγο της απόστασης των δυο σημείων που σχηματίζονται στον αμφιβληστροειδή προς την απόσταση θέασης του αντικειμένου. (Ζευγώλης, 2017) Για να γίνει ο διαχωρισμός ενός αντικειμένου στο επίπεδο του αμφιβληστροειδή, θα πρέπει να ερεθίζονται δυο κωνία και μεταξύ αυτών να παρεμβάλλεται ένα ανερέθιστο κωνίο. (Στάγκος, 2002) Όταν δυο είδωλα διαφορετικών φωτεινών πηγών ερεθίσουν το ίδιο κωνίο τότε αντιλαμβάνονται σαν μια φωτεινή πηγή.

Τα διακριτικά όρια του οφθαλμού οφείλονται κυρίως στην ανατομία του. Οι φωτουποδοχείς είναι στοιχισμένοι σειριακά με την μέση διάμετρο κωνίου να είναι 0,004 mm. Αυτή είναι και η μικρότερη απόσταση που θα πρέπει να βρίσκονται τα σημεία του ειδώλου στον αμφιβληστροειδή προκειμένου να γίνουν αντιληπτά ως διακριτά. Η οπτική γωνία που αντιστοιχεί στο αμφιβληστροειδικό είδωλο μεγέθους 0,004 mm είναι 1΄ της μοίρας και είναι το πρότυπο της οπτικής οξύτητας. (Στάγκος, 2002)

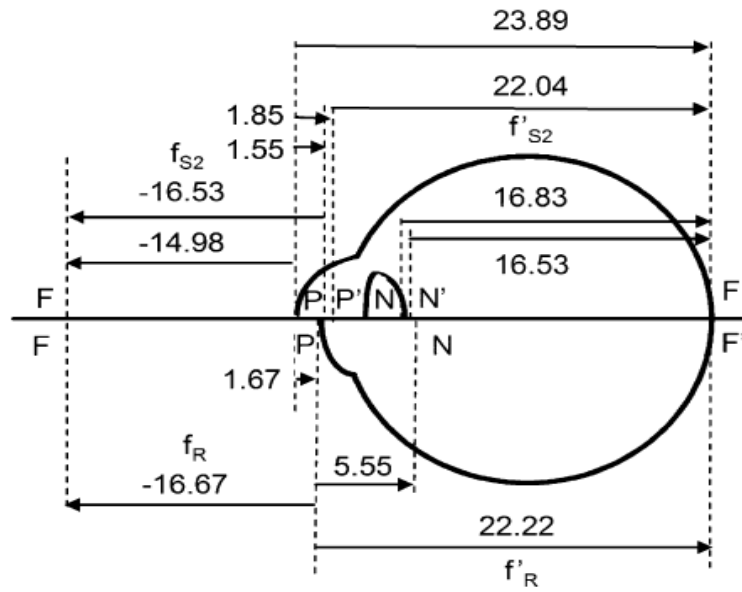
Το μέγεθος του ειδώλου δεν εξαρτάται μόνο από το μέγεθος της πηγής και την απόσταση του αντικειμένου από τον οφθαλμό αλλά και από φυσικά φαινόμενα που επηρεάζουν το μέγεθος του ειδώλου. Ένα από αυτά είναι η περίθλαση του φωτός. Η επιρροή της περίθλασης του φωτός είναι εμφανής όταν η κόρη βρίσκεται σε μύση και μικρότερη από 3 mm. Σε διάμετρο κόρης μεγαλύτερη από 3 mm η οπτική οξύτητα περιορίζεται μόνο από την χρωματική και την σφαιρική εκτροπή. (Κόττου, 2007)

Τα φαινόμενα της περίθλασης μπορεί να υπάρχουν αλλά μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα καθώς το ποσοστό της οπτικής οξύτητας που επηρεάζεται είναι αμελητέο. Η περίθλαση είναι ένα κυματικό φαινόμενο και επάγεται στους νόμους και τους κανόνες αλληλεπίδρασης κυμάτων που περιγράφονται από την *κυματική φυσική* και δεν εμπίπτει στους κανόνες και τις εφαρμογές της *γεωμετρικής οπτικής* που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή.

3.3. ΣΧΗΜΑΤΙΚΟΙ ΟΦΘΑΛΜΟΙ

Η μελέτη του οπτικού συστήματος του οφθαλμού είναι μια περίπλοκη και ανιαρή εργασία δεδομένου του για κάθε φορά που γίνεται αναφορά στο σύστημα κερατοειδής-φακός-αμφιβληστροειδής θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα λοιπά προαναφερθέντα διαθλαστικά στοιχεία του συστήματος – όσο μικρή και αν είναι η διαθλαστική επιρροή τους στην πορεία της δέσμης – για τον ακριβή υπολογισμό των μεγεθών που πρέπει να υπολογιστούν. (βλ. Κεφ. 3.1) Για την διευκόλυνση της μελέτης του οπτικού συστήματος του ματιού χρησιμοποιείται ένα οπτικό σύστημα παρεμφερές του ματιού, πιο απλό όμως από το πραγματικό.

Υπάρχουν πολλά και διαφορετικά μοντέλα σχηματικών απλοποιημένων οφθαλμών και διακρίνονται ανάλογα με το ποσό ακριβή είναι και το πόσες διαθλαστικές επιφάνειες διαθέτουν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το πιο ολοκληρωμένο μοντέλο, ο *ακριβής οφθαλμός του Gullstrand*, το οποίο διαθέτει έξι διαθλαστικές επιφάνειες: την πρόσθια και την οπίσθια διαθλαστική επιφάνεια τόσο του κερατοειδούς όσο και του φακού, και δυο εντός του κρυσταλλοειδούς, για να μπορέσει συμπεριλήφθη και η αλλαγή του δ.δ. εντός του φακού (σε ένα σωστό μαθηματικό αλλά όχι τόσο ακριβές φυσιολογικό τρόπο). Τα υπόλοιπα μοντέλα διαφοροποιούνται αφαιρώντας διαθλαστικές επιφάνειες, και γίνονται έτσι όλο και πιο απλά. Το πιο απλό μοντέλο καλείται ο *απλοποιημένος οφθαλμός*, το οποίο διαθέτει μόνο μια διαθλαστική επιφάνεια αυτή του κερατοειδούς, η οποία είναι στην πραγματικότητα 1,67 mm μετά τον πραγματικό κερατοειδή. (βλ. Πιν. 3.1) Αυτό φαίνεται μαζί με τα βασικά σημεία για αυτό το μειωμένο μάτι στο κάτω μέρος του σχήματος Σχ. 3.8. Για αυτό το μάτι όλες οι αποστάσεις σχετίζονται με τη μονή διαθλαστική διεπαφή (1,67 mm μετά την πραγματική πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς), οπότε το δεύτερο σημείο εστίασης είναι $1,67 \text{ mm} + 22,22 \text{ mm} = 23,9 \text{ mm}$ μετά από αυτήν την επιφάνεια του κερατοειδούς. (Herman, 2007)



Σχήμα 3.9 Σύγκριση των κύριων σημείων των τριών επιφανειών, σε ένα χαλαρό σχηματικό μοντέλο του Gullstrand-Emsley σύμφωνα με τον Πίνακα 1 στο πάνω μισό και του απλοποιημένου οφθαλμού στο κάτω μισό. [16]

	Schem. exact eye	Schem. eye 1	Schem. eye 2	Schem. eye 2'	Schem. eye 3	Red. eye
radii of surfaces						
anterior cornea	7.70	7.80	7.80	7.80	7.80	5.55
posterior cornea	6.80	6.50	–	–	–	–
anterior lens	10.00	10.20	10.00	5.00	11.00	–
first internal lens	7.911	–	–	–	–	–
second internal lens	–5.76	–	–	–	–	–
posterior lens	–6.00	–6.00	–6.00	–5.00	–6.476	–
distance from anterior cornea						
posterior cornea	0.50	0.55	–	–	–	–
anterior lens	3.60	3.60	3.60	3.20	3.60	–
first internal lens	4.146					
second internal lens	6.565					
posterior lens	7.20	7.60	7.20	7.20	7.30	–
retina	23.9	24.20	23.89	23.89	24.09	–
first principal point P	1.348	1.59	1.55	1.78	1.51	0
second principal point P'	1.602	1.91	1.85	2.13	1.82	0
first nodal point N	7.078	7.20	7.06	6.56	7.11	5.55
second nodal point N'	7.332	7.51	7.36	6.91	7.42	5.55
first focal point F	–15.707	–15.09	–14.98	–12.56	–15.16	–16.67
second focal point F'	24.387	24.20	23.89	21.25	24.09	22.22 ^a
refractive indices						
cornea	1.376	1.3771	–	–	–	4/3
aqueous humor	1.336	1.3374	1.3333	1.3333	1.336	4/3
crystalline lens – anterior	1.386	1.4200	1.4160	1.4160	1.422	4/3
crystalline lens – nucleus	1.406					
crystalline lens – posterior	1.386					
vitreous humor	1.336	1.3360	1.3333	1.3333	1.336	4/3

Πίνακας 3.1 Διαστάσεις των διάφορων σχηματικών μοντέλων του οφθαλμού. Όλα τα μοντέλα είναι απροσάρμοστα εκτός του Σχημ. Μοντέλο 2' (που είναι η προσαρμοσμένη εκδοχή του 2) (Herman, 2007) Οι αποστάσεις είναι σε χιλιοστά (mm). [16]

4. ΟΙ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ

Οι επιλογές που έχει ένα οφθαλμίατρος ή ένας οπτομέτρης στην διάθεση του για την διόρθωση μιας διαθλαστικής ανωμαλίας ενός ασθενή στην σημερινή εποχή είναι πάρα πολλές. Από την εφαρμογή διορθωτικών γυαλιών μέχρι την επεμβατική διαθλαστική χειρουργική διόρθωση του οφθαλμού.

Για την σωστή κατανόηση του τρόπου λειτουργίας αυτών των μεθόδων θα πρέπει πρώτα να οριστούν οι τύποι και οι σχέσεις οι οποίες περιγράφουν αυτές τις εφαρμογές.

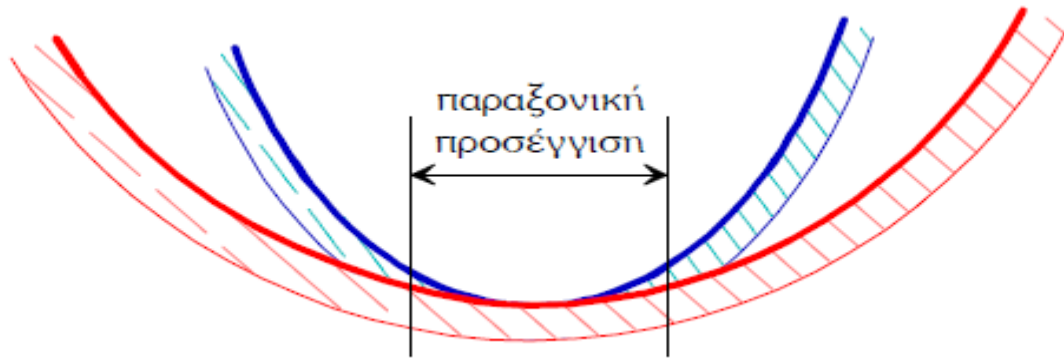
4.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΑΚΩΝ (ΛΕΠΤΩΝ)

Η μελέτη των συστημάτων των φακών είναι πολύ σημαντική στην διόρθωση των διαθλαστικών ανωμαλιών. Οι φακοί επαφής καθώς και τα διορθωτικά γυαλιά είναι διαφορετικές εφαρμογές του τρόπου λειτουργίας ενός συστήματος φακών.

Η παραδοχή που πρέπει να γίνει είναι ότι οι φακοί που «αλληλεπιδρούν» είναι λεπτοί (βλ 1.3.6.), το σύστημα είναι *ομοαξονικό* δηλαδή τα κέντρα των δυο φακών βρίσκονται επάνω στον ίδιο οπτικό άξονα και οι ακτίνες που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του ειδώλου είναι παραξονικές. Εδώ γίνεται λόγος για την μη-στιγματική απεικόνιση μιας σφαιρικής επιφάνειας – στην προκειμένη περίπτωση ενός φακού. Για να επιτευχτεί η στιγματική απεικόνιση, το πάχος του φακού θα πρέπει να μειώνεται παραβολικά προς τα άκρα του, ιξού και το λεγόμενο σφαιρικό σφάλμα φακού (βλ. Κεφ. 2.3.). Στην πράξη όμως, είναι εξαιρετικά δύσκολο να κατασκευαστεί μια λεία παραβολική επιφάνεια, κάτι που δεν ισχύει για μια λεία σφαιρική. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι για μεγάλες γωνίες δεν ισχύει η σχέση:

$$\theta_i \cong \sin\theta_i \quad (4.1)$$

Δεδομένου αυτού και του γεγονότος ότι σε μικρές γωνίες – του οπτικού άξονα με την εκάστοτε ακτίνα αναφοράς – η κορυφή του σφαιρικού δίοπτρου μοιάζει γεωμετρικά με αυτή ενός παραβολικού (Σχήμα 4.1) , χρησιμοποιείται η παραξονική προσέγγιση όπου ισχύει $\theta_i \cong \sin\theta_i$. Αυτή η προσέγγιση μας βοηθά στην μελέτη των οπτικών συστημάτων χωρίς την επιρροή των σφαλμάτων της γεωμετρίας των φακών. (Ασημέλλης Β. Δ., 2012) (Ασημέλλης Γ. , 2006)



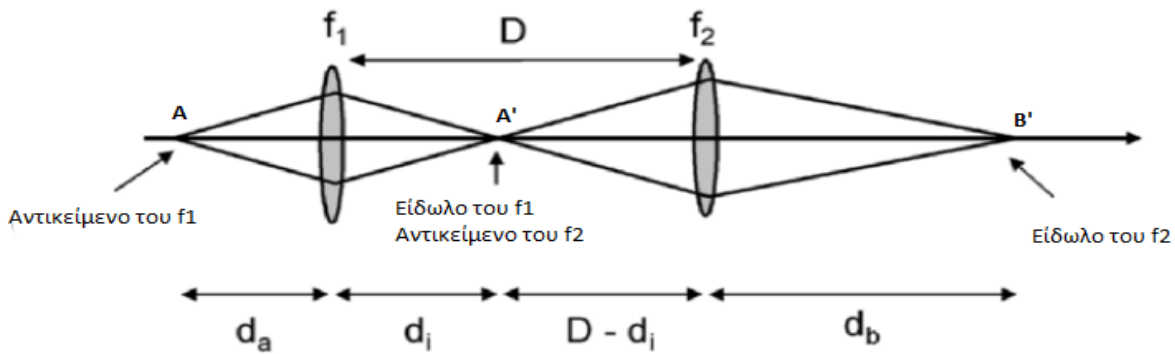
Σχήμα 4.1 Η παραξονική προσέγγιση με την ταύτιση των δυο γεωμετρικών σχημάτων

Ας υποθέσουμε δυο λεπτούς φακούς με εστιακές αποστάσεις f_1 και f_2 που βρίσκονται σε απόσταση D (Σχήμα 4.2). Ένα αντικείμενο τοποθετείται στο σημείο A σε απόσταση d_a στην αριστερή μεριά του πρώτου φακού και το είδωλο του συστήματος σε απόσταση στο σημείο B' σε απόσταση d_b στην δεξιά μεριά του δεύτερου φακού. Θεωρούμε ότι το φως ταξιδεύει από αριστερά προς τα δεξιά. Ο πρώτος φακός δημιουργεί είδωλο στην απόσταση στο σημείο A' σε απόσταση d_i στην δεξιά μεριά του όπου:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{d_a} + \frac{1}{d_i} \quad (4.2)$$

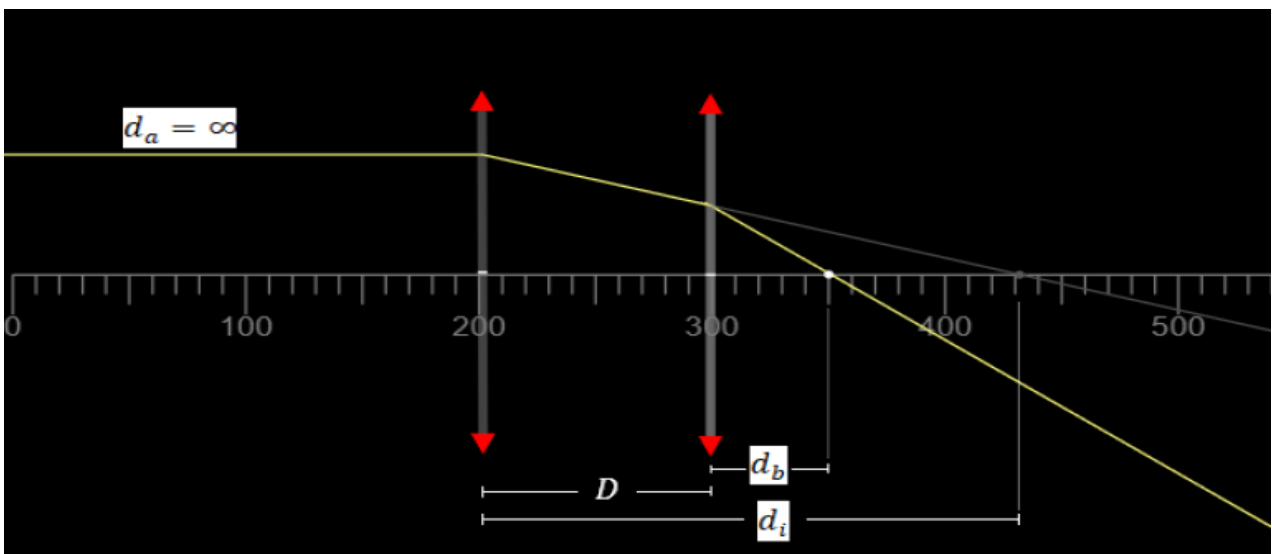
Το είδωλο του πρώτου φακού που δημιουργείται σε απόσταση $D-d_i$ από τον δεύτερο φακό λειτουργεί ως αντικείμενο αυτού που σχηματίζει είδωλο σε απόσταση d_b δεξιά του δεύτερου φακού, όπου:

$$\frac{1}{D-d_i} + \frac{1}{d_b} = \frac{1}{f_2} \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.2 Ποιοτική αναπαράσταση της πορείας των ακτίνων διαμέσου ενός συστήματος φακών σε απόσταση D . [16]

Το σύστημα των εξισώσεων 4.2 και 4.3 προσδιορίζει την θέση του ειδώλου για οποιαδήποτε θέση του αντικειμένου.



Σχήμα 4.3 Σχηματική αναπαράσταση πορείας ακτίνων σε ένα σύστημα φακών και προσδιορισμός της οπίσθιας εστιακής απόστασης του. [6]

Το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων βοηθά στον προσδιορισμό της οπίσθιας εστιακής απόστασης του συστήματος, δηλαδή η απόσταση του ειδώλου του συστήματος από τον δεύτερο κατά σειρά φακό, όταν το αντικείμενο βρίσκεται στο άπειρο (παράλληλη διάδοση ακτίνων) (Σχήμα 4.3). Άρα η εξ. (4.2) με $d_a = \infty$, δίνει: $d_i = f_1$. Με αντικατάσταση αυτής στην εξ. (4.3) θα έχουμε:

$$d_b = q(F_i) = \frac{f_2(f_1 - D)}{f_1 + f_2 - D} \quad (4.4)$$

Η εστιακή απόσταση ενός συστήματος φακών μπορεί να υπολογιστεί αν θεωρηθεί ένα φακός ο οποίος μετά την πρόσπτωση παράλληλων ακτινών θα εστιάσει τις ακτίνες στο ίδιο σημείο με το σύστημα των δυο φακών. Η εστιακή δύναμη αυτού του φακού $f_{o\lambda}$ ονομάζεται *ισοδύναμη εστιακή απόσταση* του συστήματος των φακών και δίνεται από την σχέση:

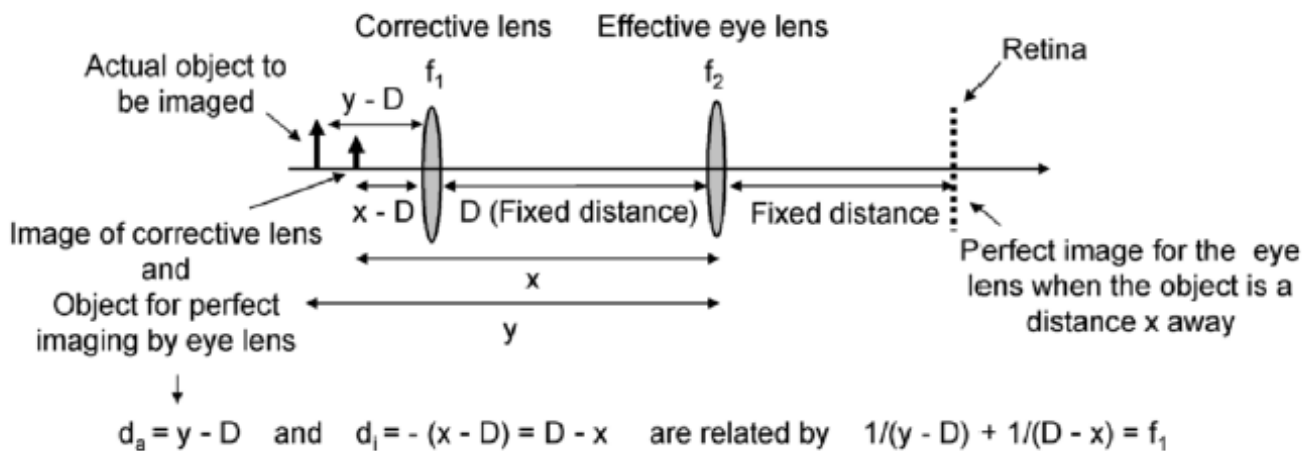
$$f_{o\lambda} = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 + D} \quad (4.5)$$

Από την παραπάνω σχέση και τον ορισμό του οπτικής ισχύος ενός φακού μπορούμε να καταλήξουμε στην σχέση που περιγράφει την οπτική ισχύ ενός συστήματος φακών και είναι: (Βαμβακάς Ι.)

$$P_{o\lambda} = P_1 + P_2 - DP_1P_2 \quad (4.6)$$

4.1.1. ΟΠΙΣΘΙΑ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Ορισμένες φορές είναι πιο εύκολο είναι να χρησιμοποιηθεί η προς τα πίσω διάδοση του φωτός, δηλαδή ξεκινώντας από το είδωλο και καταλήγοντας στο αντικείμενο, πράγμα που είναι εφικτό σύμφωνα με την αντίστροφη διάδοση (βλ. Κεφ. 1.2.) του φωτός. Αυτός ο τρόπος συνιστάται, ειδικότερα αν η απόσταση του ειδώλου του συστήματος και η απόσταση των δυο φακών είναι γνωστή, όπως στην περίπτωση των διορθωτικών φακών των διαθλαστικών ανωμαλιών. (Herman, 2007)



Σχήμα 4.4 Μετατόπιση ειδώλου με χρήση διορθωτικού φακού σε σύστημα φακών με γνωστό D και γνωστή απόσταση ειδώλου του δευτέρου φακού με χρήση της προς τα πίσω διάδοσης. [16]

Θεωρούμε ένα οπτικό σύστημα οφθαλμού (Σχήμα 4.4), στο οποίο η απόσταση του ειδώλου είναι γνωστή και το είδωλο δημιουργείται καθαρά επάνω στον αμφιβληστροειδή όταν το αντικείμενο είναι σε απόσταση x αριστερά του φακού του οφθαλμού (φακός f_2), αλλά θα θέλαμε να εστιάσουμε ένα αντικείμενο σε απόσταση y , όπου $y > x$. Το οπτικό σύστημα του ματιού δεν μπορεί να το καταφέρει λόγω ύπαρξης κάποιας αμετροπίας, όπως προαναφέρθηκε (βλ. Κεφ. 2.4.) . Η απόσταση μεταξύ των φακών είναι γνωστή ($D=1,5\text{cm}$ για διορθωτικά γυαλιά και $D=0\text{cm}$ για φακούς επαφής) όπως θα δούμε παρακάτω. Η απόσταση x από τον φακό του οφθαλμού είναι γνωστή και είναι ίση με $x - D$ από τον από τον διορθωτικό φακό (φακός f_1). Η οπτική ισχύς του διορθωτικού φακού, f_1 , επιλέγεται με τέτοιο τρόπο, ώστε το είδωλο του αντικείμενου στην απόσταση $d_a = y - D$ αριστερα του να δημιουργείται σε απόσταση $d_i = D - x$ στα δεξια του. Το είδωλο αυτό χρησιμοποιείται σαν αντικείμενο για τον φακό του ματιού, f_2 , που στην συνέχεια εστιάζεται εύκολα από αυτόν. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.2) η έκφραση αυτή περιγράφεται ως:

$$\frac{1}{y - D} + \frac{1}{D - x} = \frac{1}{f_1} \quad (4.7)$$

Και έτσι η απαραίτητη οπτική ισχύς του διορθωτικού φακού είναι $f_{\text{corrective}} = f_1$. Η σχέση αυτή είναι που θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω για τον τρόπο συνταγογράφησης διορθωτικών γυαλιών και φακών. (Herman, 2007)

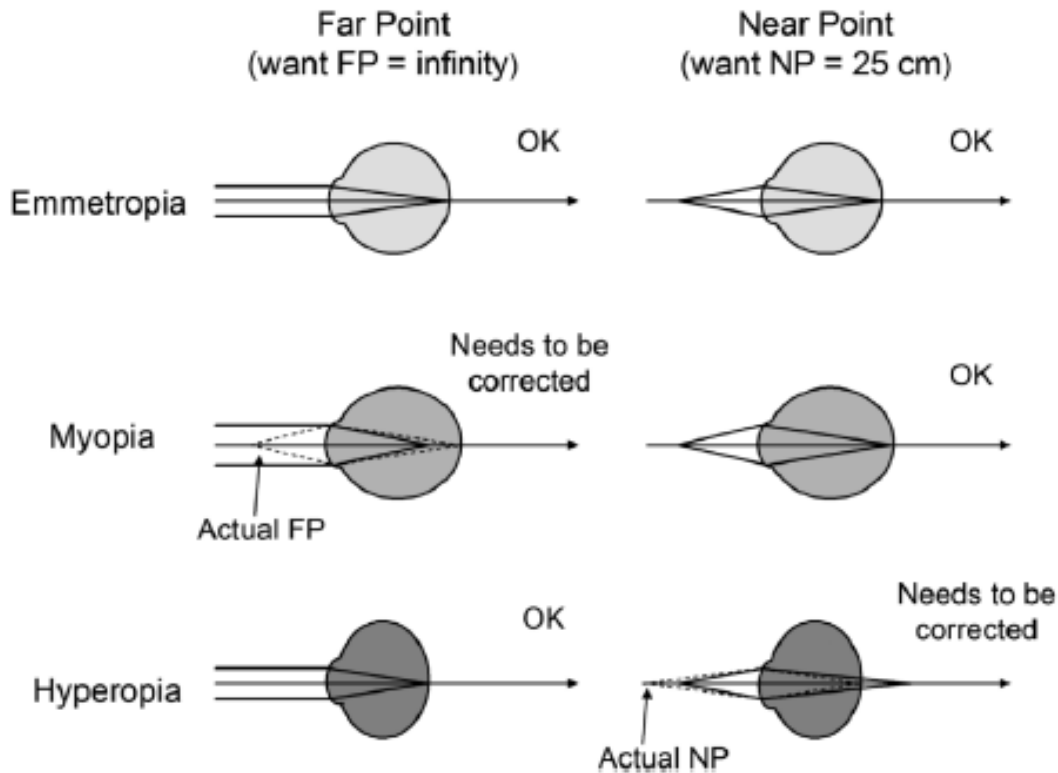
4.2. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ

Οι τρόποι αντιμετώπισης των αμετροπιών του οπτικού συστήματος του οφθαλμού είναι διάφοροι και έχουν εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου. Ο πιο συνήθης και πιο εύκολος τρόπος είναι αυτός της εφαρμογής διορθωτικών γυαλιών. Άλλοι τρόποι είναι αυτοί της εφαρμογής διαφόρων ειδών φακών επαφής, ενώ η πιο σύγχρονη πρακτική είναι αυτή της επεμβατικής χειρουργικής.

Όπως προαναφέρθηκε (βλ. 2.3.) , η γεωμετρία της κατασκευής των φακών (κυρίως του αμφίκυρτου και του αμφίκοιλου) είναι υπεύθυνη για τα σφαιρικά σφάλματα και που εμφανίζουν οι φακοί. Στην σύγχρονη οφθαλμομετρία χρησιμοποιούνται θετικοί και αρνητικοί μηνίσκοι, που ελαττώνουν σημαντικά τα φαινόμενα αστιγματισμού. (Ζευγώλης, 2017)

Οι αμετροπίες μπορούν να περιγράφουν πολύ εύκολα λέγοντας ότι ένας οφθαλμός έχει μικρότερη ή μεγαλύτερη ισχύ από το φυσιολογικό, και η διόρθωση

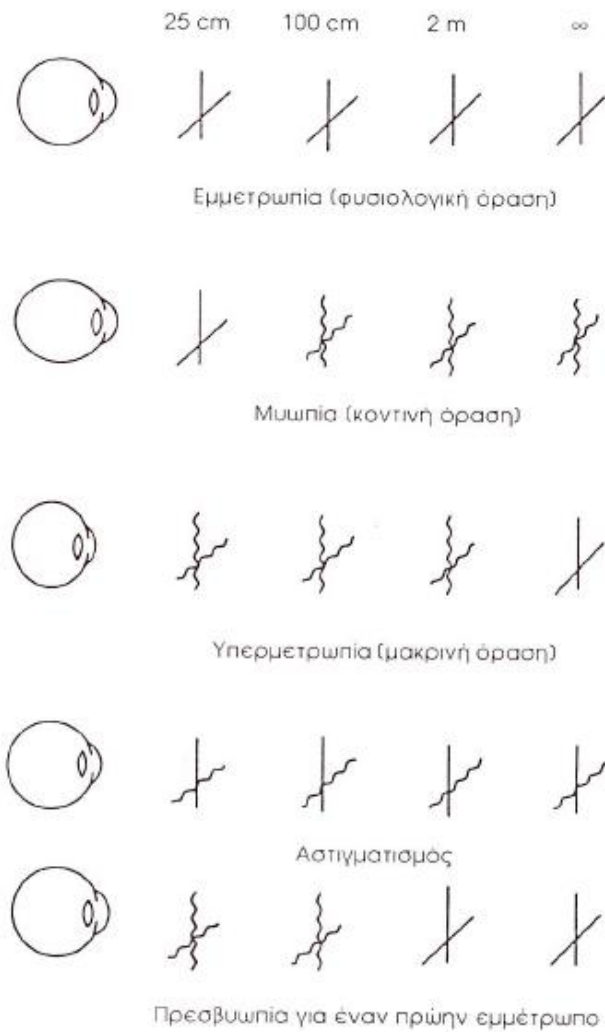
επιτυγχάνεται αλλάζοντας την κλίση της πορείας των ακτινών, απόκλιση δέσμης στην περίπτωση της μυωπίας και σύγκλιση δέσμης στην περίπτωση της υπερμετροπίας, μετακινώντας έτσι το είδωλο επάνω στον αμφιβληστροειδή. (Δαμανάκης, 1999) Η περιγραφή αυτή αφενός είναι σωστή, αφετέρου αδυνατεί να περιγράψει την διαδικασία της διόρθωσης από πλευράς γεωμετρικής οπτικής.



Σχήμα 4.5 Εγγύτερα και απώτερα σε εμμετρικό (πρώτο ζευγάρι) μυωπικό (δεύτερο ζευγάρι) και υπερμετρικό οφθαλμό (τρίτο ζευγάρι). [16]

Η εμμετροπία του οπτικού συστήματος του οφθαλμού, από πλευράς γεωμετρικής οπτικής, μπορεί να περιγραφεί ως ένα σύστημα το οποίο, χάρη στην προσαρμοστικότητα του κρυσταλλοειδούς φακού, έχει το απώτερο σημείο στο άπειρο και το εγγύτερο σημείο ευκρινής όρασης, όπως έχει οριστεί, στα $D = 25 \text{ cm}$ (βλ. Κεφ. 2.1.). Το οπτικό άπειρο του συστήματος του οφθαλμού μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας την σχέση (1.4), με $\beta = 24.2 \text{ mm}$ (απόσταση αμφιβληστροειδούς από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς) και $f = 60D$ (φυσιολογική τιμή οπτικής ισχύος οφθαλμού). Η εξ. (1.4.) δίνει το αποτέλεσμα $a \approx 6 \text{ m}$. Αυτό σημαίνει ότι κάθε αντικείμενο που βρίσκεται πέραν των έξι μέτρων εστιάζεται πάνω στον αμφιβληστροειδή με τον κρυσταλλοειδή φακό σε πλήρη χάλαση. Αυτό είναι και το απώτερο σημείο ενός εμμετρικού ματιού.

Ο γενικός κανόνας που ακολουθείται στην διόρθωση αμετροπιών είναι ότι ένας διορθωτικός φακός τοποθετούμενος μπροστά στον οφθαλμό διορθώνει την αμετροπία του όταν ο δευτερεύουσα εστία του συμπίπτει με το άπω σημείο του αμετροπικού οφθαλμού. (Δαμανάκης, 1999) Όταν η προσαρμογή είναι έως 4 dpt τότε επιτυγχάνεται ευκρινής όραση ακόμα και με διόρθωση. (βλ Κεφ 2.1.)

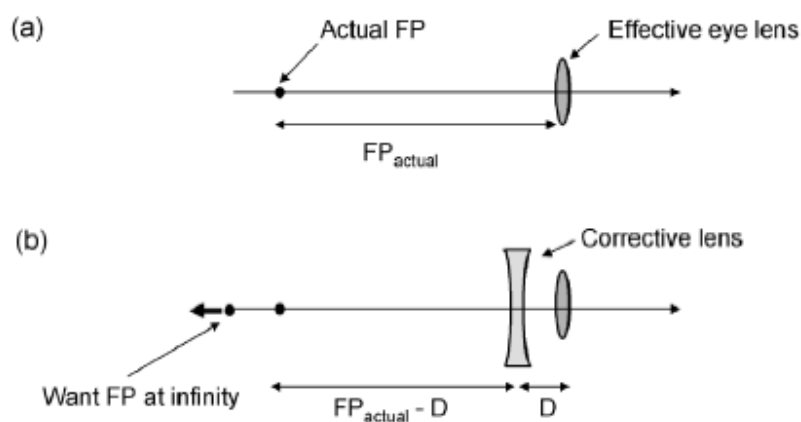


Εικόνα 4.1. Απεικόνιση ευκρίνειας της όρασης σε τέσσερις αποστάσεις.

4.2.1. ΕΞΟΥΔΕΤΕΡΩΣΗ ΜΥΩΠΙΑΣ

Οι άνθρωποι με μυωπία έχουν κοντινή όραση, που σημαίνει ότι έχουν το εγγύτερο σημείο σε φυσιολογική απόσταση ($D=25\text{ cm}$) ενώ τα αντικείμενα στο άπειρο ($d_a=\infty$) σχηματίζουν είδωλο εμπρός του αμφ/δη. Οι μύωπες έχουν ευκρινή όραση από το εγγύτερο σημείο έως το απώτερο το οποίο είναι $<\infty$. (Σχ. 4.5).

Η μυωπία διορθώνεται με την χρήση αρνητικών φακών. Η παράλληλη δέσμη ακτινών διερχόμενη μέσα από τον αρνητικό φακό αποκλίνει από τον οπτικό άξονα και φαίνεται σαν να προέρχεται από το δευτερεύον εστιακό σημείο του φακού που συμπίπτει με το απώτερο σημείο του οφθαλμού. (Δαμανάκης, 1999)



FP: Απώτερο Σημείο

Σχήμα 4.6 (α) Η θέση του απώτερου σημείου σε έναν μυωπικό οφθαλμό και (β) ο στόχος της επιλογής του κατάλληλου διορθωτικού φακού για την διόρθωση της. [16]

Για την ανάλυση του τρόπου διόρθωσης της μυωπίας θα κατασκευάσουμε είναι σύστημα φακών που θα αποτελείται από τον φακό του οφθαλμού με απώτερο σημείο $A\Sigma = \infty$ και εγγύτερο σημείο $E\Sigma = 25\text{mm}$. (Herman, 2007) Για τα διορθωτικά γυαλιά ισχύει $D \sim 1.5\text{ cm}$, αν τοποθετούνταν σε πιο κοντινή απόσταση τότε τα βλέφαρα θα ερχόντουσαν σε επαφή με τον φακό κατά την διάρκεια του βλεφαρίσματος, ενώ για διόρθωση με φακούς επαφής $D \sim 0\text{ cm}$. Ας υποθέσουμε οφθαλμό (Σχήμα 4.6α) με απώτερο σημείο $A\Sigma = 530\text{ cm}$. Ο οφθαλμός μπορεί να εστιάσει ευκρινώς το αντικείμενο σε αυτή την απόσταση, προσαρμοσμένο όσο γίνεται για μακρινή όραση, αλλά χρειάζεται διόρθωση για να εστιάσει αντικείμενα σε μεγαλύτερη απόσταση. Ο φακός τοποθετούμενος μπροστά στο μάτι θα πρέπει το αντικείμενο $d_a = \infty$ μακριά να εστιάζεται σε απόσταση $d_i = D - A\Sigma \Rightarrow D - 530$.

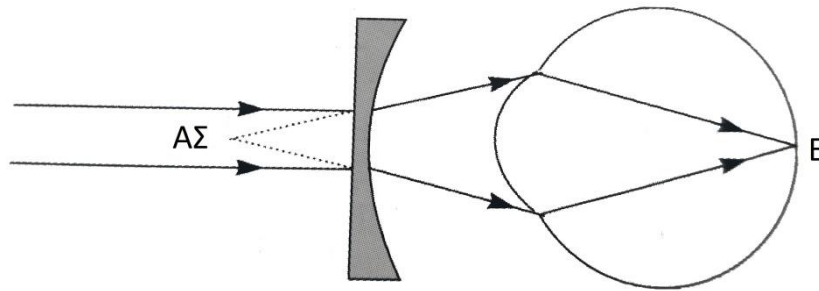
Χρησιμοποιώντας την προς τα πίσω διάδοση του φωτός (βλ. Κεφ. 4.1.1.) με το f_1 αντικαθιστάμενο από το $f_{corrective}$ η σχέση (4.3) γίνεται:

$$\frac{1}{\infty} - \frac{1}{d_a - A\Sigma} = \frac{1}{f_{corrective}} = P_{corrective} \quad (4.8)$$

Η όποια δίνει:

$$f_{corrective} = d_a - A\Sigma \quad (4.9)$$

Ειδικότερα $f_{corrective} = d_a - 530\text{cm}$. Άρα $f_{corrective} = -528.5\text{ cm} = -5.285\text{ m}$. Η οπτική ισχύς ορίζεται ως $P_{corrective} = 1/f_{corrective} = -0.1892\text{ D} \approx -0.19\text{ D}$. Για ένα φακό επαφής η εξίσωση (4.9) μετατρέπεται σε $f_{corrective} = -A\Sigma = -530\text{ cm}$ και με $P_{corrective} = 1/f_{corrective} = -0.1887\text{ D} \approx -0.19\text{ D}$ Αυτή είναι και θεωρητικά η χορηγούμενη συνταγή. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα φαίνεται ότι η συνταγή για διορθωτικά γυαλιά και φακούς επίφασης είναι όμοιες. Πρακτικά, όμως, οι επαγγελματίες θα χορηγούσαν μια συνταγή της τάξης του -0.25 D , διότι στην αγορά, οι διορθωτικοί φακοί που κυκλοφορούν αυξάνονται με βήμα 0.25 D .

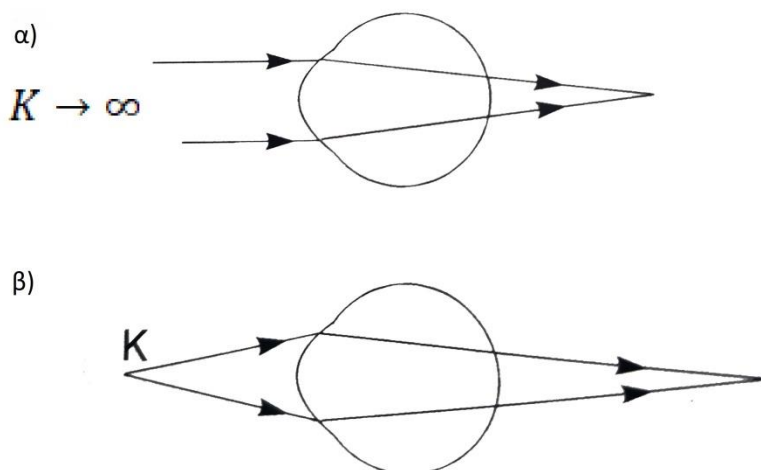


Σχήμα 4.7 Απεικόνιση της πορείας των ακτινών μέσα από έναν αρνητικό φακό σε μυωπικό οφθαλμό. [28]

4.2.2. ΕΞΟΥΔΕΤΕΡΩΣΗ ΥΠΕΡΜΕΤΡΩΠΙΑΣ

Το υπερμετρωπικό μάτι, αντιθέτως με το μυωπικό, έχει το απώτερο σημείο σε φυσιολογική τιμή $A\Sigma = \infty$, ενώ το εγγύτερο σημείο είναι σε πιο μακρινή θέση, $E\Sigma > 25\text{cm}$. Όπως έχει προαναφερθεί, στον υπερμετρωπικό οφθαλμό, η εστία του

οπτικού συστήματος είναι πίσω από τον αμφιβληστροειδή, με αποτέλεσμα τα μακρινά αντικείμενα να φαίνονται θολά. Στην περίπτωση που το αντικείμενο είναι πιο κοντά από το απώτερο σημείο του οφθαλμού, η δέσμη των ακτινών είναι αποκλίνουσα με αποτέλεσμα η απόσταση της κύριας εστίας του συστήματος από τον αμφιβληστροειδή να μεγαλώνει. Συνεπώς, το υπερμετρωπικό μάτι έχει και την μακρινή και την κοντινή όραση θολή.

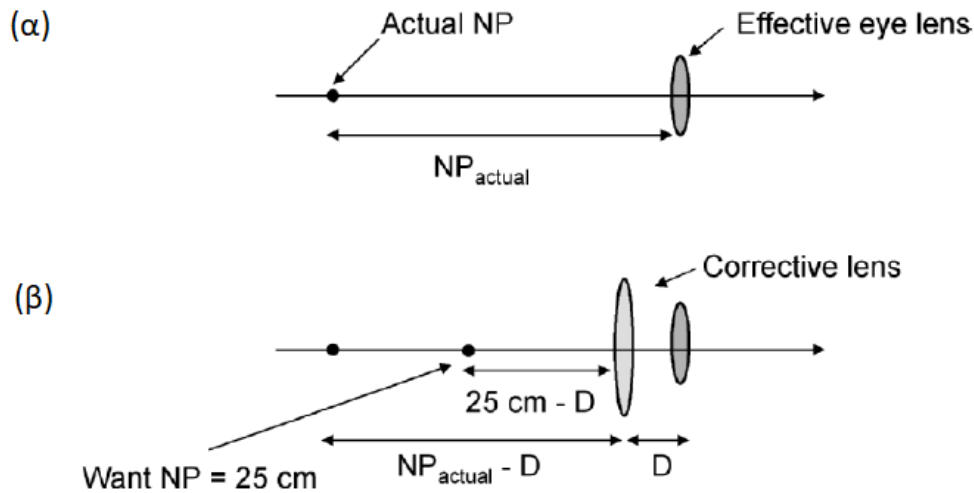


Σχήμα 4.7 α) Παράλληλη δέσμη ακτινών προερχόμενη από μακρινό αντικείμενο K ($a=\infty$) εστιάζεται πίσω από τον αμφιβληστροειδή ενός υπερμετρωπικό οφθαλμό με αποτέλεσμα να φαίνεται θόλο. β) Η αποκλίνουσα δέσμη ακτινών προερχόμενη από πιο κοντινό αντικείμενο K εστιάζεται ακόμα πιο πίσω με αποτέλεσμα το αντικείμενο να φαίνεται ακόμα πιο θόλο. [28]

Ο υπερμετρωπικός οφθαλμός, ανεξαρτήτως αιτιολογίας της υπερμετρωπίας (αξονική ή διαθλαστική), έχει μειωμένη οπτική ισχύ για το δεδομένο αξονικό του μήκος. Συνεπώς, μια αύξηση της διαθλαστικής ισχύος με τον μηχανισμό της προσαρμογής μπορεί να εξουδετερώσει ολόκληρη την αμετρωπία ή ένα μέρος αυτής. Το ποσοστό της υπερμετρωπίας που εξουδετερώνεται με την διαδικασία της προσαρμογής ονομάζεται *λανθάνουσα υπερμετρωπία*, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό ονομάζεται *έκδηλη υπερμετρωπία*. (Δαμανάκης, 1999) Με χρήση ειδικών μεθόδων της οφθαλμολογίας, το ποσοστό της λανθάνουσας υπερμετρωπίας μπορεί να αποκαλυφθεί και να διορθωθεί με την χρήση φακών.

Για την ανάλυση του τρόπου εξουδετέρωσης της υπερμετρωπίας θα κατασκευάσουμε σύστημα φακών με απώτερο σημείο $A\Sigma = \infty$ και εγγύτερο σημείο $E\Sigma = 25\text{cm}$. Το μοντέλο οφθαλμού που θα χρησιμοποιηθεί έχει την προσαρμογή του σε ισχύ, δηλαδή η εστίαση των αντικειμένων στο άπειρο γίνεται πάνω στο αμφιβληστροειδή, ενώ ένα αντικείμενο σε κοντινή απόσταση εστιάζεται πίσω από

αυτόν. Η υπερμετρωπία διορθώνεται με θετικούς φακούς. Ο φακός τοποθετούμενος μπροστά στον οφθαλμό συγκλίνει τις παράλληλα προσπίπτουσες ακτίνες προς το δεύτερο εστιακό σημείο του φακού το οποίο συμπίπτει με το απώτερο σημείο του ματιού. (Δαμανάκης, 1999)



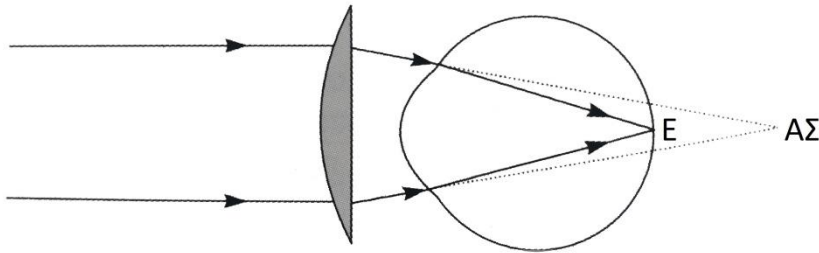
Σχήμα 4.8 (α) Η θέση του εγγύτερου σημείου σε έναν υπερμετρωπικό οφθαλμό και (β) ο στόχος της επιλογής του κατάλληλου διορθωτικού φακού για την διόρθωση της. [16]

Ας υποθέσουμε οφθαλμό (Σχήμα 4.8α) με απώτατο σημείο σε φυσιολογική τιμή $A\Sigma = \infty$, και εγγύτερο σημείο $E\Sigma = 190\text{ cm}$, όταν το μάτι έχει προσαρμόσει όσο το δυνατόν περισσότερο για κοντινές αποστάσεις. Η εστίαση σε αυτήν την απόσταση είναι ιδανική αλλά για αντικείμενο σε πιο κοντινή απόσταση χρειάζεται διόρθωση. Όπως και στην διόρθωση της μυωπίας, η απόσταση των διορθωτικών γυαλιών από το μάτι είναι $D \sim 1.5\text{ cm}$, ενώ για φακούς επαφής ισχύει $D \sim 0\text{ cm}$. Ο φακός που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει με αντικείμενο που βρίσκεται σε απόσταση $25 - D$ αριστερά του, να δημιουργεί είδωλο σε απόσταση $D - 190$ στα δεξιά του. Με την χρήση της εξ. (4.2) η έκφραση γράφεται:

$$\frac{1}{25\text{cm} - D} + \frac{1}{D - E\Sigma} = \frac{1}{f_{corrective}}$$

Για διορθωτικά γυαλιά η παραπάνω σχέση γίνεται $1/f_{corrective} = 1/26.8\text{cm} = +3.72\text{ D}$ και για φακούς επαφής, $1/f_{corrective} = 1/28.8\text{cm} = +3.47\text{ D}$. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα οι ισχύες των απαιτούμενων διορθωτικών φακών στις δυο περιπτώσεις έχουν μεγάλη διαφορά και η συνταγή που θα πρέπει να

χορηγηθεί, θα είναι διαφορετική για διορθωτικά γυαλιά και διαφορετική για φακούς επαφής. (Herman, 2007)



Σχήμα 4.9 Πορεία ακτινών διερχόμενες μέσα από έναν θετικό φακό και η σωστή εστίαση τους σε έναν υπερμετροπικό οφθαλμό. [28]

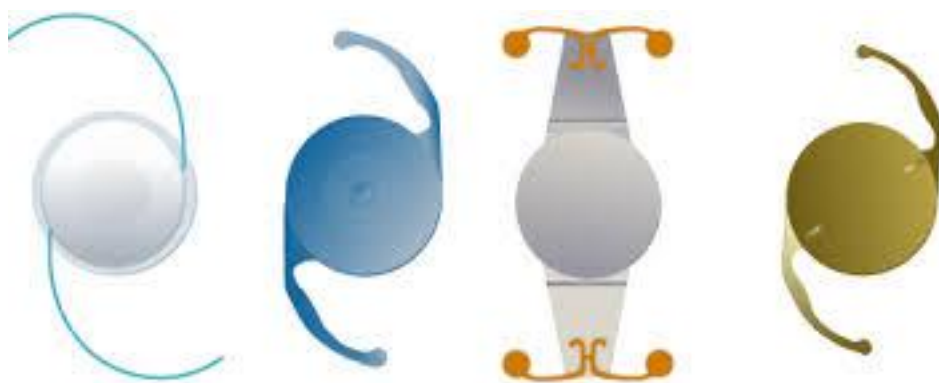
4.2.2.1. ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΓΕΡΟΝΤΙΚΗΣ ΥΠΕΡΜΕΤΡΩΠΙΑΣ (ΠΡΕΣΒΥΩΠΙΑΣ)

Όπως έχει προαναφερθεί (βλ. Κεφ. 2.4.2.2. β) η γεροντική υπερμετροπία ή πρεσβυωπία εμφανίζεται μετά το 40^ο έτος της ηλικίας και περιγράφεται από την ανικανότητα του φακού να προσαρμόσει για κοντινά αντικείμενα, δημιουργώντας έτσι μια μορφή υπερμετροπία. Επειδή η σκλήρυνση του φακού είναι σταδιακή και αυξανόμενη με την πάροδο του χρόνου, έτσι και το μέγεθος της διαθλαστικής ανωμαλίας που δημιουργείται αυξάνεται σταδιακά με το πέρασμα του χρόνου. Για παράδειγμα, σε έναν εμετροπικό οφθαλμό στο 46^ο έτος ο βαθμός της γεροντικής υπερμετροπίας είναι περίπου 1,50Dpt, ενώ στο 50^ο έτος της ηλικίας θα ανέρχεται γύρω στα 2,50Dpt. Η διόρθωση της πρεσβυωπίας γίνεται με θετικούς φακούς. Το αστιγματικό σφάλμα, σε περίπτωση που υπάρχει, συνδυάζεται με την πρεσβυωπική διόρθωση. Οι θετικοί φακοί διόρθωσης της πρεσβυωπίας μπορούν να συνδυαστούν με φακούς για την μακρινή διόρθωση με διαφορετικές μορφολογίες φακών όπως είναι οι πολυεστιακοί και οι διπλοεστιακοί. (Δαμανάκις, 1999)

Η εμφάνιση της πρεσβυωπίας είναι ανάλογη της αμετροπίας του κάθε οφθαλμού. Σε έναν υπερμετροπικό οφθαλμό, εμφανίζεται νωρίτερα, και παρατηρείται αύξηση του βαθμού της υπερμετροπίας του, επειδή πλέον

εκδηλώνεται η λανθάνουσα υπερμετρωπία, την οποία μέχρι τώρα κάλυπτε η προσαρμογή. Σε έναν μυωπικό οφθαλμό για να εκδηλωθεί η πρεσβυωπία θα πρέπει πρώτα να υπερκαλυφθεί η περίσσια ισχύς του συστήματος, ώστε να χρειαστεί πρεσβυωπική διόρθωση. Τις περισσότερες φορές, οι μυωπικοί οφθαλμοί με μυωπία μεγαλύτερη των 2,50D (-2,50 D) δεν θα χρειαστούν διόρθωση, γιατί βγάζοντας τα μυωπικά γυαλιά μπορούν να έχουν ευκρινή κοντινή όραση. (Στάγκος, 2002)

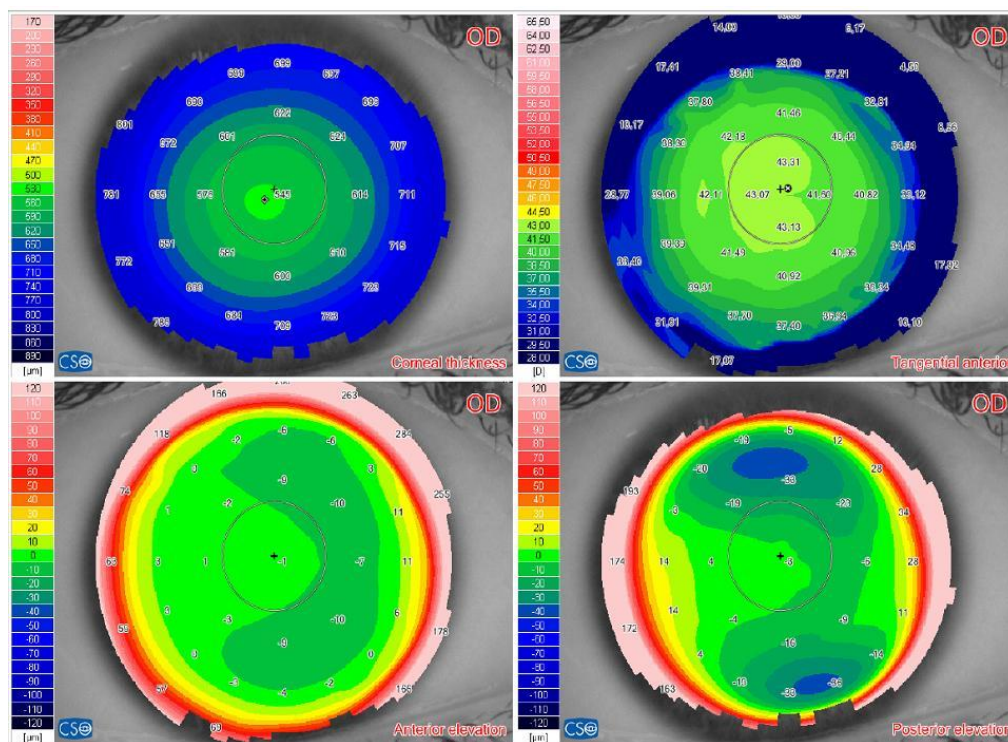
Η βαθμιαία σκλήρυνση του φακού συνοδεύεται με την βαθμιαία αλλαγή του χρώματος του φακού λόγω συσσώρευσης διάφορων αδιάλυτων κίτρινων χρωστικών ουσιών, που είναι παράγωγα των βιοχημικών μεταβολών του μεταβολισμού του φακού. Ως αποτέλεσμα, είναι η εντονότερη απορρόφηση του ορατού φωτός. Αυτή η ελάττωση της αδιαφάνειας του φακού ονομάζεται *καταρράκτης*. (Στάγκος, 2002) Η αντιμετώπιση του καταρράκτη γίνεται με μορφή χειρουργικής επέμβασης για την αφαίρεση του τμήματος ή ολοκλήρου του φακού που έχει αποκτήσει αδιαφάνεια. Η πιο συνήθης τεχνική είναι η φακοθρυψία. Στην θέση του κρυσταλλοειδούς φακού τοποθετείται ενδοφακός, για να καλυφθεί η διαφορά της οπτικής ισχύος λόγω της αφακίας. (Στάγκος, 2002)



Εικόνα 4.2 Οι διάφοροι τύποι ενδοφακών [24]

4.2.3. ΕΞΟΥΔΕΤΕΡΩΣΗ ΑΣΤΙΓΜΑΤΙΣΜΟΥ

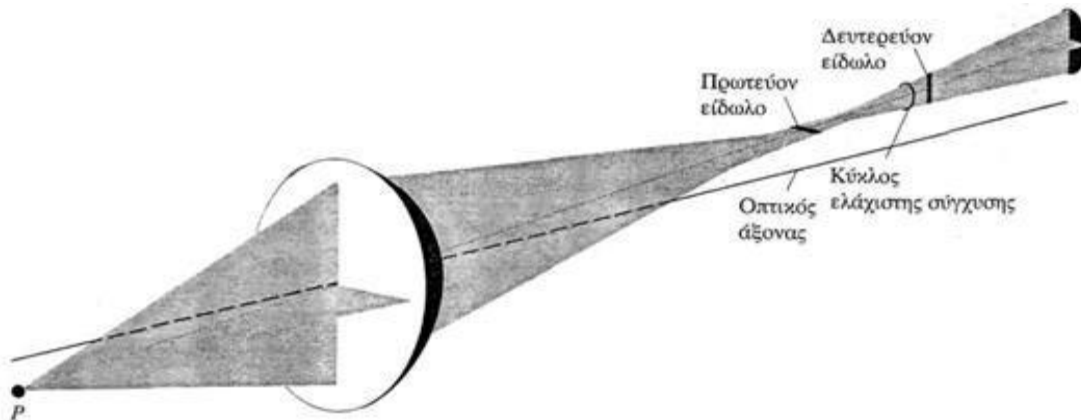
Ο αστιγματισμός στην οφθαλμολογία συνήθως θεωρείται σαν ένα διαφορετικό, μεμονωμένο, διαθλαστικό σφάλμα, το οποίο έχει διαφορετικούς τρόπους προσέγγισης από τα υπόλοιπα σφάλματα, που συνδυάζεται όμως με αυτά. Πχ. σε ένα οφθαλμό μπορούν να «συνυπάρχουν» η μυωπία με τον αστιγματισμό (-3.50D / -0.50D, όπου το πρώτο είναι ο βαθμός της μυωπίας και το δεύτερο ο βαθμός του αστιγματισμού). Στην πραγματικότητα όμως, ο αστιγματισμός μπορεί να εξηγηθεί, και συνεπώς να διορθωθεί, με την χρήση των τρόπων που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. (βλ. 4.2.1. και 4.2.2.)



Εικόνα 4.3 Τοπογραφία ενός φυσιολογικού κερατοειδούς με χρήση του Orb Scan II. Πάνω δεξιά απεικονίζεται το πάχος του κερατοειδούς, πάνω αριστερά απεικονίζεται η δύναμη του κερατοειδούς, ενώ στις δυο κάτω απεικονίσεις ποσοτικοποιείται η πρόσθια (αριστερή εικόνα) και η οπίσθια (δεξιά) ανύψωση του κερατοειδούς. [29]

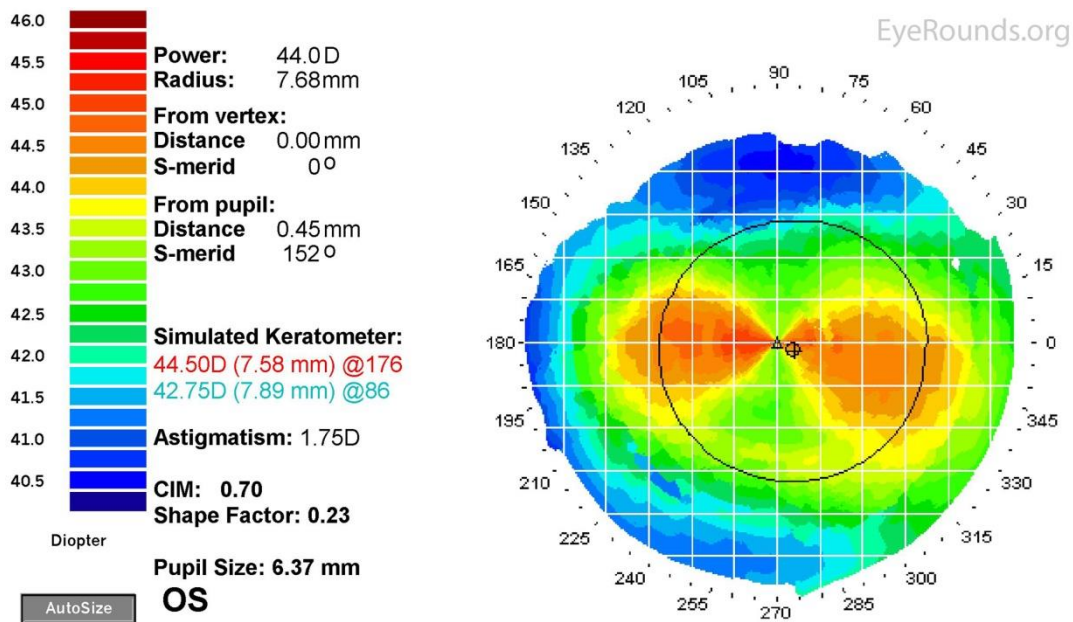
Ο αστιγματισμός όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2.4.3. είναι η άνιση διάθλαση σε ένα από τα διαθλαστικά στοιχεία του οφθαλμού (κυρίως στον κερατοειδή) με δυο κύριες εστίες που δημιουργούνται μετά την διάθλαση, την πρόσθια και την οπίσθια. Αυτές οι δυο εστίες, καθώς και το που βρίσκονται σε σχέση με τον αμφιβληστροειδή είναι που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην διόρθωση του αστιγματισμού. Στην διόρθωση ενός αστιγματικού ματιού δεν μας ενδιαφέρουν οι ενδιάμεσες εστίες, αλλά μόνο η πρόσθια και η οπίσθια κύρια εστία, οι οποίες

αντιστοιχούν στην μέγιστη και την ελάχιστη διαθλαστικότητα των καθέτων μεσημβρινών του κερατοειδούς. Στην πραγματικότητα, δεν μπορούμε να φέρουμε τις δύο ακραίες εστίες ταυτοχρόνως επάνω στον αμφιβληστροειδή, αλλά το σημείο που το εύρος απόκλισης των οριζόντιων ακτινών είναι ίσο με το εύρος σύγκλισης των κάθετων ακτινών. Η διατομή αυτού του εύρος κατανομής είναι κύκλος και ονομάζεται *κύκλος ελάχιστης σύγκλισης*, και είναι το σημείο όπου συμβαίνει η ελάχιστου παραμόρφωση του ειδώλου. (βλ Εικ 4.4) (Στάγκος, 2002)



Εικόνα 4.4 Ο κύκλος ελάχιστης σύγκλισης σε έναν αστιγματικό φακό. [32]

Οι κύριες εστίες ενός αστιγματικού οφθαλμού μπορούν να αντιμετωπιστούν μεμονωμένα. Για παράδειγμα, αν η πρόσθια εστία έχει μέγεθος μυωπικής αμετροπίας $-3.00D$ και η οπίσθια εστία $-4.00D$ μπορούμε να χορηγήσουμε εύκολα μια συνταγή για την διόρθωση τους. Οι φακοί που προκαλούν την εστίαση του φωτός σε δυο εστίες ονομάζονται κυλινδρικοί. Έτσι ανάλογα με το ποσό αστιγματισμού και την φύση αυτού (μυωπικός, υπερμετροπικός ή μεικτός) μπορεί να διορθωθεί χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη τεχνική που προαναφέρθηκε, μεταφέροντας και τις δυο εστίες ακριβώς επάνω στον αμφιβληστροειδή. (Στάγκος, 2002) (Πατέρας, Οφθαλμικοί Φακοί I, 2010)



Εικόνα 4.5 Τοπογραφία κερατοειδούς με αστιγματισμό. Η παρούσα απεικόνιση είναι της διοπτρικής δύναμης του κερατοειδούς. [30]

4.2.4. ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΗ ΔΙΟΘΡΩΣΗ ΑΜΕΤΡΩΠΙΩΝ

Όπως έχει προαναφερθεί, η πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς είναι η ισχυρότερη διαθλαστική επιφάνεια του οφθαλμού και παρέχει περίπου το 70% της διαθλαστικής ικανότητας (40 στις 60 συνολικές διοπτρίες του ανθρώπινου ματιού). Η κεντρική περιοχή της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς είναι η περιοχή «ενδιαφέροντος» όσον αφορά τις κερατοδιαθλαστικές επεμβάσεις. Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί στα όρια της κόρης και είναι η «οπτικά σημαντική» περιοχή που καθορίζει την εστίαση και κατηγορηματικά την ποιότητα του οπτικού ειδώλου. Ο στόχος των κερατοδιαθλαστικών επεμβάσεων είναι η μεταβολή της διαθλαστικής δύναμης του κεντρικού προσθίου κερατοειδούς με σκοπό την σωστή διάθλαση των ακτινών στον αμφιβληστροειδή. (Δαμανάκης, 1999)

Διάφορες επεμβάσεις είναι (1) η *Ακτινωτή Κερατοτομή (RK, Radial Keratotomy)*, φέροντας τέσσερις με οκτώ ακτινωτές τομές, σε μια προκαθορισμένη ζώνη στο κερατοειδή, με σκοπό την επιπέδωσή του. (2) Η *Φωτοδαθλαστική Κερατεκτομή (PRK, PhotoRefractive Keratectomy)* και (3) η *Laser in Situ Κερατοσμίλευση (LASIK)* χρησιμοποιούν το Excimer Laser είτε για την μείωση της καμπυλότητας του κερατοειδούς στην διόρθωση μυωπίας είτε την αύξηση στην διόρθωση της υπερμετρωπίας. Το Excimer Laser δρα σε βάθος 6-7 mm και τροποποιεί ελεγχόμενα το σχήμα του κερατοειδούς. Η ειδοποιός διαφορά των δυο επεμβάσεων είναι ότι στην πρώτη το επιθήλιο του κερατοειδούς αφαιρείται

μηχανικά πριν την επέμβαση και αναπλάθεται μετεγχειρητικά, ενώ στην δεύτερη περίπτωση, το πρόσθιο 20% του κερατοειδούς κόβεται και επαναποθετείται μετά το πέρας της επέμβασης. (Δαμανάκης, 1999) (Herman, 2007)

5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

5.1. Η ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

Η κατεύθυνση που έχουν οι ερευνητικές προσπάθειες στο πεδίο της οφθαλμολογίας και της οπτομετρίας - ειδικότερα στους τρόπους αντιμετώπισης και διόρθωσης των διαθλαστικών ανωμαλιών - είναι πραγματικά ικανοποιητική, από την ανάπτυξη νέων υλικών για τους οφθαλμικούς φακούς και τους φακούς επαφής μέχρι και διαφορετικούς τρόπους αντιμετώπισης αμετροπιών.

5.1.1. ΟΡΘΟΚΕΡΑΤΟΛΟΓΙΑ (Orthokeratoly)

Η νεότερη εξέλιξη στον τομέα διόρθωσης των αμετροπιών είναι η πρακτική της ορθοκερατολογίας (Ortho-k). Αναφορές χρήσης φακών επαφής για τη διαμόρφωση του κερατοειδικού ιστού για την διόρθωση των διαθλαστικών ατελειών χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1950 και του 1960, αλλά ήταν κυρίως μεμονωμένες αναφορές περιπτώσεων και παρεπόμενα ευρήματα¹. Οι πρώτες προσπάθειες διόρθωσης διαθλαστικών σφαλμάτων περιορίστηκαν από την έλλειψη μηχανογραφημένων τοπογραφικών δεδομένων κερατοειδούς και από τα υλικά φακών που ήταν διαθέσιμα εκείνη τη χρονική στιγμή. Κατά συνέπεια, το ενδιαφέρον για την συγκεκριμένη πρακτική μειώθηκε. 1-3. Η εμφάνιση μηχανημάτων τοπογραφίας καθώς και αεροδιαπερατών υλικών επέτρεψε την πρόοδο της έρευνας.

Στην σημερινή εποχή η χρήση της ορθοκερατολογικής πρακτικής είναι πιο ασφαλής από ποτέ. Με την χρήση κατάλληλα διαμορφωμένων RGP φακών επαφής είναι δυνατή η αναδιαμόρφωση της γεωμετρίας του κερατοειδούς, που στην συνέχεια επιτρέπει την σωστή διάθλαση των ακτινών του φωτός επάνω στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια του ματιού. Οι Ortho-K φακοί χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια του ύπνου, με αποτέλεσμα ο ασθενής να μην χρειάζεται τα διορθωτικά γυαλιά για το υπόλοιπο της ημέρας. (Gary Heiting, 2021)

Τα πλεονεκτήματα αυτής της πρακτικής στον μοντέρνο τρόπο ζωής είναι αρκετά. Οι χρήστες φακών επαφής σήμερα αντιμετωπίζουν νέες προκλήσεις. Η αυξημένη χρήση υπολογιστών και ψηφιακών συσκευών έχει επιδεινώσει τα συμπτώματα ξηροφθαλμίας και ασθενοπίας, ενώ ο ενεργός τρόπος ζωής πολλών χρηστών φακών επαφής άφησε ελάχιστα περιθώρια για συμβιβασμούς στην όραση. (Potter, 2020)



Εικόνα 5.1. Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας ορθοκερατολογικού φακού. Στο πρώτο σχήμα από τα αριστερά είναι το σχήμα του κερατοειδούς πριν την εφαρμογή. Στο δεύτερο από τα αριστερά απεικονίζεται το σχήμα του κερατοειδούς αμέσως μετά την εφαρμογή. Στο τρίτο από αριστερά απεικονίζεται το σχήμα του κερατοειδούς μετά από την εφαρμογή κατά την διάρκεια του ύπνου και στο τέταρτο από αριστερά είναι εμφανής η επιπέδωση του κερατοειδούς χωρίς τον φακό. [26]

Η αυξανόμενη ζήτηση για αποτελεσματικές επιλογές για τον έλεγχο της μυωπίας μπορεί να προσφέρει τις καλύτερες δυνατότητες ανάπτυξης στο ortho-k. Μια εκτεταμένη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας από τους Walline et al του διαπίστωσε ότι το ortho-k επιβραδύνει την ανάπτυξη του αξονικού μήκους πιο αποτελεσματικά από τους φακούς επαφής μονής όρασης. Η έλλειψη της περιφερειακής εστίασης από τον κερατοειδή - προκαλούμενη από τον Ortho-K - ή οι αλλαγές στη προσαρμογή μπορούν να οδηγήσουν σε επιβράδυνση της εξέλιξης της μυωπίας, καθώς έρευνες έχουν δείξει ραγδαία αύξηση στα περιστατικά εμφάνισης της. (Michael J. Lipson M. M., 2018) (Potter, 2020)

5.1.2. Η ΕΠΙΔΗΜΙΑ ΤΗΣ ΜΥΩΠΙΑΣ

Ο επιπολασμός της μυωπίας και ειδικότερα της υψηλής μυωπίας έχει αυξηθεί σημαντικά παγκοσμίως. Οι σοβαρές επιπτώσεις αυτής της έξαρσης αναγνωρίζονται από την επιστημονική κοινότητα. Ως υψηλή μυωπία (παθολογική, κακοήθης και εκφυλιστική) ορίζεται η μυωπία με αυξημένους κινδύνους οφθαλμικής νοσηρότητας, που περιλαμβάνει σφαιρικό ισοδύναμο (SphE) τουλάχιστον $-6,0$ D. Η υψηλή μυωπία χαρακτηρίζεται από αύξηση του αξονικού μήκους και το επακόλουθο τέντωμα του οπίσθιου τοιχώματος του οφθαλμικού βολβού. Απόρροια αυτού αποτελεί η αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης εκφυλιστικών αλλαγών στο σκληρό χιτώνα, στον χοριοειδή, στο μελάγχρουν επιθήλιο του αμφιβληστροειδούς και συναφών μειώσεων της οπτικής οξύτητας. (Seang-Mei Saw, 2005) Επιπλοκές όπως ο καταρράκτης, η χοριοαμφιβληστροειδική ατροφία, η οπή ωχράς κηλίδας με ή

χωρίς αποκόλληση του αμφιβληστροειδούς, η μυωπική ωχροπάθεια και οι αλλαγές της κεφαλής του οπτικού νεύρου συνδέονται με την υψηλή μυωπία. Οι περισσότερες από αυτές τις επιπλοκές απειλούν την όραση και συχνά οδηγούν σε μη αναστρέψιμη βλάβη του αμφιβληστροειδούς και, ως εκ τούτου, την απώλεια της κεντρικής όρασης. (Yasushi, 2017)

Η μυωπία δεν είναι απλά ένα διαθλαστικό σφάλμα που απαιτεί διόρθωση όρασης με γυαλιά ή φακούς επαφής, αλλά μια αιτία που δημιουργεί επιπλοκές με σημαντικό κίνδυνο εμφάνισης σοβαρής, απειλητικής για την όραση, οφθαλμικής νόσου. Διάφορες μέθοδοι θεραπείας για την μυωπία και την μυωπική εξέλιξη έχουν συνταγογραφηθεί και μελετηθεί σε μια προσπάθεια να βρεθεί μια αποτελεσματική, ασφαλής λύση. (Michael J. Lipson B. H., 2018)

Έρευνα των Lipson et al έχει δείξει για τον επιπολασμό της μυωπίας, στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, ότι στους ενήλικες αυξήθηκε από 25% το 1979% σε 41% το 2004.¹ Πιο πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι τάση αύξησης συνεχίζεται έτσι ώστε, από το 2016, το ποσοστό να είναι κοντά στο 50%. (Michael J. Lipson B. H., 2018) Η Ανατολική Ασία, επίσης, έχει πληγεί από μια άνευ προηγουμένου άνοδο της μυωπίας. Πριν από εξήντα χρόνια, το 10-20% του κινεζικού πληθυσμού ήταν μύωπες. Σήμερα, έως και το 90% των εφήβων και των νέων ενηλίκων έχουν εμφανίσει μυωπία.. Στη Σεούλ, η συντριπτική πλειοψηφία των ανδρών 19 ετών που ανέρχεται σε ποσοστό 96,5% είναι μύωπες. (Dolgin, 2015)

Ορισμένες πρόσφατες μελέτες αφήνουν μικρή αμφιβολία ότι η μυωπία βρίσκεται υπό ισχυρή γενετική επίδραση. Μέχρι σήμερα, τα γονίδια που προκαλούν την εμφάνιση μυωπίας δεν είναι γνωστά. Οι Rose et al και Chen et al έχουν επισημάνει το απλό γεγονός ότι ο ισχυρός γενετικός έλεγχος της μυωπίας δεν αποκλείει την πιθανότητα να οδηγήσει σε "επιδημία" μυωπίας. Είναι σαφές ότι τα πρώιμα διαθλαστικά σφάλματα, πιθανώς ήδη από την παιδική ηλικία, αποτελούν πολύ ισχυρό προγνωστικό παράγοντα για μεταγενέστερη μυωπία. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει το γεγονός ότι η εργασία στη σημερινή εποχή γίνεται ολοένα και πιο κοντινή. (DJJ Park, 2004)

Ο αντίκτυπος της μυωπίας, μιας φαινομενικά καλοήθους οφθαλμικής νόσου, μπορεί να είναι μεγαλύτερος από ό, τι φαίνεται. Μια μεγαλύτερη κατανόηση των δυνητικών κινδύνων τύφλωσης λόγω της μυωπίας, από οφθαλμιάτρους και οπτομέτρους, μπορεί να διευκολύνει τον έλεγχο και τη διαχείριση των οφθαλμικών επιπλοκών που σχετίζονται με την αυτήν. Η πρόληψη της εμφάνισης της μυωπίας καθώς και της εξέλιξης της χαμηλής σε υψηλή μυωπία είναι υψίστης σημασίας.

(Seang-Mei Saw, 2005) Παρόλο που η έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο είναι ακόμα σε αρχικά στάδια, έχει αποδειχθεί ότι οποιαδήποτε παρέμβαση στην αρχική εξέλιξη της μυωπίας μπορεί να επιβραδύνει την πρόοδο της στα επόμενα χρόνια της ζωής του ασθενούς, με αποτέλεσμα την μείωση του επιπολασμού της σε παγκόσμιο επίπεδο καθώς και των περιπτώσεων με εκφυλιστικό χαρακτήρα. (Ian G. Morgan, 2017)

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας γίνεται αντιληπτή η σημαντικότητα της κατανόησης των βασικών κανόνων και αρχών της γεωμετρικής οπτικής καθώς και της γνώσης της ανατομίας του ανθρώπινου οφθαλμού στην διόρθωση των διαθλαστικών ατελειών του. Όσον αφορά έναν οπτικό-οπτομέτρη, τα θέματα που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία αποτελούν εργαλείο κατανόησης και ως αποτέλεσμα, καλύτερης αντιμετώπισης των διαθλαστικών αμετροπιών, καθώς και ευρύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των τεχνικών που χρησιμοποιούν. Από την άλλη μεριά για τους οφθαλμιάτρους, είναι μία εργαλειοθήκη για την καλύτερη πρόγνωση και αντιμετώπιση των αμετροπιών, ενώ για κάθε επιστήμονα που ασχολείται με την ερευνά στην επιστήμη της οφθαλμολογίας, η βαθιά κατανόηση των νόμων και των εφαρμογών της γεωμετρικής οπτικής είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την πρόοδο στο πεδίο. Φυσικά, υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω έρευνας επάνω στον τομέα της αντιμετώπισης των διαθλαστικών σφαλμάτων με σκοπό την ανάπτυξη νέων τρόπων διόρθωσης των ατελειών του ανθρώπινου οφθαλμού. Τα αποτελέσματα αυτής, θα συμβάλουν στην βελτίωση των υπάρχοντων τεχνικών, σε μια προσπάθεια να μειωθούν οι παρενέργειες και να ελαχιστοποιηθούν οι κίνδυνοι που κρύβονται για τον ασθενή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- DJJ Park, N. G. (2004, Ιούνιος 21). Evidence for an "Epidemic" of Myopia. *Annals Academy of Medicine*.
- Dolgin, E. (2015, Μάρτιος 18). *The Myopia Boom*. Ανάκτηση Μάιος 11, 2021, από Nature - International Weekly Journal of Science: <https://www.nature.com/news/the-myopia-boom-1.17120>
- Fox, S. I. (2013). *Φυσιολογία του Ανθρώπου* (9η Έκδοση εκδ.). (Μ. Κωνσταντίνος, Επιμ.) New York: McGraw-Hill.
- Gary Heiting, O. (2021, Μάρτιος). *Ortho-K and corneal refractive therapy: Overnight contacts to correct myopia*. Ανάκτηση Απρίλιος 22, 2021, από ALL ABOUT VISION: <https://www.allaboutvision.com/contacts/orthok.htm>
- H.D Young, R. F. (2010). *Πανεπιστημιακή Φυσική- Ηλεκτρομαγνητισμός και Οπτική* (Τόμ. 2). Αθήνα: Εκδόσεις Παπαζήση.
- Henderson, T. (2000, Ιούλιος 19). *Reflection and the Ray Model of Light*. Ανάκτηση Δεκεμβρίου 11, 2020, από The Physics Classroom: <https://www.physicsclassroom.com/class/refln>
- Henderson, T. (2000, Ιούλιος 19). *Refraction and the Ray Model of Light*. Ανάκτηση Δεκεμβρίου 12, 2020, από The Physics Classroom: <https://www.physicsclassroom.com/class/refrn>
- Herman, I. P. (2007). *Physics of the Human Body*. Νέα Υόρκη: Springer Science & Business Media.
- Ian G. Morgan, M. H. (2017, Μάιος). *EPIDEMIC OF PATHOLOGIC MYOPIA : What Can Laboratory Studies and Epidemiology Tell Us?* Ανάκτηση Μάιος 13, 2021, από RETINA - THE JOURNAL OF RETINAL AND VITREOUS DISEASES: <https://oce.ovid.com/article/00006982-201705000-00023/HTML>
- J.V. Forrester, A. D. (2002). *The Eye - Basic Sciences in Practice*. Λονδίνο: Harcourt Publishers Ltd.
- Michael J. Lipson, B. H. (2018, Ιούλιος). The Role of Orthokeratology in Myopia Control : A Review. *Eye & Contact Lens: Science & Clinical Practice*.

- Michael J. Lipson, M. M. (2018, Ιούλιος). *The Role of Orthokeratology in Myopia Control: A Review*. Ανάκτηση Απρίλιος 25, 2021, από PubMed.gov: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29923882/>
- Potter, R. T. (2020, 10 1). *Orthokeratology For Today*. Ανάκτηση Απρίλιος 22, 2021, από CLSpectrum: <https://www.clspectrum.com/issues/2020/october-2020/orthokeratology-for-today>
- Richard Feynman, R. B. (1964). *The Feynman Lectures on Physics*. California: Addison–Wesley.
- Seang-Mei Saw, G. G.-Y.-H. (2005, Αύγουστος 10). *Myopia and associated pathological complications*. Ανάκτηση Μάιος 13, 2021, από Wiley Online Library: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1475-1313.2005.00298.x>
- Yasushi, I. (2017, Δεκέμβριος). *OVERVIEW OF THE COMPLICATIONS OF HIGH MYOPIA*. Ανάκτηση Μάιος 12, 2021, από RETINA - THE JOURNAL OF RETINA AND VITREOUS DISEASES: https://journals.lww.com/retinajournal/fulltext/2017/12000/OVERVIEW_OF_THE_COMPLICATIONS_OF_HIGH_MYOPIA.18.aspx
- Ασημέλλης, Β. Δ. (2012). *Γεωμετρική Οπτική*. Αθήνα: Εκδόσεις Σύγχρονη Γνώση.
- Ασημέλλης, Γ. (2006). *Μαθήματα Οπτικής*. Αθήνα: Εκδόσεις Ανικούλα.
- Β. Φωτεινάκης, Ε. Π. (2000). *Κλινική Διάθλαση*. Αθήνα: "ΕΛΛΗΝ" - Γ. Παρικός & ΣΙΑ ΕΕ.
- Βαμβακάς Ι., Μ. Β. (n.d.). *Εργαστηριακός Οδηγός Μαθήματος Γεωμετρικής Οπτικής* (Τόμ. Θεωρία Εργαστηριακής Άσκησης Ο16). Αθήνα: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας.
- Δαμανάκις, Α. Γ. (1999). *Διάθλαση*. Αθήνα: Ιατρικές Εκδόσεις Λίτσας.
- Ζευγώλης, Δ. (2017). *Εφαρμοσμένη Οπτική* (3η Έκδοση εκδ.). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Κόττου, Σ. (2007). *Φως, Οφθαλμοί και Όραση*. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιατρική Σχολή Αθηνών, Αθήνα.
- Κώστα, Μ. (2016). *ΔΙΑΛΕΞΗ 22, Ιδιότητες του κύματος (συμβολή, ανάκλαση, περίθλαση)*. Ανάκτηση Οκτώβριος 22, 2020, από Τμήμα Φυσικής

Πανεπιστημίου Κύπρου - Χειμερινό Εξάμηνο 2016/2017 - ΦΥΣ102 – Φυσική για Χημικούς:

<https://www.ucy.ac.cy/phy/documents/physics/phys102/lecture22.pdf>

Μήτσου, Γ. (n.d.). Η Οπτική από την άποψη της ιστορικής της εξέλιξης. *Electronic Journal of Science and Technology UNIWA*.

Μπεντο, Β. (2015). *Μελέτη της Εφαρμογής Μιτομοκίνης C κατά την διάρκεια επέμβασης διασύνδεσης Κερατοειδικού Κολλαγόνου για την σταθεροποίηση του κερατοειδούς*. Ανάκτηση Μάιος 1, 2021, από <https://slideplayer.gr/slide/2630825/>

Πατέρας, Ε. (2010). *Οπτομετρία Ι*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΛΛΗΝ.

Πατέρας, Ε. (2010). *Οφθαλμικοί Φακοί Ι*. Αθήνα: Εκδόσεις "ΕΛΛΗΝ" - Γ. Παρίκος & ΣΙΑ Ε.Ε.

Στάγκος, Ν. Τ. (2002). *Κλινική Οφθαλμολογία*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

Τσιρωνή, Ε. Ε. (2017). *Βασικές Αρχές Οφθαλμολογίας*. Αθήνα: Ιατρικές Εκδόσεις Κωνσταντάρης .

Φραγκίσκος Ι. Χανιώτης, Δ. Ι. (2015). *Φυσιολογία*. Αθήνα: Ιατρικές Εκδόσεις Λίτσας.

Χανδρινός, Α. (2010). *Ιστορία και Οπτική του Γυαλιού*. Αθήνα: Εκδόσεις "ΕΛΛΗΝ".

Χανδρινός, Α. Β. (2009). *Διπλεστικά & Πολυεστιακοί Φακοί*. Αθήνα: Εκδόσεις "ΕΛΛΗΝ" - Γ. Παρίκος & ΣΙΑ Ε.Ε.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

1. <https://fysikafysikh.wordpress.com/2014/10/18/%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CE%B8%CE%BB%CE%B1%CF%83%CE%B7-%CF%84%CE%BF%CF%85-%CF%86%CF%89%CF%84%CF%8C%CF%82/>
2. http://www.physics.ntua.gr/ergasthria/askhseis_ergasthron/askhsh_17.pdf
3. <http://light.physics.auth.gr/enc/lenses.html>
4. <https://www.physicsclassroom.com/class/refrn/Lesson-5/The-Anatomy-of-a-Lens>
5. <http://www.physics.ntua.gr/~cchrist/SIMEIOSEIS/TECH.PEIR.FYS.2004.PDF/T ECH.PEIR.FYS.2004.KEF.03.pdf?fbclid=IwAR11jFIP3-Peb6Z5gaRhqQezGU22y5JxEOJ6cw7wvmv8pAi239WNqtCz2MM>
6. <https://ricktu288.github.io/ray-optics/simulator/>
7. https://www.researchgate.net/figure/Imaging-behaviors-of-a-conventional-converging-lens-An-object-is-placed-beyond-2-f-in_fig1_221828768
8. Λυσιμάχη Αντωνοπούλου (2019), Φαινόμενα Γεωμετρικής Οπτικής: Ανάκλαση & Διάθλαση Φωτός. Κάτοπτρα, Πρίσματα, Φακοί, Σφάλματα Φακών, Οπτικά Όργανα. Ανάκτηση Μάιος 29,2021 από: <https://slideplayer.gr/slide/16656423/>
9. [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/Map%3A_University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_\(OpenStax\)/01%3A_The_Nature_of_Light/1.07%3A_Huygens%E2%80%99s_Principle](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/01%3A_The_Nature_of_Light/1.07%3A_Huygens%E2%80%99s_Principle)
10. <http://www.hellenica.de/Physik/SfalmaSfairikisEktropis.html>
11. <https://www.arl.gr/%CE%BC%CF%85%CF%89%CF%80%CE%AF%CE%B1/>
12. <https://www.arl.gr/%CF%85%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CF%89%CF%80%CE%AF%CE%B1/>
13. <https://www.eyediathlasis.gr/el/astigmatism>
14. <http://www.eyepathology.gr/how-eye-works/newsid836/134>
15. <https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/MED740/23-%CE%BA%CE%B5%CE%BD%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82%20%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CE%B9.pdf>
16. Herman, I. P. (2007). *Physics of the Human Body*. Νέα Υόρκη: Springer Science & Business Media.
17. <https://sites.google.com/site/optika1990optometria/ophthalmikos-bolbos/periechomeno/phakos-endiamesa>
18. <https://nucleus2012.wordpress.com/2015/11/01/%CF%84%CE%AF%CE%BC%CE%B1-%CF%84%CF%8C->

[%CE%B3%E1%BF%86%CF%81%CE%B1%CF%82-%CE%BF%E1%BD%90-%CE%B3%CE%AC%CF%81-%E1%BC%94%CF%81%CF%87%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%B9-%CE%BC%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CE%BD/](#)

19. Μπεντο, Β. (2015). *Μελέτη της Εφαρμογής Μιτομυκίνης C κατά την διάρκεια επέμβασης διασύνδεσης Κερατοειδικού Κολλαγόνου για την σταθεροποίηση του κερατοειδούς*. Ανάκτηση Μάιος 1, 2021, από <https://slideplayer.gr/slide/2630825/>
20. <http://ofthalmiastrosthes.gr/index.php/amfiblistroeidis>
21. <http://www.eyepathology.gr/how-eye-works/newsid836/143>
22. http://www.physics.ntua.gr/~mmakro/index_files/Biophysics_Orasis_2009.pdf
23. <https://www.slideshare.net/artigoni/photographykef32sarafi>
<https://www.karabatsas.gr/endofakoi-iol/>
24. https://coopervision.co.uk/practitioner/clinical-resources/myopia-in-children/myopia-simulator?fbclid=IwAR3LEjA2kvNPQU8CA_kwCUoUyUaTNcBX7DDqEEa1LYUQqh7SziYgBwZnaEA
25. <https://www.eyesite.co.uk/contact-lenses/ortho-k-eyedream-vision-correction/>
26. Στάγκος, Ν. Τ. (2002). *Κλινική Οφθαλμολογία*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.
27. Δαμανάκις, Α. Γ. (1999). *Διάθλαση*. Αθήνα: Ιατρικές Εκδόσεις Λίτσας.
28. https://eyewiki.aao.org/Corneal_Topography
29. <https://www.eyerounds.org/atlas/pages/Corneal-Astig-ATR/index.htm>
30. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%AE_%CF%84%CE%BF%CF%85_%CE%B5%CE%BB%CE%B1%CF%87%CE%AF%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%85_%CF%87%CF%81%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85
31. Κώστα, Μ. (2016). *ΔΙΑΛΕΞΗ 22, Ιδιότητες του κύματος (συμβολή, ανάκλαση, περίθλαση)*. Ανάκτηση Οκτώβριος 22, 2020, από Τμήμα Φυσικής Πανεπιστημίου Κύπρου - Χειμερινό Εξάμηνο 2016/2017 - ΦΥΣ102 – Φυσική για Χημικούς: <https://www.ucy.ac.cy/phy/documents/physics/phys102/lecture22.pdf>
32. <https://alpha.physics.uoi.gr/optlab/LF/LF.html>



Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: ΣΟΛΟΜΩΝ ΦΡΑΝΣΕΣ
Assignment title: Πτυχιακές Οπτικής-Οπτομετρίας Εαρινό 2020-2021
Submission title: ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Τ.Α..docx
File name: ΠΤΥΧΙΑΚΗ_ΕΡΓΑΣΙΑ_Τ.Α..docx
File size: 3.91M
Page count: 92
Word count: 14,994
Character count: 87,559
Submission date: 30-Aug-2021 11:06PM (UTC+0300)
Submission ID: 1629937835

