

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Ανάπτυξη οπτικής διάταξης για την πειραματική
απεικόνιση οφθαλμών αρουραίων.

Τερτίπη Μαρία, Απόφοιτος τμήματος Φυσικής
Πανεπιστημίου Κρήτης

ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ 2010 – 2011
ΙΟΥΛΙΟΣ 2011

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ

**Ανάπτυξη οπτικής διάταξης για την πειραματική
απεικόνιση οφθαλμών αρουραίων.**

Η παρούσα εργασία υπεβλήθη ως μέρος των υποχρεώσεων για την απονομή του μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Οπτική και Όραση» και παρουσιάστηκε στην Τριμελή επιτροπή αποτελούμενη από τους:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΠΙΒΛΕΨΗΣ

Τσιλιμπάρης Μιλτιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Οφθαλμολογίας
Κυμιωνής Γεώργιος, Λέκτορας Οφθαλμολογίας
Γκίνης Χαρίλαος, Φυσικός, PhD

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Τσιλιμπάρης Μιλτιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Οφθαλμολογίας
Παλλήκαρης Ιωάννης, Καθηγητής Οφθαλμολογίας
Κυμιωνής Γεώργιος, Λέκτορας Οφθαλμολογίας

Ευχαριστίες

Με την τελική διεκπεραίωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον κύριο Τσιλιμπάρη Μιλτιάδη, ο οποίος ήταν ο κύριος υπεύθυνος ώστε να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον θέμα, το οποίο συνάδει αρκετά και με το αντικείμενο σπουδών μου.

Θερμά ευχαριστώ, επίσης, και τον κύριο Παλλήκαρη Αριστοφάνη με τον οποίο συνεργάστηκα άψογα κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας, άνθρωπο με γνώσεις, ο οποίος με στήριξε πολύ και με κατεύθυνε σωστά προς την ολοκλήρωση του στόχου μου.

Περίληψη

Η μελέτη του οφθαλμού μικρών ζώων όπως του αρουραίου, έχει γίνει σημαντική στον τομέα της οφθαλμικής απεικόνισης. Στην παρούσα εργασία, καταρχάς αναπτύχθηκε και υπολογίστηκε μοντέλο, που αντικαθιστά τον οφθαλμό του αρουραίου, ως οπτικό σύστημα για τη χρήση του σε υπολογισμούς. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε οπτική διάταξη, της οποίας στόχος είναι η λήψη φωτογραφίας βυθού αποκλειστικά και μόνο από οφθαλμούς αρουραίου. Η βασική ιδέα της οπτικής αυτής διάταξης βασίστηκε στις ίδιες αρχές, στις οποίες στηρίζεται η κάμερα βυθού (fundus camera). Έτσι, μελετήθηκε ένας οπτικός δρόμος για να φωτίζεται ο βυθός του οφθαλμού του αρουραίου και ένας οπτικός δρόμος για την απεικόνιση του ειδώλου του αμφιβληστροειδή σε κάμερα κλειστού κυκλώματος και την ψηφιακή καταγραφή των εικόνων από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Εντέλει, συνοψίζονται αρκετές πληροφορίες για τη χρήση και την επιλογή κατάλληλων εστιακών αποστάσεων φακών, αλλά και αποστάσεων πάνω στον οπτικό πάγκο, ώστε να είναι δυνατή η μετέπειτα κατασκευή της.

Abstract

The study of the eyes' of small animals, such as the rat, has become very important in the field of ophthalmic imaging. In the present thesis, a model was calculated, that replaces the rat eye, as an optical system in mathematical calculations. In addition, an optical setup was designed, with its primary goal being fundus photographs from rat eyes. The basic idea and principles for this setup were the same that apply for the fundus camera. In accordance, the design included an optical path for the illumination of the rat fundus, and an optical path for the fundus imaging by a CCD camera and its recording by a computer. Finally, information is summarized about the use and selection of focal distances of lenses, and also distances on the optical bench, so the setups latter construction can be possible.

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
A. Εισαγωγή.....	7
B. Κύριο Μέρος	7
B.1 Οι αρουραίοι και η χρήση τους ως πειραματόζωα στον οφθαλμολογικό τομέα	7
B.2 Απεικόνιση οφθαλμών αρουραίων με διαφορετικές μεθόδους.....	9
B.3 Θεωρητικό υπόβαθρο για το μοντέλο του οφθαλμού του αρουραίου	11
B.3.1 Γενικές πληροφορίες για τον οφθαλμό του αρουραίου.....	11
B.3.2 Το μοντέλο των 2 κελυφών ή το Πυρηνικό Μοντέλο Φακού (two shell lens model – core model).....	14
B.3.3 Κόρες εισόδου και εξόδου.....	16
B.4 Βασικές αρχές Οπτικής	16
B.4.1 Λεπτοί φακοί	17
B.4.2 Διαφράγματα ανοίγματος και πεδίου	20
B.4.3 Κόρες εισόδου και εξόδου.....	20
B.4.4 Σχετικό διάφραγμα και φωτισμός του ειδώλου	22
B.5 Κάμερα βυθού (Fundus camera)	23
B.5.1 Ιστορική αναδρομή.....	23
B.5.2 Γενικές πληροφορίες	23
B.6 Βασικές αρχές σχεδιασμού της κάμερας βυθού.....	25
Γ. Μεθοδολογία	28
Γ.1.Μοντέλο Ματιού Αρουραίου	28
Γ.3 Φωτισμός	31
Γ.3.1 Υπολογισμός της κόρης εισόδου του συστήματος	32
Γ3.2 Μελέτη των οπτικών ιδιοτήτων του συστήματος.....	35
Γ.4 Απεικόνιση	36
Γ.4.1 Είδωλο της ίριδας από τον κερατοειδή.....	37

Γ.4.2 Είδωλο του αμφιβληστροειδούς από τον κερατοειδή.....	38
Γ.4.3 Αριθμητικό άνοιγμα στον αμφιβληστροειδή	39
Γ.4.4 Υπολογισμός των μέγιστων ορίων για την εστιακή απόσταση του αντικειμενικού φακού 3	43
Γ.4.5 Υπολογισμός κόρης εξόδου	44
Γ.4.6 Περιφερικές ακτίνες.....	45
Γ.4.7 Φακοί εστίασης	49
Γ.4.8 Υπολογισμός σφάλματος κατά την απεικόνιση.....	52
Δ. Αποτελέσματα	53
Δ.1 Μοντέλο Ματιού Αρουραίου	53
Δ.2 Φωτισμός.....	55
Δ.2.1 Υπολογισμός κόρης εισόδου	55
Δ.2.2 Μελέτη των οπτικών ιδιοτήτων του συστήματος.....	59
Δ.3 Φωτισμός.....	60
Δ.3.1 Είδωλο ίριδας από κερατοειδή	60
Δ.3.2 Είδωλο του αμφιβληστροειδούς από τον κερατοειδή	61
Δ.3.3 Είδωλο του αμφιβληστροειδούς μετά τον αντικειμενικό φακό 3.....	61
Δ.3.4 Υπολογισμός των μέγιστων ορίων για την εστιακή απόσταση του αντικειμενικού φακού 3	61
Δ.3.5 Κόρη εξόδου	63
Δ.3.7 Περιφερικές ακτίνες	67
Δ.3.8 Φακοί εστίασης.....	71
Δ.3.9 Σφάλμα κατά την εστίαση	72
Ε. Συμπεράσματα – Συζήτηση.....	73
Ζ. Βιβλιογραφία.....	76

A. Εισαγωγή

Η φωτογραφία βυθού καταγράφει τον αμφιβληστροειδή, το νευροαισθητήριο ιστό στο μάτι, ο οποίος μεταφράζει οπτικές εικόνες σε ηλεκτρικά ερεθίσματα, τα οποία αντιλαμβάνεται ο εγκέφαλος. Ο αμφιβληστροειδής μπορεί να φωτογραφηθεί άμεσα, με την ίριδα να χρησιμοποιείται τόσο σαν είσοδος, αλλά και σαν έξοδος για τις ακτίνες φωτός, οι οποίες θα φωτίσουν και θα απεικονίσουν τον αμφιβληστροειδή αντίστοιχα. Οι αμφιβληστροειδικές εικόνες χρησιμοποιούνται ευρέως από οφθαλμιάτρους για να παρακολουθήσουν, να διαγνώσουν και να θεραπεύσουν παθήσεις του οφθαλμού. Ο οφθαλμικός βυθός ανάλογα με την ασθένεια, που έχει ή δεν έχει ο οφθαλμός, παρουσιάζει διαφορές ακόμα και μεταξύ φυσιολογικών ατόμων. Έτσι, η φωτογραφία βυθού καθίσταται ισχυρό εργαλείο για τη χαρτογράφηση τόσο της παρουσίας όσο και της εξέλιξης δεδομένων παθολογικών ασθενειών. Μελέτες και έρευνες οι οποίες γίνονται σε πειραματόζωα, με τα τρωκτικά όπως τον αρουραίο να χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά, κατέδειξαν την ανάγκη να σχεδιαστεί η ανάπτυξη μιας οπτικής διάταξης ώστε να απεικονίζεται ο αμφιβληστροειδής του οφθαλμού του αρουραίου, καθώς μέχρι τώρα αναπροσαρμόζονταν ήδη υπάρχουσες κλινικές συσκευές, με συνηθέστερη την κάμερα βυθού για ανθρώπους.

B. Κύριο Μέρος

B.1 Οι αρουραίοι και η χρήση τους ως πειραματόζωα στον οφθαλμολογικό τομέα

Η οπτική ποιότητα του οφθαλμού του αρουραίου απέκτησε ειδικό ενδιαφέρον όταν το συγκεκριμένο πειραματόζωο άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως για συμπεριφοριστικά πειράματα, τα οποία περιλάμβαναν τις οπτικές του ιδιότητες. Συγκεκριμένα, ο Lashley το 1930, αντίθετα από τη μέχρι τότε θεώρηση ότι ο αρουραίος έχει φτωχή όραση, περιέγραψε ότι η ικανότητα του αρουραίου να διακρίνει οπτικά μοτίβα είναι λίγο υποδεέστερη από αυτή των πρωτευόντων θηλαστικών. Ένα λεπτομερές σχηματικό μάτι το οποίο είχε παρουσιαστεί από τον Block το 1969, έφτασε στο συμπέρασμα ότι το μάτι των αρουραίων είναι κατά 9D υπερμετρωπικό στο επίπεδο των φωτοϋποδοχέων. Παρόλα αυτά, είναι προφανές από άλλη μελέτη, ότι επιτυγχάνεται εξαιρετική ακρίβεια εάν χρησιμοποιηθούν υπολογισμοί για σχηματικό μοντέλο ματιού, ώστε να καθοριστεί σωστότερα η διαθλαστική κατάσταση για μικρούς ζωικούς οφθαλμούς (Hughes, 1977).

Η εκφύλιση των φωτοϋποδοχέων είναι το κύριο χαρακτηριστικό της Ηλικιακής

Εκφύλισης της Ωχράς κηλίδας, της μελαγχρωστικής αμφιβληστροειδοπάθειας και άλλων σχετικών ασθενειών και αποτελεί τη σοβαρότερη αιτία τύφλωσης στις αναπτυγμένες χώρες. Όλες αυτές οι αλλαγές παρατηρούνται κυρίως με φλουοραγγειογραφία και απεικόνιση υψηλών αναλύσεων. Μία από τις δυσκολίες στη μελέτη των αγγειακών αλλαγών και των θεραπειών τους, είναι η ασυνέχεια στη συχνότητα με την οποία παρατηρούνται αλλαγές και η οποία συνδέεται και με την ιστολογία του αμφιβληστροειδούς. Έτσι, προτιμώνται να γίνονται ερευνητικές θεραπείες σε τρωκτικά, όπως αρουραίους (Zambarakji, Keegan, Holmes et al, 2006).

Άλλη ασθένεια που έχει μελετηθεί στους αρουραίους είναι η αμφιβληστροειδοπάθεια της προωρότητας (Retinopathy of Prematurity, ROP) και ειδικά σε μεσαία αναπτυγμένες χώρες είναι σε υψηλά επίπεδα. Παγκοσμίως, τουλάχιστον 50000 παιδιά είναι τυφλά και στους δύο οφθαλμούς, πολλά περισσότερα είναι τυφλά από τον ένα οφθαλμό, ενώ απείρως περισσότερα είναι τα παιδιά που έχουν εξασθένηση της όρασης τους, ως συνέπειες της αμφιβληστροειδοπάθειας, που έπαθαν ως πρόωρα νεογνά. Επιπλέον, η μέχρι τώρα αντιμετώπιση της αμφιβληστροειδοπάθειας της προωρότητας γίνεται μετά από αναγνώριση, με υψηλό ρίσκο, αγγειακών μορφολογιών και μετά γίνεται θεραπεία του περιφερειακού αμφιβληστροειδή με LASER, μία παρεμβατική μέθοδος, η οποία επιφέρει σχεδόν πάντα μόνιμη περιφερική οπτική δυσλειτουργία. Είναι σχεδόν προφανές, λοιπόν, ότι χρειάζονται νέες προσεγγίσεις και θεραπείες, και για αυτό χρησιμοποιούνται πειραματόζωα, όπως οι αρουραίοι για τη βελτίωση της θεραπείας (Akula, Favazza, Mocko et al, 2010).

Συνακόλουθα, ασθένειες με φλεβική απόφραξη αμφιβληστροειδούς, συμπεριλαμβανομένων της κεντρικής και της κλαδικής φλεβικής απόφραξης, είναι η δεύτερη αιτία στη διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια, η οποία είναι από τις επικρατείς των ισχαιμικών αμφιβληστροειδικών ασθενειών. Σοβαρές επιπλοκές που προέρχονται από την αμφιβληστροειδική φλεβική απόφραξη, όπως οίδημα της ωχράς ή νεοαγγειακό γλαύκωμα, συχνά καταλήγουν σε ελαττωμένη όραση. Έτσι, ζωικά μοντέλα για τη φλεβική απόφραξη αμφιβληστροειδούς καθίστανται απαραίτητα στην κατανόηση της παθογένειας και της εξέλιξης αυτής της ασθένειας, όπως σκύλοι, γάτες, κουνέλια και βεβαίως αρουραίοι (Zhang, Fortune et al, 2008).

Τέλος, η φωτογραφία βυθού παρέχει μία ασφαλή και αξιόπιστη μέθοδο για να ανιχνευθούν κροταφικές αλλαγές στο μάτι από διαβήτη, καθώς αποφαίνεται χρήσιμη

και σε πειραματικές μεθόδους, συμπεριλαμβανόμενων και μόλυνσης, συστημικών και ενδοφθάλμιων μεταφορών φαρμάκων και τοξινών και συν τοις άλλους αγγειακής και αμφιβληστροειδικής μεταμόσχευσης (DiLoreto et al, 1994).

B.2 Απεικόνιση οφθαλμών αρουραίων με διαφορετικές μεθόδους

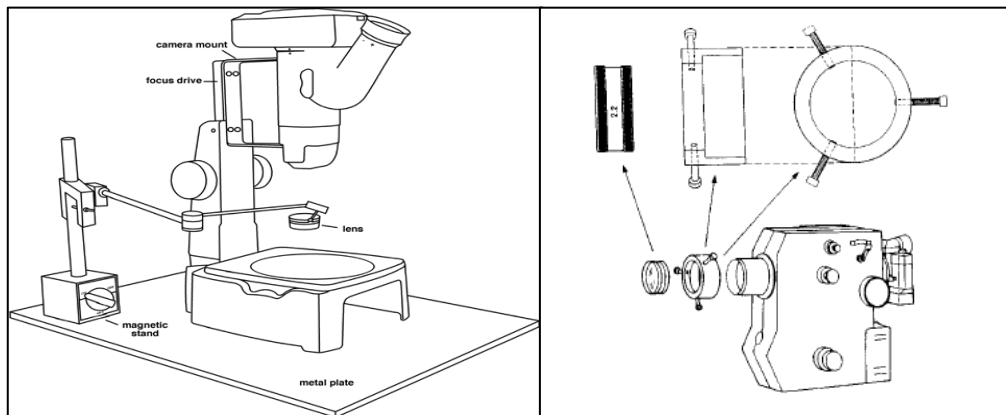
Ο αμφιβληστροειδής αρουραίων και ποντικών έχει απεικονιστεί με διάφορους τρόπους. Σε πλειάδα άρθρων, η συνηθέστερη μέθοδος είναι με μικρή τροποποίηση της κάμερας βυθού, τοποθετώντας μπροστά από το μάτι του αρουραίου, κάποιον από τους φακούς που χρησιμοποιούνται και για βιομικροσκόπηση με τη σχισμοειδή λυχνία. Σε άλλα άρθρα, χρησιμοποιήθηκαν ειδικά προσαρμοσμένες από τις εταιρείες κάμερες βυθού για απεικόνιση μικρών ζωικών οφθαλμών.

Για παράδειγμα, για απεικόνιση του οπτικού δίσκου σε ποντίκια και αρουραίους χρησιμοποιήθηκε η σχισμοειδής λυχνία, εξοπλισμένη με φακούς 2 × και μια ψηφιακή κάμερα, η οποία έκανε απεικόνιση με τη βοήθεια ενός φακού επαφής, ειδικά σχεδιασμένου για να προβάλλεται ο βυθός τρωκτικών, τύπου Goldmann (Goldmann-type fundus contact lens) (Cohan, Pearch et al, 2003). Επίσης, σε συνδυασμό με φωτογραφίες βυθού για τη μελέτη αμφιβληστροειδοπάθειας της προωρότητας σε μοντέλο ματιού αρουραίου, χρησιμοποιήθηκε πάλι ένας φακός επαφής, ο οποίος είχε κατασκευαστεί για να παράσχει οπτικό πεδίο 130° στο πρόωρο ανθρώπινο βρέφος (Liu, Akula et al, 2006).

Συν τοις άλλους, έχει χρησιμοποιηθεί κάμερα βυθού χειρός σε συνδυασμό με ένα φακό 66D (Super 66 Volk Stereo Fundus lens) - και αυτός εξάρτημα της σχισμοειδούς λυχνίας - αλλά και με φακό 78D, με τοποθέτηση του φακού μεταξύ της κάμερας και του ματιού σε σταθερό σημείο (Timmers, Zhang et al, 2001). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είχε ως πρότυπο της εικόνας 1 (δεξιά) (Hawes et al, 1999). Αυτή η παρόμοια διάταξη ήταν σχεδιασμένη για ποντίκια, οπότε χρησιμοποιήθηκε κάμερα βυθού για ανθρώπους και κάμερα βυθού για μικρά ζώα. Όλα τα όργανα χρησιμοποιήθηκαν μαζί με ένα συγκλίνοντα φακό, ο οποίος τοποθετήθηκε μεταξύ της κάμερας και του ματιού. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν φακοί τύπου Volk των 90D, αλλά και 60D και 78D (Hawes et al, 1999).

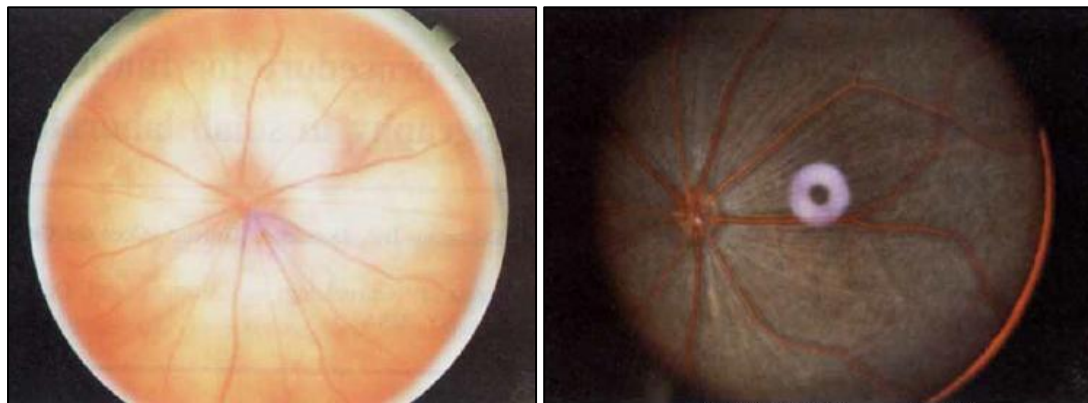
Τέλος, στο άρθρο των DiLoreto et al (1994) έχει χρησιμοποιηθεί ένας παναμφιβληστροειδικός φακός (2.2 Volk Panretinal Lens) σε παράθεση με το φακό μίας κλινικής κάμερας βυθού μέσω ενός ειδικά σχεδιασμένου μεταλλικού

υποστηρίγματος (Εικόνα 1, αριστερά). Αυτός ο φακός δημιουργεί οπτικό πεδίο κατάλληλο για τη φωτογραφία μικρών ζωικών οφθαλμών.

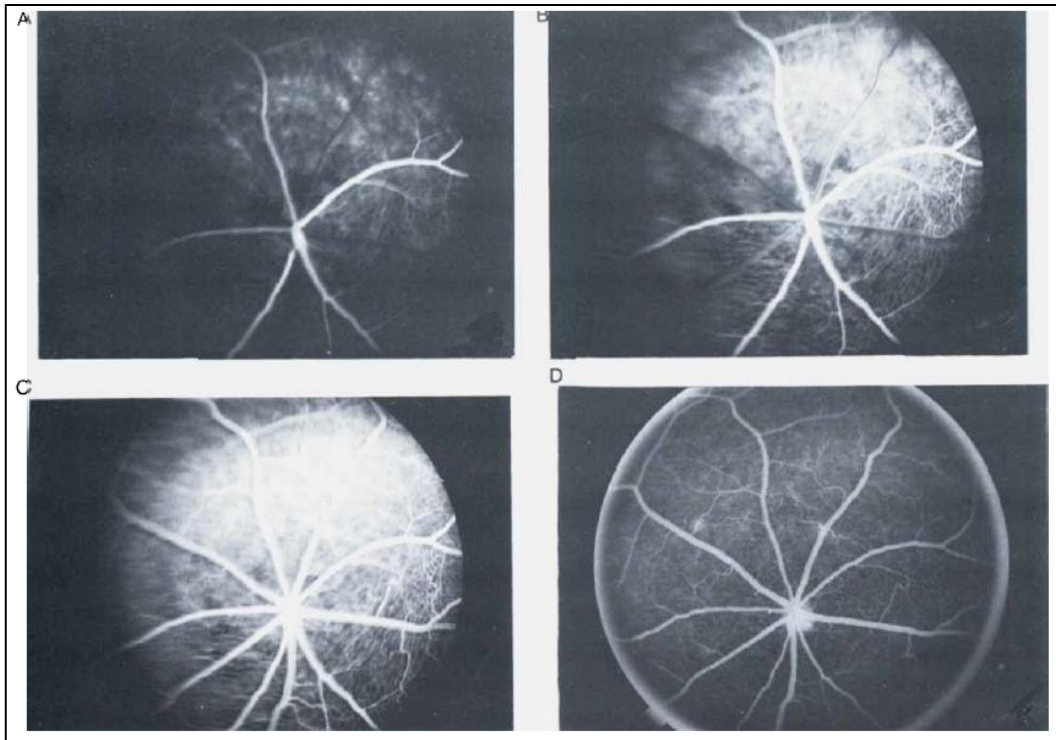


Εικόνα 1: ΔΕΞΙΑ. Ειδική προσαρμογή της κάμερας βυθού με ένα συγκλίνοντα φακό, ο οποίος τοποθετείται μεταξύ της κάμερας και του ματιού (Hawes et al, 1999). **ΑΡΙΣΤΕΡΑ.** Παναμφιβληστροειδικός φακός, σε μεταλλικό στήριγμα, ο οποίος χρησιμοποιείται σε παράθεση με το φακό μιας κάμερας βυθού για να επιτυγχάνεται οπτικό πεδίο κατάλληλο για την παρατήρηση μικρών ζωικών οφθαλμών (DiLoreto et al, 1994).

Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες βυθού και φλουοραγγειογραφίας από αρουραίους (Εικόνες 2 και 3).



Εικόνα 2: ΔΕΞΙΑ. Αλφικός αρουραίος ενός μήνα. Κεντρική φωτογραφία, όπου φαίνεται η κεφαλή του οπτικού νεύρου με την αγγείωση του αμφιβληστροειδή να εκτείνεται ακτινωτά από αυτό. **ΑΡΙΣΤΕΡΑ.** Βυθός ενήλικου αρουραίου, που δείχνει υποαμφιβληστροειδική ένεση από DiI αστροκύτταρα (DiLoreto et al, 1994).



Εικόνα 3: Βυθός ενήλικου αρουραίου κατά τη διάρκεια της φλουοραγγειογραφίας. Α) Η πολύ πρόωμη αρτηριοφλεβική φάση που δείχνει την απαρχή στρωματικής ροής στις φλέβες. Β) Η πρόωμη αρτηριοφλεβική με καλύτερη ανάλυση του τριχοειδούς στρώματος. Γ) Η μέση αρτηριοφλεβική φάση δείχνοντας καλό προσδιορισμό στο τριχοειδές στρώμα. Δ) Η φάση της επανακυκλοφορίας δείχνει καλό προσδιορισμό στο τριχοειδές στρώμα (DiLoreto et al, 1994).

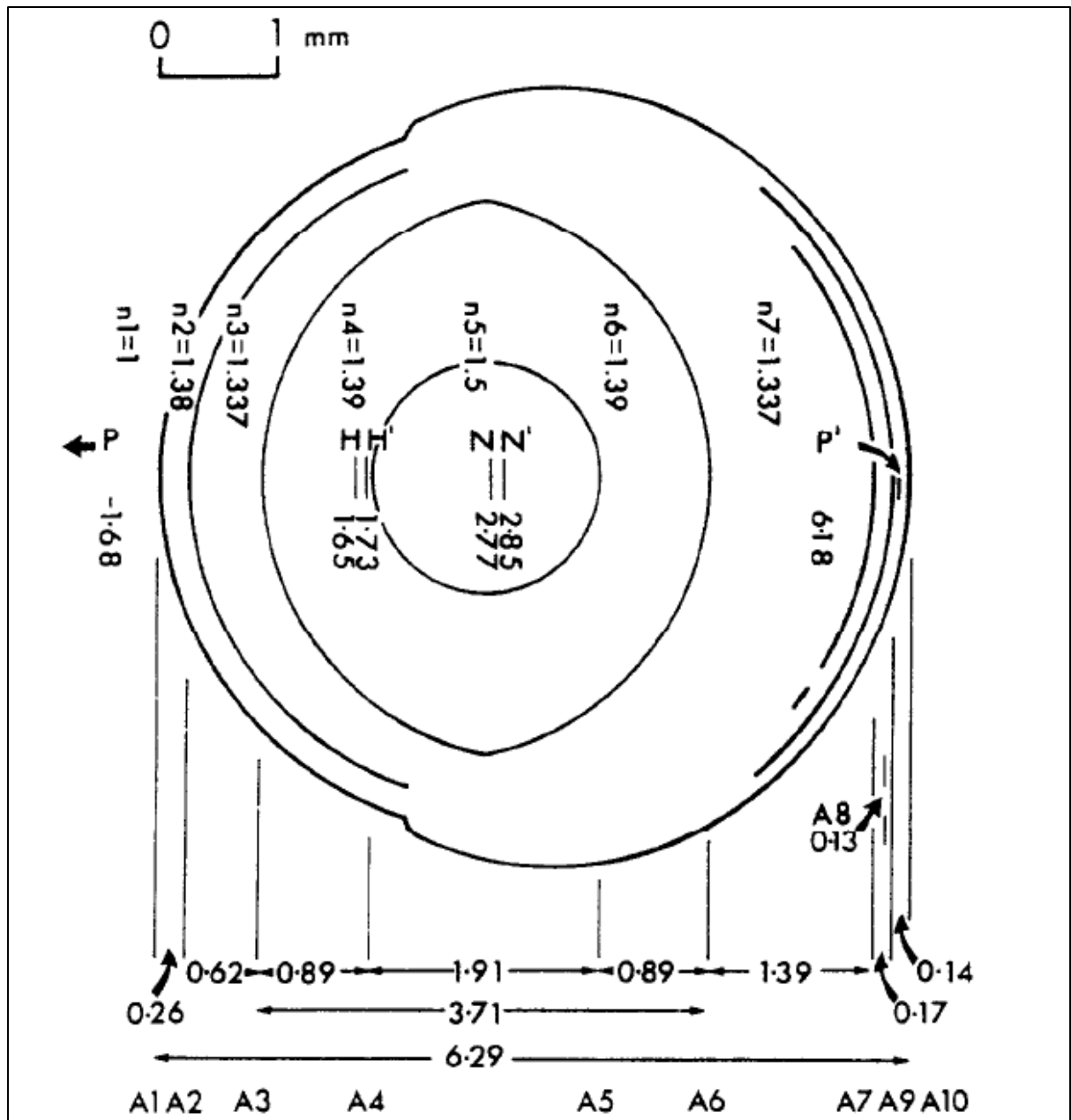
B.3 Θεωρητικό υπόβαθρο για το μοντέλο του οφθαλμού του αρουραίου

B.3.1 Γενικές πληροφορίες για τον οφθαλμό του αρουραίου

Σε πολλά παλαιότερα άρθρα, τα μοντέλα για το μάτι του αρουραίου φάνηκαν ανεπαρκή για τόσο μικρά μάτια και καταδείχτηκε η ανάγκη για μη αποδοχή ενός μοντέλου με ομογενή δείκτη διάθλασης στο φακό (homogeneous lens model) και ένα πυρηνικό μοντέλο φακού παρατίθεται (core lens model). Αυτό θεωρείται περισσότερο ακριβές, και επίσης υπολογίζονται οι κόρες εισόδου και εξόδου του συστήματος, αλλά μπορούν να υπολογιστούν τόσο οι περιφερικές εκτροπές, αλλά και η οπίσθια απόσταση κομβικών σημείων (Posterior Nodal Distance – PND) (Hughes , 1979).

Οι παρακάτω συμβάσεις χρησιμοποιήθηκαν τόσο στο άρθρο του Hughes (Hughes , 1979), όσο και στους παρόντες υπολογισμούς προς διευκόλυνση. Αυτοί είναι οι εξής. Οι ακτίνες φωτός εισέρχονται στο σύστημα από τα αριστερά προς τα δεξιά, εκτός αν αναφερθεί το αντίθετο. Το ίδιο ισχύει και για τους δείκτες διάθλασης των μέσων στο μάτι, ξεκινώντας από τον αέρα, όπου $n_1 = 1$, αλλά και για τις διαθλαστικές επιφάνειες, ξεκινώντας με την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς A_1 ,

η οποία χρησιμεύει και ως σημείο αναφοράς για τις περαιτέρω μετρήσεις. Επομένως, μετρήσεις από τη δεξιά πλευρά ενός σημείου είναι θετικές και επιφάνειες τις οποίες συναντά το φως ως κυρτές ορίζονται να έχουν θετική ακτίνα καμπυλότητας, όπως άλλωστε και στις συμβάσεις της οπτικής σε ποικίλη βιβλιογραφία διεθνώς (Hughes , 1979). (Πίνακες 1, 2, 3 και Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Το μάτι του αρουραίου σχηματικά, όπως υπολογίζεται από τον Hughes. Στην εικόνα φαίνονται οι αποστάσεις, οι διαφορετικές διαθλαστικές επιφάνειες και οι αντίστοιχοι δείκτες διάθλασης (Hughes , 1979).

Δείκτης Διάθλασης	
Κερατοειδής	$n_2 = 1.380$
Υδατοειδές Υγρό και Υαλώδες	$n_3 = n_7 = 1.337$
Περίβλημα Φακού	$n_4 = n_6 = 1.390$
Ισοδύναμο Πυρήνα Φακού	$n_5 = 1.500$
Ομοιογενής Φακός	$n_t = 1.683$
Αμφιβληστροειδής	$n_8 = 1.351$

Πίνακας 1

Θέσεις διαθλαστικών επιφανειών		
Πρόσθια επιφάνεια κερατοειδούς	A_1	0.000mm
Οπίσθια επιφάνεια κερατοειδούς	A_2	0.260mm
Πρόσθια επιφάνεια φακού	A_3	0.881 mm
Πρόσθια επιφάνεια πυρήνα φακού	A_4	1.778 mm
Οπίσθια επιφάνεια πυρήνα φακού	A_5	3.695 mm
Οπίσθια επιφάνεια φακού	A_6	4.591 mm
Επιφάνεια αμφιβληστροειδούς	A_7	5.981 mm
Έξω περιοριστική μεμβράνη	A_8	6.111 mm
Διεπιφάνεια χοριοειδούς/αμφιβληστροειδούς	A_9	6.151 mm
Οπίσθια επιφάνεια σκληρού	A_{10}	6.291 mm
Οπίσθια επιφάνεια σκληρού (core model)	A_8'	6.178 mm
Οπίσθια επιφάνεια σκληρού (core model)	A_{10}'	6.357 mm

Πίνακας 2

Ακτίνες καμπυλότητας		
Πρόσθια επιφάνεια κερατοειδούς	R_a	2.965 mm
Οπίσθια επιφάνεια κερατοειδούς	R_p	2.705 mm
Πρόσθια επιφάνεια φακού	R_L	2.340 mm
Πρόσθια επιφάνεια πυρήνα φακού	R_C	0.958 mm
Οπίσθια επιφάνεια πυρήνα φακού	R_C	0.958 mm
Οπίσθια επιφάνεια φακού	R_L	2.340 mm

Πίνακας 3

Τέλος, χρήσιμες είναι επιπλέον, πληροφορίες όπως η Συνολική Δύναμη Ματιού $F = 300.705 D$, το αξονικό μήκος στο εμμετρωπικό μοντέλου $A_1A'_{10} = 6.357 mm$, ο παράγοντας αμφιβληστροειδικής μεγέθυνσης $RMF = 0.059 mm/degree$, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι ο οφθαλμός του αρουραίου είναι ελαφρώς υπερμετρωπικός, με τη διαθλαστική κατάσταση (Refractive State) να είναι υπολογισμένη στις $K = 4.616 D$ (Hughes , 1979).

B.3.2 Το μοντέλο των 2 κελυφών ή το Πυρηνικό Μοντέλο Φακού (two shell lens model – core model)

Η διαφορά στο δείκτη διάθλασης εντός του κρυσταλλοειδούς φακού, καθιστά αδύνατη την εφαρμογή ενός απλού μοντέλου φακού, όπως ενός λεπτού φακού για να αντικατασταθεί στο σχηματικό μοντέλο της παρούσας εργασίας. Έτσι, ο φακός αναπαριστάται από ένα όργανο ακριβώς ομοίου μεγέθους, αλλά με ενιαίο και υψηλότερο δείκτη διάθλασης και αυτό είναι το Ομογενές Μοντέλο Φακού, που είχε χρησιμοποιηθεί προγενέστερα σε σχηματικά μάτια γάτας, λαγού και ακόμα και αρουραίων. Ορισμένες παράμετροι που προσέφερε ο ομοιογενής φακός παρατίθενται στον Πίνακα 4 που ακολουθεί (Hughes , 1979).

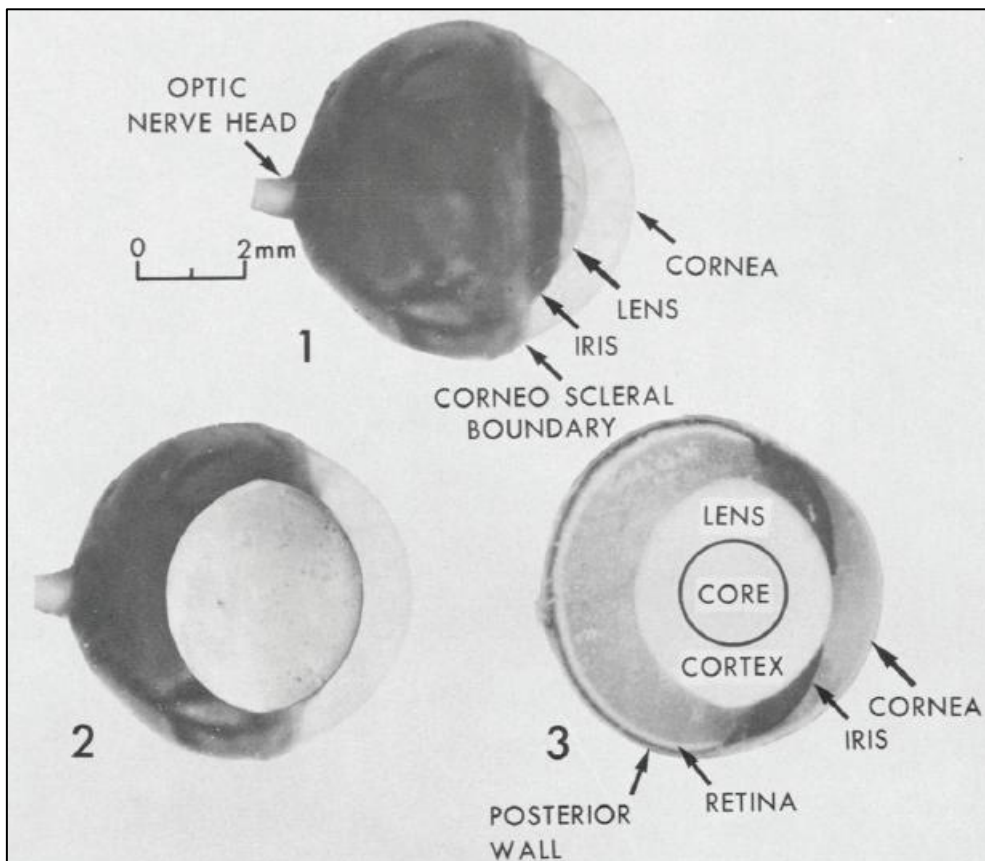
Μετρήσεις του ματιού, με χρήση του ομογενούς μοντέλου φακού	
Μήκος ματιού	6.29 mm
Πλάτος ματιού	6.41 mm
Πάχος φακού	3.71 mm
Διάμετρος Φακού	4.23 mm
Συνολική Ισχύς Ματιού	305.116 D
Διαθλαστική Κατάσταση (Refractive State)	9.03 D

Πίνακας 4

Ο ομοιογενής φακός αναπαριστά σε γενικές γραμμές καλά τον οφθαλμό του αρουραίου, όμως τα κύρια επίπεδα του έχουν αρκετή απόκλιση, από τα κύρια επίπεδα του πραγματικού κρυσταλλοειδή φακού, ενώ και η διαθλαστική ισχύς του προκύπτει μεγαλύτερη της πραγματικής (Hughes , 1979).

Συνακόλουθα, λοιπόν, ως εναλλακτική λύση προτάθηκε από τον Gullstrand το 1925 το μοντέλο του πυρηνικού φακού για τον ανθρώπινο οφθαλμό, του οποίου η κεντρική περιοχή διαφοροποιείται ως πυκνότερη από τον περιβάλλοντα φλοιό. Έτσι, στο Πυρηνικό Μοντέλο Φακού, το σύστημα του αποτελείται από 4 διαθλαστικές επιφάνειες, εκ των οποίων οι 2 ενδότερες συνιστούν τον πυρήνα, ενώ οι 2 εξωτερικές συνιστούν το φλοιό. Βέβαια, το πυρηνικό μοντέλο δεν έχει ακριβή αντιστοιχία στο πραγματικό μάτι και είναι μία υπολογιστική βοήθεια για τη μοντελοποίηση του ματιού του αρουραίου. Παρόλα αυτά, μπορεί να δοθεί μία προσεγγιστική λύση στο πρόβλημα. Ο κρυσταλλοειδής φακός του αρουραίου περιέχει ένα στέρεο πυρήνα, υψηλού δείκτη διάθλασης, σε σχέση με το περίβλημα και μπορεί να εξαχθεί από το ρευστό φλοιό, μόνο με την εφαρμογή μικρής πίεσης (Εικόνα 5). Ο πυρήνας φαίνεται

ότι είναι σχεδόν σφαιρικός στο σχήμα, με πάχος 2.0 – 2.3 mm στην αξονική του διάσταση και με αναλογία μεγάλου προς μικρό άξονα, να κυμαίνεται από 1:1 έως 1.15:1. Τελικά, ο Hughes αποφαίνεται πως ο φακός είναι συμμετρικός περί τον ισημερινό του και όταν οι καμπύλες ίσου δείκτη διάθλασης σχεδιαστούν - δηλαδή αποστάσεις στον κρυσταλλοειδή φακό με τον ίδιο δείκτη διάθλασης, το όριο της καμπύλης με δείκτη 1.39, πλησιάζει κατά πολύ τη μορφή του περιβλήματος και είναι αμφίκυρτος, ενώ ο πυρήνας, που πλησιάζει το όριο της καμπύλης με δείκτη 1.45 είναι κυκλικός και με ακτίνα περίπου 1.1 mm. Συμπερασματικά, καταλήγουμε στο ότι το πυρηνικό μοντέλο δε μπορεί να έχει τα κύρια σημεία του στην ακριβώς ίδια θέση με του πραγματικού φακού και παρόλο που το μοντέλο του πυρηνικού φακού είναι μόνο μια μαθηματική αναπαράσταση, έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον αληθινό πυρήνα και έτσι τα κύρια σημεία δε θα εμφανίζουν το ίδιο μεγάλο σφάλμα του ομογενούς μοντέλου φακού (Hughes, 1979).



Εικόνα 5: 1) Το μάτι του αρουραίου φωτογραφημένο από τη νοτιαία πλευρά, ώστε να εμφανίζονται οι σχετικές θέσεις του αμφιβληστροειδή και του φακού. 2) Φωτομοντάζ στο οποίο φωτογραφία του φακού βγαλμένου από το μάτι έχει τοποθετηθεί στη σωστή του θέση. 3) Παγωμένη οριζόντια τομή από το μάτι σε νοτιαία άποψη κομμένη ένα επίπεδο πάνω από την κεφαλή του οπτικού νεύρου. Ο πυρήνας του φακού μπορεί να διακρίνεται στο πρωτότυπο, αλλά για έμφαση τονίστηκε με ένα κύκλο (Hughes, 1979).

B.3.3 Κόρες εισόδου και εξόδου στο μάτι του αουραίου

Το φως όταν εισέρχεται στον οφθαλμό, περιορίζεται στο χώρο των αντικειμένων από τα όρια της κόρης εισόδου, δηλαδή το είδωλο της αληθινής κόρης που σχηματίζεται από τον κερατοειδή. Παρόμοια, η κόρη εξόδου ή αλλιώς το είδωλο της ίριδας από τον κρυσταλλοειδή φακό περιορίζει την έκταση των ακτινών, που σχηματίζει την εικόνα μιας σημειακής πηγής. Οι σχετικές θέσεις και τα μεγέθη της κόρης εισόδου και εξόδου ποικίλουν ανάλογα τη θέση και το μέγεθος της αληθινής κόρης και πρέπει να υπολογιστούν ανάλογα τις συνθήκες. Το περιθώριο της κόρης καθορίζεται από το επίπεδο επαφής της ίριδας με τον κρυσταλλοειδή φακό και επομένως απομακρύνεται από τον κερατοειδή όσο η κόρη ανοίγει.

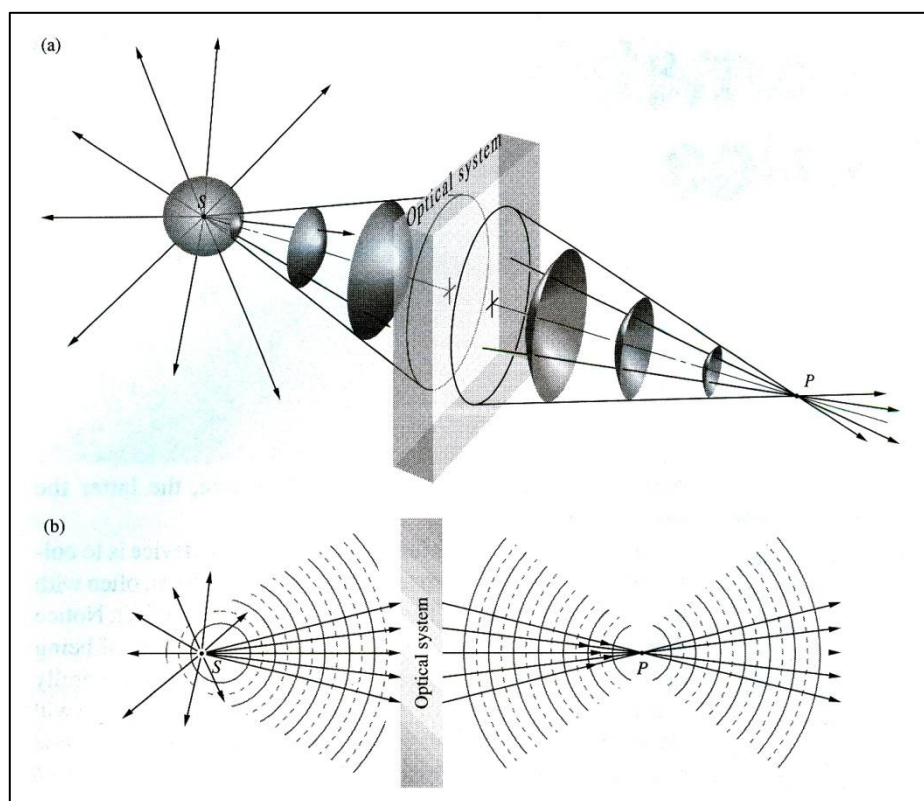
Σε ό, τι αφορά την κόρη εξόδου, δε χρειάζεται υψηλό επίπεδο ακρίβειας, οπότε μπορούν να γίνουν δεκτοί οι περιορισμοί του ομοιογενούς μοντέλου φακού αντί για το πυρηνικό και να κερδίσουμε απλούστευση των υπολογισμών. Σημειώνεται ότι για όλο το εύρος των μεγεθών κόρης στον αουραίο, η κόρη εξόδου είναι πιο κοντά στον κερατοειδή από την κόρη εισόδου, η οποία με τη σειρά της είναι πιο κοντά στον κερατοειδή από την πραγματική κόρη (Hughes , 1979).

B.4 Βασικές αρχές Οπτικής

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας, χρειάζεται να αναφερθούν βασικές αρχές οπτικής. Είναι γνωστό ότι το φως έχει διττή φύση. Άλλοτε συμπεριφέρεται ως σωματίδιο και άλλοτε ως κύμα. Στη βασική γεωμετρική οπτική, σχεδιάζεται με τη μορφή ακτινών και οι οπτικοί νόμοι περιγράφονται γεωμετρικά, αγνοείται η κυματική φύση του φωτός και η βασική υπόθεση είναι ότι το μήκος κύματος του φωτός πρέπει να είναι πολύ μικρότερο από τις φυσικές διαστάσεις των αντικειμένων, τα οποία εξετάζονται. Γενικότερα, ένα σημείο από όπου τμήμα σφαιρικού κύματος αποκλίνει, ή ένα σημείο προς το οποίο το τμήμα του κύματος συγκλίνει, είναι γνωστό ως το σημείο εστίασης μιας δέσμης ακτινών (Hecht, 2002).

Στην εικόνα 6 φαίνεται μία σημειακή πηγή, θεωρούμενη ότι αλληλεπιδρά με ανακλαστικές και διαθλαστικές επιφάνειες, τα οποία αναπαριστούν ένα οπτικό σύστημα. Εάν για μία δέσμη ακτινών, προερχόμενων από το S, υπάρχει μία αντίστοιχη δέσμη ακτινών οι οποίες διέρχονται από το σημείο P, το σύστημα λέγεται στιγματικό, καθώς απεικόνισε τη σημειακή πηγή, με έτερη σημειακή πηγή. Συνεπώς, όλη η ενέργεια της δέσμης στο σημείο S, φτάνει στο σημείο P, το οποίο θεωρείται μία

τέλεια ή στιγματική απεικόνιση του P. Εάν στο σημείο P, δεν έφτανε όλη η ενέργεια της δέσμης φωτός από το σημείο S, το σύστημα θα σχημάτιζε μία θολή απεικόνιση του σημείου S και το P δε θα ήταν πια τέλεια εικόνα. Όταν, λοιπόν, μία σημειακή πηγή είναι εξίσου καλά απεικονισμένη σε ένα άλλο σημείο, όπως στην περίπτωση των P και S, αυτά αναφέρονται ως συζυγή σημεία μεταξύ τους. Σε ένα ιδανικό οπτικό σύστημα, κάθε σημείο μίας τρισδιάστατης περιοχής θα απεικονίζεται στιγματικά σε άλλη περιοχή – η πρώτη καλείται χώρος των αντικειμένων και η δεύτερη χώρος των ειδώλων (Hecht, 2002).

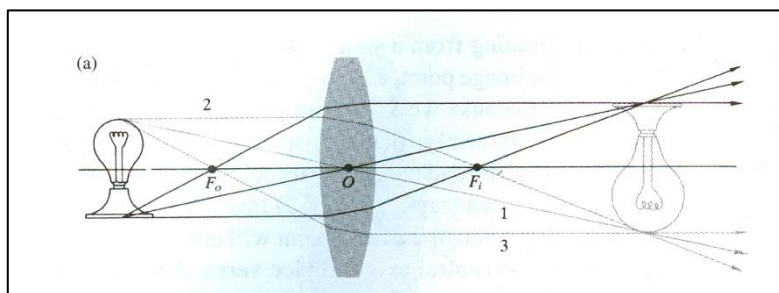


Εικόνα 6: Απεικόνιση σημειακής πηγής από οπτικό σύστημα. Συζυγή επίπεδα. (a) Σημειακή πηγή στέλνει σφαιρικά κύματα κι ένας κώνος φωτός εισέρχεται στο οπτικό σύστημα που εκτρέπει το μέτωπο κύματος, αναγκάζοντας το να συγκλίνει στο σημείο P. (b) Στην τομή ακτίνες αποκλίνουν από το σημείο S και ένα τμήμα τους συγκλίνει στο σημείο P. Εάν τίποτα δε σταματήσει το φως στο σημείο P, τότε συνεχίζει την πορεία του (Hecht, 2002).

B.4.1 Λεπτοί φακοί

Οι φακοί όπως όλα τα αντικείμενα είναι πεπερασμένων διαστάσεων. Φακός ο οποίος είναι λεπτότερος στα άκρα και παχύτερος στο κέντρο λέγεται συγκλίνων, επειδή εστιάζει τις ακτίνες φωτός σε ένα σημείο (Εικόνα 7). Αντίθετα, ο φακός, ο οποίος αποσυγκεντρώνει και απομακρύνει τις ακτίνες φωτός μεταξύ τους, καλείται

αποκλίνων και μορφολογικά είναι παχύτερος στα άκρα και λεπτότερος στο κέντρο.



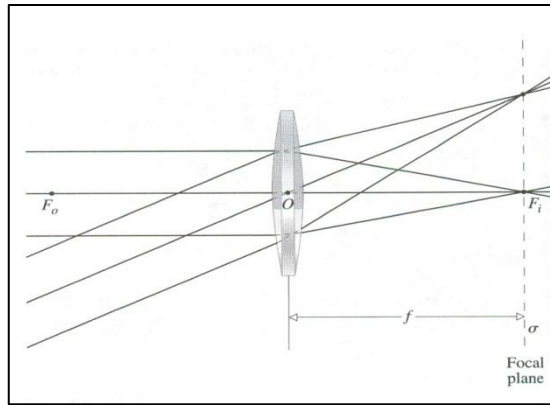
Εικόνα 7: Συγκλίνων φακός με πραγματικό αντικείμενο (Hecht, 2002).

Στη Γεωμετρική Οπτική για χάρη απλότητας στους υπολογισμούς, θεωρείται πως όταν ο φακός κατασκευάζεται με αρκετά μικρό πάχος (το οποίο τείνει στο μηδέν), τότε αυτό δε χρειάζεται να υπεισέλθει στους υπολογισμούς. Έτσι, υπάρχει η εξίσωση των λεπτών φακών, ή αλλιώς η γκαουσιανή εξίσωση για τους φακούς, όπου συνδέει την απόσταση του αντικειμένου, με την απόσταση του ειδώλου από το φακό (η απόσταση είναι σαφώς, εκείνη στην οποία υπάρχει στιγματική απεικόνιση) με την εστιακή απόσταση του λεπτού φακού. Επομένως, αν s_{obj} η απόσταση του αντικειμένου από το φακό, s_{im} η απόσταση του ειδώλου από το φακό και f η εστιακή απόσταση του φακού, ισχύει η παρακάτω εξίσωση¹ (Hecht, 2002)..

$$\frac{1}{s_{obj}} + \frac{1}{s_{im}} = \frac{1}{f}$$

Το επίπεδο στο οποίο εστιάζουν οι ακτίνες του φακού καλείται εστιακό επίπεδο και το σημείο πάνω στον άξονα εστία του φακού (Εικόνα 8).

¹ Σημείωση: Η εξίσωση των κατασκευαστών των φακών ισχύει φυσικά και για παχείς φακούς, όμως εδώ παρατίθεται στην απλοποιημένη μορφή, η οποία ισχύει μόνο για λεπτούς φακούς.

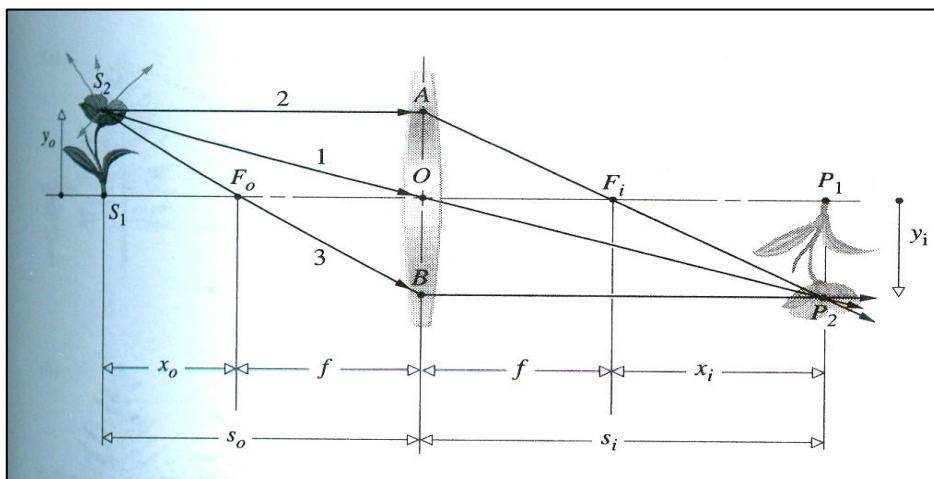


Εικόνα 8: Εστιακό επίπεδο φακού (Hecht, 2002).

Η μεγέθυνση σε ένα οπτικό σύστημα γενικά και ειδικότερα στην περίπτωση των λεπτών φακών φυσικά, δίνεται από την αναλογία του ύψους ειδώλου προς το ύψος αντικειμένου. Συγκεκριμένα, αυτός είναι ο ορισμός για την εγκάρσια μεγέθυνση και όπως φαίνεται και στην εικόνα 9, y_o είναι το ύψος του αντικειμένου και y_i είναι το ύψος του σχηματιζόμενου ειδώλου. Συνεπώς, ισχύει:

$$M = \frac{y_i}{y_o}$$

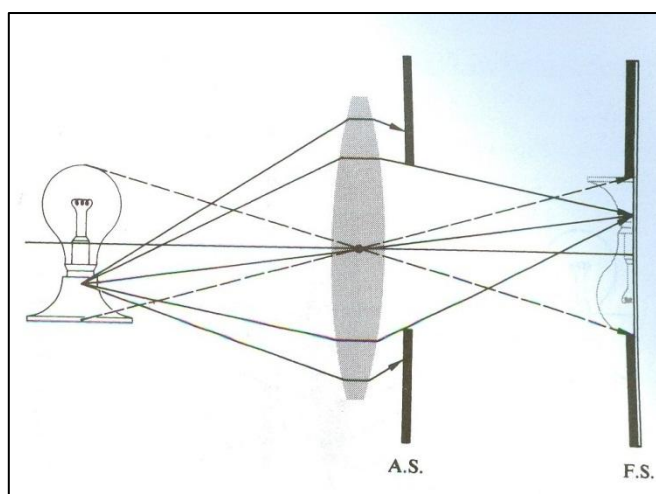
Το αρνητικό πρόσημο είναι εξ ορισμού και εάν η μεγέθυνση έχει θετική τιμή αυτό σημαίνει πως το είδωλο είναι ορθό, ενώ εάν είναι αρνητική το είδωλο είναι ανεστραμμένο. Εύλογο είναι και το συμπέρασμα, πως εάν η μεγέθυνση έχει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας, το είδωλο είναι μεγαλύτερο σε μέγεθος από το αντικείμενο και αντίστοιχα για μεγέθυνση μικρότερη της μονάδας, το είδωλο είναι μικρότερο σε σχέση με το αντικείμενο (Hecht, 2002).



Εικόνα 9: Θέση και ύψος αντικειμένου και ειδώλου για ένα λεπτό φακό. Διακρίνονται και οι εστίες και τα εστιακά επίπεδα (Hecht, 2002).

B.4.2 Διαφράγματα ανοίγματος και πεδίου

Οι φακοί έχουν πεπερασμένο μέγεθος και επόμενο είναι ότι το φως που εκπέμπεται από μία σημειακή πηγή, δε συλλέγεται όλο, αλλά μόνο ένα τμήμα του, οπότε στην πραγματικότητα απεικονίζεται ένα μέρος του χώρου του αντικειμένου. Υπάρχει φυσικός περιορισμός σε αυτό και το πιο απλό παράδειγμα είναι η διάμετρος του ίδιου του φακού, η οποία δρα σαν άνοιγμα για τις ακτίνες που διαθλώνται στο υπόλοιπο σύστημα. Έτσι, ορίζεται ως διάφραγμα ανοίγματος κάθε διάφραγμα, το οποίο καθορίζει την ποσότητα του φωτός, η οποία καταφτάνει στο είδωλο. Στην ουσία, το διάφραγμα ανοίγματος ευθύνεται για το φωτισμό του ειδώλου και καταδεικνύει την ικανότητα ενός φακού να συλλέξει φως. Κατ' αντιστοιχία το στοιχείο, το οποίο καθορίζει το μέγεθος ή το γωνιακό εύρος του αντικειμένου, που μπορεί να απεικονιστεί από το σύστημα είναι το διάφραγμα πεδίου. Αυτό τελικά καθορίζει το οπτικό πεδίο σε ένα οπτικό σύστημα. Στην εικόνα 10 εμφανίζονται τα διαφράγματα ανοίγματος και πεδίου αντίστοιχα (Hecht, 2002).

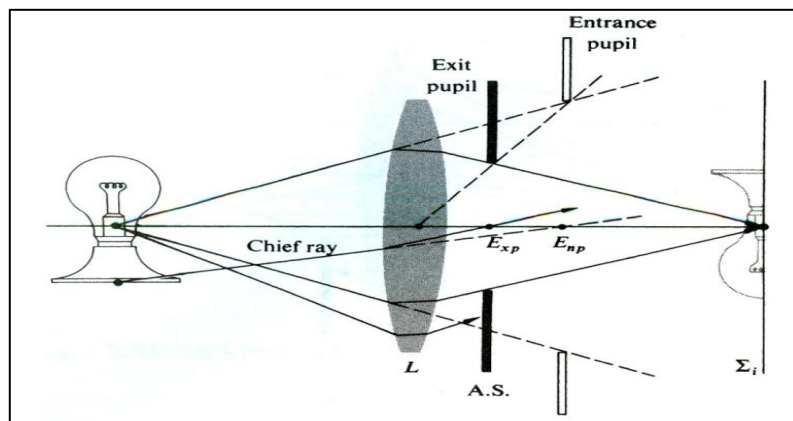


Εικόνα 10: A.S. Διάφραγμα πεδίου και F.S. διάφραγμα ανοίγματος (Hecht, 2002).

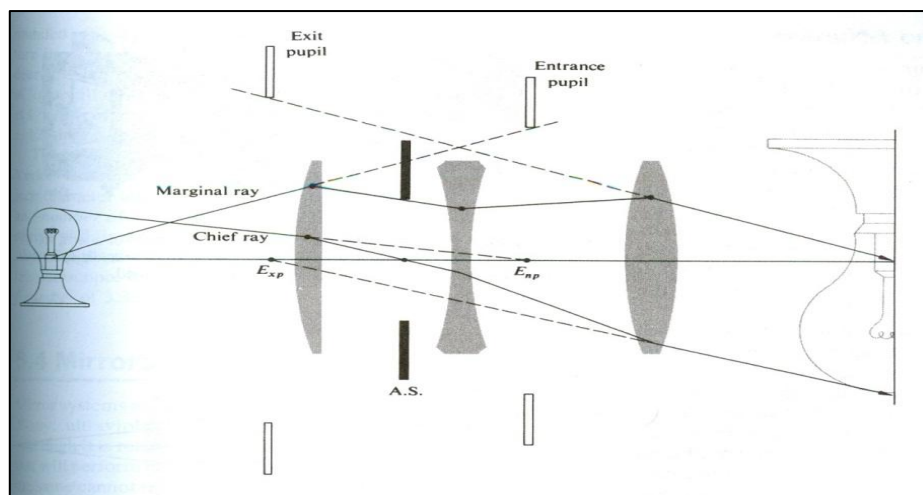
B.4.3 Κόρες εισόδου και εξόδου:

Γενικά κόρη σε ένα σύστημα, ορίζεται το είδωλο του διαφράγματος ανοίγματος. Η κόρη εισόδου είναι το είδωλο του διαφράγματος ανοίγματος στο χώρο του αντικειμένου. Εντοπίζεται με απλό Ray Tracing, από τα όρια του διαφράγματος ανοίγματος. Κόρη εξόδου, από την άλλη ορίζεται το είδωλο του διαφράγματος ανοίγματος στο χώρο των ειδώλων. Συμπερασματικά, λοιπόν η κόρη εισόδου καθορίζει την ποσότητα φωτός που εισέρχεται στο σύστημα, ενώ η κόρη εξόδου

ελέγχει την ποσότητα φωτός που εξέρχεται του συστήματος. Σε τέτοιου είδους συστήματα, με διαφράγματα και κόρες εισόδου ή εξόδου, χρήσιμη είναι η μελέτη της κύριας ακτίνας, η οποία ορίζεται ως η ακτίνα, που διέρχεται από τα κέντρα του διαφράγματος ανοίγματος, καθώς και της κόρης εισόδου και της κόρης εξόδου (Εικόνα 11). Ακόμα, η οριακή ακτίνα, είναι η ακτίνα, η οποία ξεκινά από τον άξονα στη θέση του αντικειμένου και φτάνει στα όρια του διαφράγματος ανοίγματος και της κόρης εισόδου. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί και το φαινόμενο γνωστό ως Vignetting. Ο κώνος που σχηματίζουν οι ακτίνες φωτός και φτάνει στο επίπεδο του ειδώλου μειώνεται σε μέγεθος καθώς το αντικείμενο κινείται εκτός άξονα. Το αποτέλεσμα αυτού είναι μία σταδιακή εξασθένηση στην απεικόνιση των σημείων κοντά στην περιφέρεια του αντικειμένου. Στην εικόνα 12 φαίνεται σύστημα 3 φακών, με τη θέση των διαφραγμάτων και της κόρης εισόδου και εξόδου, ενώ σημειώνονται και η κύρια με την οριακή ακτίνα (Hecht, 2002).



Εικόνα 11: Κόρη εισόδου και κόρη εξόδου, Entrance και Exit Pupil αντίστοιχα (Hecht, 2002).



Εικόνα 12: Κόρες και διαφράγματα για σύστημα 3 φακών. Σημειώνονται όπως και στις Εικόνες 10 και 11. Επίσης, φαίνεται η κύρια ακτίνα (chief ray) και η οριακή ακτίνα (marginal ray) (Hecht, 2002).

B.4.4 Σχετικό διάφραγμα και φωτισμός του ειδώλου

Όταν ένας φακός σχηματίζει το είδωλο ενός εκτεταμένου αντικειμένου, η ποσότητα της ενέργειας που συγκεντρώνεται από μία μικρή περιοχή του αντικειμένου είναι ανάλογη με την επιφάνεια του καθαρού ανοίγματος ή της κόρης εισόδου του φακού (Born and Wolf, 1997). Η επιφάνεια της κόρης εισόδου, εφόσον αυτή είναι κυκλική είναι ανάλογη του τετραγώνου της ακτίνας της, άρα είναι και ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου της. Επιπλέον, η επιφάνεια του ειδώλου εξαρτάται από το ύψος του ειδώλου, όπου το ύψος του ειδώλου εξαρτάται και αυτό με τη σειρά του από την εστιακή απόσταση του φακού (σχέση μεγέθυνσης), οπότε η επιφάνεια θα είναι ανάλογη του τετραγώνου της εστιακής απόστασης. Έτσι, η πυκνότητα της ροής ενέργειας είναι ανάλογη της ποσότητας $\left(\frac{D}{f}\right)^2$. Το κλάσμα $\left(\frac{D}{f}\right)$ είναι γνωστό ως το «σχετικό άνοιγμα» και το αντίστροφο του είναι γνωστό ως η εστιακή αναλογία (focal ratio) ή F-number, όπου ισούται δηλαδή με:

$$\boxed{F\# = \frac{f}{D}}$$

Όσο μικρότερο είναι το F-number, τόσο περισσότερο φως διέρχεται του φακού – και του οπτικού συστήματος εν γένει – και φτάνει στο χώρο των ειδώλων (Hecht, 2002).

Άλλος τρόπος, να υπολογιστεί η ποιότητα των οπτικών του συστήματος είναι με τον υπολογισμό του αριθμητικού ανοίγματος (Numerical Aperture, NA). Αυτό υπολογίζεται ως εξής, πολλαπλασιάζοντας το δείκτη διάθλασης του μέσου στο οποίο το φως ταξιδεύει επί το ημίτονο της γωνίας που σχηματίζει ο κώνος του φωτός με τον άξονα. Πιο συγκεκριμένα, η γωνία α είναι η γωνία που σχηματίζει με τον άξονα η οριακή ακτίνα. Δηλαδή: $\boxed{NA = n \cdot \sin \alpha}$.

Το αριθμητικό άνοιγμα και το F-number είναι 2 μέθοδοι για την περιγραφή του ίδιου χαρακτηριστικού του συστήματος, δηλαδή την ικανότητα συλλογής φωτός. Το αριθμητικό άνοιγμα χρησιμοποιείται επί το πλείστον σε συστήματα, των οποίων τα συζυγή επίπεδα είναι πεπερασμένων διαστάσεων, όπως αντικειμενικοί φακοί μικροσκοπίων, ενώ το F-number χρησιμοποιείται σε συστήματα με αντικείμενα, τα οποία είναι μακριά, πρακτικά στο άπειρο, όπως φακοί για κάμερες και αντικειμενικοί φακοί τηλεσκοπίων. Οι 2 ποσότητες αυτές συσχετίζονται μεταξύ τους με την παρακάτω σχέση (Born and Wolf, 1997).

$$\boxed{F\# = \frac{1}{2 \cdot NA}}$$

B.5 Κάμερα βυθού (Fundus camera)

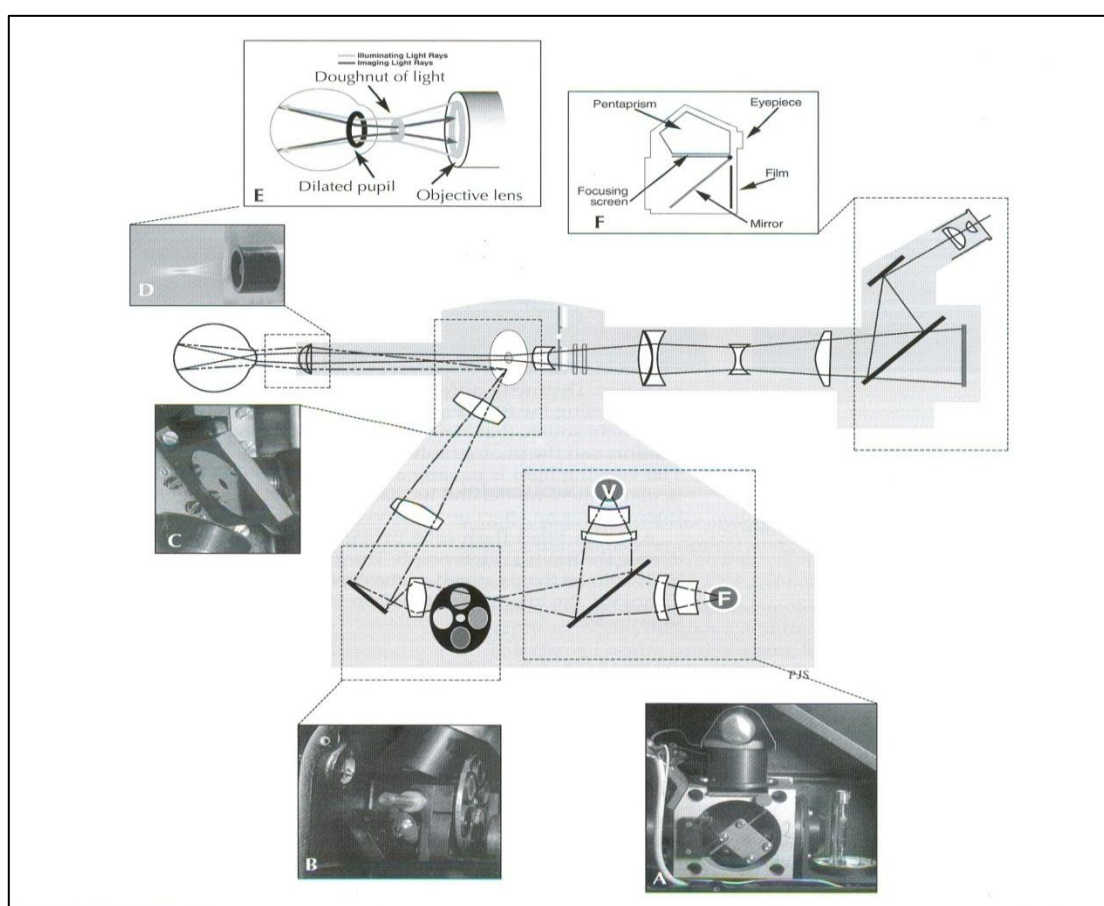
B.5.1 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη απόπειρα να ληφθούν φωτογραφίες βυθού έγινε σε κουνέλια από τον Henry Noyes, πάνω από 100 χρόνια πριν και ήταν περιορισμένης επιτυχίας. Μέχρι την παραγωγή της πρώτης αξιόπιστης κάμερας βυθού από την Zeiss και τη Nordensen, δεν υπήρχε στην ουσία φωτογραφία βυθού. Ο καθορισμός της φωτογραφίας βυθού, όπως είναι ευρέως γνωστή σήμερα έγινε το 1955 όταν η Zeiss, χρησιμοποίησε το φωτογραφικό φλας. Στη συνέχεια, το 1960, οι MacLean και Maumenee πρώτοι χρησιμοποίησαν ενδοφλέβια φλουοροσεΐνη για να μελετήσουν χοριοειδικά αιμαγγειώματα χρησιμοποιώντας σχισμοειδή λυχνία και ένα φίλτρο με μπλε του κοβαλτίου, το οποίο ενεργοποιούσε τη φλουοροσεΐνη. Το 1961, οι Novotony και Alvis συνδύασαν την τεχνική αυτή με μία κάμερα βυθού σε ανθρώπους και το αποτέλεσμα ήταν η πρώτη επιτυχής φλουοραγγειογραφία (Fluorescein Angiography) σε συνδυασμό με φωτογραφία βυθού, τεχνική ευρέως διαδεδομένη για απεικόνιση του αμφιβληστροειδή (Huang et al, 2006). Περιέγραψαν μια κάμερα βυθού εξοπλισμένη με φίλτρο ενεργοποίησης (exciter filter), φίλτρο φραγμού (barrier filter) και ηλεκτρονικό φλας για να καταγράφεται διαδοχικά η αμφιβληστροειδική αιματική ροή μετά από ένεση με φθορίζον νάτριο (sodium fluorescein). Επόμενο είναι πως η ανάπτυξη της διαδικασίας ξεκίνησε κάποια χρόνια μετά (Saine and Tyler, 2002).

B.5.2 Γενικές πληροφορίες

Η κάμερα βυθού είναι ένα εξειδικευμένου τύπου μικροσκόπιο χαμηλής ισχύος με προσαρτημένη μία φωτογραφική μηχανή. Η κάμερα βυθού θα μπορούσε να χωριστεί σε 3 υποσυστήματα, ένα μηχανικό, ένα ηλεκτρικό και φυσικά το οπτικό. Το μηχανικό υποσύστημα υποστηρίζει την οπτική κεφαλή σε μία προσαρμοζόμενη στο ύψος τράπεζα, το ηλεκτρικό υποσύστημα παρέχει 2 πηγές φωτισμού. Από αυτές είναι εμφανές ότι διαφορετική συνδεσμολογία κυκλωμάτων συνυπάρχουν ώστε να φωτιστεί ο βυθός και να εκτεθεί το φιλμ. Η απεικόνιση του αμφιβληστροειδή προαπαιτεί μία συνεχή πηγή φωτός της οποίας η ένταση μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα τον ασθενή. Επιπρόσθετα, ένας λαμπτήρας για φλας παρέχει μία σύντομη έκθεση σε δυνατό φως, ώστε να εκτεθεί το φιλμ στο οποίο απεικονίζεται η φωτογραφία. Αυτά ίσχυαν σε παλιότερα μοντέλα κάμερας βυθού, καθώς τώρα έχει

γίνει ψηφιακή και αυτή η διαδικασία. Τέλος, το οπτικό υποσύστημα χρησιμοποιείται για να μεταφέρει την εικόνα του βυθού στο φωτογράφο και στο φίλμ παλιότερα ή στον ηλεκτρονικό υπολογιστή πλέον. Ο κλασικός σχεδιασμός της κάμερας βυθού χρησιμοποιεί έναν ασφαιρικό αντικειμενικό φακό επακριβώς ευθυγραμμισμένο με το φακό της κάμερας, τύπου Single Lens Reflex. Συνεπώς, το οπτικό σύστημα της κάμερας βυθού προβάλλει ένα δακτύλιο φωτισμού, μέσω της μυδριασμένης κόρης, κατόπιν το φως αντανακλάται από τον αμφιβληστροειδή, εξέρχεται της κόρης μέσω του κέντρου του δακτυλίου φωτισμού και συνεχίζει ώστε να προβληθεί εικόνα του βυθού στο φίλμ ή σε μία κάμερα τύπου CCD (Εικόνα 13) (Saine and Tyler, 2002).



Εικόνα 13: Ο οπτικός δρόμος της κάμερας βυθού. Φως προβαλλόμενο από τη λυχνία παρατήρησης (V) ή από το φλας (F) (A) προβάλλεται μετά από μια σειρά από φίλτρα σε ένα στρογγυλό κάτοπτρο (B) από το κάτοπτρο αντανακλάται σε μία σειρά συγκλινόντων φακών. Μία μάσκα μετά από τον τελευταίο φακό σχηματίζει ένα δακτύλιο φωτός και κατόπιν αυτός προβάλλεται σε κάτοπτρο με κεντρικό διάφραγμα, (C) εξέρχεται της κάμερας μέσω του αντικειμενικού φακού και συναντά τον κερατοειδή του ματιού (D). Εφόσον το σύστημα φωτισμού και η εικόνα είναι σωστά ευθυγραμμισμένα, η εικόνα του βυθού εξέρχεται από τον κερατοειδή μέσω του κεντρικού, μη φωτισμένου τμήματος του δακτυλίου (E). Το φως, τελικά, συνεχίζει μέσω του κεντρικού διαφράγματος του προαναφερθέντος κατόπτρου, διαμέσου της συσκευής διόρθωσης του αστιγματισμού και του φακού διόρθωσης διοπτριών για το οφθαλμικό σφάλμα και μετά στο φακό της κάμερας (F) (Saine and Tyler, 2002).

B.6 Βασικές αρχές σχεδιασμού της κάμερας βυθού

Η φωτογραφία του αμφιβληστροειδούς απαιτεί τη χρήση ενός πολύπλοκου οπτικού συστήματος, της κάμερας βυθού, το οποίο να είναι ικανό να φωτίσει και να απεικονίσει ταυτόχρονα τον αμφιβληστροειδή. Η τρέχουσα βιβλιογραφία κυρίως κατοχυρωμένης πατέντας για κάμερες βυθού, έχει 2 κύριες φόρμες σχεδιασμού (DeHoog and Schwiegerling, 2009).

Η δυσκολία στην απεικόνιση του αμφιβληστροειδούς έγκειται στο γεγονός ότι ο αμφιβληστροειδής πρέπει να φωτιστεί και να απεικονιστεί ταυτόχρονα. Αυτό είναι μια διαδικασία, η οποία υποχρεώνει το σύστημα φωτισμού και απεικόνισης να έχουν κοινό οπτικό δρόμο. Στην τρέχουσα βιβλιογραφία εντοπίζεται ένα κύριο πρόβλημα. Ο βυθός είναι ελάχιστα ανακλαστική επιφάνεια, έτσι η ισχύς των οπισθοανακλάσεων από τα κοινά οπτικά των μονοπατιών φωτισμού και απεικόνισης είναι μεγαλύτερη, από την ισχύ που ανακλάται από τον αμφιβληστροειδή. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με 2 κυρίως τύπους σχεδιασμού της κάμερας βυθού. Παρόλα αυτά το στοιχείο που λείπει είναι διευκρινιστικά στοιχεία της οπτικής διάταξης όπως δυνάμεις των φακών, αποστάσεις και θέσεις για τα συζυγή επίπεδα (DeHoog and Schwiegerling, 2009).

Ο γενικός σχεδιασμός μιας κάμερας βυθού έχει ως εξής. Μια φωτεινή πηγή απεικονίζεται στην κόρη του ματιού, ώστε να φωτιστεί ο βυθός. Οι οπίσθιες ανακλάσεις του κερατοειδούς εξαλείφονται με την τοποθέτηση μιας κεντρικής σκίασης στο σύστημα φωτισμού σε συζυγές επίπεδο με την ίριδα. Το σύστημα απεικόνισης αποτελείται από έναν αντικειμενικό φακό και έναν απλό φακό για μεγέθυνση (ζουμ). Ο αντικειμενικός δημιουργεί ένα ενδιάμεσο είδωλο του αμφιβληστροειδή μπροστά από το σύστημα του φακού ή των φακών μεγέθυνσης και μετά απεικονίζεται δεύτερο είδωλο του αμφιβληστροειδή πάνω στην κάμερα.

Ο πρώτος τύπος σχεδιασμού για κάμερα βυθού είναι η σχεδίαση εξωτερικού φωτισμού. Σε αυτόν χρησιμοποιείται ένας διαχωριστής δέσμης, τοποθετημένος μπροστά από τον οφθαλμό, ώστε να κατορθωθεί να συνδυαστεί ο φωτισμός με την απεικόνιση. Ο δεύτερος τύπος της κάμερας βυθού είναι με σχεδίαση εσωτερικού φωτισμού και εκεί χρησιμοποιείται ένα κάτοπτρο με κεντρική οπή, που τοποθετείται σε συζυγές επίπεδο με την κόρη του οφθαλμού για να συνδυαστεί και πάλι ο φωτισμός και η απεικόνιση. Το σύστημα σχεδίασης με εσωτερικό φωτισμό χρήζει βέβαια από πολυπλοκότερα συστήματα για να μειωθούν οι οπισθοσκεδάσεις φωτός, οι οποίες θα δυσχεράνουν την απεικόνιση (DeHoog and Schwiegerling, 2009).

1ος σχεδιασμός: Εξωτερικός φωτισμός

Με οδηγό τις εικόνες από το άρθρο των DeHoog και Schwiegerling (2009) θα μελετηθεί η διάδοση του φωτός στην κάμερα βυθού. Με βάση την εικόνα 14 (επάνω), ο σχεδιασμός του εξωτερικού φωτισμού έχει ως εξής. Η φωτεινή πηγή (στοιχείο 11), με τη βοήθεια των φακών 8 και 10 απεικονίζεται στην κόρη του οφθαλμού. Ένας κυκλικός δακτύλιος (στοιχείο 9) είναι τοποθετημένος μεταξύ των φακών, σε τέτοια θέση, ώστε αυτός και η κόρη του ματιού να θεωρούνται συζυγή επίπεδα. Ο διαχωριστής δέσμης (στοιχείο 2) είναι τοποθετημένος μπροστά στο μάτι (στοιχείο 1) για να συνδυάζει το φωτισμό και την απεικόνιση. Στον εξωτερικό σχεδιασμό, τέλος, περιλαμβάνεται και ένα διάφραγμα (στοιχείο 4), το οποίο είναι και αυτό συζυγές με το επίπεδο της ίριδας και ο ρόλος του έγκειται στην ελαχιστοποίηση των κερατοειδικών οπίσθιων ανακλάσεων και στον περιορισμό της διαμέτρου της κόρης εισόδου του συστήματος απεικόνισης. Το στοιχείο 3 αντιπροσωπεύει τον αντικειμενικό φακό και τα στοιχεία 5 και 6 τους φακούς μεγέθυνσης, για το σύστημα απεικόνισης (DeHoog and Schwiegerling, 2009).

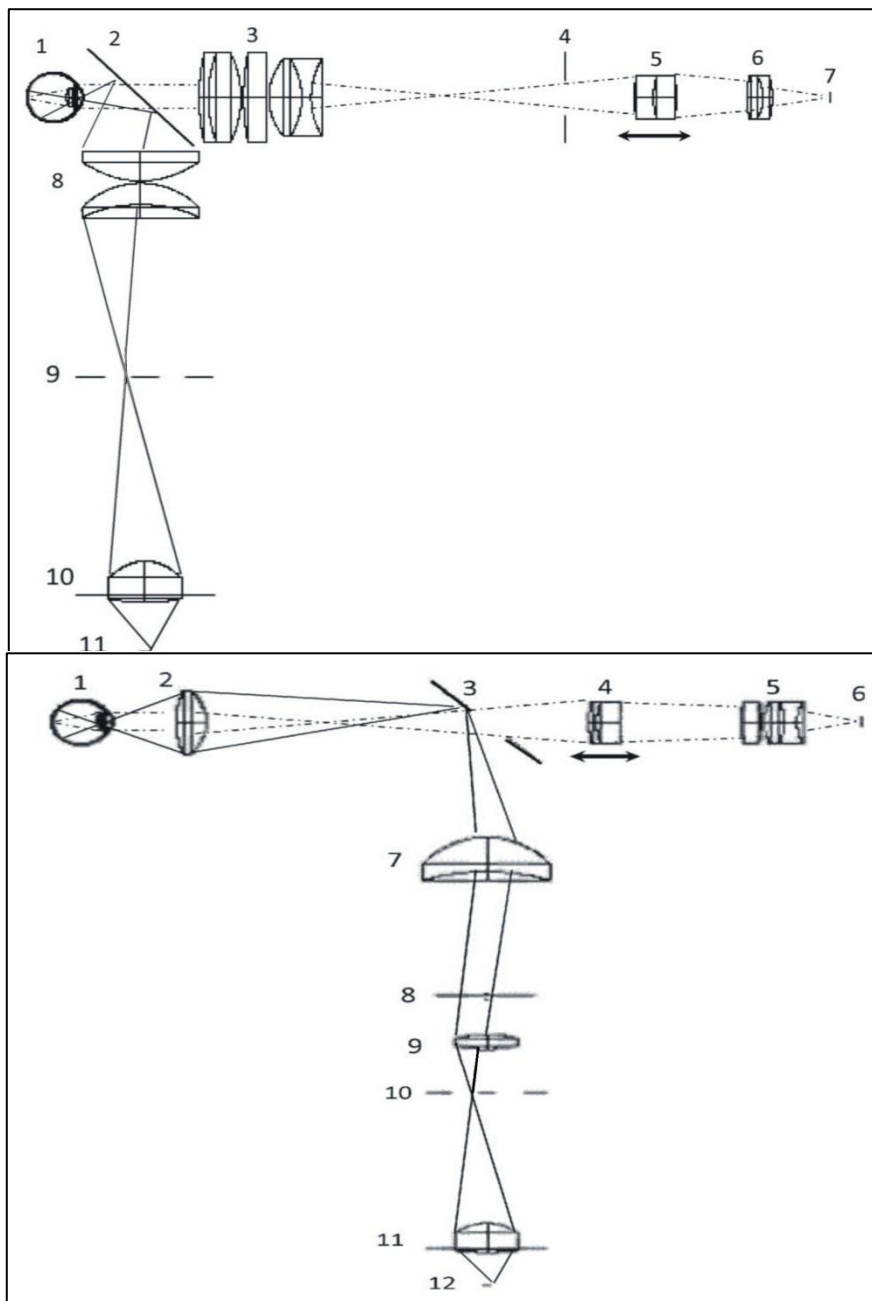
2ος σχεδιασμός: Εσωτερικός φωτισμός

Όπως προαναφέρθηκε και φαίνεται και στην εικόνα 14 (κάτω) χρησιμοποιεί ένα καθρέφτη με κεντρική οπή (στοιχείο 3) τοποθετημένο σε τέτοια θέση ώστε να είναι με την κόρη του ματιού (στοιχείο 1), ομοεστιακά επίπεδα. Ο αντικειμενικός φακός (στοιχείο 2), ο οποίος είναι το κοινό στοιχείο για τους οπτικούς δρόμους φωτισμού και απεικόνισης, πρέπει να είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να αποφεύγονται οι οπισθοσκεδάσεις. Η φωτεινή πηγή (στοιχείο 12), απεικονίζεται στο κάτοπτρο από τους φακούς 7,9 και 11. Οι οπίσθιες ανακλάσεις αφαιρούνται από το στοιχείο 8, μία «μαύρη κουκίδα», η οποία είναι συζυγές επίπεδο με την οπίσθια επιφάνεια του αντικειμενικού. Επίσης, στον εσωτερικό φωτισμό χρησιμοποιείται ένας μονός ασφαιρικός φακός για να μειωθεί η ποσότητα των επιφανειών, οι οποίες συμβάλλουν στις οπίσθιες ανακλάσεις. Το στοιχείο 2 αντιπροσωπεύει τον αντικειμενικό φακό και τα στοιχεία 4 και 5 τους φακούς μεγέθυνσης, για το σύστημα απεικόνισης. Η φωτεινή πηγή εδώ είναι το στοιχείο 12 (DeHoog and Schwiegerling, 2009).

Στο σχεδιασμό 2 του εσωτερικού φωτισμού, το κάτοπτρο με την κεντρική οπή, εξυπηρετεί τον ίδιο σκοπό με το διάφραγμα του σχεδιασμού 1 (με τον εξωτερικό φωτισμό).

Σύστημα απεικόνισης

Στον εξωτερικό φωτισμό, έχουμε ένα φακό, ο οποίος απεικονίζει την πηγή επάνω στο δακτύλιο και ένα δεύτερο φακό, ο οποίος απεικονίζει την πηγή και το δακτύλιο πάνω στο επίπεδο της κόρης του οφθαλμού. Αντίθετα, στον εσωτερικό φωτισμό, πρέπει να απεικονιστεί η φωτεινή πηγή στο κάτοπτρο και κατόπιν το επόμενο σύστημα να παρέχει μία ενδιάμεση εικόνα της «μαύρης κουκίδας» στον αντικειμενικό φακό (DeHoog and Schwiegerling, 2009).



Εικόνα 14: (ΕΠΑΝΩ) Εξωτερικός και (ΚΑΤΩ) Εσωτερικός φωτισμός (DeHoog and Schwiegerling, 2009).

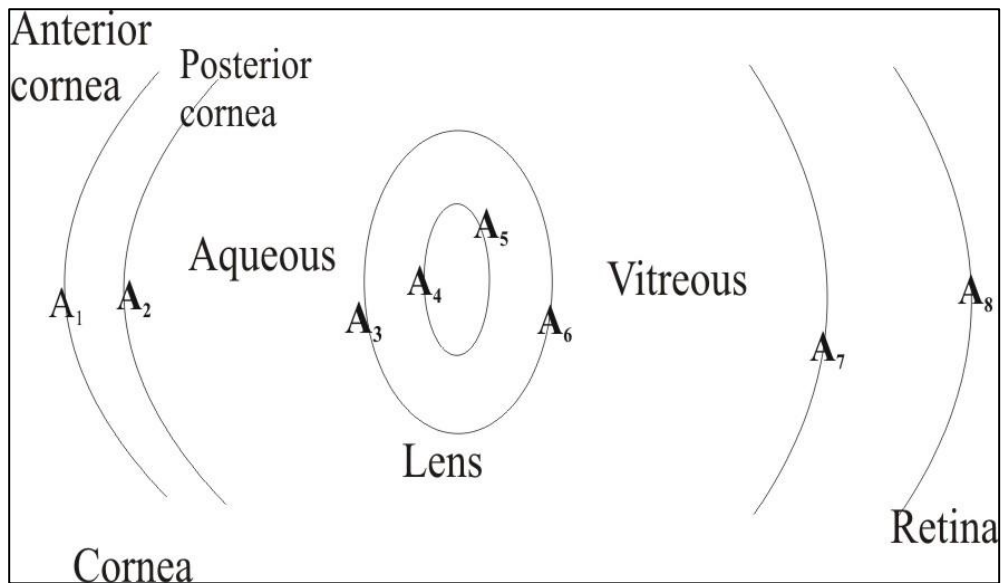
Γ. Μεθοδολογία

Γ.1. Μοντέλο Ματιού Αρουραίου

Για να γίνουν οι υπολογισμοί της παρούσας εργασίας, χρειάζεται να μοντελοποιηθεί το μάτι του αρουραίου, ώστε να συμμετέχει ως οπτικό στοιχείο και να ληφθούν απαραίτητες πληροφορίες για την οπτική διάταξη.

Αρχικά, έγινε απόπειρα να αντικατασταθεί το μάτι από ένα λεπτό φακό στη θέση του κρυσταλλοειδούς και πιθανά, άλλον ένα στη θέση του κερατοειδούς, σε αντιστοίχιση με τα παρόμοια μοντέλα για τον ανθρώπινο οφθαλμό. Όμως, ο φακός στο μάτι του αρουραίου έχει μεγάλη διαθλαστική ισχύ ($243.991 D$) και εξαιτίας και του ότι είναι αρκετά παχύς σε σχέση με το μάτι δεν κατέστη δυνατό να εξαχθούν αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Έτσι, αποφασίστηκε λόγω του μικρού μεγέθους του ματιού του αρουραίου, να γίνει ένα μοντέλο όσο το δυνατόν ακριβέστερο, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του άρθρου του Hughes (1979). Όπως, θα παρουσιαστεί αναλυτικά παρακάτω, χρησιμοποιήθηκαν όλες οι διαθλαστικές επιφάνειες που βρίσκονται στο μάτι του αρουραίου και βεβαίως λήφθηκε υπόψη η διάδοση του φωτός εντός των διαφόρων οπτικών του ματιού.

Παρακάτω παρατίθεται το σχήμα του ματιού, με το φως να διαδίδεται από αριστερά προς τα δεξιά και το έξω από το μάτι θεωρείται ότι υπάρχει αέρας ($n_1 = 1$). Οπότε, αρχικά το φως συναντά την πρώτη διαθλαστική επιφάνεια, δηλαδή την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς (A_1), στη συνέχεια διαδίδεται εντός του κερατοειδούς σε υλικό με δείκτη διάθλασης n_2 και κατόπιν διαθλάται από την οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδούς (A_2). Συνακόλουθα, διαδίδεται εντός του υδατοειδούς υγρού n_3 , διαθλάται από την πρόσθια επιφάνεια του περιβλήματος του φακού A_4 , διαδίδεται στο υλικό του περιβλήματος, με δείκτη διάθλασης n_4 , διαθλάται από την πρόσθια επιφάνεια του πυρήνα του κρυσταλλοειδούς φακού A_5 , διαδίδεται εντός του υλικού που περικλείεται στον πυρήνα n_5 , διαθλάται και πάλι από την οπίσθια επιφάνεια του πυρήνα του φακού A_5 , διαδίδεται στο υλικό του περιβλήματος και πάλι με δείκτη διάθλασης n_6 και διαθλάται ώστε να εξέλθει από το φακό από την οπίσθια επιφάνεια του περιβλήματος A_6 . Εν συνεχεία, διαδίδεται στο υαλώδες, μέχρι την επιφάνεια του αμφιβληστροειδή A_7 , με δείκτη διάθλασης n_7 και τέλος διαδίδεται εντός του αμφιβληστροειδούς μέχρι την έξω περιοριστική μεμβράνη A_8 –όπου εκεί και θεωρείται ότι λαμβάνεται το σήμα από τους φωτοϋποδοχείς- με δείκτη διάθλασης n_8 (Εικόνα 15).



Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση του οφθαλμού του αρουραίου.

Συμπερασματικά, λοιπόν, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των πινάκων για να υπολογιστεί ο ισοδύναμος πίνακας που αντιπροσωπεύει το σχηματικό μάτι του αρουραίου. Αυτό γίνεται με πίνακες διάδοσης και διάθλασης, ανάλογα την πορεία του φωτός. Όταν το φως συναντά διαθλαστική επιφάνεια σαφώς, ο πίνακας που αντιπροσωπεύει είναι πίνακας διάθλασης, ενώ όταν το φως διαδίδεται εντός των μέσων στα οπτικά του οφθαλμού, ο αντιπροσωπευτικός πίνακας είναι πίνακας διάδοσης.

Με το φως να διαδίδεται από αριστερά προς τα δεξιά και η πρώτη επιφάνεια που συναντά να είναι η πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς, A_1 , οι πίνακες και λοιποί υπολογισμοί είναι οι παρακάτω (Πίνακας 5).

Υπολογίστηκαν και οι πίνακες του κερατοειδούς και του φακού χωριστά για να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τα αποτελέσματα του άρθρου του Hughes (1979). Επιπλέον, υπολογίστηκαν και οι αντίστοιχοι πίνακες με το φως να διαδίδεται από τον αμφιβληστροειδή (επιφάνεια A_8 προς A_1).

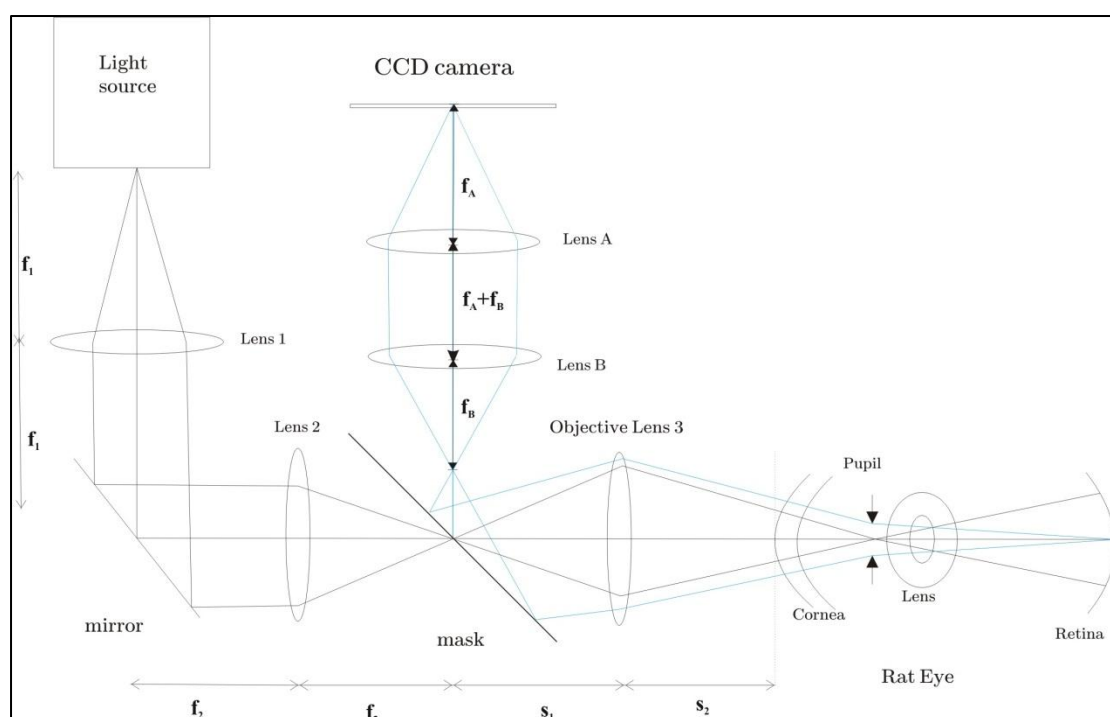
Διαθλαστική ισχύς από πρόσθια επιφάνεια κερατοειδούς A_1	$P_{ant} = \frac{n_2 - 1}{R_a}$
Διάδοση εντός του κερατοειδούς n_2	$cor = \frac{A_2 - A_1}{n_2}$
Διαθλαστική ισχύς οπίσθιας επιφάνειας κερατοειδούς A_2	$P_{post} = \frac{n_3 - n_2}{R_p}$
Διάδοση εντός του υδατοειδούς	$aq = \frac{A_3 - A_2}{n_3}$
Διαθλαστική ισχύς της πρόσθιας επιφάνειας του περιβλήματος του φακού	$P_{A_3} = \frac{n_4 - n_3}{R_L}$
Διάδοση εντός του περιβλήματος του φακού	$L_a = \frac{A_4 - A_3}{n_4}$
Διαθλαστική ισχύς της πρόσθιας επιφάνειας του πυρήνα του φακού	$P_{A_4} = \frac{n_5 - n_4}{R_C}$
Διάδοση εντός του πυρήνα του φακού	$L_b = \frac{A_5 - A_4}{n_5}$
Διαθλαστική ισχύς της οπίσθιας επιφάνειας του πυρήνα του φακού	$P_{A_5} = \frac{n_6 - n_5}{-R_C}$
Διάδοση εντός του περιβλήματος του φακού	$L_c = \frac{A_6 - A_5}{n_6}$
Διαθλαστική ισχύς της οπίσθιας επιφάνειας του περιβλήματος του φακού	$P_{A_6} = \frac{n_7 - n_6}{-R_L}$
Διάδοση στο υαλώδες	$vit = \frac{A_7 - A_6}{n_7}$
Διάδοση στον αμφιβληστροειδή	$olm = \frac{A_8 - A_7}{n_8}$

Πίνακας 5

Γ.2 Οπτική διάταξη

Στη συνέχεια, μετά τη μοντελοποίηση του οφθαλμού του αρουραίου σχεδιάστηκε η οπτική διάταξη, που είναι και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας και η οποία παρατίθεται σχηματικά στην εικόνα 16. Από τη φωτεινή πηγή το φως προσπίπτει στο φακό 1, ενώ με τη βοήθεια κατόπτρου μεταβάλλεται η πορεία του ώστε να στρίψει και να συναντήσει το φακό 2. Ο φακός 1 και 2 είναι μεταξύ τους τηλεσκοπικό σύστημα, ώστε να μη μεταβάλλεται η διαθλαστική ισχύς του υπόλοιπου συστήματος. Η φωτεινή πηγή και ο φακός 1, δύναται να χρησιμοποιηθούν και σε κάποιο άλλο πείραμα για αυτό το λόγο και επιλέχθηκε και δεύτερος φακός ώστε να μπορεί να μεταβληθεί η πορεία του φωτός. Κατόπιν, αφού οι ακτίνες φωτός εξέλθουν και από το φακό 2, συναντούν τη μάσκα του συστήματος. Όσον αφορά στη μάσκα είναι ένας κυκλικός δακτύλιος με μεγαλύτερη διάμετρο τα 6mm και ταυτόχρονα είναι και διαχωριστής δέσμης (beamsplitter) για να χρησιμοποιηθεί και στην οπτική οδό του

φωτισμού. Στη συνέχεια, αφού οι ακτίνες διέλθουν από τη μάσκα με τη βοήθεια του αντικειμενικού φακού 3, εστιάζονται στην κόρη του οφθαλμού του ζώου και τελικά το φως διαχέεται στο βυθό του αρουραίου. Αυτό αποτελεί την οπτική οδό για το φωτισμό. Αφού το φως έχει φτάσει στον αμφιβληστροειδή του αρουραίου, ανακλάται και εξέρχεται της κόρης, και αφού διέλθει ξανά από τον αντικειμενικό φακό 3, προσπίπτει στο κεντρικό σημείο της μάσκας και από κει, λόγω του διαχωριστή δέσμης, εκτρέπεται και με τη βοήθεια των φακών εστίασης A και B, οι οποίοι είναι τηλεσκοπικό σύστημα, απεικονίζεται ως ψηφιακό σήμα στη CCD κάμερα και από εκεί με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού μετατρέπεται σε φωτογραφία από το βυθό του αρουραίου.



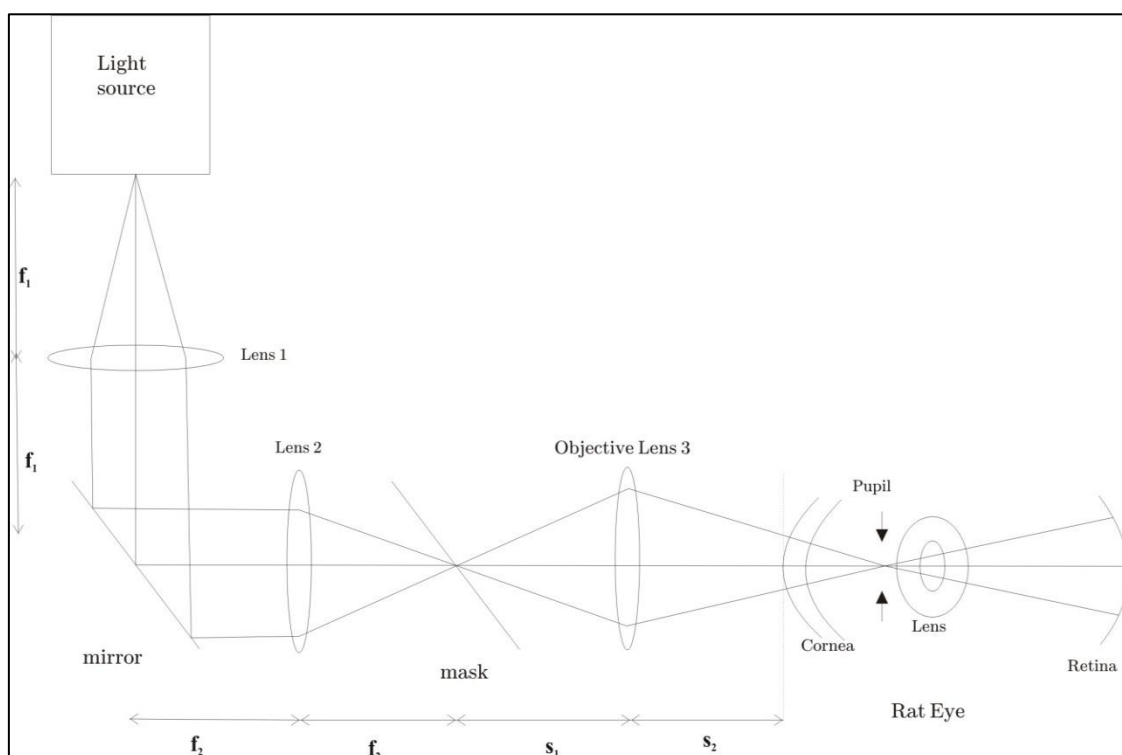
Εικόνα 16: Σχεδιασμός της οπτικής διάταξης για την πειραματική απεικόνιση οφθαλμών αρουραίων.

Γ.3 Φωτισμός

Η πορεία του φωτός ξεκινώντας από τη φωτεινή πηγή (Εικόνα 17), είναι ως εξής. Από φωτεινή πηγή με διάμετρο $d_{source} = 6mm$, προσπίπτει πρώτα στο φακό 1 (με εστιακή απόσταση f_1) κατόπιν ανακλάται από κάτοπτρο και στη συνέχεια με τη βοήθεια του φακού 2 (με εστιακή απόσταση f_2) απεικονίζεται σημειακά στη μάσκα του συστήματος. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της χρήσης της πηγής και για άλλα πειράματα, οπότε χρειάζεται να εκτραπεί από την ορθή της πορεία. Από τη μάσκα, όπου έχει απεικονιστεί η πηγή, συνεχίζει προσπίπτοντας στο φακό 3 (με εστιακή

απόσταση f_3), ο οποίος χρησιμεύει για να εστιάσει και πάλι σημειακά την πηγή στην κόρη του ματιού του αρουραίου, η οποία είναι διαμέτρου $d_{rat} = 4mm$ όταν η κόρη του οφθαλμού του αρουραίου είναι μυδριασμένη (Hughes, 1977). Τέλος, αφού απεικονιστεί και πάλι σημειακά η πηγή στην ίριδα του αρουραίου, διαχέεται το φως εντός του οφθαλμού ώστε να επιτευχθεί ο στόχος και να φωτιστεί ο αμφιβληστροειδής.

Οι φακοί 1 και 2 έχουν την παράμετρο $F\#_{f_1} = 1$ και $F\#_{f_2} = 1$ ώστε δηλαδή η διάμετρος τους και η εστιακή τους απόσταση είναι ίσες και επίσης λόγω του ότι είναι τηλεσκοπικό σύστημα με ίσες εστιακές αποστάσεις, δεν προσφέρουν μεγέθυνση στο σύστημα, απλά βοηθούν στην απεικόνιση της πηγής στη μάσκα.

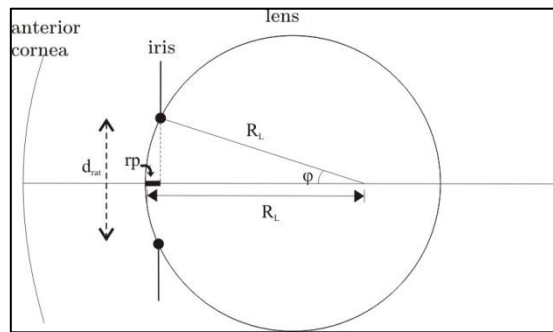


Εικόνα 17: Οπτικός δρόμος φωτισμού

Γ.3.1 Υπολογισμός της κόρης εισόδου του συστήματος

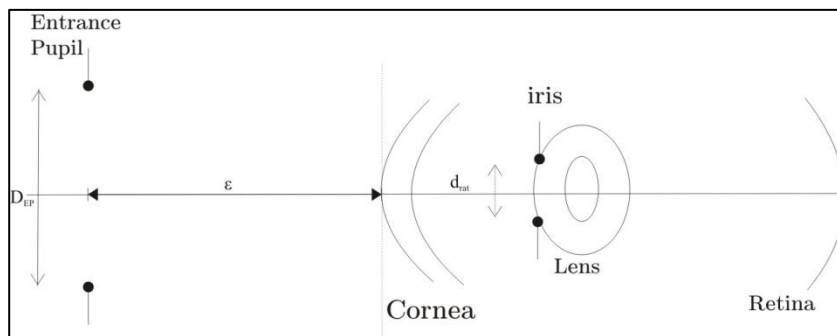
Για να βρεθεί το σημείο εισόδου του φωτός στον οφθαλμό, πρέπει να υπολογιστεί η κόρη εισόδου του συστήματος. Είναι γνωστό ότι τα όρια της ίριδας του ματιού είναι ακριβώς σε επαφή με τον κρυσταλλοειδή φακό και επομένως χρησιμοποιείται η ακόλουθη διαδικασία για να βρεθεί η κόρη εισόδου του συστήματος. Επειδή ο κρυσταλλοειδής φακός είναι σφαιρική επιφάνεια με ακτίνα καμπυλότητας $R_L = 2.340 mm$ θα πρέπει να υπολογιστεί πρώτα η ακριβής θέση της ίριδας του ματιού πίσω από τον κερατοειδή χιτώνα. Μέσω απλής τριγωνομετρίας

και από την εικόνα 18 είναι σαφές ότι η θέση της πραγματικής κόρης πίσω από την επιφάνεια του φακού είναι rp .



Εικόνα 18: Εύρεση θέσης πραγματικής κόρης, πίσω από την επιφάνεια του φακού.

Ως κόρη εισόδου του συστήματος του οφθαλμού έχει ήδη οριστεί το είδωλο της αληθινής κόρης του οφθαλμού που δημιουργείται από τον κερατοειδή. Έστω ότι αυτό το είδωλο είναι σε απόσταση ϵ μπροστά από τον κερατοειδή και συγκεκριμένα από την πρόσθια επιφάνεια του A_1 , όπως φαίνεται και στην εικόνα 19.



Εικόνα 19: Εύρεση θέσης πραγματικής κόρης, πίσω από την επιφάνεια του φακού.

Στη δεδομένη περίπτωση θεωρείται ότι το φως μεταδίδεται από αριστερά προς τα δεξιά και κατασκευάζεται ο πίνακας του συστήματος από την ίριδα έως και την κόρη εισόδου. Είναι:

$$[EP] = \begin{pmatrix} 1 & \epsilon \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_{ant} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & cor \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_{post} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & aq \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & rp' \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

όπου $\begin{pmatrix} 1 & \epsilon \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ο πίνακας της διάδοσης από την κόρη εισόδου μέχρι και τον κερατοειδή και $\begin{pmatrix} 1 & rp' \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ο πίνακας της διάδοσης από την πρόσθια επιφάνεια του φακού μέχρι και τη θέση της ίριδας, με

$$rp' = \frac{rp}{n_3}$$

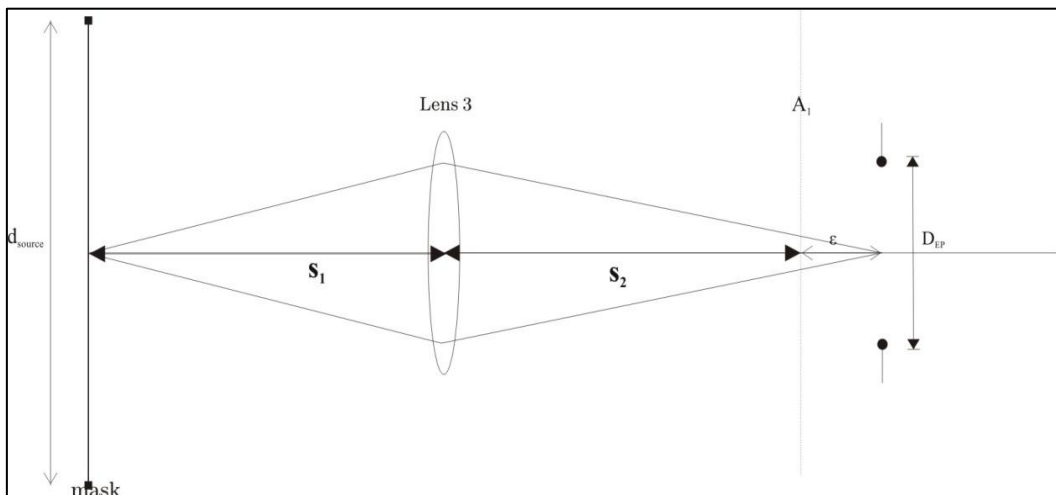
και τους υπόλοιπους πίνακες γνωστούς από τον υπολογισμό του σχηματικού μοντέλου του ματιού.

Αφού η κόρη εισόδου είναι το είδωλο της αληθινής κόρης που σχηματίζεται από τον κερατοειδή, εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα πως η ίριδα και η κόρη εισόδου είναι συζυγή επίπεδα. Επομένως, στον παραπάνω πίνακα ισχύουν τα εξής. Το στοιχείο $EP(1,2) = 0$ μηδενίζεται εξαιτίας της απεικόνισης και τότε το στοιχείο $EP(1,1) = m_{EP}$ αντικατοπτρίζει τη μεγέθυνση του συστήματος.

Από τη μεγέθυνση αυτή, υπολογίζεται και η διάμετρος και της κόρης εισόδου.

$$D_{EP} = m_{EP} \cdot d_{rat}$$

Εφόσον έχει απεικονιστεί η ίριδα του συστήματος από τον κερατοειδή, μπορεί να αφαιρεθεί από το σύστημα και να συνεχιστεί η μελέτη της απεικόνισης της μάσκας στην κόρη εισόδου (Εικόνα 20). Στην περίπτωση της μάσκας, μελετάται η απεικόνιση της φωτεινής πηγής των $6mm$, στην κόρη εισόδου διαμέτρου D_{EP} .



Εικόνα 20: Στιγματική απεικόνιση της μάσκας στην κόρη εισόδου.

Ο συνολικός πίνακας του συστήματος, επομένως, είναι:

$$[MASK] = \begin{pmatrix} 1 & \epsilon \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & s_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ f_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & s_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Η μάσκα και η κόρη εισόδου ζητούνται να είναι συζυγή επίπεδα, ώστε να επιτευχθεί

η απεικόνιση, επομένως ισχύουν τα εξής:

$$MASK(1,2) = 0$$

$$MASK(1,1) = m_{mask}$$

$$MASK(2,2) = \frac{1}{m_{mask}}$$

Όπου m_{mask} η μεγέθυνση του συστήματος της μάσκας, η οποία θα δίνεται από τη σχέση:

$$m_{mask} = -\frac{h_{image}}{h_{object}} = -\frac{D_{EP}}{d_{source}}$$

Γ3.2 Μελέτη των οπτικών ιδιοτήτων του συστήματος

Χρησιμοποιείται παραξονική προσέγγιση και υπολογίζονται οι ποσότητες του αριθμητικού ανοίγματος ή το F-number ανάλογα την περίπτωση.

Όπως αναφέρθηκε και σε προγενέστερη ανάλυση, είναι γνωστό ότι: $F\#_{f_1} = 1$ και $F\#_{f_2} = 1$. Επειδή, οι ακτίνες δεν προσπίπτουν στο φακό από το άπειρο, θα χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση για πεπερασμένα επίπεδα. Συνακόλουθα για την περιοχή της μάσκας ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις.

Για την περιοχή από τη μάσκα ως το φακό 3, συμβολίζεται με $F_1\#$, για την περιοχή από το φακό 3 ως την κόρη εισόδου με $F_2\#$ και για τον αντικειμενικό φακό 3, θεωρώντας τον, σε άπειρη εστιακή απόσταση $F_{f_3}\#$.

$$F_1\# = \frac{s_1}{D_{f_3}}$$

$$F_2\# = \frac{s_2 + \varepsilon}{D_{f_3}}$$

$$F_{f_3}\# = \frac{f_3}{D_{f_3}}$$

Αν δε ληφθεί υπόψη η παραξονική προσέγγιση και γίνει ο ακριβής υπολογισμός του αριθμητικού ανοίγματος σύμφωνα με τον ορισμό, οι αντίστοιχες ποσότητες υπολογίστηκαν.

$$F_1\# = \frac{\sqrt{s_1^2 + \left(\frac{D_{f_3}}{2}\right)^2}}{D_{f_3}}$$

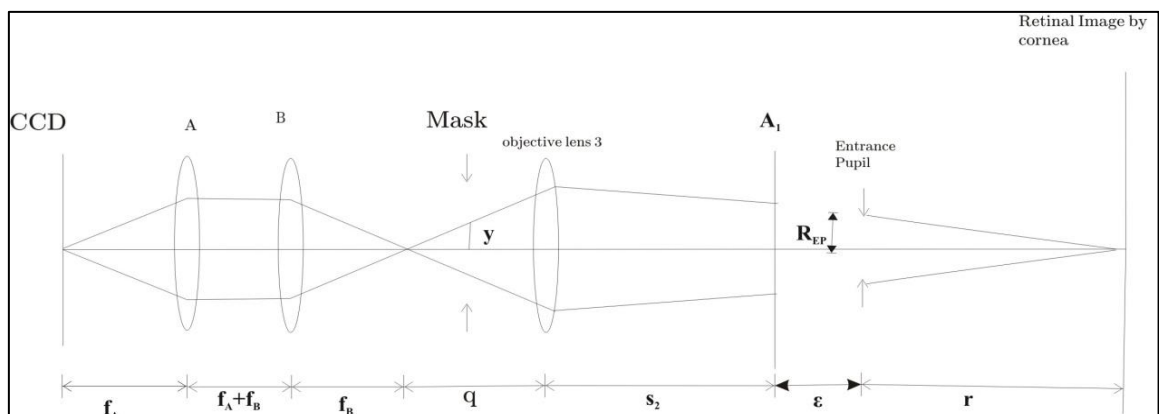
$$F_{2\#} = \frac{\sqrt{(s_2 + \varepsilon) + \left(\frac{D_{f_3}}{2}\right)^2}}{D_{f_3}}$$

$$F_{f_3\#} = \frac{f_3}{D_{f_3}}$$

Γ.4 Απεικόνιση

Στην εικόνα 21 φαίνεται ο οπτικός δρόμος της απεικόνισης. Ακτίνες ξεκινούν από την έξω περιοριστική μεμβράνη, η οποία πρώτα έχει φωτιστεί. Στη συνέχεια εξέρχονται του οπτικού συστήματος του ματιού, διαθλώνται από τον αντικειμενικό φακό 3 και αφού περάσουν τη μάσκα, μέσω ενός συστήματος φακών relay –φακοί Α και Β- απεικονίζονται στην κάμερα CCD, η οποία λαμβάνει την εικόνα, που με τη σειρά της προβάλλεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού.

Στην απεικόνιση πρέπει να σημειωθεί ότι χρειάζονται οπτικά τέτοια, ώστε να συλλέγουν το φως από την περιοχή του αμφιβληστροειδή και να είναι ικανά, χωρίς να χάνεται οπτική πληροφορία, να απεικονίσουν σωστά το είδωλο του βυθού στην κάμερα CCD.



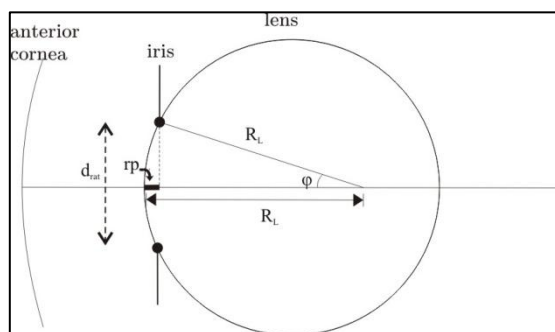
Εικόνα 21: Οπτικός δρόμος απεικόνισης.

Αρχικά, γίνεται η εξής διαδικασία. Βρίσκεται το είδωλο της πραγματικής κόρης και του αμφιβληστροειδούς από τον κερατοειδή. Αυτό γίνεται, για διευκόλυνση των υπολογισμών, καθώς αφού βρεθεί η θέση των ειδώλων αυτών, το οπτικό σύστημα του ματιού μπορεί να «αφαιρεθεί» και να συνεχιστούν οι υπολογισμοί σε σχέση με αυτά τα 2 επίπεδα.

Γ.4.1 Είδωλο της ίριδας από τον κερατοειδή

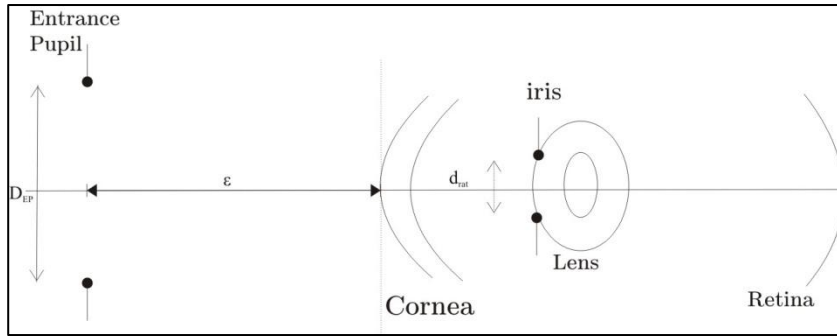
Στην περίπτωση της απεικόνισης, η απαιτούμενη διάμετρος της πραγματικής κόρης δεν είναι πια $d_{rat} = 4mm$, αλλά στην περίπτωση αυτή $d_{rat}^1 = 2mm$ ή $d_{rat}^2 = 2.5mm$. Για να βρεθεί το είδωλο της πραγματικής κόρης από τον κερατοειδή χιτώνα, πρέπει πρώτα να βρεθεί η ακριβής θέση της πίσω από αυτόν και κατόπιν να ακολουθηθεί η ίδια μεθοδολογία, όπως και στο κεφάλαιο του φωτισμού, ώστε να υπολογιστεί η θέση και η διάμετρος της.

Είναι γνωστό ότι τα όρια της ίριδας του ματιού είναι ακριβώς σε επαφή με τον κρυσταλλοειδή φακό και επομένως χρησιμοποιείται η ακόλουθη διαδικασία για να βρεθεί η κόρη εισόδου του συστήματος. Επειδή ο κρυσταλλοειδής φακός είναι σφαιρική επιφάνεια με ακτίνα καμπυλότητας $R_L = 2.340 mm$ θα πρέπει να υπολογιστεί πρώτα η ακριβής θέση της ίριδας του ματιού πίσω από τον κερατοειδή χιτώνα. Μέσω απλής τριγωνομετρίας και από την εικόνα 22 είναι σαφές ότι η θέση της πραγματικής κόρης πίσω από την επιφάνεια του φακού είναι rp .



Εικόνα 22: Εύρεση θέσης πραγματικής κόρης, πίσω από την επιφάνεια του φακού.

Ως κόρη εισόδου του συστήματος του οφθαλμού έχει ήδη οριστεί το είδωλο της αληθινής κόρης του οφθαλμού που δημιουργείται από τον κερατοειδή. Έστω ότι αυτό το είδωλο είναι σε απόσταση ϵ μπροστά από τον κερατοειδή και συγκεκριμένα από την πρόσθια επιφάνεια του A_1 , όπως φαίνεται και στην εικόνα 23. Στη δεδομένη περίπτωση θεωρείται ότι το φως μεταδίδεται από αριστερά προς τα δεξιά και κατασκευάζεται ο πίνακας του συστήματος από την ίριδα έως και την κόρη εισόδου.



Εικόνα 23: Απεικόνιση ίριδας από τον κερατοειδή. Εύρεση κόρης εισόδου.

Είναι:

$$[EP] = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_{ant} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & cor \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_{post} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & aq \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & rp' \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

όπου $\begin{pmatrix} 1 & \varepsilon \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ο πίνακας της διάδοσης από την κόρη εισόδου μέχρι και τον κερατοειδή και $\begin{pmatrix} 1 & rp' \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ο πίνακας της διάδοσης από την πρόσθια επιφάνεια του φακού μέχρι και τη θέση της ίριδας, με

$$rp' = \frac{rp}{n_3}$$

και τους υπόλοιπους πίνακες γνωστούς από τον υπολογισμό του σχηματικού μοντέλου του ματιού.

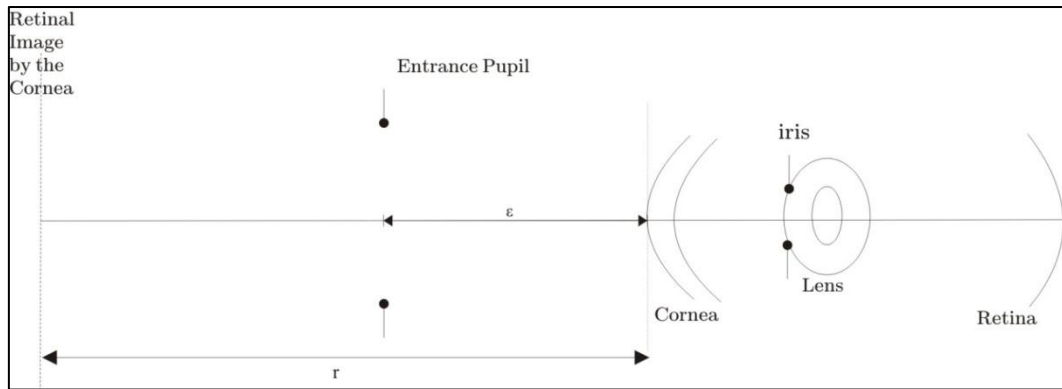
Αφού η κόρη εισόδου είναι το είδωλο της αληθινής κόρης που σχηματίζεται από τον κερατοειδή, εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα πως η ίριδα και η κόρη εισόδου είναι συζυγή επίπεδα. Επομένως, στον παραπάνω πίνακα ισχύουν τα εξής. Το στοιχείο $EP(1,2) = 0$ μηδενίζεται εξαιτίας της απεικόνισης και τότε το στοιχείο $EP(1,1) = m_{EP}$ αντικατοπτρίζει τη μεγέθυνση του συστήματος.

Γ.4.2 Είδωλο του αμφιβληστροειδούς από τον κερατοειδή

Για την ανεύρεση του ειδώλου του αμφιβληστροειδή, έστω ότι το είδωλο του βρίσκεται σε απόσταση r από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς. Οπότε, αφού το φως διαδίδεται από αριστερά προς τα δεξιά και βάση της εικόνας 24, ο πίνακας του συστήματος της απεικόνισης του αμφιβληστροειδούς είναι:

$$[R] = \begin{pmatrix} 1 & r \\ 0 & 1 \end{pmatrix} [iEYE].$$

Για να απεικονίζεται σημείο προς σημείο ο βυθός, θα πρέπει να ισχύει: $R(1,2) = 0$.



Εικόνα 24: Απεικόνιση αμφιβληστροειδούς από τον οφθαλμό.

Γ.4.3 Αριθμητικό άνοιγμα στον αμφιβληστροειδή

Συνακόλουθα, υπολογίζεται το αριθμητικό άνοιγμα στον αμφιβληστροειδή. Όπως φαίνεται από την εικόνα 21, η γωνία του αμφιβληστροειδή είναι θ .

$$NA^{ret} = \sin \theta$$

Η γωνία θ υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\tan \theta = \frac{R_{EP}}{r - \varepsilon} \Rightarrow$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{R_{EP}}{r - \varepsilon} \right)$$

Το αριθμητικό άνοιγμα στον αμφιβληστροειδή και το αριθμητικό άνοιγμα μετά τον αντικειμενικό φακό έχουν σχέση και με τη μεγέθυνση της απεικόνισης του ειδώλου του αμφιβληστροειδή από τον αντικειμενικό φακό. Αυτό αποδεικνύεται εύκολα με τη σχέση μεγέθυνσης και απεικόνισης των ειδώλων.

$$\frac{NA^{obj}}{NA^{ret}} = \frac{1}{M_{obj}}$$

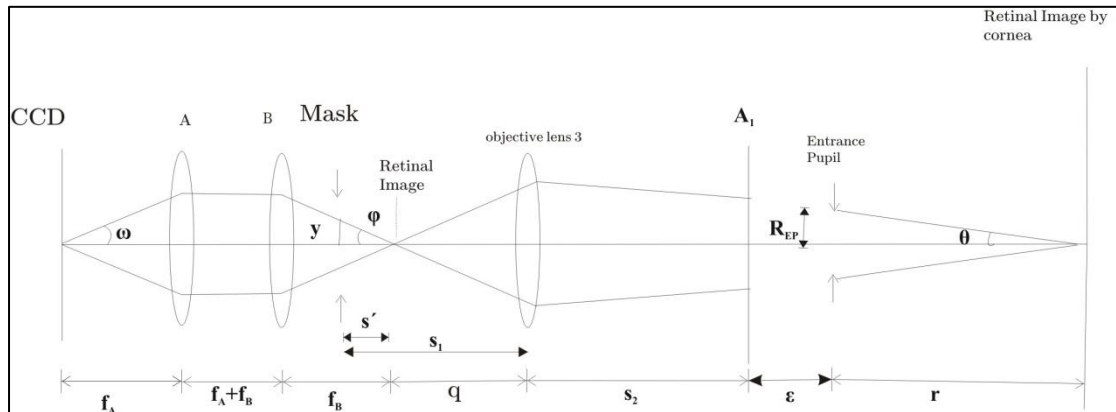
Όπου NA^{obj} το αριθμητικό άνοιγμα μετά τον αντικειμενικό φακό 3 και M_{obj} η μεγέθυνση μεταξύ των συζυγών επιπέδων που απεικονίζεται ο αμφιβληστροειδής και υπολογίζεται παρακάτω.

Γ.4.4 Είδωλο του αμφιβληστροειδούς μετά τον αντικειμενικό φακό 3

Ο αμφιβληστροειδής απεικονίζεται από τον αντικειμενικό φακό 3 και διακρίνονται 2 περιπτώσεις. Η μία είναι να σχηματιστεί το είδωλο του αμφιβληστροειδή στο διάστημα μεταξύ του αντικειμενικού φακού 3 και της μάσκας και η δεύτερη είναι να σχηματιστεί αμφιβληστροειδικό είδωλο μετά τη μάσκα, πριν

το φακό B, του συστήματος απεικόνισης.

Περίπτωση 1: Είδωλο αμφιβληστροειδή πριν τη μάσκα



Εικόνα 25: Σύστημα απεικόνισης. Είδωλο αμφιβληστροειδή πριν τη μάσκα.

Ο αμφιβληστροειδής απεικονίζεται στο σημείο που φαίνεται στην εικόνα ως Retinal Image, επομένως το επίπεδο του αμφιβληστροειδή με το επίπεδο αυτό είναι συζυγή. Έτσι, ισχύει η σχέση απεικόνισης:

$$\boxed{\frac{1}{q} + \frac{1}{r + s_2} = \frac{1}{f_3}}$$

Και η μεγέθυνση δίνεται από τη σχέση:

$$\boxed{M_{obj} = \frac{-q}{r + s_2}}$$

Το αρνητικό πρόσημο στη μεγέθυνση οφείλεται στο ότι το είδωλο θα είναι ανεστραμμένο.

Η απόσταση q δίνεται από τη σχέση:

$$\boxed{q = s_1 - s'}$$

Το αριθμητικό άνοιγμα, στο σύστημα μετά τον αντικειμενικό φακό 3 υπολογίζεται ως εξής:

$$\boxed{NA^{obj} = \sin \phi}$$

Όπως προαναφέρθηκε το αριθμητικό άνοιγμα του αντικειμενικού φακού συνδέεται με το αριθμητικό άνοιγμα στον αμφιβληστροειδή.

$$\boxed{\frac{NA^{obj}}{NA^{ret}} = \frac{1}{M_{obj}}}$$

Επειδή όμως δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τον υπολογισμό της μεγέθυνσης, θα υπολογιστεί το ελάχιστο αριθμητικό άνοιγμα μετά τον αντικειμενικό φακό. Αυτό γίνεται, γιατί λόγω της παραπάνω σχέσης αναμένεται να είναι:

$$NA^{obj} \geq NA^{ret}.$$

Επομένως, θα ισχύει $\boxed{NA_{min}^{obj} = NA^{ret}}$ και έτσι υπολογίζεται η ελάχιστη γωνία φ .

$$\sin \varphi = NA^{ret} \Rightarrow$$

$$\boxed{\varphi = \sin^{-1}(NA^{ret})}$$

Η γωνία φ ισούται παράλληλα και με:

$$\tan \varphi = \frac{y}{s'}$$

Το ύψος y καθότι είναι η απεικόνιση της κόρης εισόδου, πάνω από τον άξονα θα είναι αντίστοιχο με την ακτίνα της κόρης εισόδου συνυπολογιζόμενης και της μεγέθυνσης, η οποία υπεισέρχεται στους υπολογισμούς από το σύστημα της μάσκας στο κεφάλαιο του φωτισμού. Με άλλα λόγια, αφού για διάμετρο $4.8263mm$ της κόρης εισόδου αντιστοιχούν σε $6mm$ διάμετρο της μάσκας, τότε για ακτίνα κόρης εισόδου R_{EP} , το αντίστοιχο ύψος πάνω από τον άξονα που θα περνούν οριακά οι ακτίνες, στο επίπεδο της μάσκας θα είναι y .

Δηλαδή:

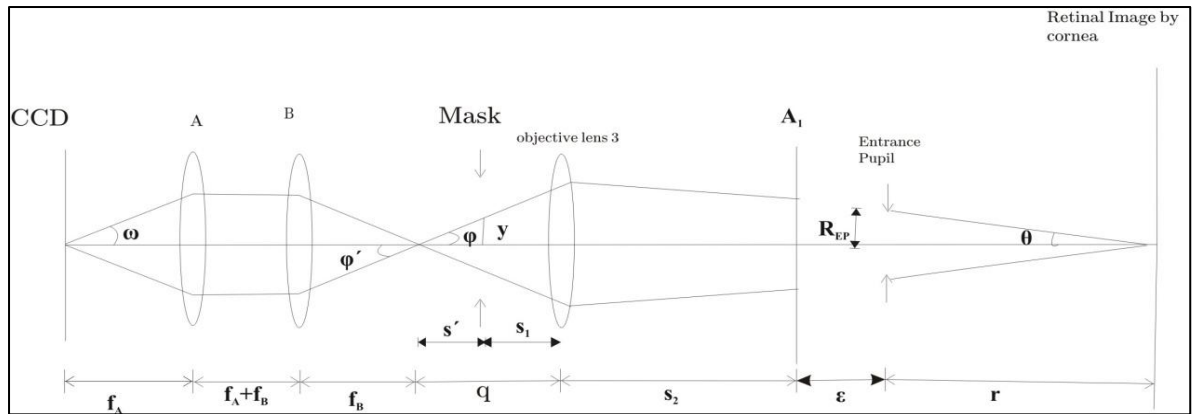
$$\frac{y}{R_{EP}} = \frac{1}{m_{mask}} \Rightarrow$$

$$\boxed{y = \frac{1}{m_{mask}} \cdot R_{EP}}$$

Οπότε μπορεί να υπολογιστεί μία μέγιστη τιμή για την απόσταση s' , μέσω της ελάχιστης γωνίας φ , η οποία βρίσκεται από τον τύπο:

$$\boxed{s' = \frac{y}{\tan \varphi}}$$

Περίπτωση 2: Είδωλο αμφιβληστροειδή μετά τη μάσκα



Εικόνα 26: Σύστημα απεικόνισης. Είδωλο αμφιβληστροειδή μετά από τη μάσκα.

Ο αμφιβληστροειδής απεικονίζεται στο σημείο μετά τη μάσκα, επομένως το επίπεδο του αμφιβληστροειδή με το επίπεδο στο οποίο απεικονίζεται από τον αντικειμενικό φακό είναι συζυγή. Έτσι, ισχύει η σχέση απεικόνισης:

$$\frac{1}{q} + \frac{1}{r + s_2} = \frac{1}{f_3}$$

Και η μεγέθυνση δίνεται από τη σχέση:

$$M_{obj} = \frac{-q}{r + s_2}$$

Το αρνητικό πρόσημο στη μεγέθυνση οφείλεται στο ότι το είδωλο θα είναι ανεστραμμένο.

Η απόσταση q δίνεται από τη σχέση:

$$q = s_1 + s'$$

Το αριθμητικό άνοιγμα, στο σύστημα μετά τον αντικειμενικό φακό 3 υπολογίζεται ως εξής:

$$NA^{obj} = \sin \varphi.$$

Όπως προαναφέρθηκε το αριθμητικό άνοιγμα του αντικειμενικού φακού συνδέεται με το αριθμητικό άνοιγμα στον αμφιβληστροειδή.

$$\frac{NA^{obj}}{NA^{ret}} = \frac{1}{M_{obj}}$$

Επειδή όμως δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τον υπολογισμό της μεγέθυνσης, θα υπολογιστεί το ελάχιστο αριθμητικό άνοιγμα μετά τον αντικειμενικό φακό. Αυτό γίνεται, γιατί λόγω της παραπάνω σχέσης αναμένεται να είναι:

$$NA^{obj} \geq NA^{ret}.$$

Επομένως, θα ισχύει $NA_{min}^{obj} = NA^{ret}$ και έτσι υπολογίζεται η ελάχιστη γωνία φ .

$$\sin \varphi = NA^{ret} \Rightarrow$$

$$\varphi = \sin^{-1}(NA^{ret})$$

Η γωνία φ ισούται παράλληλα και με:

$$\tan \varphi = \frac{y}{s'}$$

Το ύψος y καθότι είναι η απεικόνιση της κόρης εισόδου, πάνω από τον άξονα θα είναι αντίστοιχο με την ακτίνα της κόρης εισόδου συνυπολογιζόμενης και της μεγέθυνσης, η οποία υπεισέρχεται στους υπολογισμούς από το σύστημα της μάσκας στο κεφάλαιο του φωτισμού.

Με άλλα λόγια, αφού για διάμετρο $4.8263mm$ της κόρης εισόδου αντιστοιχούν σε $6mm$ διάμετρο της μάσκας, τότε για ακτίνα κόρης εισόδου R_{EP} , το αντίστοιχο ύψος πάνω από τον άξονα που θα περνούν οριακά οι ακτίνες, στο επίπεδο της μάσκας θα είναι y .

Δηλαδή:

$$\frac{y}{R_{EP}} = \frac{1}{m_{mask}} \Rightarrow$$

$$y = \frac{1}{m_{mask}} \cdot R_{EP}$$

Οπότε μπορεί να υπολογιστεί μία μέγιστη τιμή για την απόσταση s' , μέσω της ελάχιστης γωνίας φ , η οποία βρίσκεται από τον τύπο:

$$s' = \frac{y}{\tan \varphi}$$

Διαφαίνεται ότι ο υπολογισμός τους είναι παρόμοιος και στις 2 περιπτώσεις εκτός από την απόσταση q η οποία παρουσιάζει τη διαφορά κατά περίπτωση.

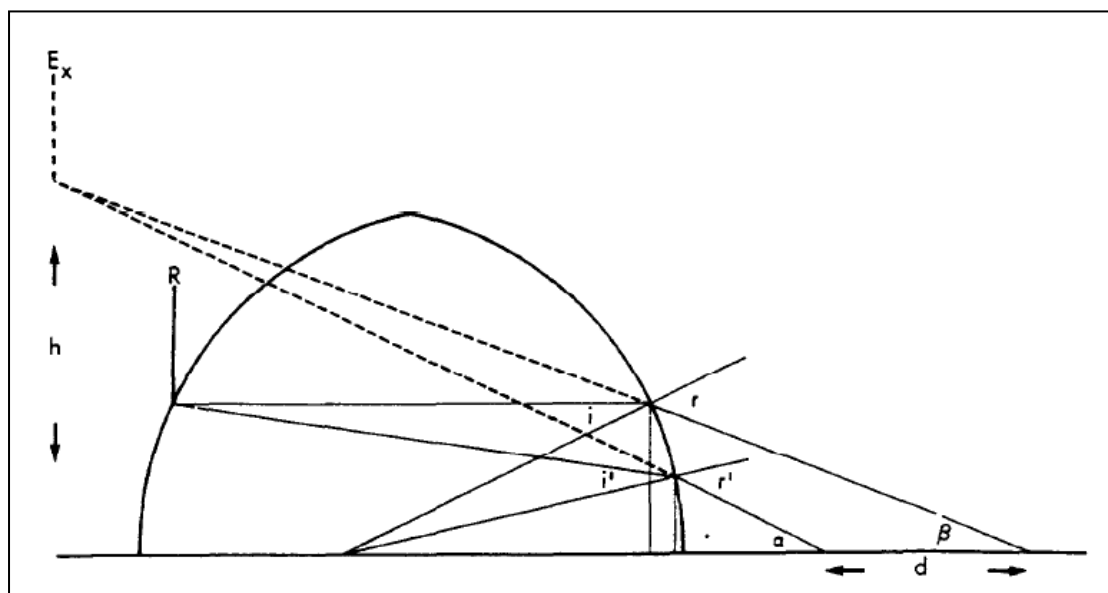
Γ.4.4 Υπολογισμός των μέγιστων ορίων για την εστιακή απόσταση του αντικειμενικού φακού 3

Αφού έχει βρεθεί, ανά περίπτωση και η απόσταση s' μπορεί να τροποποιηθεί η εξίσωση της απεικόνισης και καθώς είναι πλέον γνωστά τα s' και r , ενώ υπάρχουν και σχέσεις για τις αποστάσεις s_1 και s_2 συναρτήσει της εστιακής απόστασης f_3 , οπότε μπορεί να βρεθεί το μέγιστο όριο της εστιακής απόστασης που θα επιλεγεί ο αντικειμενικός φακός, τόσο για απεικόνιση του αμφιβληστροειδή εμπρός, όσο και για

απεικόνιση του αμφιβληστροειδή πίσω από τη μάσκα.

Γ.4.5 Υπολογισμός κόρης εξόδου

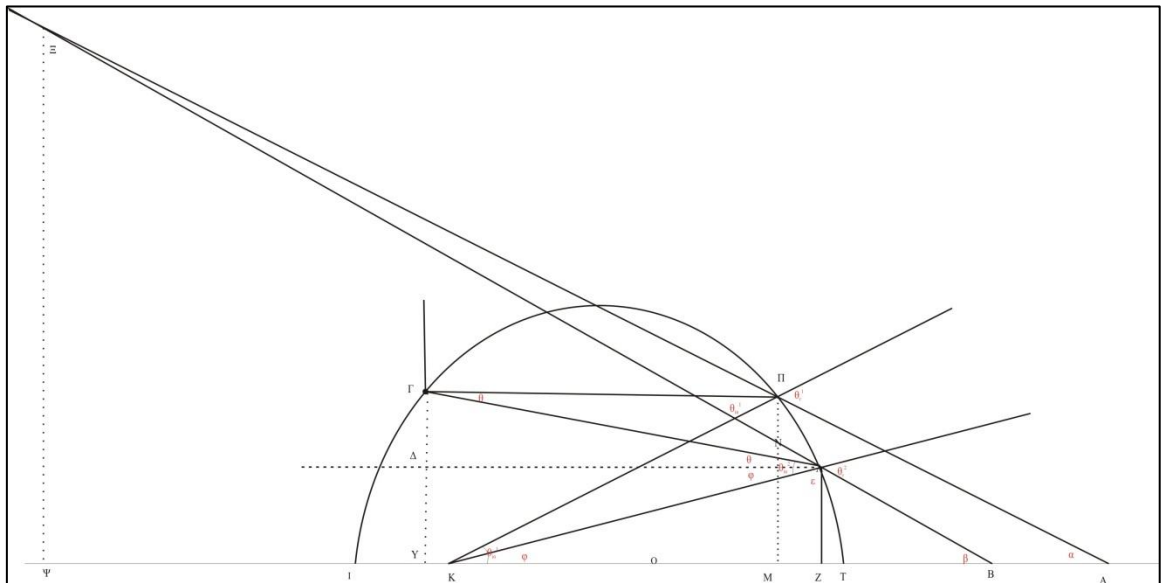
Ως κόρη εξόδου, ορίστηκε ήδη το είδωλο της ίριδας του οφθαλμού μετά την απεικόνιση της από τον κρυσταλλοειδή φακό, κατ' αντιστοιχία και με τον ανθρώπινο οφθαλμό. Στον υπολογισμό της κόρης εξόδου, επειδή το γεγονός ότι το μοντέλο που περιγράφει καλύτερα τον κρυσταλλοειδή φακό είναι το πυρηνικό μοντέλο και υφίσταται αρκετή πολυπλοκότητα στους υπολογισμούς, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του φακού με ομοιογενή δείκτη διάθλασης. Σύμφωνα με το Hughes (1979) ο υπολογισμός της κόρης εξόδου μπορεί να απλουστευτεί και να χρησιμοποιηθεί απλή μέθοδος Ray Tracing για την ανεύρεση της θέσης, αλλά και της διαμέτρου της (Εικόνα 27). Στην Εικόνα 28 φαίνονται 2 ακτίνες, οι οποίες ξεκινούν από το άνω όριο της ίριδας και διαθλώνται έξω από τον κρυσταλλοειδή φακό. Το σημείο που συντέμνουν εκτός του φακού, θα καταδείξει τη θέση της κόρης εξόδου και το ύψος της πάνω από τον άξονα, δηλαδή την ακτίνα της, οπότε εύκολα εξάγεται και η διάμετρος της.



Εικόνα 27: Εύρεση κόρης εξόδου (Hughes, 1979).

Στην εικόνα 27 και 28 φαίνονται οι 2 ακτίνες. Η ακτίνα 1 για λόγους ευκολίας επιλέχθηκε ώστε να είναι παράλληλη με τον άξονα και η ακτίνα 2 επιλέχθηκε να έχει κλίση θ σε σχέση με την ακτίνα 1. Επιλέχθηκε ακόμα, το ύψος που συναντά την

επιφάνεια του φακού η ακτίνα 2 να είναι $y^* = 0.80 \cdot 10^{-3} m$.



Εικόνα 28: Ray Tracing για τον υπολογισμό της κόρης εξόδου

Θα ισχύει λοιπόν ο νόμος του Snell για τη διάθλαση, όπου $n_t \cdot \sin \theta_{in} = n_7 \cdot \sin \theta_r$, όπου n_t ο δείκτης διάθλασης στον κρυσταλλοειδή φακό, θ_{in} η γωνία της προσπίπτουσας ακτίνας με την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια, n_7 ο δείκτης διάθλασης του υαλώδους και θ_r η γωνία της διαθλώμενης ακτίνας με την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια.

Η κάθετη σε ένα σημείο πάνω σε σφαιρική επιφάνεια είναι η ευθεία, η οποία είναι προέκταση της ακτίνας της σφαιρικής αυτής επιφάνειας. Επομένως για την ακτίνα 1 κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια θεωρείται η ευθεία προέκταση του ευθύγραμμου τμήματος $KΠ$ και για την ακτίνα 2 αντίστοιχα, η ευθεία προέκταση του ευθύγραμμου τμήματος $ΚΛ$. Ο κρυσταλλοειδής φακός είναι σα σχήμα η σύντηξη δύο σφαιρικών επιφανειών και όχι μια τέλεια σφαίρα. Από Γεωμετρία και τη χρήση του διαθλαστικού νόμου, βρίσκεται η θέση και το μέγεθος της κόρης εξόδου.

Γ.4.6 Περιφερικές ακτίνες

Για την ολοκλήρωση του τμήματος της απεικόνισης, θα πρέπει να μελετηθούν και οι ακτίνες που ξεκινούν από τα έξω όρια της περιοχής που χρειάζεται να απεικονιστεί. οι παρόντες υπολογισμοί είναι για απεικόνιση στον αμφιβληστροειδή περιοχής 40° ή 60° . Αυτό σημαίνει ότι υπολογίζονται 20° ή 30° επάνω και κάτω από

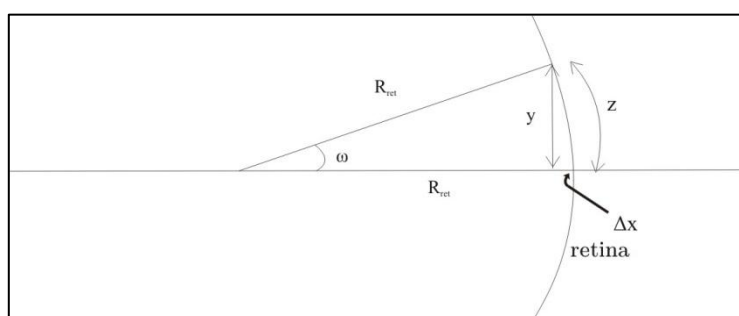
τον άξονα αντιστοιχώς.

Η αμφιβληστροειδική αντιστοιχία είναι: $59\mu m$ ανά 1° επομένως το μήκος τόξου, το οποίο καταλαμβάνουν πάνω στην επιφάνεια του βυθού, από το οποίο ξεκινούν οι περιφερικές ακτίνες είναι (Εικόνα 29)

$$\omega_1 = 20^\circ \Rightarrow z_1 = 20^\circ \cdot \frac{59\mu m}{1^\circ} \Rightarrow z_1 = 1.180mm$$

$$\omega_2 = 30^\circ \Rightarrow z_2 = 30^\circ \cdot \frac{59\mu m}{1^\circ} \Rightarrow z_2 = 1.770mm$$

Στο σχήμα φαίνεται η επιφάνεια του αμφιβληστροειδή με ακτίνα καμπυλότητας R_{ret} .



Εικόνα 29: Εύρεση επιφάνειας αμφιβληστροειδή και ακτίνας καμπυλότητας του.

Επειδή σε κυκλική επιφάνεια ισχύουν τα εξής:

Σε γωνία 360° το μήκος τόξου είναι $2\pi \cdot R_{ret}$.

Σε γωνία ω το μήκος τόξου είναι z .

Οπότε από απλή μέθοδο αντιστοιχίας υπολογίζεται η ακτίνα καμπυλότητας του αμφιβληστροειδούς, η οποία θα είναι:

$$R_{ret} = \frac{z \cdot 360^\circ}{2\pi \cdot \omega}$$

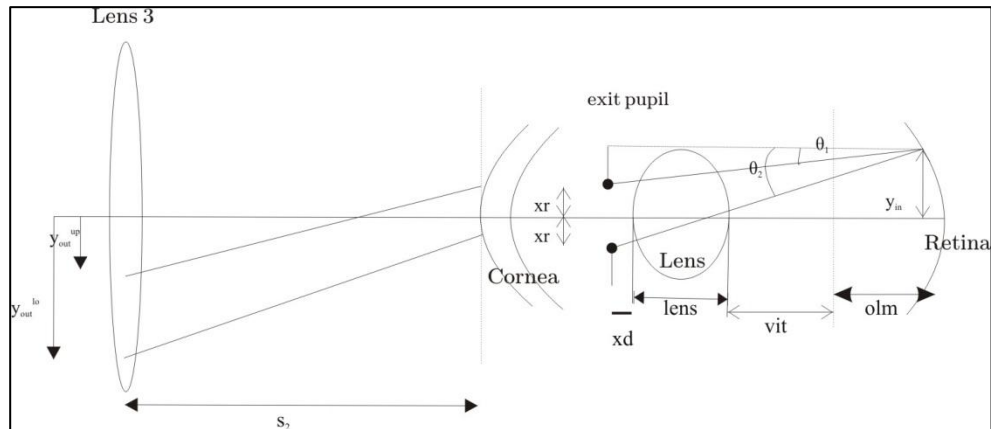
Το ύψος που απέχει η περιφερική ακτίνα από τον άξονα θα είναι:

$$y = R_{ret} \cdot \sin \omega$$

όπως φαίνεται και από το ορθογώνιο τρίγωνο της εικόνας 29.

Με το ύψος της ακραίας ακτίνας γνωστό μένει να υπολογιστεί η γωνία με την οποία εξέρχονται σε σχέση με το άνω και το κάτω όριο της κόρης εξόδου, το οποίο είναι ένας ακόμη περιοριστικός παράγοντας στη συλλογή φωτός από την κάμερα CCD και στην τελική απεικόνιση του βυθού του αρουραίου.

Από την εικόνα 30 και τα 2 ορθογώνια τρίγωνα που σχηματίζονται είναι φανερό ότι η ακτίνα 1 που προσπίπτει στο πάνω όριο της κόρης εξόδου σχηματίζει γωνία θ_1 με τον άξονα, ενώ αντίστοιχα η ακτίνα 2 που προσπίπτει στο κάτω όριο της κόρης εξόδου σχηματίζει γωνία θ_2 με τον άξονα.



Εικόνα 30: Περιφερικές ακτίνες του αμφιβληστροειδή και ύψος εξόδου.

Κατά συνέπεια οι γωνίες θ_1 και θ_2 υπολογίζονται ως εξής:

$$\tan \theta_1 = \frac{y - xr}{xd + lens + vit + olm - \Delta x}$$

$$\tan \theta_2 = \frac{y + xr}{xd + lens + vit + olm - \Delta x}$$

Όπου y το ύψος της περιφερικής ακτίνας από τον άξονα, xr η ακτίνα της κόρης εξόδου, xd η απόσταση της κόρης εξόδου από την πρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού, $lens$ η απόσταση διάδοσης στον κρυσταλλοειδή φακό (με ομοιογενή δείκτη διάθλασης), vit η απόσταση διάδοσης στο υαλώδες, olm η απόσταση διάδοσης στον αμφιβληστροειδή και Δx η απόσταση της ακτίνας από την επιφάνεια του αμφιβληστροειδούς.

Έτσι, $\Delta x = R_{ret} - \sqrt{R_{ret}^2 - y^2}$, από το ορθογώνιο τρίγωνο της εικόνας 29.

Και οι άλλες τιμές έχουν υπολογιστεί ως εξής:

$$lens = \frac{A_6 - A_3}{n_t}$$

$$vit = \frac{A_7 - A_6}{n_7}$$

$$olm = \frac{A_8 - A_7}{n_8}$$

Τελικά, αυτά που υπολογίζονται από τα παραπάνω είναι το ύψος εξόδου της περιφερικής ακτίνας και 2 γωνίες εξόδου, μία για το άνω όριο και μία για το κάτω όριο της κόρης εξόδου. Μελετώνται σε κάθε περίπτωση 2 διαφορετικά ύψη εξόδου ανάλογα με την απεικόνιση για 20° ή 30° επάνω και κάτω από τον άξονα και για 2 διαφορετικές τιμές διαμέτρου της ίριδας στο κομμάτι της απεικόνισης, δηλαδή $d_{rat}^1 = 2mm$ ή $d_{rat}^2 = 2.5mm$.

Οι παραπάνω πληροφορίες χρησιμοποιούνται ως εξής. Ελέγχοντας την έξοδο τους από το οπτικό σύστημα του οφθαλμού του αρουραίου, μπορεί να βρεθεί σε τι ύψος συναντούν τον αντικειμενικό φακό 3 και κατά συνέπεια να δοθεί επιπλέον πληροφορία σε ό, τι αφορά τη διάμετρο του, καθώς θα πρέπει να είναι ικανή ούτως ώστε οι ακτίνες αυτές να διαπερνούν το φακό και να μπορέσουν να απεικονιστούν τελικά στην κάμερα CCD.

Επομένως, θέτοντας σε ένα πίνακα, ο οποίος αντιπροσωπεύει το οπτικό σύστημα του οφθαλμού του αρουραίου έως τον αντικειμενικό φακό 3, συνθήκη εισόδου το ύψος και τις γωνίες που μόλις υπολογίστηκαν, θα ληφθεί ως αποτέλεσμα ένα διάνυσμα με το ύψος και τη γωνία εξόδου συναρτήσει των παραμέτρων του συστήματος για να υπάρξει και άλλος ένας περιορισμός στα οπτικά της διάταξης.

Για κάθε μία από τις διαφορετικές συνθήκες υπάρχουν 2 αποτελέσματα, ένα για την ακτίνα που συναντά το άνω όριο της κόρης εξόδου και ένα για την ακτίνα που συναντά το κάτω όριο της κόρης εξόδου. Έτσι, από αυτά τα 2 αποτελέσματα είναι χρήσιμο το ύψος πάνω από τον άξονα στο οποίο και οι 2 ακτίνες συναντούν το φακό. Από αυτά είναι εύκολο το συμπέρασμα ότι η ακτίνα του φακού πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το ύψος της ακτίνας, ώστε να περνάει το φακό όλη η ποσότητα του φωτός από τον αμφιβληστροειδή του αρουραίου. Έτσι θα ισχύει το εξής:

$$R_{f_3} \leq y_{out} \Rightarrow$$

$$D_{f_3}^{min} = 2R_{f_3} = 2y_{out}$$

Τελικά λοιπόν, επειδή το ύψος του φακού θα συνδέεται με την εστιακή του απόσταση, προκύπτει μία σχέση μεταξύ της διαμέτρου του αντικειμενικού φακού 3 και της εστιακής του απόστασης, οπότε γίνεται για κάθε συνθήκη το γράφημα $D_{f_3} = f(f_3)$.

Αυτό γίνεται για κάθε διαφορετική συνθήκη και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Το αριθμητικό άνοιγμα για το φακό B, λοιπόν, ορίζεται ως εξής:

$$NA_{f_B} = \sin \varphi' = \sin \varphi$$

Η γωνία λοιπόν, φ' , ισούται με τα ακόλουθα:

$$\tan \varphi' = \frac{\left(\frac{D_B}{2}\right)}{f_B}$$

Όπου D_B η διάμετρος του φακού B και f_B η εστιακή του απόσταση.

Έτσι, προκύπτει μία σχέση μεταξύ της διαμέτρου του φακού B και της εστιακής του απόστασης, η οποία είναι η εξής:

$$D_B = 2 \cdot f_B \cdot \tan \varphi.$$

Περίπτωση 2: Είδωλο αμφιβληστροειδή μετά τη μάσκα

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 32, η γωνία φ μέσω της οποίας υπολογίστηκε το αριθμητικό άνοιγμα μετά τον αντικειμενικό φακό είναι η ίδια και για τον υπολογισμό του αριθμητικού ανοίγματος και πριν το φακό B.

Επομένως ορίζεται $NA_{f_B} = \sin \varphi$ όπου η γωνία φ υπολογίζεται ως εξής:

$$\tan \varphi = \frac{\left(\frac{D_B}{2}\right)}{f_B}$$

Όπου D_B η διάμετρος του φακού B και f_B η εστιακή του απόσταση.

Έτσι, προκύπτει μία σχέση μεταξύ της διαμέτρου του φακού B και της εστιακής του απόστασης, η οποία είναι η εξής:

$$D_B = 2 \cdot f_B \cdot \tan \varphi.$$

Και στις 2 διαφορετικές θέσεις του ειδώλου του αμφιβληστροειδή η σχέση της διαμέτρου του φακού B με την εστιακή του απόσταση προκύπτει ακριβώς η ίδια.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το αριθμητικό άνοιγμα μετά το φακό A, ο οποίος είναι μπροστά από την κάμερα CCD.

$$NA_{CAM} = \sin \omega \Rightarrow$$

$$NA_{CAM} = \frac{\left(\frac{D_A}{2}\right)}{\sqrt{(f_A)^2 + \left(\frac{D_A}{2}\right)^2}}$$

Το αριθμητικό άνοιγμα για την κάμερα CCD, θα σχετίζεται με το αριθμητικό

άνοιγμα για τον αμφιβληστροειδή με την ολική μεγέθυνση του συστήματος απεικόνισης. Παράλληλα, το αριθμητικό άνοιγμα για την κάμερα CCD, θα σχετίζεται με το αριθμητικό άνοιγμα για το φακό B, με τη μεγέθυνση του συστήματος relay.

Τα άνωθι αναγραφόμενα μεταφράζονται στους εξής μαθηματικούς τύπους:

$$\frac{NA_{CAM}}{NA_{ret}} = \frac{1}{M_{imag}}$$

$$\frac{NA_{CAM}}{NA_{f_B}} = \frac{1}{M_{zoom}}$$

Οι μεγεθύνσεις που εμφανίζονται στους παραπάνω τύπους, ορίζονται ως εξής.

Για την ολική μεγέθυνση του συστήματος απεικόνισης, απαιτείται η κεντρική περιοχή των 40° ή 60° , με αντιστοιχία σε $59\mu m \text{ per degree}$ από το βυθό του ματιού του αρουραίου, να απεικονίζονται σε κάμερα καταγραφής κλειστού κυκλώματος (CCD), η οποία είναι των εξής διαστάσεων: $512pixels \times 512pixels$ όπου η αντιστοιχία είναι σε $24\mu m \text{ per pixel}$. Συνεπώς, και εφόσον η μεγέθυνση σε ένα οπτικό σύστημα ορίζεται ως το ύψος του ειδώλου, προς το ύψος του αντικειμένου, η μεγέθυνση για το σύστημα απεικόνισης προκύπτει εντέλει:

$$M^{imag} = \frac{CCDsize}{FUNDUSsize}$$

Η μεγέθυνση στο σύστημα relay των φακών είναι εξ ορισμού η εστιακή απόσταση του φακού στο χώρο των ειδώλων προς την εστιακή απόσταση του φακού στο χώρο των αντικειμένων. Θα αποδειχτεί και παρακάτω, όπου θα υπολογιστεί ο πίνακας του relay συστήματος.

$$M_{zoom} = -\frac{f_A}{f_B}$$

Πλέον, χρειάζεται να υπολογιστεί το αριθμητικό άνοιγμα μετά τη CCD κάμερα, και για το οποίο ισχύει:

$$NA_{CAM} = \frac{NA_{ret}}{M_{imag}}$$

Έτσι και η γωνία ω είναι γνωστή, οπότε από την παραπάνω σχέση, όπου συνδέονται η γωνία ω , η διάμετρος του φακού A, D_A και η εστιακή του απόσταση f_A προκύπτει πλέον:

$$D_A = 2 \cdot f_A \cdot \tan \omega$$

Τέλος, κατασκευάζονται τα διαγράμματα των διαμέτρων των φακών A και B,

συναρτήσει των εστιακών τους αποστάσεων $D_A = f(f_A)$ και $D_B = f(f_B)$.

Γ.4.8 Υπολογισμός σφάλματος κατά την απεικόνιση

Με βάση τις πληροφορίες για το μάτι του αρουραίου, σχεδιάστηκε και μελετήθηκε ένα σύστημα φωτισμού και απεικόνισης για τη λήψη φωτογραφίας βυθού. Επειδή, όμως οι μετρήσεις και οι πληροφορίες βασίζονται σε κάποιο μέσο όρο μετρήσεων, είναι αρκετά εύλογο να θεωρηθεί ότι δε θα ισχύουν σε όλους τους οφθαλμούς αρουραίων οι ίδιες μετρήσεις. Έτσι, αναμένεται να υπάρξει ένα μικρό σφάλμα, στην απεικόνιση του αμφιβληστροειδούς, με αποτέλεσμα το είδωλο του να βρεθεί είτε λίγο μπροστά είτε λίγο πίσω, από το σημείο, όπου έχει υπολογιστεί.

Συνεπώς, πρέπει να μελετηθεί η εναλλακτική να κινείται ο ένας από τους 2 φακούς της εστίασης, ώστε να προσαρμόζεται και να απεικονίζεται ευκρινές είδωλο στη CCD κάμερα. Ειδικότερα, ζητείται ο φακός A να παραμένει σταθερός και με μικρή προσαρμογή στη θέση του φακού B, να επιτυγχάνεται η στιγματική απεικόνιση.

Μελέτη του συστήματος των 2 φακών, χωρίς μεταβολή

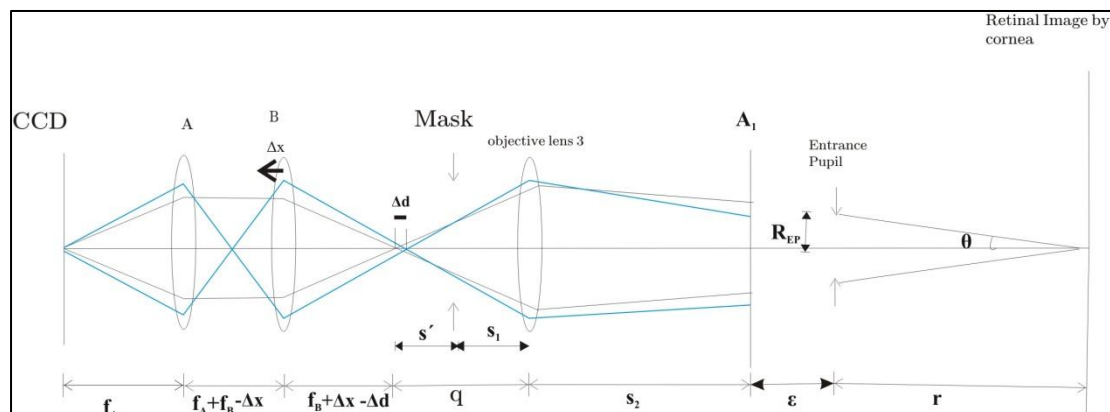
Ο πίνακας που αντιπροσωπεύει το τηλεσκοπικό σύστημα φακών σημειώνεται.

$$[relay] = \begin{pmatrix} 1 & f_A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_A} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f_A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f_B \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_B} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f_B \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$[relay] = \begin{pmatrix} -\frac{f_A}{f_B} & 0 \\ 0 & -\frac{f_B}{f_A} \end{pmatrix}$$

Όπως αναφέρθηκε και προγενέστερα, το τηλεσκοπικό σύστημα των 2 φακών A και B δεν έχει ισχύ αφού το στοιχείο $relay(2,1) = 0$ είναι αντιπροσωπευτικό της ισχύος σε ένα οπτικό σύστημα. Επιπρόσθετα, ισχύει η ζητούμενη στιγματική απεικόνιση, όπως αποδεικνύεται και από το μηδενισμό του στοιχείου $relay(1,2)$. Το γεγονός ότι $relay(1,2) = 0$ έχει ως συνέπεια να εξάγεται η μεγέθυνση του συστήματος, όπου $relay(1,1) = M_{zoom}$, επομένως επαληθεύεται η εξίσωση που είχε αναγραφεί παραπάνω και φυσικά $relay(2,2) = 1/M_{zoom}$. Η μεγέθυνση και η ισχύς τηλεσκοπικού συστήματος είναι γνωστή και από θεωρία οπτικής.

Μελέτη μικρής μεταβολής στο σύστημα απεικόνισης



Εικόνα 33: Σφάλμα στην απεικόνιση. Σημειώνεται με γαλάζιες ακτίνες η μετατόπιση της θέσης του.

Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το είδωλο του αμφιβληστροειδή μπορεί να εστιαστεί είτε εμπρός, είτε πίσω από τη μάσκα και η απόσταση του από τον αντικειμενικό φακό 3, έχει συμβολιστεί με q . Έστω, λοιπόν ότι το είδωλο αυτό, λόγω των οπτικών του οφθαλμού του αρουραίου μεταφέρεται είτε λίγο μπρος, είτε λίγο πίσω κατά απόσταση $[\pm \Delta d]$. Τότε, θα πρέπει να μετακινηθεί και ο φακός B κατά $[\pm \Delta x]$ και η ολική διαφορά από την αρχική του θέση θα είναι $f_B \pm \Delta x \mp \Delta d$. Στην εικόνα 33 φαίνεται παράδειγμα για μετακίνηση του ειδώλου και του φακού B προς τα αριστερά, ισχύει όμως και για την αντίθετη μετακίνηση και φυσικά και για τις δύο περιπτώσεις απεικόνισης του ειδώλου αμφιβληστροειδή. Ο φακός A παραμένει σταθερός και με τη μετακίνηση του φακού B σαφώς μεταβάλλεται και η μεταξύ των 2 φακών απόσταση κατά $[\mp \Delta x]$ αντιστοίχως. Έτσι, ο πίνακας που περιγράφει την απεικόνιση από τους 2 φακούς πλέον είναι ο ακόλουθος.

$$[Zoom] = \begin{pmatrix} 1 & f_A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f_A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f_B \mp \Delta x \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f_B \pm \Delta x \pm \Delta d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ακολουθώντας, ζητείται και πάλι στιγματική απεικόνιση από το ίδιο σύστημα, άρα θα πρέπει:

$$Zoom(1,2) = 0.$$

Δ. Αποτελέσματα

Δ.1 Μοντέλο Ματιού Αρουραίου

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στον Πίνακα 6.

Διαθλαστική ισχύς από πρόσθια επιφάνεια κερατοειδούς A_1	$P_{ant} = 128.1619D$
Διάδοση εντός του κερατοειδούς n_2	$cor = 1.8841 \cdot 10^{-4}m$
Διαθλαστική ισχύς οπίσθιας επιφάνειας κερατοειδούς A_2	$P_{post} = -15.8965D$
Διάδοση εντός του υδατοειδούς	$aq = 4.6447 \cdot 10^{-4}m$
Διαθλαστική ισχύς της πρόσθιας επιφάνειας του περιβλήματος του φακού	$P_{A_3} = 22.6496D$
Διάδοση εντός του περιβλήματος του φακού	$L_a = 6.4532 \cdot 10^{-4}m$
Διαθλαστική ισχύς της πρόσθιας επιφάνειας του πυρήνα του φακού	$P_{A_4} = 114.8225D$
Διάδοση εντός του πυρήνα του φακού	$L_b = 1.278 \cdot 10^{-3}m$
Διαθλαστική ισχύς της οπίσθιας επιφάνειας του πυρήνα του φακού	$P_{A_5} = 114.8225D$
Διάδοση εντός του περιβλήματος του φακού	$L_c = 6.4460 \cdot 10^{-4}m$
Διαθλαστική ισχύς της οπίσθιας επιφάνειας του περιβλήματος του φακού	$P_{A_6} = 22.6496D$
Διάδοση στο υαλώδες	$vit = 1.0396 \cdot 10^{-3}m$
Διάδοση στον αμφιβληστροειδή	$olm = 9.6225 \cdot 10^{-5}m$

Πίνακας 6

Πίνακες

Μέσω των τύπων του πίνακα 5 και τις μεθόδους για οπτικά συστήματα με μαθηματικές μεθόδους πινάκων, παρατίθενται οι ακόλουθοι υπολογισμοί.

Ο πίνακας που αντιπροσωπεύει τον κερατοειδή ως οπτικό σύστημα είναι:

$$[cor] = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_{post} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & cor \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_{ant} & 1 \end{pmatrix}$$

Ο πίνακας για τη διάδοση στο υδατοειδές:

$$[aq] = \begin{pmatrix} 1 & aq \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ο πίνακας που αντιπροσωπεύει το φακό ως οπτικό σύστημα είναι:

$$[lens] = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_6 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_5 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_3 & 1 \end{pmatrix}$$

Ο πίνακας για τη διάδοση στο υαλώδες:

$$[vit] = \begin{pmatrix} 1 & vit \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ο πίνακας για τη διάδοση στον αμφιβληστροειδή:

$$[olm] = \begin{pmatrix} 1 & olm \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Έτσι, από τα παραπάνω ο ολικός πίνακας του ματιού του ποντικού είναι:

$$\boxed{[EYE] = [olm][vit][lens][aq][cor]}.$$

Ο πίνακας του κερατοειδούς αριθμητικά είναι ο:

$$[cor] = \begin{pmatrix} 0.9759 & 0.00020 \\ -112.6492 & 1.0030 \end{pmatrix}$$

Ο πίνακας του κρυσταλλοειδούς φακού είναι ο:

$$[lens] = \begin{pmatrix} 0.6642 & 0.0023 \\ -244.0555 & 0.6641 \end{pmatrix}$$

Και τέλος ο συνολικός πίνακας του ματιού είναι:

$$[EYE] = \begin{pmatrix} \mathbf{0.0145} & \mathbf{0.0033} \\ \mathbf{-300.1992} & \mathbf{0.5064} \end{pmatrix}$$

Παρατίθεται ο ανάστροφος πίνακας του ματιού:

$$[iEYE] = \begin{pmatrix} \mathbf{0.5064} & \mathbf{0.0033} \\ \mathbf{-300.1992} & \mathbf{0.0145} \end{pmatrix}.$$

Τα θεωρητικά αποτελέσματα που υπάρχουν στο άρθρο της παρούσας εργασίας είναι πολύ κοντινά με τους αριθμητικούς υπολογισμούς που παρατέθηκαν παραπάνω.

Στον πίνακα 7 παρατίθενται σε αντιπαραβολή οι θεωρητικές και οι υπολογισμένες τιμές.

Θεωρητικές Τιμές	Αριθμητικοί Υπολογισμοί
$F_{ant.cor} = 128.162D$	$P_{ant} = 128.1619D$
$F_{post.cor} = -15.896D$	$P_{post} = -15.8965D$
$F_{total.cornea} = 112.649D$	$P_{total.cornea} = 112.649D$
$F_{ant.lens} = 22.650D$	$P_{A_3} = 22.6496D$
$F_{ant.core} = 114.781D$	$P_{A_4} = 114.8225D$
$F_{post.core} = 114.781D$	$P_{A_5} = 114.8225D$
$F_{post.lens} = 22.650D$	$P_{A_6} = 22.6496D$
$F_{total.lens} = 243.991D$	$P_{total.lens} = 244.0555D$
$F_{total.ey} = 300.705 D$	$P_{total.ey} = 300.1992 D$

Πίνακας 7

Δ.2 Φωτισμός

Δ.2.1 Υπολογισμός κόρης εισόδου

Η θέση της πραγματικής κόρης πίσω από τον κρυσταλλοειδή φακό προκύπτει

$$rp = R_L - R_L \cdot \cos \varphi \Rightarrow$$

$$rp = R_L - R_L \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} \Rightarrow$$

$$rp = R_L - R_L \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{d_{rat}}{2}}{R_L}\right)^2} \Rightarrow$$

$$\boxed{rp = 1.1253mm}$$

Ο πίνακας για την κόρη εισόδου, μετά από πράξεις είναι ο ακόλουθος

$$\boxed{[EP] = \begin{pmatrix} 1.0029 - 112.649 \cdot \varepsilon & 0.0014984 + 0.8287 \cdot \varepsilon \\ -112.649 & 0.8287 \end{pmatrix}}.$$

Οπότε με τη σχέση για τη στιγματική απεικόνιση είναι:

$$EP(1,2) = 0 \Rightarrow$$

$$\varepsilon = -1.8081mm$$

Το γεγονός ότι η απόσταση ε έχει αρνητικό πρόσημο, σημαίνει ότι βρίσκεται πίσω από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς A_1 .

Όσον αφορά στη μεγέθυνση της κόρης εισόδου, είναι:

$$EP(1,1) = m_{EP} \Rightarrow$$

$$m_{EP} = 1.0029 - 112.649 \cdot \varepsilon, \text{ όπου } \varepsilon = -1.8081mm \Rightarrow$$

$$m_{EP} = 1.2066.$$

Επίσης για διάμετρο πραγματικής κόρης του αρουραίου $d_{rat} = 4mm$, η διάμετρος της κόρης εισόδου υπολογίζεται: $D_{EP} = 4.8263mm$.

Οι υπολογισμοί στον πίνακα της μάσκας γίνονται:

$$[MASK] = \begin{pmatrix} 1 - \frac{(s_2 + \varepsilon)}{f_3} & s_1 \cdot \left(1 - \frac{(s_2 + \varepsilon)}{f_3}\right) + s_2 + \varepsilon \\ \frac{-1}{f_3} & 1 - \frac{s_1}{f_3} \end{pmatrix}$$

$$MASK(1,2) = 0 \Rightarrow s_1 \cdot \left(1 - \frac{(s_2 + \varepsilon)}{f_3}\right) + s_2 + \varepsilon = 0 \quad (1)$$

$$MASK(1,1) = m_{mask} \Rightarrow 1 - \frac{(s_2 + \varepsilon)}{f_3} = m_{mask} \quad (2)$$

$$MASK(2,2) = \frac{1}{m_{mask}} \Rightarrow 1 - \frac{s_1}{f_3} = \frac{1}{m_{mask}} \quad (3)$$

Από τις (1), (2) και (3) συνεπάγεται ότι:

$$s_2 + \varepsilon = -m_{mask} \cdot s_1$$

$$f_3 = \frac{1}{1 - \frac{1}{m_{mask}}} \cdot s_1$$

$$f_3 = \frac{1}{1 - m_{mask}} \cdot (s_2 + \varepsilon)$$

Η μεγέθυνση του συστήματος της μάσκας, η οποία θα δίνεται από την εξής σχέση.

$$m_{mask} = -\frac{4.8263mm}{6mm} \Rightarrow \boxed{m_{mask} = -0.8044}$$

Το είδωλο της μάσκας στην κόρη εισόδου, θα είναι ανεστραμμένο, για αυτό και υπεισέρχεται αρνητικό πρόσημο στον υπολογισμό της.

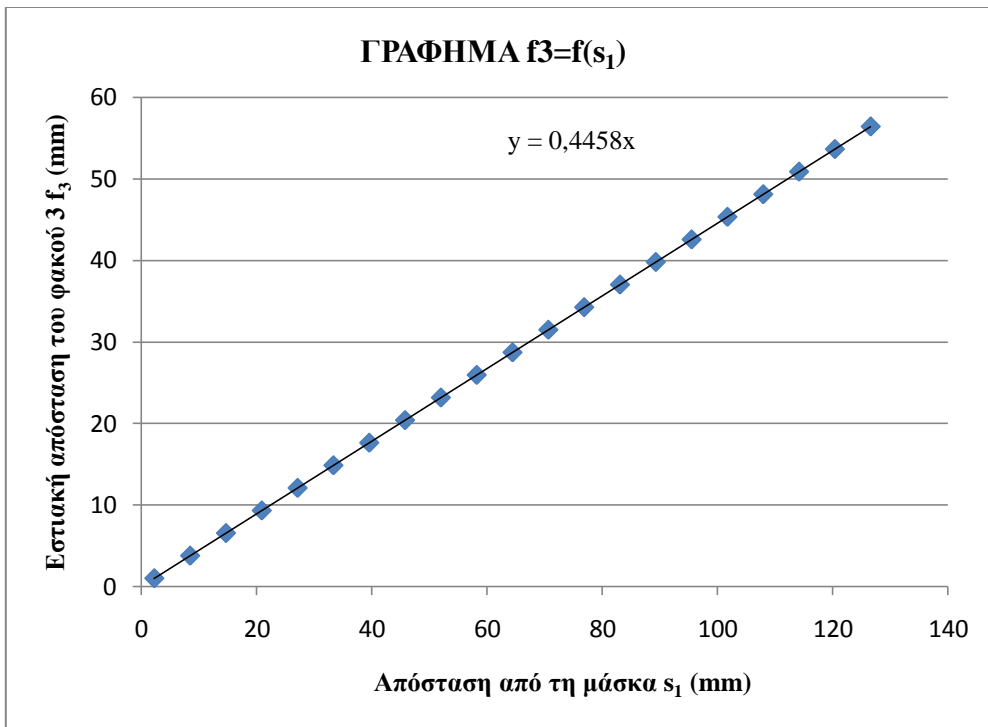
Γνωρίζοντας ότι: $m_{mask} = -0.8044$ και $\varepsilon = 1.8081mm$, οι εξισώσεις που προκύπτουν από το φωτισμό τροποποιούνται:

$$s_2 + \varepsilon = 0.8044 \cdot s_1$$

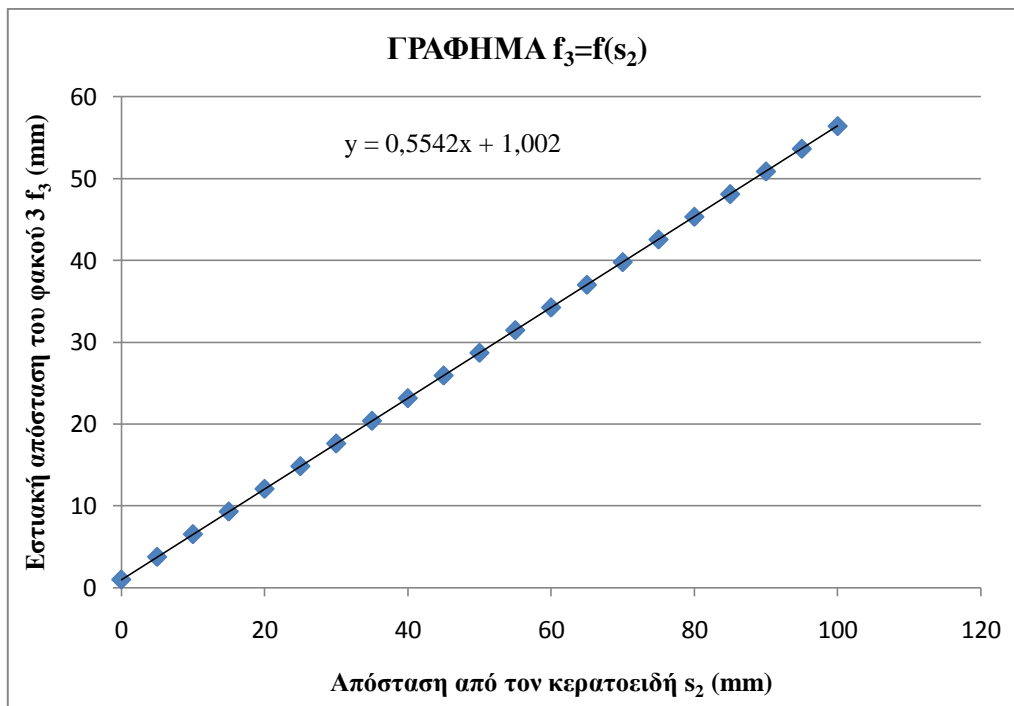
$$f_3 = 0.4458 \cdot s_1$$

$$f_3 = 0.5542 \cdot (s_2 + 1.8081)$$

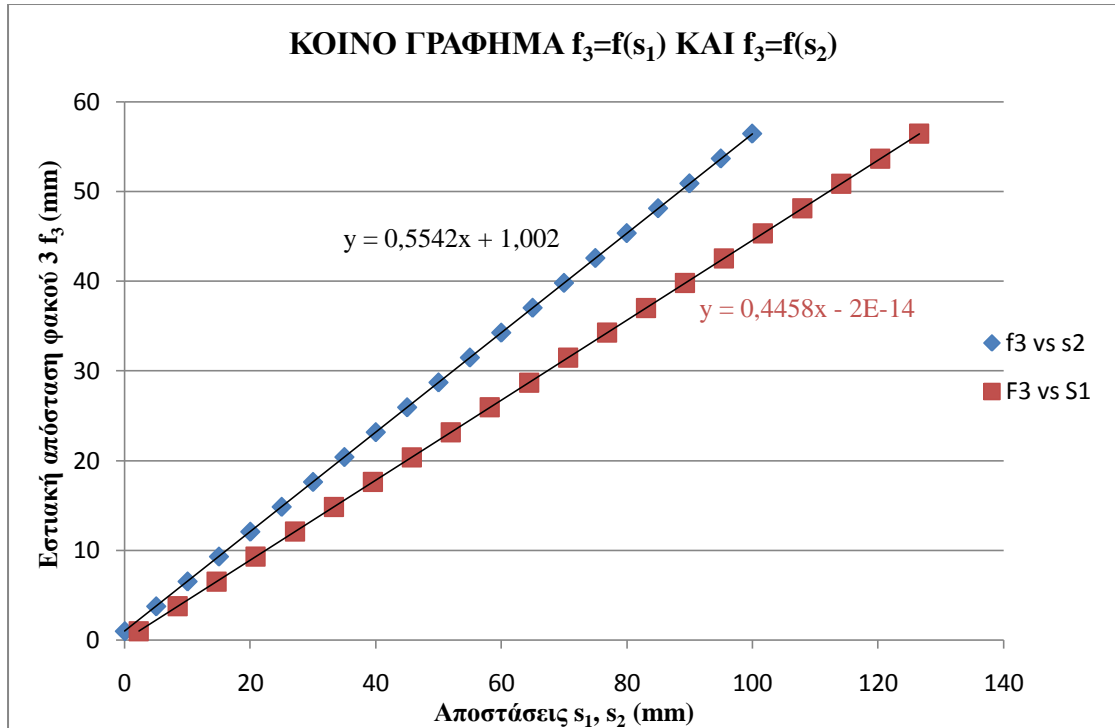
Από τις παραπάνω σχέσεις μπορούν να σχεδιαστούν γραφήματα για να προσδιοριστεί η σχέση του αντικειμενικού φακού 3, με τις αποστάσεις από τη μάσκα και την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς. Έτσι, αν η απόσταση s_2 τεθεί από 0 έως 100 mm, η απόσταση s_1 και η εστιακή απόσταση του φακού f_3 , μεταβάλλονται αναλόγως. Οπότε σχεδιάζονται τα γραφήματα $f_3 = f(s_1)$ (Γράφημα 1) και $f_3 = f(s_2)$ (Γράφημα 2) και παρουσιάζονται και σε κοινό γράφημα (Γράφημα 3).



Γράφημα 1



Γράφημα 2



Γράφημα 3

Δ2.2 Μελέτη των οπτικών ιδιοτήτων του συστήματος

Παραζωνική Προσέγγιση

Από τις (1), (2) και (3) οι σχέσεις για τις εστιακές αναλογίες μεταφράζονται ως εξής:

$$F_1\# = \left(1 - \frac{1}{m_{mask}}\right) \cdot \frac{f_3}{D_{f_3}} \Rightarrow F_1\# = \left(1 - \frac{1}{m_{mask}}\right) \cdot F_{f_3}\#$$

$$F_2\# = (1 - m_{mask}) \cdot \frac{f_3}{D_{f_3}} \Rightarrow F_2\# = (1 - m_{mask}) \cdot F_{f_3}\#$$

Επειδή $(1 - 1/m_{mask}) = 2.2432$ και $(1 - m_{mask}) = 1.8044$

Είναι σαφές ότι $F_1\# > F_2\#$ και θέτοντας $F_1\# = 1$ προκύπτει

$$F_{f_3}\# = \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{m_{mask}}\right)} \Rightarrow F_{f_3}\# = 0.4458$$

$$F_2\# = 0.8044$$

$$F_{f_3}\# = 0.4458 \Rightarrow \boxed{D_{f_3} = 2.2432 \cdot f_3}$$

Επομένως, υπάρχει μία πρώτη σχέση για τη διάμετρο του αντικειμενικού φακού 3 συναρτήσει της εστιακής του απόστασης.

Εξ ορισμού υπολογισμός

Αν $F_1\# = 1$ τότε προκύπτει:

$$s_1 = \frac{D_{f_3} \sqrt{3}}{2}$$

Και κατά συνέπεια $F_2\# = 0.8574$.

$$s_2 + \varepsilon = -m_{mask} \cdot \frac{D_{f_3} \sqrt{3}}{2}$$

Οπότε

εάν

$$D_{f_3} = \frac{s_1 2\sqrt{3}}{3}$$

Και

$$f_3 = 0.4458 \cdot s_1 \Rightarrow s_1 = 2.2432 \cdot f_3$$

Τότε τελικά η διάμετρος του αντικειμενικού φακού 3 βρίσκεται μέσω του τύπου:

$$D_{f_3} = 2.590 \cdot f_3$$

Άρα το F-number που αντιστοιχεί στο φακό θα είναι, μέσω του υπολογισμού με ακριβή ορισμό:

$$F_{f_3}\# = 0.3681$$

Σε αντιπαράβολή με τον προηγούμενο υπολογισμό, όπου ήταν:

$$F_{f_3}\# = 0.4458$$

Δ.3 Φωτισμός

Δ.3.1 Είδωλο ίριδας από κερατοειδή

Για αποτελέσματα που προκύπτουν είναι: για διάμετρο $d_{rat}^1 = 2mm$

$$[EP^1] = \begin{pmatrix} 1.003 - 112.6492 \cdot \varepsilon_1 & 0.0008226 + 0.9046 \cdot \varepsilon_1 \\ -112.6492 & 0.9046 \end{pmatrix}$$

$$EP^1(1,2) = 0 \Rightarrow \varepsilon_1 = -0.9094 \cdot 10^{-3}m \Rightarrow \varepsilon_1 = -0.9094mm$$

$$EP^1(1,1) = m_{EP}^1 \Rightarrow m_{EP}^1 = 1.1054$$

$$D_{EP}^1 = 2.2109mm,$$

$$R_{EP}^1 = 1.1054mm$$

Και επίσης: για διάμετρο $d_{rat}^2 = 2.5mm$

$$[EP^2] = \begin{pmatrix} 1.003 - 112.6492 \cdot \varepsilon_2 & 0.0009257 + 0.8930 \cdot \varepsilon_2 \\ -112.6492 & 0.8930 \end{pmatrix}$$

$$EP^2(1,2) = 0 \Rightarrow \varepsilon_2 = -1.0366 \cdot 10^{-3}m \Rightarrow \varepsilon_2 = -1.0366mm$$

$$EP^2(1,1) = m_{EP}^2 \Rightarrow m_{EP}^2 = 1.1198$$

$$D_{EP}^2 = 2.7994mm$$

$$R_{EP}^2 = 1.3997mm$$

Δ.3.2 Είδωλο του αμφιβληστροειδούς από τον κερατοειδή

Ο πίνακας για την απεικόνιση του αμφιβληστροειδή του αουραίου από τον κερατοειδή ισούται με την παρακάτω σχέση.

$$[R] = \begin{pmatrix} 1 & r \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.5064 & 0.0033 \\ -300.1992 & 0.0145 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$[R] = \begin{pmatrix} 0.5064 - 300.1992 \cdot r & 0.0033 + 0.0145 \cdot r \\ -300.1992 & 0.0145 \end{pmatrix}$$

Χρησιμοποιώντας τη συνθήκη στιγματικής απεικόνισης

$$R(1,2) = 0 \Rightarrow 0.0033 + 0.0145 \cdot r = 0 \Rightarrow$$

$$r = -0.2287m \Rightarrow \boxed{r = -228.7mm}$$

Και αφού το πρόσημο της απόστασης αυτής είναι αρνητικό σημαίνει ότι το είδωλο του αμφιβληστροειδούς από το μάτι είναι πίσω από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς A_1 κατά απόσταση r .

Δ.3.3 Είδωλο του αμφιβληστροειδούς μετά τον αντικειμενικό φακό 3

Μετά από τις εξισώσεις και την αντικατάσταση τα αποτελέσματα για τη θέση του ειδώλου πριν (before) και μετά (after) τη μάσκα κατά περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

$d_{rat}^1 = 2mm$	$d_{rat}^2 = 2.5mm$
$\varepsilon_1 = 0.9094mm$	$\varepsilon_2 = 1.0366mm$
$s'_{before}^1 = 282.56mm$	$s'_{before}^2 = 282.40mm$
$s'_{after}^1 = 282.56mm$	$s'_{after}^2 = 282.40mm$

Πίνακας 8

Δ.3.4 Υπολογισμός των μέγιστων ορίων για την εστιακή απόσταση του αντικειμενικού φακού 3

Η σχέση της απεικόνισης είναι η παρακάτω:

$$\frac{1}{q} + \frac{1}{r + s_2} = \frac{1}{f_3}$$

Και γνωρίζοντας ακόμα ότι:

$$q = s_1 - s'$$

Και από το κεφάλαιο του φωτισμού ότι:

$$s_2 + \varepsilon = 0.8044 \cdot s_1$$

$$f_3 = 0.4458 \cdot s_1$$

Συμπεραίνεται πως:

$$\frac{1}{s_1 - s'} + \frac{1}{0.8044 \cdot s_1 + (r - \varepsilon)} = \frac{1}{0.4458 \cdot s_1}$$

Έτσι, λύνοντας ως προς s_1 προκύπτει:

$$s_1 = \frac{-s' \cdot (r - \varepsilon)}{-0.5542 \cdot (r - \varepsilon) + 0.3586 \cdot s'}$$

Οπότε συνεπάγεται πως και η εστιακή απόσταση του αντικειμενικού φακού 3 προκύπτει:

$$f_3 = 0.4458 \cdot s_1 \Rightarrow$$

$$f_3 = \frac{-0.4458 \cdot s' \cdot (r - \varepsilon)}{-0.5542 \cdot (r - \varepsilon) + 0.3586 \cdot s'}$$

Περίπτωση 2: Είδωλο αμφιβληστροειδή μετά τη μάσκα

Η σχέση της απεικόνισης είναι η παρακάτω:

$$\frac{1}{q} + \frac{1}{r + s_2} = \frac{1}{f_3}$$

Και γνωρίζοντας ακόμα ότι:

$$q = s_1 + s'$$

Και από το κεφάλαιο του φωτισμού ότι:

$$s_2 + \varepsilon = 0.8044 \cdot s_1$$

$$f_3 = 0.4458 \cdot s_1$$

Συμπεραίνεται πως:

$$\frac{1}{s_1 + s'} + \frac{1}{0.8044 \cdot s_1 + (r - \varepsilon)} = \frac{1}{0.4458 \cdot s_1}$$

Έτσι, λύνοντας ως προς s_1 προκύπτει:

$$s_1 = \frac{s' \cdot (r - \varepsilon)}{-0.5542 \cdot (r - \varepsilon) - 0.3586 \cdot s'}$$

Οπότε συνεπάγεται πως και η εστιακή απόσταση του αντικειμενικού φακού 3 προκύπτει:

$$f_3 = 0.4458 \cdot s_1 \Rightarrow$$

$$f_3 = \frac{0.4458 \cdot s' \cdot (r - \varepsilon)}{-0.5542 \cdot (r - \varepsilon) - 0.3586 \cdot s'}$$

Σύνοψη των αριθμητικών υπολογισμών στον πίνακα 9.

$d_{rat}^1 = 2mm$	$d_{rat}^2 = 2.5mm$
$f_3^{1,before} = 1164.8mm$	$f_3^{2,before} = 1164.1mm$
$f_3^{1,after} = -125.93mm$	$f_3^{2,after} = 1164.1mm$
$-125.93mm \leq f_3^1 \leq 1164.8mm$	$-125.84mm \leq f_3^2 \leq 1164.1mm$

Πίνακας 9

Δ.3.5 Κόρη εξόδου

Οι υπολογισμοί της κόρης εξόδου παρατίθενται παρακάτω. Το ευθύγραμμο τμήμα $ΠΓ$ είναι παράλληλο με τον άξονα, επομένως η γωνία $\theta_{in} = Π\hat{K}M$ ως εντός εναλλάξ.

Στο τρίγωνο $KΠM$ ισχύει $KΠ = R_L$ και $ΠM = ΓΥ = d_{rat}$:

$$\sin\theta_{in}^1 = \frac{ΠM}{KΠ} = \frac{d_{rat}}{R_L} \Rightarrow$$

$$\theta_{in}^1 = \sin^{-1}\left(\frac{d_{rat}}{R_L}\right)$$

Και έτσι η γωνία της διαθλώμενης ακτίνας με την κάθετο από το νόμο του Snell θα είναι:

$$\theta_r^1 = \sin^{-1}\left(\frac{n_t}{n_7} \cdot \sin\theta_{in}^1\right)$$

Το ευθύγραμμο τμήμα KM υπολογίζεται

$$KM = KΠ \cdot \cos\theta_{in}^1 \Rightarrow$$

$$KM = R_L \cdot \cos\theta_{in}^1$$

Σε ό, τι αφορά το ορθογώνιο τρίγωνο $KΛZ$ ισχύουν τα εξής:

Το ευθύγραμμο τμήμα $ΛΔ$ είναι επίσης παράλληλο με τον άξονα, επομένως η γωνία $Γ\hat{Λ}Δ$ που σχηματίζεται είναι ίση με την $Π\hat{Γ}Λ = \theta$ ως εντός εναλλάξ. Επίσης, η γωνία $Δ\hat{Λ}K$ θα είναι ίση με τη γωνία $Λ\hat{K}Z = \varphi$ ως εντός εναλλάξ.

Επιπρόσθετα ισχύουν τα κάτωθι:

$$\sin\varphi = \frac{ΛZ}{ΛK} = \frac{y^*}{R_L} \Rightarrow$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{y^*}{R_L} \right)$$

Για το ευθύγραμμο τμήμα KZ :

$$KZ = KA \cdot \cos \varphi \Rightarrow$$

$$KZ = R_L \cdot \cos \varphi$$

Στο ορθογώνιο τρίγωνο $\Lambda\Delta\Gamma$ ισχύει:

$$\tan \theta = \frac{\Gamma\Delta}{\Delta\Lambda}$$

Όπου το ευθύγραμμο τμήμα: $\Gamma\Delta = d_{rat} - y^*$ και το ευθύγραμμο τμήμα $\Delta\Lambda = YZ$ λόγω του γεγονότος ότι το $\Gamma\Lambda Z$ είναι ορθογώνιο.

Οπότε επειδή το μήκος του φακού είναι: $2L = A_6 - A_3$ και η απόσταση της ίριδας από την επιφάνεια του φακού είναι rp , έτσι το ευθύγραμμο τμήμα YK υπολογίζεται:

$$YK = 2 \cdot L - 2 \cdot rp - KM \Rightarrow$$

$$YK = 2 \cdot L - 2 \cdot rp - R_L \cdot \cos \theta_{in}^1$$

Και τελικά η γωνία θ εξάγεται:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d_{rat} - y^*}{2 \cdot L - 2 \cdot rp - R_L \cdot \cos \theta_{in}^1} \right)$$

Οπότε η προσπίπτουσα γωνία της ακτίνας 2 υπολογίζεται:

$$\theta_{in}^2 = \theta + \varphi$$

Και έτσι η γωνία της διαθλώμενης ακτίνας με την κάθετο από το νόμο του Snell θα είναι:

$$\theta_r^2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_t}{n_7} \cdot \sin \theta_{in}^2 \right)$$

Πλέον έχουν υπολογιστεί οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης των ακτινών. Οι διαθλώμενες ακτίνες σχηματίζουν κάποια γωνία με τον άξονα, η οποία αν υπολογιστεί θα είναι πιο εύκολη η μαθηματική εξαγωγή και της κόρης εξόδου.

Στην ευθεία, που προεκτείνεται του ευθύγραμμου τμήματος $K\Pi$ ισχύει:

$$\omega + \theta_r^1 + M\hat{\Pi}A = 180^\circ.$$

Η γωνία $M\hat{\Pi}A = (90^\circ - \alpha)$ ως συμπληρωματική οξείας γωνίας στο ορθογώνιο τρίγωνο $M\Pi A$. Έτσι $\omega + \theta_r^1 + (90^\circ - \alpha) = 180^\circ$.

Επίσης, εύκολα συμπεραίνεται ότι $\omega + \theta_{in}^1 = \Gamma\hat{\Pi}M = 90^\circ$, καθώς η $\Gamma\hat{\Pi}M$ είναι

γωνία παραλληλόγραμμου. Δηλαδή: $\omega = 90^\circ - \theta_{in}^1$.

Οπότε η γωνία α που σχηματίζει η διαθλώμενη ακτίνα 1 με τον άξονα είναι:

$$\alpha = \theta_r^1 - \theta_{in}^1.$$

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται για τη διαθλώμενη ακτίνα 2. Στην ευθεία προέκταση του ευθύγραμμου τμήματος $K\Lambda$ ισχύει:

$$\varepsilon + \theta_r^2 + Z\hat{\Lambda}B = 180^\circ.$$

Η γωνία $Z\hat{\Lambda}B = (90^\circ - \beta)$ ως συμπληρωματική οξείας γωνίας στο ορθογώνιο τρίγωνο $M\Lambda A$. Έτσι $\varepsilon + \theta_r^2 + (90^\circ - \beta) = 180^\circ$.

Επίσης, εύκολα συμπεραίνεται ότι $\varepsilon + \varphi = \Delta\hat{\Lambda}Z = 90^\circ$, καθώς η $\Delta\hat{\Lambda}Z$ είναι γωνία παραλληλόγραμμου. Δηλαδή: $\varepsilon = 90^\circ - \varphi$.

Οπότε η γωνία β που σχηματίζει η διαθλώμενη ακτίνα 2 με τον άξονα είναι:

$$\beta = \theta_r^2 - \varphi.$$

Στα ορθογώνια τρίγωνα $\Xi\Psi A$ και $\Xi\Psi B$ ισχύει:

$$\cot \alpha = \frac{A\Psi}{\Psi\Xi}$$

$$\cot \beta = \frac{B\Psi}{\Psi\Xi}$$

Το ευθύγραμμο τμήμα $\Psi\Xi = xr$ είναι η απόσταση του ορίου της κόρης εξόδου από τον άξονα, δηλαδή η ακτίνα της κόρης εξόδου. Επίσης, το ευθύγραμμο τμήμα $AB = d$ είναι η απόσταση των σημείων A και B , όπου συναντιέται η ακτίνα 1 και η ακτίνα 2 με τον άξονα αντίστοιχα. Οπότε, ισχύει:

$$\cot \alpha = \frac{d + \Psi B}{xr}$$

$$\cot \beta = \frac{\Psi B}{xr}$$

Και η ακτίνα της κόρης εξόδου από τις 2 παραπάνω σχέσεις, προκύπτει τελικά όπως ήταν αναμενόμενο από το άρθρο του Hughes (1979):

$$xr = \frac{d}{\cot \alpha - \cot \beta}$$

Τέλος, για την ανεύρεση της απόστασης d και της απόστασης $x d$ της κόρης εξόδου από την πρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού είναι:

$$d = AB = MA - MB \Rightarrow$$

$$d = MA - MZ - ZB$$

Έτσι, από τα ορθογώνια τρίγωνα ΠMA και ΛZB είναι:

$$\tan \alpha = \frac{\Pi M}{MA} \Rightarrow$$

$$MA = \frac{\Pi M}{\tan \alpha} \xrightarrow{\Pi M = d_{rat}}$$

$$\boxed{MA = \frac{d_{rat}}{\tan \alpha}}$$

$$\tan \beta = \frac{\Lambda Z}{ZB} \Rightarrow$$

$$ZB = \frac{\Lambda Z}{\tan \beta} \xrightarrow{\Lambda Z = y^*}$$

$$\boxed{ZB = \frac{y^*}{\tan \beta}}$$

Είναι εμφανές ότι: $\boxed{MZ = KZ - KM}$, τα οποία έχουν υπολογιστεί ανωτέρω και έτσι εξάγεται το αριθμητικό αποτέλεσμα για την ανεύρεση της απόστασης d και περαιτέρω της ακτίνας της κόρης εξόδου.

Η απόσταση της κόρης εξόδου από την πρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού είναι:

$$xd = \Psi A - IA \Rightarrow$$

$$xd = \Psi A - IM - MA$$

Όπου το ευθύγραμμο τμήμα MA έχει υπολογιστεί παραπάνω και για τα ΨA , IM παρατίθενται παρακάτω οι υπολογισμοί.

$$\cot \alpha = \frac{\Psi A}{\Psi \varepsilon} \Rightarrow$$

$$\cot \alpha = \frac{\Psi A}{xr} \Rightarrow$$

$$\boxed{\Psi A = xr \cdot \cot \alpha}$$

Και: $IM = 2 \cdot L - MT$, και η απόσταση MT είναι ίση με την απόσταση της ίριδας από την επιφάνεια του φακού λόγω του παραλληλογράμμου $\Upsilon Γ Π Μ$, άρα:

$$\boxed{IM = 2 \cdot L - rp}$$

Τέλος, γνωρίζοντας τη θέση της κόρης εξόδου μπροστά από το φακό είναι και προφανής η απόσταση της από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς, δηλαδή:

$$\boxed{cd = A_3 - xd}$$

Συνοψίζοντας, για την κόρη εξόδου τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται

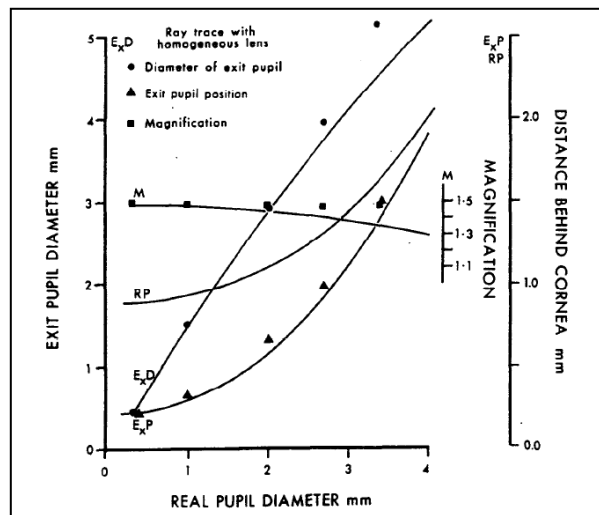
στον Πίνακα 10.

Διάμετρος ίριδας	$d_{rat}^1 = 2mm$	$d_{rat}^2 = 2.5mm$
Ακτίνα κόρης εξόδου	$xr^1 = 1.47mm$	$xr^2 = 1.84mm$
Διάμετρος κόρης εξόδου	$D_{XP}^1 = 2.94mm$	$D_{XP}^2 = 3.68mm$
Απόσταση από το φακό	$xd^1 = 2.4912mm$	$xd^2 = 0.0098mm$
Απόσταση από τον κερατοειδή	$cd^1 = 0.6319mm$	$cd^2 = 0.8712mm$
Μεγέθυνση	$M_{XP}^1 = 1.47$	$M_{XP}^2 = 1.4720$

Πίνακας 10

Αυτό που παρατηρείται είναι μία συνέχεια και με τις τιμές υπολογισμού του Hughes (1979) από το ακόλουθο διάγραμμα και με τη μεγέθυνση της κόρης εξόδου ως προς την πραγματική κόρη να είναι σχετικά σταθερή, αφού βρίσκεται από τον τύπο:

$$M_{XP} = \frac{D_{XP}}{d_{rat}}$$



Γράφημα 4: Θέση πίσω από τον κερατοειδή, διάμετρος και μεγέθυνση της κόρης εξόδου.

Δ.3.7 Περιφερικές ακτίνες

Τόσο για $\omega_1 = 20$, $z_1 = 1.180mm$ όσο και για $\omega_2 = 30$, $z_2 = 1.770mm$ η τιμή της καμπυλότητας του αμφιβληστροειδή προκύπτει ίδια, όπως ήταν αναμενόμενο και είναι: $R_{ret} = 3.3805mm$.

Είναι προφανές ότι:

$$y_1 = R_{ret} \cdot \sin \omega_1 \Rightarrow y_1 = 1.1562mm$$

$$y_2 = R_{ret} \cdot \sin \omega_2 \Rightarrow y_2 = 1.6902mm.$$

Από τα προηγούμενα και τη μεθοδολογία λοιπόν ο πίνακας, ο οποίος θα περιγράφει

σε ποιο ύψος θα φτάσουν οι περιφερικές ακτίνες τον αντικειμενικό φακό 3, είναι ο πίνακας του ματιού μέχρι πριν τον αντικειμενικό φακό 3 (το φως θεωρείται πως διαδίδεται από δεξιά προς τα αριστερά), άρα χρησιμοποιείται ο ανάστροφος πίνακας του ματιού.

$$[H] = \begin{pmatrix} 1 & s_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.5064 & 0.0033 \\ -300.1992 & 0.0145 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$[H] = \begin{pmatrix} 0.5064 - 300.1992 \cdot s_2 & 0.0033 + 0.0145 \cdot s_2 \\ -300.1992 & 0.0145 \end{pmatrix}$$

Οπότε ο πίνακας $[H]$ γίνεται:

$$[H] = \begin{pmatrix} 0.5064 - 300.1992 \cdot (1.8044 \cdot f_3 - \varepsilon) & 0.0033 + 0.0145 \cdot (1.8044 \cdot f_3 - \varepsilon) \\ -300.1992 & 0.0145 \end{pmatrix}$$

Πλέον για να βρεθεί το ύψος και η γωνία εξόδου των ακτινών πολλαπλασιάζεται το διάνυσμα εισόδου με τον πίνακα $[H]$, δηλαδή:

$$\begin{pmatrix} y_{out} \\ \theta_{out} \end{pmatrix} = [H] \begin{pmatrix} y_{in} \\ \theta_{in} \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{pmatrix} y_{out} \\ \theta_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5064 - 300.1992 \cdot s_2 & 0.0033 + 0.0145 \cdot s_2 \\ -300.1992 & 0.0145 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{in} \\ \theta_{in} \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{pmatrix} y_{out} \\ \theta_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (0.5064 - 300.1992 \cdot s_2)y_{in} + (0.0033 + 0.0145 \cdot s_2)\theta_{in} \\ -300.1992y_{in} + 0.0145\theta_{in} \end{pmatrix}.$$

Από τις σχέσεις που ισχύουν για την απεικόνιση της πραγματικής κόρης από τον κερατοειδή είναι γνωστό ότι:

$$f_3 = 0.5542 \cdot (s_2 + \varepsilon)$$

$$\boxed{s_2 = 1.8044 \cdot f_3 - \varepsilon}$$

Όπου ε η απόσταση της κόρης εισόδου από τον κερατοειδή και είναι ελαφρώς διαφορετική για κάθε μία από τις τιμές της διαμέτρου της πραγματικής κόρης που μελετώνται.

$$D_{f_3} = 2[(0.5064 - 300.1992 \cdot s_2)y_{in} + (0.0033 + 0.0145 \cdot s_2)\theta_{in}] \Rightarrow$$

$$D_{f_3} = 2(0.5064y_{in} + 0.0033\theta_{in}) + 2(0.0145\theta_{in} - 300.1992y_{in}) \cdot s_2 \Rightarrow$$

$$\boxed{D_{f_3} = 2(0.5064y_{in} + 0.0033\theta_{in}) + 2(0.0145\theta_{in} - 300.1992y_{in})(1.8044 \cdot f_3 - \varepsilon)}$$

Επομένως, τα αποτελέσματα αριθμητικά και συγκεντρωτικά, αφού έχουν υπολογιστεί και οι γωνίες εξόδου παρουσιάζονται παρακάτω² (Πίνακες 11 και 12).

² Σημείωση: για διάμετρο ίριδας $d_{rat}^1 = 2mm$, η απόσταση της κόρης εισόδου από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδούς είναι $\varepsilon_1 = 9.0938 \cdot 10^{-4}m$, ενώ για

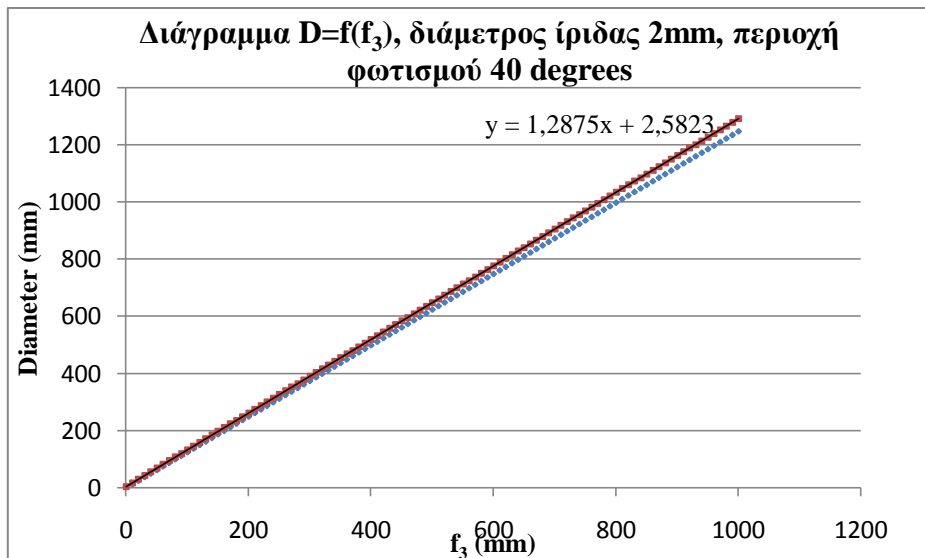
Διάμετρος πραγματικής κόρης $d_{rat}^1 = 2mm$	
Ύψος $y_1 = 1.1562mm$ για $\omega_1 = 20^\circ$	Ύψος $y_2 = 1.6902mm$ για $\omega_2 = 30^\circ$
$\theta_1 = 0.0950rad$	$\theta_1 = -0.0696rad$
$\theta_2 = -0.6670rad$	$\theta_2 = -0.7970rad$

Πίνακας 11

Διάμετρος πραγματικής κόρης $d_{rat}^2 = 2.5mm$	
Ύψος $y_1 = 1.1562mm$ για $\omega_1 = 20^\circ$	Ύψος $y_2 = 1.6902mm$ για $\omega_2 = 30^\circ$
$\theta_1 = -0.2170rad$	$\theta_1 = -0.0524rad$
$\theta_2 = -0.7680rad$	$\theta_2 = -0.8911rad$

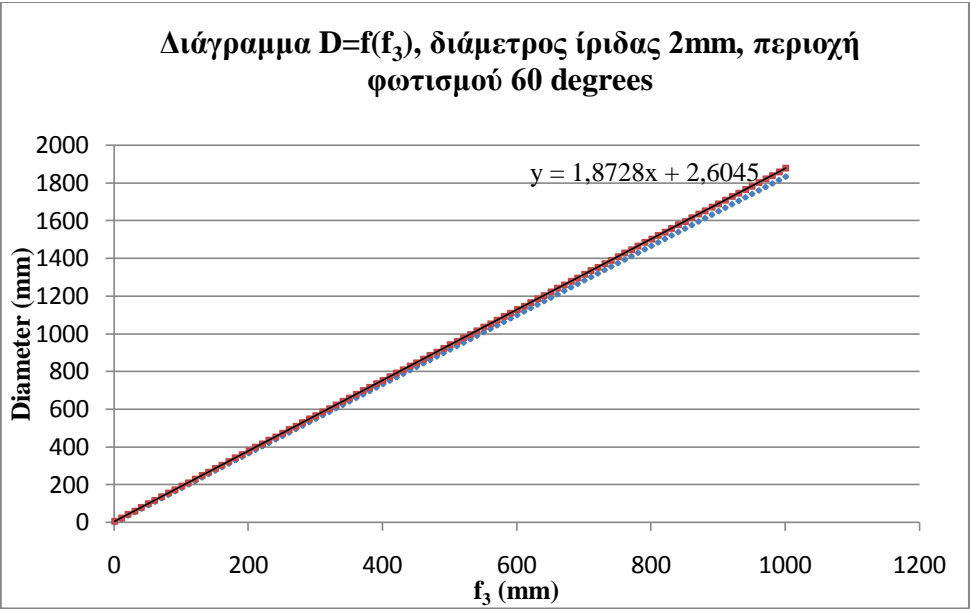
Πίνακας 12

Παρακάτω παρατίθενται τα γραφήματα 5 έως 8 της διαμέτρου του αντικειμενικού φακού συναρτήσει της εστιακής απόστασης, και επειδή σε κάθε γράφημα εμφανίζονται 2 ευθείες, η ευθεία με τη μεγαλύτερη κλίση θα είναι σαφώς η ευθεία που θα δώσει την ικανή συνθήκη για να βρεθεί η διάμετρος του αντικειμενικού φακού 3. Σε αυτή έχει προσαρμοστεί ευθεία, με την εξίσωση να παρατίθεται στο γράφημα.

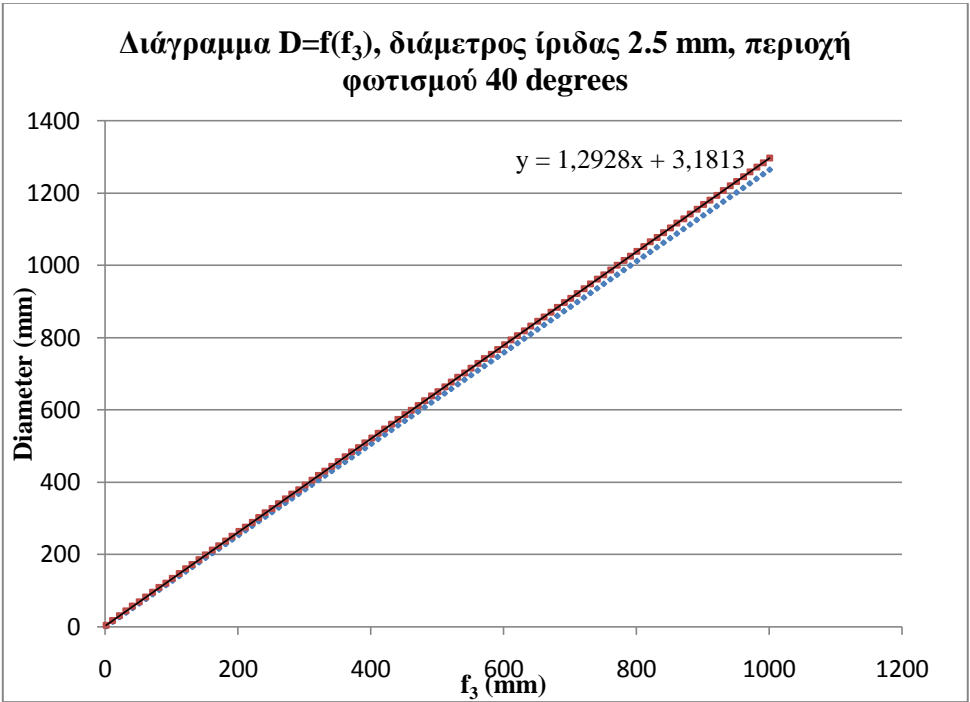


Γράφημα 5

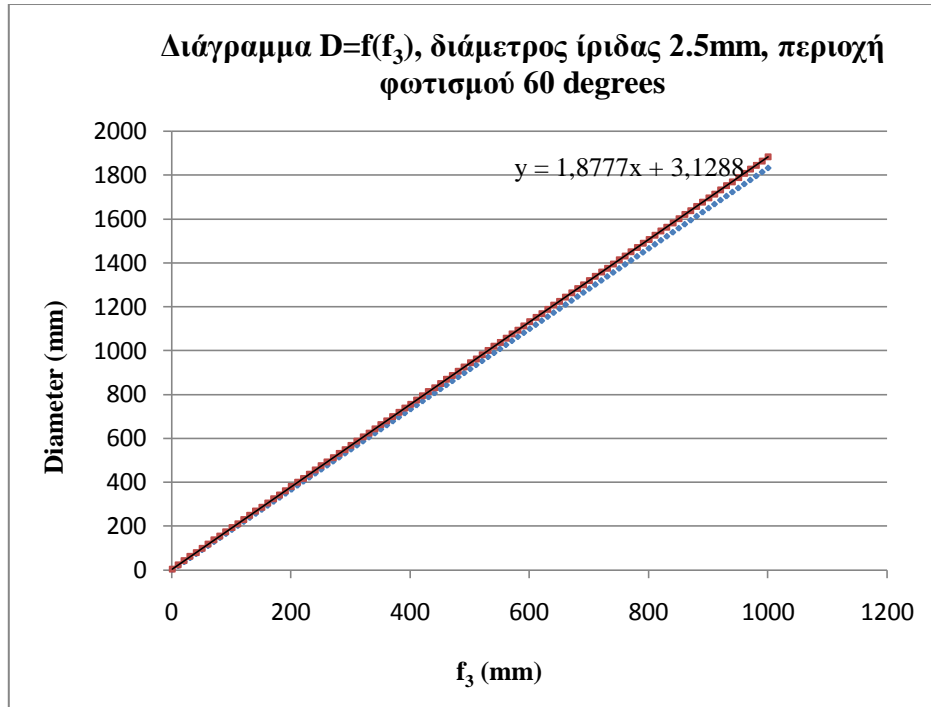
διάμετρο ίριδας $d_{rat}^2 = 2.5mm$ η απόσταση είναι: $\varepsilon_2 = 0.0010m$.



Γράφημα 6



Γράφημα 7



Γράφημα 8

Δ.3.8 Φακοί εστίασης

Η ολική μεγέθυνση του συστήματος απεικόνισης εξάγεται:

$$M_{imag}^1 = \frac{512pixels \cdot 24\mu m/pixel}{40^\circ \cdot 59\mu m/1^\circ} \Rightarrow M_{imag}^1 = 5.0268$$

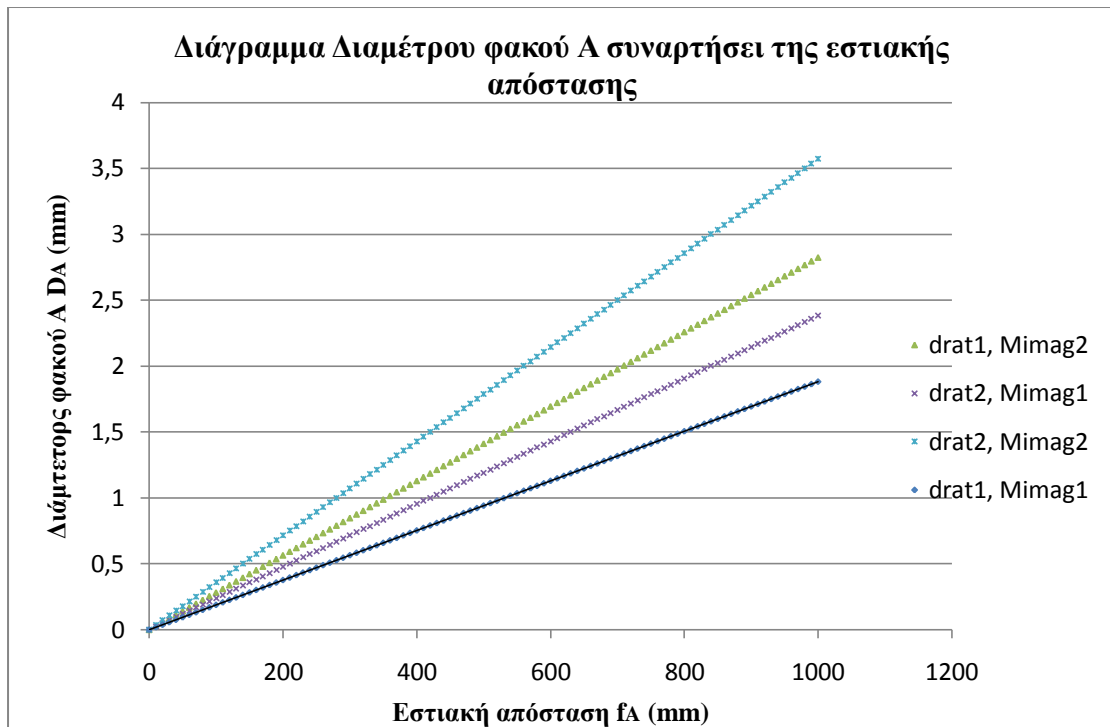
ή

$$M_{imag}^2 = \frac{512pixels \cdot 24\mu m/pixel}{60^\circ \cdot 59\mu m/1^\circ} \Rightarrow M_{imag}^2 = 3.4712$$

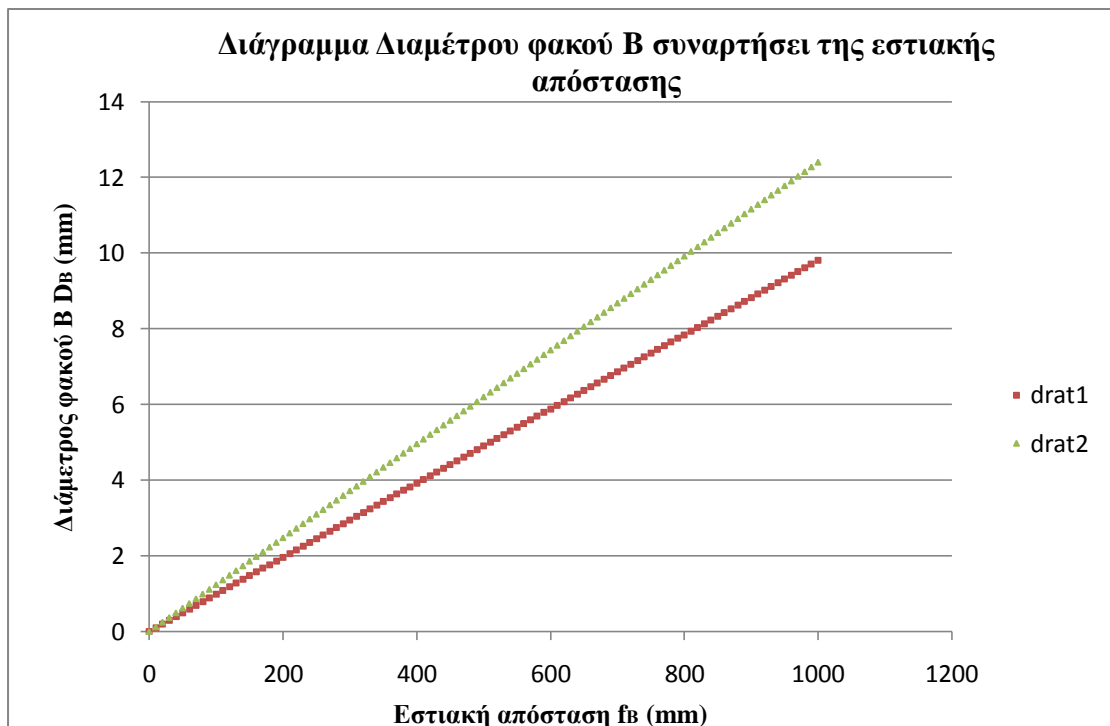
Επίσης, το αριθμητικό άνοιγμα στην περιοχή μεταξύ φακού Α και κάμερας CCD φαίνεται στον Πίνακα 10 και τα διαγράμματα της διαμέτρου των φακών συναρτήσει της εστιακής τους απόστασης κατά περίπτωση διαμέτρου κόρης και μεγέθυνσης συστήματος στα Γραφήματα 9 και 10.

$d_{rat}^1 = 2mm$	$d_{rat}^2 = 2.5mm$
$NA_{CAM}^1 = 9.4108 \cdot 10^{-4}$ για M_{imag}^1	$NA_{CAM}^2 = 0.0012$ για M_{imag}^1
$NA_{CAM}^1 = 0.0014$ για M_{imag}^2	$NA_{CAM}^2 = 0.0018$ για M_{imag}^2

Πίνακας 13



Γράφημα 9



Γράφημα 10

Δ.3.9 Σφάλμα κατά την εστίαση

Ο πίνακας για τον υπολογισμό του σφάλματος από τους φακούς που προσφέρουν μεγέθυνση στο σύστημα κατά την απεικόνιση του βυθού γίνεται.

$$[Zoom] = \begin{pmatrix} 0 & f_A \\ \frac{-1}{f_A} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \pm \frac{\Delta x}{f_B} & f_B + \frac{\Delta x}{f_B} \cdot (\Delta x - \Delta d) \\ \frac{-1}{f_B} & \mp \frac{\Delta x}{f_B} \pm \frac{\Delta d}{f_B} \end{pmatrix}$$

$$[Zoom] = \begin{pmatrix} -\frac{f_A}{f_B} & \frac{f_A}{f_B} \cdot (\mp \Delta x \pm \Delta d) \\ \mp \frac{\Delta x}{f_A \cdot f_B} & -\frac{f_B}{f_A} - \frac{\Delta x}{f_A \cdot f_B} \cdot (\Delta x - \Delta d) \end{pmatrix}$$

Με τη συνθήκη στιγματικής απεικόνισης, αυτό που τελικά προκύπτει είναι η παρακάτω εξίσωση, η οποία και επιλύεται.

$$\frac{f_A}{f_B} \cdot (\mp \Delta x \pm \Delta d) = 0 \xrightarrow{\frac{f_A}{f_B} \neq 0}$$

$$\boxed{\Delta x = \Delta d}$$

Εφόσον ισχύει $Zoom(1,2) = 0$, τότε η μεγέθυνση του συστήματος είναι το $Zoom(1,1) = m_{zoom}$ και παρατηρείται πως είναι ίση με του προηγούμενου τηλεσκοπικού συστήματος.

$$\boxed{M_{zoom} = m_{zoom} = -\frac{f_A}{f_B}}$$

Αντικαθιστώντας, στον πίνακα τη συνθήκη $\Delta x = \Delta d$, το αποτέλεσμα έχει ως εξής.

$$[Zoom] = \begin{pmatrix} -\frac{f_A}{f_B} & 0 \\ \mp \frac{\Delta x}{f_A \cdot f_B} & -\frac{f_B}{f_A} \end{pmatrix}$$

Είναι εμφανές ότι ο πίνακας είναι παρόμοιος με του προηγούμενου συστήματος απλά παρουσιάζει ισχύ πλέον, το οποίο είναι λογικό καθώς αφού η τελική αλλαγή που επιφέρεται είναι μόνο στην απόσταση μεταξύ των 2 φακών A και B και απαιτείται και πάλι να εστιάζουν τη δέσμη των ακτινών, άρα θα πρέπει αυτές να συγκλίνουν ή να αποκλίνουν ώστε να συμβαίνει η απαιτούμενη αλλαγή.

E. Συμπεράσματα – Συζήτηση

Από την προηγούμενη ανάλυση προκύπτει ότι τόσο το μοντέλο για τον οφθαλμό του αρουραίου όσο και η αριθμητική προσέγγιση της κόρης εξόδου συνάδουν με τους υπολογισμούς που έγιναν το 1979 από τον Hughes στο άρθρο του. Οι τιμές που

παρατίθενται στο άρθρο και στην παρούσα εργασία παρατηρούνται να έχουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους και μάλιστα σε επίπεδο χιλιοστού συνήθως. Όπως φαίνεται, ο υπολογισμός για τη διαθλαστική ισχύ του κερατοειδή προκύπτει 112.649D ενώ και ο Hughes (1979) εξάγει 112.649D. Ο κρυσταλλοειδής φακός υπολογίστηκε 243.991D, ενώ ως θεωρητική τιμή αναφέρθηκαν οι 244.0555D. Επιπρόσθετα, η ολική διαθλαστική ισχύς για τον οφθαλμό ως οπτικό σύστημα, μετά από πράξεις, προέκυψε 300.1992D ενώ στο άρθρο του Hughes (1979) υπολογίστηκε 300.705D. Αυτό, μπορεί να εξηγηθεί εύκολα με το γεγονός ότι οι παρόντες υπολογισμοί έγιναν με γλώσσα προγραμματισμού σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για την αποφυγή σφαλμάτων και χάριν ευκολίας και βέβαια, σε μια γλώσσα προγραμματισμού καθώς είναι αναμενόμενο γίνονται αναπόφευκτες οι στρογγυλοποιήσεις.

Ένας ακόμη περιορισμός είναι τα οπτικά του ματιού του αρουραίου. Οι φακοί που θα χρησιμοποιηθούν στο σύστημα περιορίζονται κατά πολύ από τον οφθαλμό του αρουραίου ως οπτικό σύστημα. Ως εκ τούτου, η απεικόνιση εξαρτάται προφανώς και από το ίδιο το πειραματόζωο.

Πρέπει παρόλα αυτά να σημειωθεί πως τα παραπάνω αποτελέσματα εξήχθησαν με υπολογισμούς απλού Ray Tracing και τα πάντα έγιναν με παραξονική προσέγγιση. Η μελέτη όμως ενός οφθαλμού δε μπορεί σε καμία περίπτωση να είναι με ακτίνες φωτός μικρότερες των 10°, όπως ορίζει η παραξονική προσέγγιση. Συγκεκριμένα, ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί πως η παρούσα μελέτη, έγινε για απεικόνιση του αμφιβληστροειδή για 40° ή 60°. Επιπλέον, οι προσεγγίσεις για τις ακτίνες φωτός έγιναν με απλή γεωμετρική οπτική, ενώ στην πραγματικότητα το φως διαδίδεται σε κύματα και μελλοντικά θα ήταν καλύτερη μία ανάλυση μετώπου κύματος με ακριβή μοντελοποίηση σε υπολογιστή, για να βρεθούν ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με την οπτική διάταξη.

Πιθανές βελτιώσεις στην παρούσα εργασία, θα είναι φυσικά η απεικόνιση της πορείας των ακτινών σε λογισμικό Ray Tracing, αφού επιλεγθούν πρώτα εστιακές αποστάσεις και διαμέτροι, για όλους τους φακούς του συστήματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο θα εξαχθεί με περισσότερη ακρίβεια η πορεία και η κλίση των ακτινών και θα υπάρχει μεγαλύτερη βεβαιότητα, ως προς την τελική αναμενόμενη στιγματική απεικόνιση του βυθού. Τέλος, θα πρέπει να στηθεί η οπτική διάταξη στον πάγκο και να κριθεί βεβαίως η χρησιμότητα της και η ποιότητα της απεικόνισης του αμφιβληστροειδικού ειδώλου, ώστε να φανεί τελικά αν βοηθά στις κλινικές μελέτες

για τις οποίες χρησιμοποιείται ο οφθαλμός του αρουραίου και να συμβάλει τελικά στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Z. Βιβλιογραφία

Άρθρα

- **Hughes, A.** (1979). A schematic eye for the rat. *Vision Res.* **19**: 569-588.
- **Hughes A.** (1977). The refractive state of the rat eye. *Vision Res.* **17**:927–39.
- **Hawes N.L., Smith R.S., Chang B., Davisson M., Heckenlively J.R., et al** (1999). Mouse fundus photography and angiography: a catalogue of normal and mutant phenotypes. *Mol Vis* **5**: 22.
- **Zambarakji H.J., Keegan D.J., Holmes T.M., et al.** (2006). High resolution imaging of fluorescein patterns in RCS rat retinae and their direct correlation with histology. *Exp Eye Res.* **82**:164–171.
- **Akula J.D., Favazza T.L., Mocko J.A. et al** (2010). The anatomy of the rat eye with oxygen-induced retinopathy. *DocOphthalmol* **120**(1):41–50.
- **Zhang Y., Fortune B. et al** (2008). Natural History and Histology in a Rat Model of Laser-Induced Photothrombotic Retinal Vein Occlusion. *Curr Eye Res.* **33**(4):365-376.
- **Cohan B.E., Pearch A.C., Jokelainen P.T., Bohr D.F.** (2003). Optic disc imaging in conscious rats and mice. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* **44**, 160–163.
- **Liu K., Akula J.D., Falk C., Hansen R.M., Fulton A.B.** (2006). The retinal vasculature and function of the neural retina in a rat model of retinopathy of prematurity. *Invest Ophthalmol Vis Sci* **47**:2639–47.
- **Hawes N.L., Smith R.S., Chang B., Davisson M., Heckenlively J.R., John S.W.** (1999). Mouse fundus photography and angiography: a catalogue of normal and mutant phenotypes. *Mol Vis*; **5**:22.
- **Timmers A.M., Zhang H., Squitieri A., Gonzalez-Pola C.** (2001). Subretinal injections in rodent eyes: effects on electrophysiology and histology of rat retina. *Mol Vis* **7**:131-7.
- **DeHoog E., Schwiegerling J.** (2009). Fundus camera systems: a comparative analysis. *Appl Opt.* **48**(2): 221–228.
- **DiLoreto D., Grover D., del Cerro C., del Cerro M.** (1994). A new procedure for fundus photography and fluorescein angiography in small laboratory animal eyes. *Curr Eye Res.* **13**:157-161.

Βιβλία

- **Huang D., Kaiser P., Lowder C, Traboulsi E.** (2006). Retinal Imaging, *Mosby-Elsevier*.
- **Saine P.J., Tyler M.E.** (2002). Ophthalmic Photography. Retinal Photography, Angiography and Electronic Imaging (2nd edition), *Buttleworth-Heinemann*.
- **Hecht E.** (2002). Optics (International Edition – 4th edition). *Addison – Wesley*.
- **Born M., Wolf E.** (1997). Principles of Optics; electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light (6th edition). *Cambridge University Press*.