



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΟΠΤΙΚΗ & ΟΡΑΣΗ



Μεταπτυχιακή Εργασία:

**“ Αξιολόγηση Ευαισθησίας Φωτεινής Αντίθεσης μετά
από Διαθλαστική Χειρουργική ”**

Τρισεύγενη Γιαννακοπούλου

Επιβλέπων: Δρ. Σωτήρης Πλαϊνης

Ακαδημαϊκό έτος 2005-2006



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΟΠΤΙΚΗ & ΟΡΑΣΗ



Μεταπτυχιακή Εργασία:

“Αξιολόγηση Ευαισθησίας Φωτεινής Αντίθεσης μετά
από Διαθλαστική Χειρουργική”

Τρισεύγενη Γιαννακοπούλου

Επιβλέπων: Δρ. Σωτήρης Πλαΐνης

Η παρούσα εργασία υπεβλήθη στις 28/02/2006 ως μέρος των υποχρεώσεων για την απονομή του μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Οπτική και Όραση» και παρουσιάστηκε στην Τριμελή Επιτροπή αποτελούμενη από τους:

1. Δρ. Σωτήρη Πλαΐνη
2. Δρ. Χαρίλαο Γκίνη
3. Ιωάννη Παλλήκαρη, Καθηγητή Οφθαλμολογίας

Περίληψη

Σκοπός: Στην καθημερινή κλινική πράξη, η διακριτική ικανότητα του συστήματος όρασης αξιολογείται με τη μέθοδο της οπτικής οξύτητας και την χρήση οπτότυπων. Τα οπτότυπα αποτελούνται από σειρές συμβόλων σταθερής αντίθεσης φωτεινότητας που μειώνονται σταδιακά σε μέγεθος με αποτέλεσμα η οπτική οξύτητα να μην αποτελεί αξιολόγηση της λειτουργικής όρασης. Για αυτόν τον σκοπό έχουν δημιουργηθεί οπτότυπα που αξιολογούν την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης, δηλαδή την αξιολόγηση της ποιότητας της όρασης με την χρήση ερεθισμάτων [π.χ. πλεγμάτων (gratings)] διαφορετικής χωρικής συχνότητας, φωτεινότητας και ευαισθησίας αντίθεσης. Σκοπός της παρούσης εργασίας ήταν να αξιολογηθεί η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης μετά από διαθλαστική χειρουργική. Επιπλέον αξιολογήθηκε η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού και για τεχνητές κόρες διαφορετικής διαμέτρου με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των εκτροπών υψηλής τάξης στην ποιότητα όρασης.

Μέθοδος: Στη μελέτη έλαβαν μέρος 23 συμμετέχοντες οι οποίοι υπεβλήθησαν σε επέμβαση (10 με LASIK – 13 με PRK) προκειμένου να διορθώσουν το διαθλαστικό τους σφάλμα. Οι μετρήσεις (οπτική οξύτητα, σφαιρο-κυλινδρικό σφάλμα, ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης) πραγματοποιήθηκαν προ-εγχειρητικά, ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση. Άλλοι 9 συμμετέχοντες αποτέλεσαν την ομάδα "ελέγχου", στους οποίους αξιολογήθηκε η σημασία της εκμάθησης. Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας Gabor gratings που παρουσιάζονταν σε μια οθόνη Sony GDM F-520 CRT (με ρυθμό ανανέωσης 120 Hz) με τη βοήθεια κάρτας γραφικών VSG 2/5 (CRS, Rochester, UK). Έξι χωρικές συχνότητες εξετάστηκαν: 1, 2, 4, 8, 12, 16 c/deg (σε κάθετο προσανατολισμό - 90deg), ενώ καταγραφόταν η μέση τιμή τριών μετρήσεων. Η ευαισθησίας καθορίστηκε χρησιμοποιώντας τη ψυχοφυσική μέθοδο binary-search. Τεχνητή κόρη 3 και 6mm χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να απομονωθεί η επίδραση των εκτροπών υψηλής τάξης στη αξιολόγηση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης. Η φωτεινότητα της οθόνης ρυθμίστηκε σε 30 και 7.5 cd/m², αντίστοιχα ώστε η αμφιβληστροειδική φωτεινότητα να είναι σταθερή. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και για φωτεινότητα 30 cd/m² και κόρη 6mm ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της φωτεινότητας. Οι εκτροπές υψηλής τάξης μετρήθηκαν με το COAS (Complete Ophthalmic Analysis System, Wavefront Sciences, Ltd) εκτροπόμετρο και εκφράστηκαν σε συμβολισμό κατά OSA (Optical Society of America).

Αποτελέσματα: Όταν η αμφιβληστροειδική φωτεινότητα είναι σταθερή, μεγαλύτερη ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης παρουσιάζεται σε κόρη διαμέτρου 3mm σε σχέση με τα 6mm. Η ευαισθησία σε υψηλές συχνότητες μειώνεται περισσότερο. Με τη μείωση της φωτεινότητας ελαττώνεται σημαντικά η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης κυρίως για τις χαμηλές και μεσαίες χωρικές συχνότητες. Ο μέσος όρος της οπτικής οξύτητας σε δεκαδική κλίμακα (με την καλύτερη διορθωμένη όραση) προ-εγχειρητικά, ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση ήταν 1.06 ± 0.21 (SD), 1.06 ± 0.10 και 1.09 ± 0.21 αντίστοιχα για την ομάδα LASIK και 1.15 ± 0.23 (SD), 1.02 ± 0.13 and 1.15 ± 0.13 για την ομάδα PRK. Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης παρουσιάζει βελτίωση ένα και τρεις μήνες μετά την διαθλαστική επέμβαση, ενώ όταν οι μετρήσεις τον τρίτο μήνα πραγματοποιούνται χωρίς την καλύτερη διόρθωση παρατηρείται μείωση, ιδιαίτερα στη συνθήκη χρήσης διαμέτρου κόρης 6mm. Όμως, βελτίωση στη ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης παρατηρήθηκε και στην ομάδα ελέγχου. Τη δεύτερη φορά εξέτασης παρουσιάστηκε σημαντική βελτίωση της ευαισθησίας όχι τόσο για τις χαμηλές, όσο για τις μεσαίες και υψηλές χωρικές συχνότητες (περίπου 2-5 dB), καθώς και για την μέγιστη διακριτική ικανότητα (3.0 c/deg). Αυτή η διαφορά ήταν περισσότερο εμφανής για 6mm διάμετρο κόρης και για 7.5 cd/m² φωτεινότητα grating). Όσον αφορά τις εκτροπές υψηλής τάξης, παρατηρείται αύξησή τους κυρίως ένα μήνα μετά την επέμβαση (λόγω της αύξησης της σφαιρικής εκτροπής), ενώ τρεις μήνες μετά παρουσιάζουν μια μικρή μείωση, χωρίς όμως να πλησιάζουν τις προ-εγχειρητικές τιμές. Δεν παρουσιάστηκε όμως σημαντική συσχέτιση μεταξύ των συνολικών εκτροπών και της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης.

Συμπεράσματα: Αν και η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης βελτιώνεται μετά από διαθλαστική χειρουργική είναι πολύ πιθανόν αυτό να οφείλεται στον παράγοντα της εκμάθησης μιας και διαπιστώθηκε σημαντική βελτίωση σε αυτήν τη δεύτερη φορά των μετρήσεων στην ομάδα ελέγχου. Όταν συνυπολογιστεί η εκμάθηση τότε τα αποτελέσματα οδηγούν σε μείωση της ευαισθησίας και επαναφορά αυτής τον τρίτο μήνα. Όταν η αμφιβληστροειδική φωτεινότητα είναι σταθερή, μεγαλύτερη ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης παρουσιάζεται σε κόρη διαμέτρου 3mm σε σχέση με τα 6mm. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού έχει διαπιστωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της κόρης, τόσο πιο σημαντική είναι η επίδραση των οφθαλμικών εκτροπών στην ποιότητα του αμφιβληστροειδικού ειδώλου. Επίσης, η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης ελαττώνεται σημαντικά σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού και ιδιαίτερα για τις υψηλές χωρικές συχνότητες. Είναι περίπου ίση και για τις δύο ομάδες, αν και μεγαλύτερες εκτροπές

παρουσιάζονται για την ομάδα LASIK. Όταν οι μετρήσεις τρεις μήνες μετά την επέμβαση πραγματοποιούνται χωρίς την καλύτερη διορθωμένη όραση παρατηρείται μείωση στην ευαισθησία, ιδιαίτερα για τα 6mm διάμετρο κόρης.

ABSTRACT

Purpose: Visual acuity for many years has been the standard procedure for assessing visual performance in optometric practice. Visual acuity involves the measurement of the recognition of small, high-contrast letters, which change in size. Unfortunately, conventional letter acuity is limited because, despite proper refractive correction, some visual problems, which mainly affect low contrast detection, may not be well demonstrated with conventional letter charts. Moreover, because the real world is composed of objects of varying sizes and contrasts, visual acuity is a simplistic assessment of visual performance for every day visual tasks. Contrast sensitivity function (CSF) is a measure of contrast threshold for a range of objects sizes and is conventionally measured by finding the contrast threshold of sine-wave gratings of varying spatial frequencies. As a result, contrast sensitivity measures may allow a more complete investigation of visual function and can be used to detect visual problems at early stage. The purpose of this study was to evaluate changes in visual performance after refractive surgery, comparing contrast sensitivity, visual acuity and high order aberrations for the two mostly used techniques: photorefractive keratectomy (PRK) and laser in situ keratomileusis (LASIK). Moreover, the effect of pupil size and retinal illuminance on contrast sensitivity was investigated.

Methods: Twenty-three subjects volunteered to participate in the study. The mean age was 25.4 ± 5.1 SD). The dominant eyes of 10 LASIK and 13 PRK myopic patients, corrected with the Laser Allegretto (Wavelight Technologies). Nine more subjects served as the control group. Best-corrected contrast sensitivity (C.S) was measured preoperatively, 1 and 3 months after refractive surgery. C.S was evaluated using Gabor patches of gratings displayed on a Sony GDM F-520 CRT display (frame rate of 120 Hz) by means of a VSG2/5 stimulus generator card (CRS, Rochester, UK). Gabor patches, measured 100 pixels in diameter at half height in the centre of the display, with a standard deviation subtending 1.2 deg at a 2 m distance. Six spatial frequencies, 1, 2, 4, 8, 12 and 16 c/deg were tested. The average of three thresholds was taken. Threshold was determined using a binary-search staircase with a contrast resolution of 1dB (0.05 log units). An artificial pupil was used to isolate the ocular high order aberrations for

3mm and 6mm diameter pupil. A COAS (Complete Ophthalmic Analysis System, Wavefront Sciences, Ltd) aberrometer was used for measuring the aberrations. The luminance of the Sony display was 30 and 7.5 cd/m², respectively, so that the retinal illuminance was equal in the two conditions. Moreover, the contrast sensitivity was evaluated for 30 cd/m² and for 6mm diameter pupil in order to evaluate the effect of the luminance.

Results: For equal amounts of retinal luminance, contrast sensitivity was higher at 3mm diameter pupil compared to 6mm. Contrast sensitivity was for 6mm was depressed especially for high spatial frequencies. When luminance was reduced, contrast sensitivity was decreased especially for low and medium spatial frequencies. Preoperatively, and at 1 and 3 months, the mean decimal BCVA was 1.06±0.21 (SD), 1.06±0.10 and 1.09±0.21 respectively for LASIK subjects and 1.15±0.23 (SD), 1.02±0.13 and 1.15±0.13 for PRK subjects. Contrast sensitivity increased 1 and 3 months after refractive surgery. While the measurements take place without correction 3 months post-operatively, contrast sensitivity decreased especially for 6mm diameter pupil. Contrast sensitivity also improved for the control group. At the second visit there was a significant improvement especially for the high spatial frequencies (2 to 5 dB). This difference was more obvious for 7.5 cd/m² grating luminance. The root mean square (RMS) values of ocular high-order aberrations after refractive surgery were significantly greater one month post-operatively, decreasing three months following refractive surgery. The root mean square (RMS) values of ocular higher-order aberrations after LASIK and PRK were significantly greater one month following the surgery than before (the biggest increase was observed for the spherical aberration). At three months later there was a decrease in high order aberrations. Aberrations were higher for the LASIK group. There was no significant correlation among high order aberrations and contrast sensitivity.

Conclusions: An increase in contrast sensitivity in post-PRK and post-LASIK eyes was observed, but this may be due to the training effect. When this was taken into account a depression in contrast sensitivity (mainly the higher spatial frequencies) one month post-operatively, was observed. Contrast sensitivity recovered to pre-operative levels at 3 months. Corneal surface irregularities after laser vision correction induce significant ocular aberrations apart from scattering errors. When retinal illuminance is steady, pre-operatively, bigger amounts of contrast sensitivity were found for 3mm diameter pupil.

The decreased performance at 6mm may be attributed to the increased levels of ocular aberration, although no significant correlation was found between contrast sensitivity and ocular aberrations. When the measurements took place at 3 months following refractive surgery without the best corrected refraction a decrease in contrast sensitivity was evident, especially for the 6mm diameter pupil.

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου...

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω:

Το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (Ι. Κ. Υ) του οποίου ήμουν υπότροφος κατά τη διάρκεια της απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου. Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω τη διευθύντρια του ιδρύματος κ. Κ. Κουκουλομμάτη και την κ. Ι. Αδαμαντιάδου.

Την τριμελή μου επιτροπή και ιδιαιτέρως τον επιβλέποντά μου Δρ. Σωτήρη Πλαϊνή για το πρωτότυπο και πολύ ενδιαφέρον θέμα που μου εμπιστεύτηκε. Κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας (που για μένα υπήρξε άψογη) θαύμασα την αγάπη του για το αντικείμενο της δουλειάς του και τη συνεχή και ακούραστη αναζήτηση νέων στοιχείων στην έρευνα, τις μεθοδευμένες και άψογα δομημένες σκέψεις του, τις γνώσεις και εμπειρίες του που εισέπραξα. Όταν τον χρειάστηκα ήταν πάντα δίπλα μου, με αποτέλεσμα η τελική μορφή της εργασίας μου να οφείλεται κατά ένα μεγάλο μέρος στην επίβλεψη και στις διορθώσεις του. Θα ήταν παράληψή μου να μην τον ευχαριστήσω για τα λόγια με τα οποία προλόγισε την εργασία μου κατά την παρουσίασή της και εμένα προσωπικά...αυτά ήταν για μένα η μεγαλύτερη ανταμοιβή...

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΟΠΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΝΕΥΡΩΝΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	12
1.1 Το αισθητήριο όργανο της όρασης	12
1.1.2 Οπτική επεξεργασία από τον αμφιβληστροειδή	12
1.2 Κερατοειδής χιτώννας	15
1.2.1 Ιστολογική δομή του κερατοειδή.....	16
1.2.2 Υδατοειδές υγρό	18
1.2.3 Κρυσταλλοειδής φακός.....	18
1.2.4 Υαλοειδές σώμα.....	19
1.3 Ποιότητα αμφιβληστροειδικής εικόνας.....	20
1.3.1 Διαθλαστικά σφάλματα	20
1.3.2 Εκτροπές υψηλής τάξης.....	22
1.3.3 Χρωματική εκτροπή (chromatic aberration).....	24
1.3.4 Σκέδαση	25
1.4 Γενικά περί ακτίνων Laser	25
1.4.1 Επιδράσεις των ακτίνων laser σε βιολογικούς ιστούς	26
1.4.2 Excimer Laser	27
1.4.3 Ο μηχανισμός της εκρηκτικής φωτοαποδόμησης.....	28
1.4.4 Ρυθμός φωτοαποδόμησης.....	29
1.4.5 Διαθλαστικές επεμβάσεις.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΟΡΑΣΗΣ.....	34
2.1 Εισαγωγή.....	34
2.1.2 Μεθοδολογίες εύρεσης της ουδούς.....	37
2.1.3 Gratings.....	38
2.1.4 Όργανα μέτρησης της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης στην κλινική πράξη.....	40
2.1.5 Πρακτικές εφαρμογές της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης	43
2.2 Σκοπός της μελέτης	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	46
3.1 Συμμετέχοντες	46
3.2 Διαδικασία καταγραφής - Όργανα μέτρησης	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	55
4.1 Αξιολόγηση ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης.....	55
4.2 Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης - Διάμετρος κόρης	57
4.3 Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης – Φωτεινότητα grating	58
4.4 Διαθλαστική χειρουργική	59
4.4.1 Διαθλαστική χειρουργική και οπτική οξύτητα	59
4.4.2 Διαθλαστική χειρουργική και ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης	63
4.4.3 Μετεγχειρητική αξιολόγηση (PRK subjects)	65
4.4.4 LASIK VS PRK.....	67
4.5 Η σημασία της εκμάθησης	69
4.6 Διαθλαστική χειρουργική και εκτροπές υψηλής τάξης.....	72
4.6.1 Εκτροπές υψηλής τάξης - Αξιολόγηση.....	72

4.6.2 Η επίδραση των εκτροπών υψηλής τάξης στην ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	78
5.1 Εισαγωγή.....	78
5.2 Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης	79
5.2.1 Η σημασία της διαμέτρου της κόρης	79
5.2.2 Η σημασία της φωτεινότητας	79
5.3 Διαθλαστική χειρουργική - Οπτική οξύτητα - Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης – Εκτροπές.....	80
5.4 Περιορισμοί παρούσης εργασίας.....	83
5.5 Μελλοντική Εργασία	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΟΠΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΝΕΥΡΩΝΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

1.1 Το αισθητήριο όργανο της όρασης

Ο οφθαλμός αποτελεί το αισθητήριο όργανο της όρασης. Βρίσκεται σε προστατευτική οστική δομή του κεφαλιού (τις κόγχες), έχουν σφαιροειδή κατασκευή και διαθέτουν σύστημα φακών για να εστιάζεται το φως στους υποδοχείς (στοιβάδα υποδοχέων όπου τα φωτεινά ερεθίσματα μετατρέπονται σε νευρικές ώσεις) και σύστημα αγωγής νευρικών ώσεων από τους υποδοχείς στον οπτικό φλοιό. Ο οφθαλμός αποτελείται από έξω προς τα μέσα, από τρεις χιτώνες: τον ινώδη, τον αγγειώδη και τον αμφιβληστροειδή.

Ο **ινώδης** χιτώνας αποτελείται από δύο μέρη: από τον κερατοειδή χιτώνα (μπροστά) και από τον σκληρό χιτώνα (πίσω). Ο **αγγειώδης** χιτώνας αποτελείται από τρία μέρη από εμπρός προς τα πίσω: την ίριδα, το ακτινωτό σώμα και το χοριοειδή χιτώνα. Τέλος δε υπάρχει ο **αμφιβληστροειδής**¹ ο οποίος είναι ο φωτοευαίσθητος χιτώνας του οφθαλμού. Καλύπτει από μέσα τον αγγειώδη χιτώνα και αποτελείται από δύο πέταλα: το έξω ή μελάγχρουν επιθήλιο και το μέσα ή οπτικό πέταλο (ο ιδίως αμφιβληστροειδής)(σχήμα: 1).

1.1.2 Οπτική επεξεργασία από τον αμφιβληστροειδή

Η όραση αποτελεί μάλλον την πλέον ανώτερη αισθητηριακή λειτουργία, όπως είναι η αντίληψη του φωτός, των αντικειμένων και των χρωμάτων. Χάρη σε αυτήν την ικανότητα ερχόμαστε σε επαφή με το γύρω κόσμο και συνειδητοποιούμε τη θέση μας και την κίνηση μας μέσα στο χώρο.

Η οπτική αντίληψη αρχίζει στον αμφιβληστροειδή και πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Το φως που διέρχεται τον κερατοειδή χιτώνα προβάλλεται στο βυθό του οφθαλμού, όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα από ένα εξειδικευμένο αισθητήριο όργανο, τον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Στη συνέχεια, τα σήματα αυτά μεταβιβάζονται μέσω του οπτικού νεύρου, αρχικά στον έξω γονατώδη πυρήνα (LGN), στη συνέχεια στο κέντρο της όρασης (V1, πρωτοταγής οπτικός φλοιός) και στη συνέχεια σε ανώτερα

¹ Ο αμφιβληστροειδής είναι ελαφρώς μεγαλύτερος (32mm κατά μήκος του οριζόντιου άξονα - 1094mm² έκταση) και λίγο παχύτερος (150μm στο κεντρικό βοθρίο – 400μm στο όριο του βοθρίου – 200μm στην περιφέρεια) από ένα γραμματόσημο. Είναι συνδεδεμένος με το χοριοειδή στο οπτικό νεύρο και την πριονωτή περιφέρεια (ora serrata) (σχήμα: 1).

κέντρα του εγκεφάλου για περαιτέρω επεξεργασία, αναγκαία για την αντίληψη (όπως στο V4 για την αποκωδικοποίηση του χρώματος, της μορφής και του σχήματος των εικόνων και στο V5 για τον προσανατολισμό, την κίνηση και το βάθος πεδίου των εικόνων). Εκεί οι οπτικές πληροφορίες αναλύονται και εκδηλώνονται μέσω αντιδράσεων του μυοσκελετικού μας συστήματος.

Ο αμφιβληστροειδής αποτελείται από διαφορετικούς τύπους νευρώνων (ουσιαστικά ειδικευμένα εγκεφαλικά κύτταρα) που μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: τους φωτοϋποδοχείς (ραβδιοφόρα και τα κωνιοφόρα κύτταρα), τους ενδιάμεσους νευρώνες (δίπολα κύτταρα, οριζόντια κύτταρα, βραχύινα κύτταρα) και τα γαγγλιακά κύτταρα (σχήμα: 1).

Φωτοϋποδοχείς: στον πίνακα 1 συνοψίζονται οι σημαντικότεροι παράγοντες οι οποίοι συμβάλλουν στη διαφορετικότητα των δύο τύπων φωτοϋποδοχέων, των ραβδίων και των κωνίων.

Ραβδιοφόρα κύτταρα	Κωνιοφόρα κύτταρα
Αριθμός: 120 Εκ.	Αριθμός: 5 Εκ.
Μεγάλη ευαισθησία	Μικρότερη ευαισθησία
Εξειδικευμένα για όραση τη νύχτα	Εξειδικευμένα για όραση την ημέρα
Περισσότερη φωτοχρωστική, δεσμεύουν περισσότερο φως	Λιγότερη φωτοχρωστική
Μικρή χρονική διακριτική ικανότητα: βραδεία απόκριση, μεγάλος χρόνος ολοκλήρωσης	Μεγάλη χρονική διακριτική ικανότητα: ταχεία απόκριση, μικρός χρόνος ολοκλήρωσης
Περισσότερο ευαίσθητα στο διάχυτο φως	Πάρα πολύ ευαίσθητα στις άμεσες αξονικές ακτίνες
Σύστημα ραβδιοφόρων κυττάρων	Σύστημα κωνιοφόρων κυττάρων
Μικρή οπτική οξύτητα: μεγάλη σύγκλιση οδών αμφιβληστροειδούς, δεν υπάρχει στο κεντρικό βόθρο	Μεγάλη οπτική οξύτητα: μικρότερη σύγκλιση οδών αμφιβληστροειδούς, συγκεντρωμένο στο κεντρικό βόθρο
Άχρωμη όραση: ένας τύπος χρωστικοφόρων ραβδίων	Έγχρωμη όραση: τρεις τύποι κωνίων, καθένας με χωριστή χρωστική η οποία είναι πιο ευαίσθητη σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του ορατού φάσματος (419, 531, 559nm)

Πίνακας 1: Νευροφυσιολογικές διαφορές μεταξύ ραβδιοφόρων και κωνιοφόρων κυττάρων.

Δίπολα και οριζόντια κύτταρα. Τα κύτταρα αποκαλούνται δίπολικά επειδή παρουσιάζουν δύο σημεία σύνδεσης. Η μία σύνδεση πραγματοποιείται με το φωτοϋποδοχέα και η άλλη με ένα γαγγλιακό κύτταρο. Ορισμένα δίπολα έρχονται σε επαφή μόνο με κωνία (cone bipolars) και άλλα μόνο με ραβδία (rod bipolars). Αν και ορισμένα κωνιο-δίπολα (κυρίως στο κέντρο του αμφιβληστροειδή) έρχονται σε άμεση

επαφή με μόνο ένα κωνίο, είναι πιθανό να δέχονται και έμμεσες πληροφορίες από άλλα κωνία (μέσω των οριζόντιων κυττάρων ή συνάψεων των φωτοϋποδοχέων με άλλους φωτοϋποδοχείς). Σε αντίθεση, κάθε ραβδίο έρχεται σε επαφή με 2 έως 5 ραβδιο-δίπολα, ενώ κάθε ραβδιο-δίπολο δέχεται πληροφορίες από 30 έως 50 διαφορετικά ραβδία. Αν και τα δίπολα κύτταρα μεταβιβάζουν τις πληροφορίες κατακόρυφα στην οπτική οδό (vertical pathway), τα οριζόντια κύτταρα μεταβιβάζουν τις πληροφορίες πλαγίως (lateral pathway).

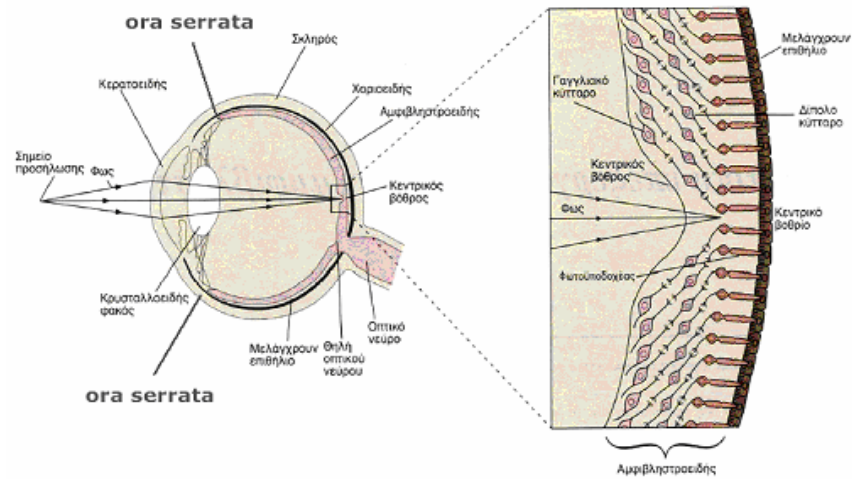
Αμακρύινα ή βραχύινα κύτταρα. Αποτελούν μια ξεχωριστή ομάδα κυττάρων στον αμφιβληστροειδή. Υπάρχουν πολλοί τύποι αμακρύινων κυττάρων που διαφέρουν στο μέγεθος, στη μορφολογία και στη λειτουργία. Συχνά διαμορφώνουν διασυνδέσεις μεταξύ των δίπολικών και των γαγγλιακών κυττάρων, αλλά και μεταξύ τους, διανέμοντας τις πληροφορίες πλαγίως (όπως τα οριζόντια κύτταρα).

Γαγγλιακά κύτταρα. Αποτελούν την τελευταία ξεχωριστή ομάδα κυττάρων στον αμφιβληστροειδή. Σε αντίθεση με τους φωτοϋποδοχείς, οι οποίοι αποκρίνονται στο φως με βαθμιαίες αλλαγές του δυναμικού μεμβράνης, κάθε γάγγλιο διαβιβάζει τις πληροφορίες στον εγκέφαλο ως σειρές δυναμικών ενέργειας.

Στο πίσω μέρος του οφθαλμού, βρίσκεται η **ωχρά κηλίδα**, μια κιτρινωπή, ελλειπτική περιοχή, διαμέτρου περίπου 5.0mm (αντιστοιχεί σε 17° οπτικής γωνίας).

Την κεντρική περιοχή της ωχράς κηλίδας καταλαμβάνει το **βοθρίο**, με διάμετρο 1.5mm (5°). Η κεντρική του περιοχή (1°) ονομάζεται **κεντρικό βοθρίο**, το οποίο αποτελεί το λεπτότερο σημείο του αμφιβληστροειδή (~150μm), στερείται ραβδίων και εμφανίζει τη μέγιστη ευκρίνεια λόγω της υψηλής πυκνότητας κωνίων.

Στην πίσω επιφάνεια του αμφιβληστροειδή 4.5mm (11.8°) ρινικά του κεντρικού βοθρίου βρίσκεται η **οπτική θηλή**, η οποία στερείται φωτοϋποδοχέων και γι' αυτό το λόγο δημιουργεί ένα τυφλό σημείο στο οπτικό μας πεδίο.



Σχήμα 1: Οριζόντια τομή οφθαλμικού βολβού και θέση του αμφιβληστροειδή σε αυτόν (αριστερά), λειτουργικές κατηγορίες νευρώνων (δεξιά).

1.2 Κερατοειδής χιτώνας

Ο κερατοειδής χιτώνας καταλαμβάνει το πρόσθιο και διαφανές τμήμα του ινώδη χιτώνα του οφθαλμικού βολβού και αποτελεί το κυριότερο διαθλαστικό μέσο του οπτικού συστήματος του οφθαλμού. Η διαθλαστική του ισχύς ανέρχεται περίπου σε 45 διοπτρίες και η διαφάνειά του επιτρέπει την διόδο εντός του οφθαλμού των φωτεινών ακτίνων που προέρχονται από τα διάφορα αντικείμενα του περιβάλλοντος χώρου, για να ερεθίσουν τον αμφιβληστροειδή. Είναι ένας ανάγγειος ιστός, ο οποίος αποτελεί το πρόσθιο 1/6 τμήμα του βολβού του οφθαλμού, ενώ τα υπόλοιπα 5/6 αποτελούν τον αδιαφανή σκληρό χιτώνα του οφθαλμικού βολβού. Για να εκπληρώσει ο κερατοειδής τον φυσικό του ρόλο για τον οποίο έχει κατασκευαστεί πρέπει να παραμένει πάντα διαφανής. Ο κυριότερος παράγοντας που συμβάλλει στη διαφάνεια του κερατοειδή είναι η ομοιόμορφη και κανονική διάταξη των ελασμάτων του στρώματος, αλλά και των κολλαγόνων ινιδίων που τα αποτελούν, καθώς και η ύπαρξη μικρού αριθμού κυττάρων στο στρώμα. Στη φυσιολογική του κατάσταση είναι διαφανής και αποτελείται από πέντε στοιβάδες.

Είναι γνωστό, ότι μικρές μεταβολές στην καμπυλότητα του επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στη διαθλαστική του ισχύ. Για το λόγο αυτό, τις τελευταίες δεκαετίες μεγάλο ενδιαφέρον έχει εστιαστεί στη διόρθωση των διαθλαστικών ανωμαλιών του οφθαλμού, με χειρουργική τροποποίηση της κυρτότητας της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδή. Η λειτουργική του ακεραιότητα αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ακριβή οπτική

του απόδοσης και ως εκ τούτου, κάθε χειρουργική τεχνική πρέπει να αποβλέπει στη διατήρησή της.

1.2.1 Ιστολογική δομή του κερατοειδή

Στην εξωτερική πλευρά υπάρχει το **επιθήλιο** το οποίο αποτελείται από 5-7 στρώματα κυττάρων στο κέντρο του κερατοειδούς, ενώ στην περιφέρεια γίνεται παχύτερο και φτάνει τις 10 στοιβάδες, αντίστοιχα προς το σκληροκερατοειδές όριο, όπου μεταπίπτει στο επιθήλιο του επιπεφυκότα. Το επιθήλιο αποτελεί το 10% περίπου του συνολικού πάχους του κερατοειδή και έχει πάχος 50μ στο κέντρο και 80μ στην περιφέρεια. Αποτελείται από 3 είδη κυττάρων, τα βασικά επιθηλιακά, τα πτερυγοειδή πολυγωνικά και τα επιφανειακά κύτταρα. Ο χρόνος που απαιτείται για μια πλήρη αναγέννηση του επιθηλίου είναι 7 ημέρες (σχήμα: 2).

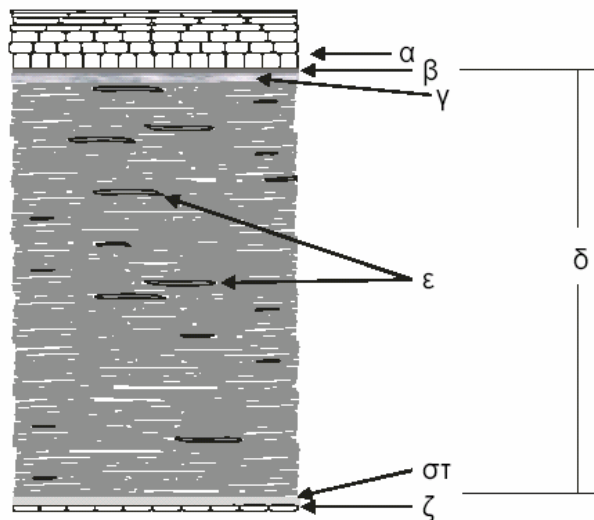
Η **βασική μεμβράνη** αποτελεί ξεχωριστή δομή του κερατοειδούς και είναι τοποθετημένη μεταξύ της βασικής στοιβάδας των επιθηλιακών κυττάρων και της μεμβράνης του Bowman, σχηματίζει φραγμό που απομονώνει τις διαταραχές του κερατοειδούς από το υποκείμενο στρώμα (σχήμα: 2).

Ακολουθεί η **μεμβράνη του Bowman** η οποία είναι ακόμα μία ξεχωριστή στοιβάδα του κερατοειδή, αλλά ουσιαστικά είναι συνέχεια του στρώματος στο οποίο μεταπίπτει χωρίς να είναι δυνατόν να την αποχωρήσουμε απ' αυτό. Είναι ακυτταρική, πάχους 8-10μ και αποτελείται από κολλαγόνο και θεμέλιο ουσία. Η πρόσθια επιφάνεια της μεμβράνης του Bowman είναι λεία και ομαλή, εν αντιθέσει με την οπίσθια, η οποία είναι ασαφής και συγχέεται με το δίκτυο των κολλαγόνων ινιδίων του προσθίου στρώματος. Η μεμβράνη του Bowman συμμετέχει ενεργά στη στερεότητα και αντοχή του κερατοειδή (σχήμα: 2).

Στη συνέχεια υπάρχει το **στρώμα** του κερατοειδή το οποίο αντιπροσωπεύει περίπου το 90% του συνολικού πάχους του κερατοειδή. Σχηματίζεται από ελάσματα κολλαγόνων ινιδίων, κύτταρα και θεμέλιο ουσία. Τα ελάσματα από κολλαγόνο επικάθονται το ένα επί του άλλου και διατάσσονται παράλληλα τόσο μεταξύ τους όσο και προς την επιφάνεια του κερατοειδή. Κάθε έλασμα αποτελείται από κολλαγόνα ινίδια, που περιβάλλονται από θεμέλια ουσία. Τα κολλαγόνα ινίδια είναι παράλληλα μεταξύ τους και αρμονικά διατεταγμένα. Η διάταξη αυτή αποτελεί την κύρια αιτία της διαφάνειας του κερατοειδούς. Τα κύτταρα του στρώματος διακρίνονται σε μόνιμα (κερατοκύτταρα) και σε μεταναστευτικά (λεμφοκύτταρα, πολυμορφοπύρρηνα, λευκοκύτταρα και μακροφάγα). Η θεμέλιος ουσία, η οποία συμπληρώνει τον χώρο μεταξύ των ινιδίων του κολλαγόνου, αποτελείται από πρωτεογλυκάνες και γλυκοζαμινογλυκάνες (σχήμα: 2).

Η **δεσκεμέτειος μεμβράνη** αποτελεί τη βασική μεμβράνη του ενδοθηλίου, από το οποίο και προέρχεται. Κατά τη γέννηση έχει πάχος 4μ, στον ενήλικα δε φθάνει τα 10μ. Είναι ομοιογενής μεμβράνη η οποία εύκολα μπορεί να αποχωριστεί από το στρώμα και το ενδοθήλιο. Αποτελείται από λεπτά κολλαγόνα ινίδια, με ομοιόμορφη κατανομή, διαφορετικά όμως από αυτά του στρώματος (σχήμα: 2).

Τελευταία στοιβάδα του κερατοειδούς είναι το **ενδοθήλιο** που αποτελείται από μία μονοκυτταρική στρώση εξαγωγικών κυττάρων, τα οποία αφενός δεν αναγεννώνται και αφετέρου παίζουν ζωτικό ρόλο στη διατήρηση της διαύγειας του κερατοειδή μέσω της άντλησης νερού από τον κερατοειδή προς τον πρόσθιο θάλαμο. Αυτή η αντλία εξασφαλίζει την πυκνή διάταξη των ινών κολλαγόνου του στρώματος σε διαφορετικές στρώσεις. Σε περίπτωση ανεπάρκειας του ενδοθηλίου να επιτελέσει αυτή τη λειτουργία η μέση απόσταση μεταξύ των ινών του κολλαγόνου αυξάνει (οίδημα), με αποτέλεσμα τη σκέδαση και την απώλεια της διαύγειας του κερατοειδή. Η πυκνότητα των ενδοθηλιακών κυττάρων σε νέους ενήλικες ανέρχεται σε 3000-4000 κύτταρα/mm². Η πυκνότητα αυτή με την πάροδο της ηλικίας ελαττώνεται λόγω θανάτου και μη αντικατάστασής τους, επειδή το ενδοθήλιο δεν εμφανίζει μιτωτική δραστηριότητα. Τα εναπομείναντα εκάστοτε ενδοθηλιακά κύτταρα πληρούν τις θέσεις των απολεσθέντων γειτονικών κυττάρων αποπλατυνόμενα και μετακινούμενα, ώστε να καλύψουν τα κενά, διαδικασία που είναι βραδεία. Εν τούτοις, υπάρχει μια κριτική πυκνότητα (400-700 κύτταρα/mm²) κάτω από την οποία το ενδοθήλιο αδυνατεί να επιτελέσει τη φυσιολογική του λειτουργία (σχήμα: 2).



Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση της ιστολογικής δομής του κερατοειδή (α: επιθήλιο, β: βασική μεμβράνη, γ: στοιβάδα του Bowman, δ: στρώμα, ε: κερατοκύτταρα, στ: δεσκεμέτειος μεμβράνη, ζ: ενδοθήλιο).

1.2.2 Υδατοειδές υγρό

Υδατοειδές υγρό ονομάζεται το διαφανές υγρό που βρίσκεται μεταξύ του πρόσθιου και του οπίσθιου θαλάμου του οφθαλμού. Παράγεται από το ακτινωτό σώμα και αποχετεύεται από το αποχετευτικό σύστημα της γωνίας του προσθίου θαλάμου, ενώ έχει την ικανότητα να ανανεώνεται συνεχώς. Η ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της αποχέτευσης του υδατοειδούς υγρού έχει σαν αποτέλεσμα τη διατήρηση της ενδοφθάλμιας πίεσης σε φυσιολογικά επίπεδα.

1.2.3 Κρυσταλλοειδής φακός

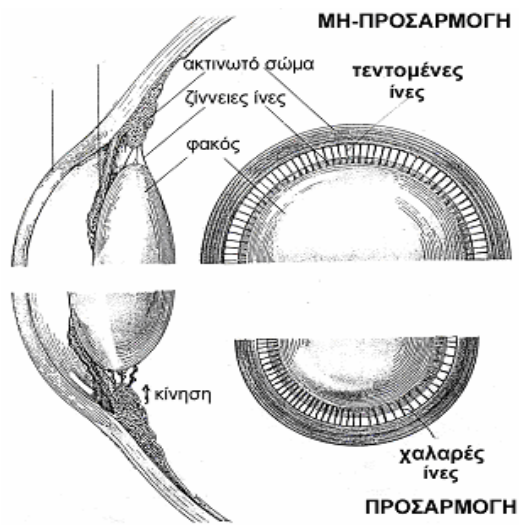
Ο φακός του οφθαλμού έχει σχήμα αμφίκυρτο και βρίσκεται μεταξύ της οπίσθιας επιφάνειας της ίριδας και της πρόσθιας επιφάνειας του υαλοειδούς σώματος. Εμφανίζει δύο επιφάνειες (την πρόσθια και την οπίσθια), τον ισημερινό και δύο πόλους. Το κέντρο της πρόσθιας επιφάνειας καλείται πρόσθιος πόλος του φακού και το κέντρο της οπίσθιας οπίσθιος πόλος του φακού. Η νοητή γραμμή που συνδέει τους δύο πόλους καλείται προσθιοπίσθιος άξονας του φακού και αντιστοιχεί στο πάχος αυτού.

Η πρόσθια επιφάνεια είναι λιγότερο κυρτή από την οπίσθια. Ο φακός είναι διαφανής και ελαστικός, στερείται αγγείων και νεύρων, ενώ τρέφεται από τα υγρά που τον περιβάλλουν. Συγκρατείται στη θέση του από το κυκλικό σώμα με τη ζώνη του Zinn. Η ζώνη του Zinn αποτελείται από ένα σύνολο λεπτών, ακτινοειδώς διατεταγμένων, διαφοροποιημένων κολλαγόνων ινών, που ξεκινούν από το επιθήλιο των ακτινοειδών προβολών και καταλήγουν στο περιφάκιο. Ανατομικά ο φακός αποτελείται από τρία μέρη: το περιφάκιο, το επιθήλιο του φακού και την ιδίως ουσία του φακού.

Ο δείκτης διάθλασης του κρυσταλλοειδούς φακού δεν είναι ομοιογενής. Είναι μεγαλύτερος στο κέντρο του φακού και μειώνεται στην περιφέρεια. Στην περιοχή του πυρήνα του φακού (κεντρική περιοχή) ο δείκτης διάθλασης είναι σχεδόν σταθερός, με τις σημαντικότερες μεταβολές να λαμβάνουν χώρα στο φλοιό (περιφέρεια του φακού). Αυτή η διαφοροποίηση του δείκτη διάθλασης έχει σαν αποτέλεσμα τη σταδιακή και συνεχή διάθλαση των εισερχόμενων ακτίνων στον οφθαλμό, μειώνοντας έτσι τις σφαιρικές εκτροπές (spherical aberrations), συμμετέχοντας έτσι στη βελτίωση της ποιότητας των αντιλαμβανόμενων εικόνων από τον οφθαλμό.

Ο φακός και ο μηχανισμός προσαρμογής. Η προσαρμογή είναι φαινόμενο αντανακλαστικό και εκλύεται όταν το σχηματιζόμενο αντικείμενο στον αμφιβληστροειδή δεν είναι σαφές. Ο οφθαλμός εφ' όσον κοιτάζει ένα αντικείμενο που βρίσκεται μακριά,

βλέπει εκ κατασκευής ευκρινώς (εμμετρωπικός οφθαλμός). Όταν όμως κοιτάζει ένα αντικείμενο που βρίσκεται κοντά, για να το δει ευκρινώς πρέπει να προσαρμόσει. Η προσαρμογή γίνεται με την ενέργεια του ακτινωτού μυός που μεταδίδεται στις ίνες της Ζιννείου ζώνης και μέσω αυτών στο φακό. Όταν το άτομο βλέπει ένα αντικείμενο μακριά, ο ακτινωτός μυς βρίσκεται σε χάλαση και οι ίνες της Ζιννείου ζώνης σε διάταση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κυκλωτερή και ομότιμο έλξη του περιφακίου στον ισημερινό και τη μείωση της καμπυλότητας του κρυσταλλοειδούς φακού. Αντίθετα, κατά τη διαδικασία της προσαρμογής, όταν ο οφθαλμός χρειάζεται να μεταβάλλει την εστίαση του από μακρινά σε κοντινά αντικείμενα, το ακτινωτό σώμα συσπάται και προκαλεί χαλάρωση των ινών της Ζιννείου ζώνης. Έτσι ο φακός γίνεται σφαιρικότερος, αυξάνει το πάχος του στο κέντρο καθώς και οι ακτίνες καμπυλότητας των επιφανειών του (σχήμα: 3).



Σχήμα 3: Ο μηχανισμός της προσαρμογής.

Όταν κοιτάμε ένα μακρινό αντικείμενο, ο ακτινωτός μυς έχει τη μέγιστη διάμετρο και κρατάει τις ίνες της Ζιννείου ζώνης τεντωμένες. Αυτές με τη σειρά τους ασκούν δυνάμεις τάνυσης που «επιπεδώνουν» τις επιφάνειες του φακού. Κατά την προσαρμογή, ο ακτινωτός μυς συσπάται (η διάμετρος του ακτινωτού σώματος μειώνεται). Όταν ο μυς συσπάται, οι ίνες χαλαρώνουν με αποτέλεσμα ο φακός να ανακτά πιο «σφαιρική» μορφή και να αυξάνεται η διοπτρική του δύναμη. Παράλληλα, η πρόσθια επιφάνεια μετακινείται προς τον κερατοειδή, ενώ η οπίσθια επιφάνεια παραμένει σχεδόν στην ίδια θέση.

1.2.4 Υαλοειδές σώμα

Το υαλοειδές σώμα είναι μια ζελατινώδης ουσία που εκτείνεται πίσω από το φακό έως τον αμφιβληστροειδή, καταλαμβάνοντας το 80% του εσωτερικού περιεχομένου του

οφθαλμού. Έχει δομικό (στηρικτικό) ρόλο και συμμετέχει στη λειτουργική διασύνδεση όλων αυτών των δομών με τις οποίες βρίσκεται σε επαφή. Ο δείκτης διάθλασης του υαλοειδούς σώματος αντιστοιχεί περίπου σ' εκείνον του υδατοειδούς υγρού ($n=1.33$).

1.3 Ποιότητα αμφιβληστροειδικής εικόνας

Η διακριτική ικανότητα του οπτικού μας συστήματος ορίζεται από την ποιότητα του ειδώλου που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή (το φωτοευαίσθητο χιτώνα του οφθαλμού), αλλά επίσης περιορίζεται από ανατομικούς και φυσιολογικούς παράγοντες².

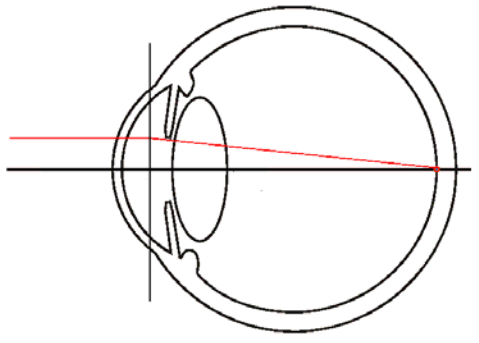
Με την σειρά της η ποιότητα της εικόνας στον αμφιβληστροειδή εξαρτάται από την πιθανή παρουσία οφθαλμικών σφαλμάτων (π.χ. μυωπία, υπερμετρωπία, αστιγματισμός) αλλά επίσης και οπτικών εκτροπών υψηλής τάξης (π.χ σφαιρική εκτροπή, κόμα), από το μέγεθος της κόρης του οφθαλμού (φαινόμενο περίθλασης), από τη χρωματική εκτροπή, τη σκέδαση και από τη σταθερότητα και ακρίβεια της προσαρμοστικής ικανότητας του φακού.

1.3.1 Διαθλαστικά σφάλματα

Για κάθε οφθαλμό υπάρχει ένα σημείο στο χώρο από το οποίο οι προερχόμενες φωτεινές ακτίνες, διαθλώμενες από το οπτικό σύστημα του οφθαλμού, εστιάζουν στον αμφιβληστροειδή, ενώ ο οφθαλμός βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. Το σημείο αυτό καλείται άπω σημείο, ενώ η θέση αυτού χαρακτηρίζει και τη διαθλαστική κατάσταση του οφθαλμού.

Στον **εμμέτρωπα** οφθαλμό, οι διαθλώμενες από το οπτικό σύστημα αυτού παράλληλες ακτίνες εστιάζουν στον αμφιβληστροειδή, προερχόμενες από ένα σημείο που βρίσκεται θεωρητικά στο άπειρο (πρακτικά σε μεγάλη απόσταση). Το σημείο αυτό συμπίπτει με το άπω σημείο του εμμετρωπικού οφθαλμού (σχήμα: 4).

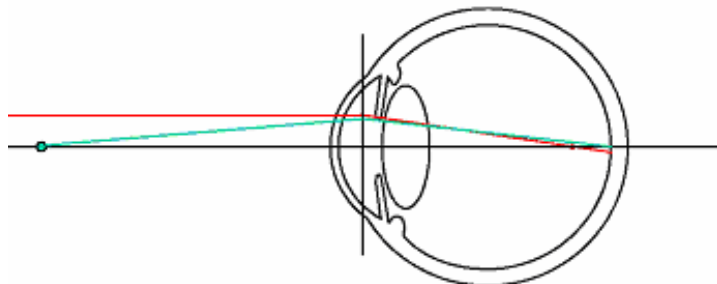
² Όπως για παράδειγμα την πυκνότητα των φωτούποδοχέων στο κεντρικό βοθρίο (1°) του αμφιβληστροειδή, τις οφθαλμικές κινήσεις προσήλωσης, τα ανατομικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά των γαγγλιακών κυττάρων της οπτικής οδού και την νευρική επεξεργασία σε ανώτερα στάδια της οπτικής οδού (η οποία κυρίως ευθύνεται για την αποκωδικοποίηση των χαρακτηριστικών των εικόνων (π.χ. φωτεινότητα, χρωματικότητα, περίγραμμα, προσανατολισμός).



Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση της εμμετρωπίας. Παράλληλες ακτίνες φωτός εστιάζουν επί του αμφιβληστροειδούς προερχόμενες από ένα σημείο που βρίσκεται θεωρητικά στο άπειρο.

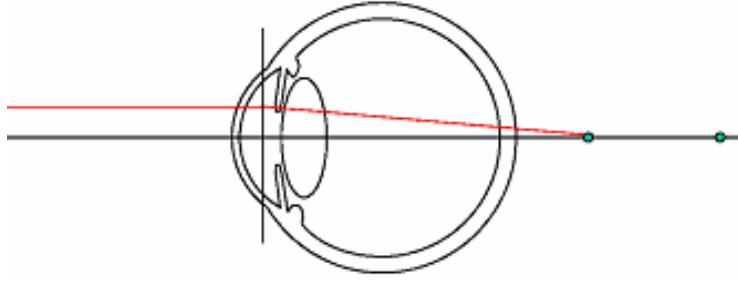
Στην περίπτωση που το άπω σημείο δε βρίσκεται σε άπειρη απόσταση μπροστά από τον οφθαλμό, τότε ο οφθαλμός αυτός είναι **αμετρωπικός**. Στον αμετρωπικό οφθαλμό, οι παράλληλες προσπίπτουσες ακτίνες, διαθλώμενες από το οπτικό σύστημα του οφθαλμού, δεν εστιάζονται στον αμφιβληστροειδή αλλά είτε πριν από αυτόν (**μυωπία**) (σχήμα: 5), είτε μετά από αυτόν (**υπερμετρωπία**) (σχήμα: 6).

Τα δύο παραπάνω διαθλαστικά σφάλματα μπορούν να υπάρχουν μόνα ή να συνυπάρχουν μαζί με **αστιγματισμό**³, ο οποίος ορίζεται σαν εκείνη τη διαθλαστική ανωμαλία του οφθαλμού κατά την οποία η διαθλαστική ισχύς του διοπτρικού συστήματος αυτού δεν είναι ίδια σε όλους τους μεσημβρινούς, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εστίαση όλων των ακτίνων σε ένα σημείο.



Σχήμα 5: Σχηματική απεικόνιση της μυωπίας. Ακτίνες φωτός παράλληλες προς τον οπτικό άξονα του οφθαλμού μετά την διάθλασή τους εστιάζονται μπροστά από τον αμφιβληστροειδή. Το άπω σημείο οράσεως δεν βρίσκεται στο άπειρο, αλλά σε κάποιο σημείο πλησιέστερα στον οφθαλμό.

³ Στην καθημερινή κλινική πράξη χρησιμοποιείται συχνά ο όρος σφαιρικό ισοδύναμο. Ως σφαιρικό ισοδύναμο ορίζεται το αλγεβρικό άθροισμα του σφαιρώματος (μυωπία ή υπερμετρωπία) με το ήμισυ του αστιγματισμού.



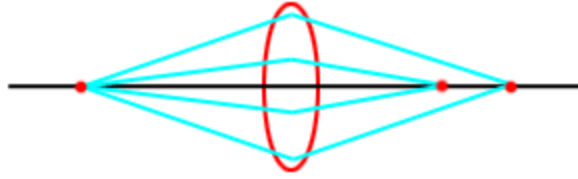
Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση της υπερμετρωπίας. Ακτίνες φωτός παράλληλες προς τον οπτικό άξονα του οφθαλμού μετά την διάθλασή τους εστιάζονται πίσω από τον αμφιβληστροειδή. Το άπω σημείο οράσεως βρίσκεται πίσω από τον οφθαλμό, εκεί όπου θα εστίαζε η συγκλίνουσα δέσμη αν δεν παρεμβάλλονταν ο οφθαλμός.

1.3.2 Εκτροπές υψηλής τάξης

Από πλευράς οπτικής φυσικής, ο οφθαλμός δεν αποτελεί ένα τέλειο οπτικό σύστημα και εκτός από τα απλά διαθλαστικά σφάλματα (μυωπία, υπερμετρωπία, αστιγματισμός), παρουσιάζει μια σειρά από μονοχρωματικές εκτροπές υψηλής τάξης (σφαιρική εκτροπή, κόμη και καμπύλωση πεδίου) με αποτέλεσμα το είδωλο του αντικειμένου να υπόκεινται πάντα σε κάποιου βαθμού παραμόρφωση (Charman, 1991).

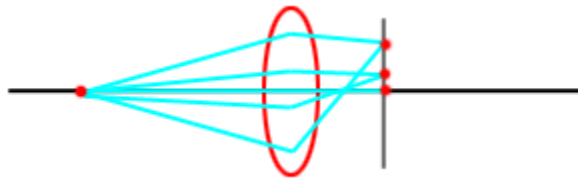
Στην ουσία αυτό που κάνουν οι εκτροπές είναι να περιορίζουν την ποιότητα όρασής μας όταν το μέγεθος της κόρης ξεπερνά τα 2.5 με 3 mm, ενώ για μικρότερες κόρες η διακριτική ικανότητα του οφθαλμού περιορίζεται από το φαινόμενο της περίθλασης. Ακόμη και εάν υποθέσουμε ότι πιθανή αμετρωπία έχει διορθωθεί (είτε με οφθαλμικούς φακούς, είτε με φακούς επαφής αλλά ακόμα και με διαθλαστική χειρουργική), το τελικό αμφιβληστροειδικό είδωλο που σχηματίζεται, δεν μπορεί να είναι απόλυτα ευκρινές, αλλά παρουσιάζει κάποιου βαθμού θόλωση λόγω της ύπαρξης χρωματικών και μονοχρωματικών εκτροπών αλλά και της περίθλασης (Charman, 1983 ; Thibos et al., 2002).

Σφαιρική εκτροπή (spherical aberration) είναι το σφάλμα εκείνο κατά το οποίο οι ακτίνες που περνάνε από την περιφέρεια του φακού (ή της κόρης για τον οφθαλμό) είναι πιο διαθλαστικές (μυωπικές) από τις κεντρικές ακτίνες, όταν η τιμή της είναι θετική, ενώ όταν ισχύει το αντίστροφο η τιμή της είναι αρνητική. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι ο οφθαλμός βρίσκεται σε διαρκείς εναλλαγές της διαθλαστικής του ισχύος, λόγω της προσαρμογής σε αντικείμενα που βρίσκονται σε διάφορες αποστάσεις (σχήμα: 7).



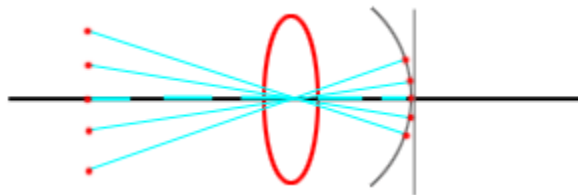
Σχήμα 7: Σχηματική απεικόνιση της σφαιρικής εκτροπής για ένα φακό.

Κόμη (coma). Συμβαίνει όταν οι ακτίνες φωτός που φθάνουν στα άκρα του φακού συγκλίνουν σε διαφορετικό άξονα απ' αυτές που φθάνουν κοντά στο κέντρο του φακού (σχήμα: 8).



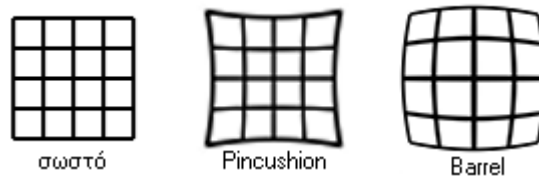
Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση του σφάλματος της κόμης για ένα φακό.

Καμπύλωση πεδίου (field curvature). Συμβαίνει επειδή οι ακτίνες φωτός συγκλίνουν σε ένα κυρτό επίπεδο (αμφιβληστροειδής) σε αντίθεση με τις επίπεδες επιφάνειες καταγραφής που χρησιμοποιούμε. Το σφάλμα της καμπύλωσης του πεδίου αναγκάζει ένα αντικείμενο να προβάλλεται σε μια κυρτή καμπύλη. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται επιφάνεια Petzval (σχήμα: 9).



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση του σφάλματος της καμπύλωσης πεδίου.

Παραμόρφωση ή γεωμετρική απόκλιση (geometric distortion). Συμβαίνει όταν η μεγέθυνση δεν είναι ίδια στο κέντρο του φακού και στα άκρα του. Όταν αυξάνεται προς τα άκρα το είδωλο έχει μορφή μηνίσκου (pincushion distortion), ενώ όταν μειώνεται προς τα άκρα το είδωλο έχει μορφή βαρελιού (barrel distortion) (σχήμα: 10).

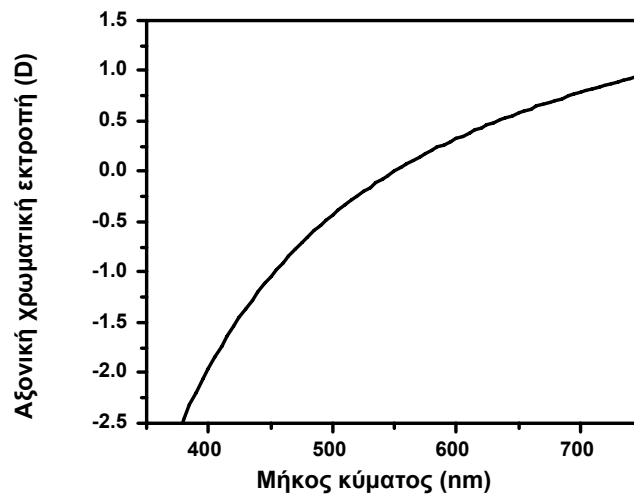


Σχήμα 10: Σχηματική απεικόνιση του σφάλματος της παραμόρφωσης.

1.3.3 Χρωματική εκτροπή (chromatic aberration)

Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο όταν πέσει πάνω στο φακό παράλληλη δέσμη ακτίνων λευκού φωτός (το λευκό φως περιέχει όλα τα χρώματα) τότε, οι εξερχόμενες από το φακό ακτίνες συγκλίνουν σε ξεχωριστή εστία ανάλογα με το κάθε χρώμα. Πλησιέστερα προς το φακό είναι η εστία του ιώδους $E_{\text{ιωδ}}$ και μακρύτερα η εστία του ερυθρού $E_{\text{ερ}}$. Με αυτό τον τρόπο έχουμε ανάλυση του λευκού φωτός από το πέρασμά του μέσα από ένα φακό, που δημιουργεί πολλαπλά έγχρωμα είδωλα του ίδιου φωτεινού αντικειμένου.

Η χρωματική εκτροπή οφείλεται στο γεγονός ότι τα χαμηλά μήκη κύματος (μπλε) διαθλώνται περισσότερο από εκείνα του υψηλού μήκους κύματος (κόκκινα) και πιστεύεται ότι μειώνει σε κάποιο βαθμό την ευκρίνεια του ειδώλου (σχήμα: 11).



Σχήμα 11: Αξονική χρωματική εκτροπή του οφθαλμού σε διοπτρίες σαν συνάρτηση του μήκους κύματος. Στην καμπύλη έχει θεωρηθεί ότι η χρωματική εκτροπή μηδενίζεται σε μήκος κύματος 550nm.

Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών (ανάλυση μετώπου κύματος - wavefront analysis) και με τη χρήση εξελιγμένων οργάνων (π.χ. Hartmann - Shack aberrometer), είναι δυνατή η μέτρηση και η αναλυτική καταγραφή όλων των οπτικών εκτροπών του οφθαλμού (Thibos et al., 2002). Σήμερα μάλιστα καθίσταται δυνατή η διόρθωση εκτροπών υψηλής τάξης και η μεγιστοποίηση της ευκρίνειας του ειδώλου που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή με την χρήση της τεχνολογίας προσαρμοστικών οπτικών (Liang et al., 1997; Vargas et al., 1998).

1.3.4 Σκέδαση

Τις περισσότερες φορές το φως που παρατηρούμε ακολουθεί ένα δικό του δρόμο και φτάνει στα μάτια μας ύστερα από πολλές ανακλάσεις και όχι απευθείας από την πηγή του. Το φαινόμενο της σκέδασης λέμε ότι εμφανίζεται όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα συναντήσει ένα εμπόδιο (π.χ. το σκεδαστή).

Τη σκέδαση μπορούμε να τη διαχωρίσουμε σε δύο είδη, την **ελαστική** (όπου το μήκος κύματος παραμένει σταθερό) και τη **μη ελαστική** (όπου το μήκος κύματος μεταβάλλεται). Αποτέλεσμα της σκέδασης είναι η τυχαία αλλαγή στην πορεία των φωτονίων, ενώ φαίνεται να επηρεάζεται από το μέγεθος και το σχήμα των σκεδαστών, από τη διαφορά του δείκτη διάθλασης και από την πυκνότητα των σκεδαστών.

Ένα μέτρο της σκέδασης είναι το PSF (**Point Spread Function**) ή διαφορετικά η συνάρτηση διασποράς σημείου, η οποία δεν είναι τίποτε άλλο από την κατανομή του ειδώλου μιας σημειακής πηγής. Η μορφή του εξαρτάται από τις εκτροπές, τη σκέδαση και την περίθλαση (το μέγεθος της κόρης επηρεάζει τα προηγούμενα).

1.4 Γενικά περί ακτίνων Laser

Εδώ και μια εικοσαετία υπάρχει συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χειρουργική διόρθωση των διαθλαστικών ανωμαλιών του οφθαλμού με μεθόδους, οι οποίες τροποποιούν την κυρτότητα της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδή. Παρόλο που το σημερινό ενδιαφέρον για τη διαθλαστική χειρουργική έχει τις σύγχρονες ρίζες του στις εργασίες των Barraquer (1949) και Sato (1953) οι χειρουργικές μέθοδοι που ελέγχουν την κυρτότητα της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς συζητούνται από τον περασμένο αιώνα (Lans 1898).

Ο όρος **LASER** προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων **L**ight **A**mplification by **S**timulating **E**mission of **R**adiation, που σημαίνουν την ενίσχυση φωτός μετά από

εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Τις βάσεις για την ανάπτυξη της φυσικής του laser τις έθεσε ο Einstein το 1916, περιγράφοντας τις διεργασίες απορρόφησης, της αυθόρμητης και εξαναγκασμένης εκπομπής φωτός.

Κατά τη διεργασία της απορρόφησης, ένα άτομο που βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, απορροφά φως και διεγείρεται, μεταπίπτει δηλαδή σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο. Κατά την αυθόρμητη εκπομπή, το άτομο αποδιεγείρεται και επιστρέφει στην κατάσταση ηρεμίας εκπέμποντας ένα φωτόνιο. Κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή ένα φωτόνιο προσπίπτει στο διεγερμένο άτομο και το αναγκάζει να μεταπέσει σε κατάσταση ηρεμίας. Από τη διεργασία αυτή αποδίδονται δύο φωτόνια, το εξαναγκάζον και το εξαναγκασμένο και με αυτό τον τρόπο πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των φωτονίων. Η εξαναγκασμένη εκπομπή προσφέρει ένα μέσο με το οποίο μια φωτεινή δέσμη ενισχύεται σημαντικά και αποτελεί τη θεμελιακή αρχή της λειτουργίας του laser.

1.4.1 Επιδράσεις των ακτίνων laser σε βιολογικούς ιστούς

Η επίδραση των ακτίνων laser σε βιολογικούς ιστούς εξαρτάται από τρεις παράγοντες: την ενέργεια της δέσμης, τη διάρκεια της επίδρασης και τέλος την απορροφητικότητα του ιστού. Ανάλογα με τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων τα αποτελέσματα των ακτίνων laser διακρίνονται σε βιολογικά,θερμικά, φωτοχημικά και σε αποτελέσματα ιονισμού.

Η επίδραση της δέσμης laser στον ιστό φέρει θερμικό αποτέλεσμα, δηλαδή αύξηση της θερμοκρασίας στο μέρος που ακτινοβολείτε, με βιολογικό αποτέλεσμα από απλό κοκκίνισμα μέχρι την απανθράκωση του ιστού (ανάλογα με τη διάρκεια). Σ' αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται συνήθως laser συνεχούς δέσμης. Αυξάνοντας την ισχύ της δέσμης, δηλαδή την ενέργεια ανά διάρκεια ακτινοβολήσης, το αποτέλεσμα γίνεται φωτοχημικό. Η απορρόφηση της δέσμης πραγματοποιείται πολύ γρήγορα και σε πολύ μικρό μέρος του ιστού. Δεσμοί και μόρια διασπώνται και τα θραύσματα, αποκτώντας μεγάλη κινητική ενέργεια αποκολλώνται από τον ιστό υπό τη μορφή μικρής έκρηξης. Η διεργασία αυτή ονομάζεται **φωτοαποσύνθεση**.

Απαραίτητες συνθήκες είναι η μεγάλη ισχύς (ενέργεια / διάρκεια) και η μεγάλη απορροφητικότητα του ιστού σ' αυτό το μήκος κύματος. Η μικρή διάρκεια επιτυγχάνεται με παλμικά laser. Μεγάλη απορροφητικότητα παρουσιάζει ο ιστός στην υπέρυθη ακτινοβολία των 193nm των excimer laser.

Μια ειδική φωτοχημική αντίδραση που έχει σαν αποτέλεσμα την αφαίρεση (εκτομή) του ιστού συμβαίνει κατά τη διάρκεια της φωτοαποσύνθεσης. Η απορρόφηση των φωτονίων υψηλής ενέργειας από τον ιστό-στόχο, προκαλεί τη διάσπαση των χημικών δεσμών των μορίων του ιστού και την παραγωγή μοριακών θραυσμάτων που προσδίδουν μεγαλύτερο όγκο στα αρχικά μόρια. Η αιφνίδια αύξηση του όγκου των μορίων οδηγεί στην εκτόπισή τους υπό μορφή έκρηξης, από την επιφάνεια του ιστού (στόχου).

1.4.2 Excimer Laser

Ο όρος **Excimer** προέρχεται από τις λέξεις **excited** και **dimmer** και σημαίνει διεγερμένο διμερές. Ένα διεγερμένο διμερές είναι ένα άτομο ευγενούς αερίου (π.χ. Ar, Kr, Xe) συνδεδεμένο σε διεγερμένη κατάσταση μ' ένα άτομο αλογόνου (π.χ. F, Cl).

Τα διεγερμένα διμερή ευγενούς αερίου-αλογόνου είναι εξαιρετικά ασταθείς ενώσεις. Η αποδιέγερση αυτών των ασταθών μορίων συνοδεύεται από την εκπομπή φωτονίων υψηλής ενέργειας. Επομένως η ενέργεια των φωτονίων και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα excimer laser, εξαρτάται από το μείγμα των αερίων που γεμίζουν την κοιλότητά του.

Τα Excimer laser είναι παλμικές πηγές υπεριώδους ακτινοβολίας, χαμηλής συμφωνίας, μονοχρωματικότητας και κατευθυντικότητας και τα πλέον συνηθισμένα είναι το **XeF** (351nm), το **XeCl** (308nm), το **KrF** (248nm) και το **ArF** (193nm). Τυπικά, η διάρκεια παλμού είναι της τάξης των 20nsec και η συνολική ενέργεια της τάξης των δεκάδων ή εκατοντάδων mJoule. Η ηλεκτρική απόδοση δε ξεπερνά το 2% για το ArF excimer laser. Οι εφαρμογές των Excimer laser περιλαμβάνουν την επεξεργασία υλικών, τη μικρομηχανουργική κατεργασία και τις ιατρικές εφαρμογές (κυρίως εκτομές).

Τα πρώτα πειράματα για την αξιολόγηση των Excimer laser σα μέσα για την πραγματοποίηση φωτοεκτομών στον κερατοειδή, πραγματοποιήθηκαν στα τέλη του **1983** από τον **Trokel** και τους συνεργάτες του. Το συμπέρασμα που προέκυψε άμεσα ήταν ότι το ArF excimer laser ($\lambda=193\text{nm}$) είναι το καταλληλότερο από τα διαθέσιμα για την εκτομή επιφανειακών στοιβάδων του κερατοειδή λόγω της μικρής σχετικά θερμικής βλάβης που προκαλεί στον παρακείμενο ιστό, της ακρίβειας του βάθους της εκτομής και της ποιότητας της επιφάνειας μετά τη φωτοεκτομή.

1.4.3 Ο μηχανισμός της εκρηκτικής φωτοαποδόμησης

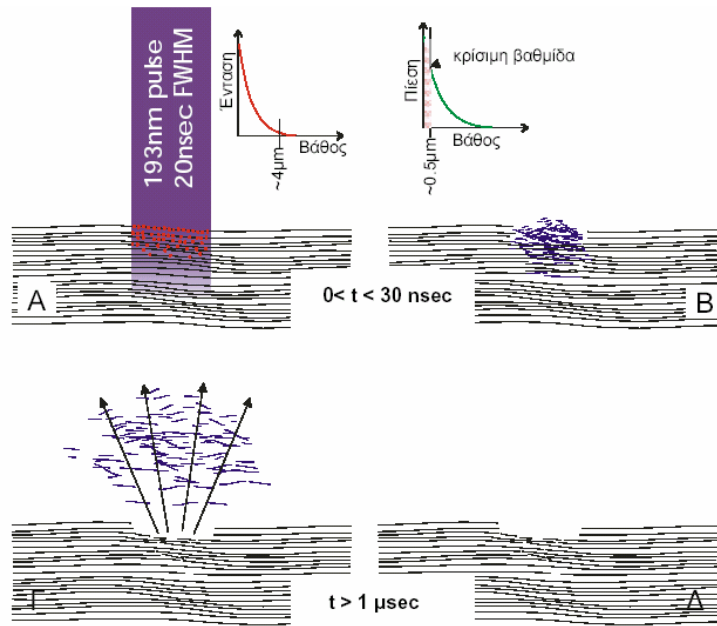
Η άποψη που επικρατεί σχετικά με το μηχανισμό με τον οποίο πραγματοποιείται η εκρηκτική φωτοαποδόμηση (**ablative photocomposition**) του κερατοειδή συνοψίζεται στην ακόλουθη περιγραφή.

Ο παλμός του excimer laser κατευθυνόμενος προς τον κερατοειδή απορροφάται από ένα επιφανειακό στρώμα του. Το βάθος διείσδυσης, εκτιμάται σε μερικά μικρόμετρα (μm). Κατά την απορρόφηση πραγματοποιούνται διασπάσεις των μοριακών δεσμών των δομικών στοιχείων του κερατοειδή (σχήμα: 12Α). Η διάσπαση θεωρείται κατά βάση **φωτοχημική**.

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας των 193nm πραγματοποιείται κυρίως στο πλέγμα των ινών κολλαγόνου, ενώ το ενδιάμεσο νερό απορροφά μικρό σχετικά ποσοστό της ακτινοβολίας. Ταυτόχρονα με τη φωτοδιάσπαση, αναπτύσσεται μια βαθμίδα πίεσης, η οποία τείνει να αποκολλήσει τα θραύσματα, από τη επιφάνεια (σχήμα: 12Β).

Για συνήθεις πυκνότητες ενέργειας η πίεση κοντά στην επιφάνεια μπορεί να φτάσει τα 100 bar. Αυτή η βαθμίδα πίεσης, δίνει στα προϊόντα της φωτοχημικής διάσπασης τη δυνατότητα απόκτησης υπερηχητικών ταχυτήτων κινούμενα περίπου κάθετα στην επιφάνεια (σχήμα: 12Γ). Η διαδικασία της απομάκρυνσης ολοκληρώνεται σε χρόνους της τάξης των μsec .

Από την προηγούμενη περιγραφή καταλήγουμε στο ότι όσο βαθύτερα βρίσκεται η ίνα κολλαγόνου, τόσο μειώνεται η ενέργεια η οποία έχει εναποτεθεί σε αυτήν, ενώ αντίθετα οι επιφανειακές διασπώνται σε μικρότερα τμήματα τα οποία είναι ευκολότερο να απομακρυνθούν από την επιφάνεια. Υπάρχει ένα κρίσιμο βάθος (το οποίο εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας) πάνω από το οποίο, το ακτινοβολούμενο υλικό απομακρύνεται από το υπόστρωμα. Σε περίπτωση που η πυκνότητα ενέργειας είναι χαμηλότερη από ένα συγκεκριμένο κατώφλι (ablation threshold), η διαδικασία φωτοεκτομής δεν πραγματοποιείται. Το **κατώφλι φωτοεκτομής** για τον ανθρώπινο κερατοειδή είναι περίπου **40 mJ/cm²**.



Σχήμα 12: Ο μηχανισμός της εκρηκτικής φωτοαποδόμησης του κερατοειδή από την ακτινοβολία του excimer laser όπως μεταβάλλεται με το χρόνο.

1.4.4 Ρυθμός φωτοαποδόμησης

Ο ρυθμός φωτοαποδόμησης (ablation rate) ισούται με το πάχος του ιστού που εκτέμνεται από έναν παλμό (μετράται σε μm/παλμό). Το βάθος του κρατήρα που μένει στο σημείο της ακτινοβολήσης (σχήμα: 12Δ) εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, τον αριθμό των παλμών καθώς και τη χρονική διάρκεια αυτών και τη συχνότητα ακτινοβολήσης (repetition rate).

Η εμπειρική σχέση που συνδέει το ρυθμό φωτοαποδόμησης με την επιφανειακή πυκνότητα ενέργειας έχει λογαριθμική μορφή: $A = m \cdot \ln (F/F_{thr})$, όπου A είναι ο ρυθμός φωτοαποδόμησης (μm/παλμό), F η πυκνότητα ενέργειας, F_{thr} το κατώφλι φωτοεκτομής (το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ίσο με 50 mJ/cm^2) και m μια εμπειρική σταθερά, η οποία ισούται με $0,3 \mu\text{m}/\text{παλμό}$. Οι πυκνότητες ενέργειας που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές της φωτοεκτομής είναι της τάξης των 120 έως 225 mJ/cm^2 .

Η αλλαγή της καμπυλότητας πραγματοποιείται σε μια ζώνη είναι κατά το δυνατόν μέγιστη προκειμένου να είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο της κόρης σε όλες τις συνθήκες φωτισμού. Για την περίπτωση της διόρθωσης μυωπίας το κεντρικό βάθος της εκτομής δίνεται προσεγγιστικά από την **εξίσωση του Munnerlyn**: $KB = \delta^2 \cdot \Delta\Phi/3$ όπου

KB είναι το κεντρικό βάθος σε μm , $\Delta\Phi$ η επιθυμητή αλλαγή της διαθλαστικής ισχύος του κερατοειδή σε διοπτρίες και δ η διάμετρος της ζώνης φωτοεκτομής σε mm.

Για την επιλογή της διαμέτρου της ζώνης φωτοεκτομής στην οποία θα πραγματοποιηθεί η διόρθωση πρέπει να συναξιολογηθούν η μέγιστη διάμετρος της κόρης του οφθαλμού που διορθώνεται, η επιδιωκόμενη διόρθωση και το διαθέσιμο πάχος του κερατοειδή.

Το προφίλ της δέσμης του λέιζερ είναι η υπέρθεση μιας γκαουσιανής και μιας flat-ομογενοποιημένης δέσμης. Ο συνδυασμός αυτός είναι επιθυμητός διότι χρησιμοποιώντας μια γκαουσιανή δέσμη αποφεύγουμε τα θερμικά φαινόμενα, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζουμε το λείο αποτέλεσμα που αφήνει στη φωτοαποδομούμενη επιφάνεια μια flat-ομογενοποιημένη δέσμη.

1.4.5 Διαθλαστικές επεμβάσεις

Οι απαιτήσεις διαφόρων ενασχολήσεων ή επαγγελματιών όπως αθλητισμός, στρατός, οδήγηση, αεροπλοΐα, ναυσιπλοΐα ή εργασιακό περιβάλλον με έντονο φωτισμό και τοξικές ουσίες, είναι αναμενόμενο να καθιστούν δύσκολη την χρήση γυαλιών η φακών επαφής. Στις περιπτώσεις αυτές η λύση έχει δοθεί από την εφαρμογή της τεχνολογίας των laser.

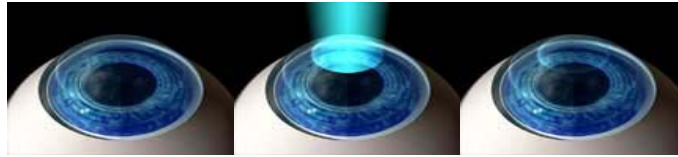
Αν και τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές, οι δύο κύριες κατηγορίες είναι οι επιφανειακές και οι "εν τω βάθει", οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

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

Στη συγκεκριμένη τεχνική το επιθήλιο αφαιρείται μηχανικά με απόξεση, προκειμένου η αλλαγή της καμπυλότητας του κερατοειδή να πραγματοποιηθεί στο στρώμα. Στη συνέχεια η στοιβάδα του Bowman και το ανώτερο στρώμα υπόκεινται σε φωτοεκτομή για να επιτευχθεί η επιθυμητή διόρθωση.

Η ανάπλαση του επιθηλίου διαρκεί 3 με 7 ημέρες, διάστημα κατά το οποίο ο οφθαλμός καλύπτεται από ένα θεραπευτικό φακό επαφής, που αφαιρείται με το οριστικό κλείσιμο του τραύματος. Ο "γυμνός" από επιθήλιο κερατοειδής δίνει την αίσθηση ξένου σώματος και προκαλεί δακρύρροια για 48 ώρες περίπου. Η τεχνική PRK ενδείκνυται κυρίως για χαμηλές μυωπίες (μέχρι 3 έως 4 βαθμούς), αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και σε λίγο μεγαλύτερες, όταν το πάχος του κερατοειδούς δεν επιτρέπει τη χρήση άλλης τεχνικής. Η

αποκατάσταση της όρασης με τη μέθοδο PRK διαρκεί περισσότερες μέρες απ' ότι στη μέθοδο LASIK (για την οποία θα αναφερθούμε παρακάτω). Σπάνιες επιπλοκές είναι η υποεπιθηλιακή θόλωση του κερατοειδή και η υποτροπή του διαθλαστικού σφάλματος (σχήμα: 13).



Σχήμα 13: Τα στάδια της επιφανειακής φωτοδιαθλαστικής κερατεκτομής (PRK).

- ☞ 1. Ο οφθαλμός που θα υποβληθεί σε διαθλαστική επέμβαση τοποθετείται κάτω από το excimer laser και πραγματοποιείται η μηχανική απόξεση του επιθηλίου.
- ☞ 2. Το excimer laser χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει την επιφάνεια του κερατοειδή.
- ☞ 3. Η νέα διαμορφωμένη επιφάνεια του κερατοειδή.

1.4.5.2 Επιφανειακή κερατοσμίλευση με Laser (Laser Epithelial Keratomileusis - LASEK)

Ο γιατρός έπειτα από μια τοπική νάρκωση με σταγόνες στο μάτι, εφαρμόζει μια μέθοδο κατά την οποία αλκοόλη 25% τοποθετείται πάνω στο επιθήλιο για 30 δευτερόλεπτα, χαλαρώνοντάς το από το στρώμα. Το χαλαρωμένο επιθήλιο τοποθετείται δίπλα και το λέιζερ εφαρμόζεται στο στρώμα. Με το πέρας της διαθλαστικής επέμβασης, το επιθήλιο επανατοποθετείται στην αρχική του θέση με προσοχή. Ένας φακός επαφής τοποθετείται στον κερατοειδή για κάποιες μέρες μετά έτσι ώστε να βοηθήσει στην επούλωση και γενικά για άνεση του ασθενούς (σχήμα: 14).



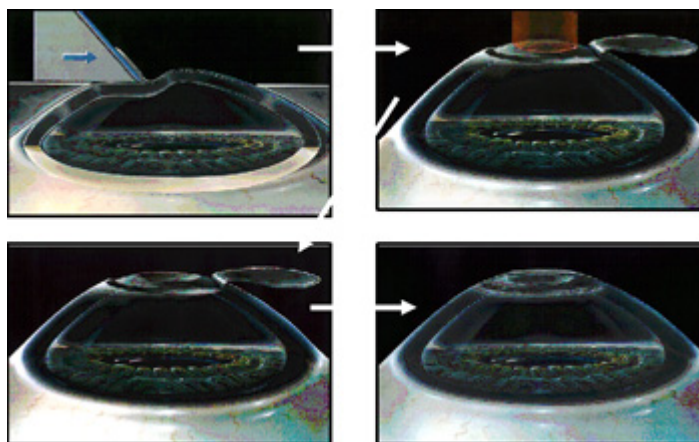
Σχήμα 14: Τα στάδια της επιφανειακής τεχνικής LASEK.

- ☞ 1. Ενσταλάσσεται αλκοόλη στο επιθήλιο.
- ☞ 2. Το χαλαρωμένο επιθήλιο τοποθετείται δίπλα.
- ☞ 3. Το excimer laser χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει την επιφάνεια του κερατοειδή.
- ☞ 4. Το επιθήλιο επανατοποθετείται στην αρχική του θέση.
- ☞ 5. Προστατευτικός φακός επαφής τοποθετείται στη νέα διαμορφωμένη επιφάνεια του κερατοειδή.

1.4.5.3 Επιφανειακή φωτοεκτομή με επιθηλιακό κρημνό (Epi-LASIK)

Η τεχνική Epi-LASIK αναπτύσσεται στο Πανεπιστήμιο Κρήτης τα τελευταία χρόνια, μετά από την ανάγκη δημιουργίας μιας τεχνικής που θα συνδυάζε τα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω τεχνικών που προαναφέρθηκαν. Η φωτοεκτομή σε αυτήν τη μέθοδο πραγματοποιείται κάτω από έναν επιθηλιακό κρημνό, ο οποίος έχει δημιουργηθεί με τη βοήθεια ενός ειδικού εργαλείου (επικερατόμου), το οποίο διαχωρίζει μηχανικά τη στοιβάδα των επιθηλιακών κυττάρων, καταφέροντας παράλληλα να διατηρήσει τη συνέχειά της.

Μετά τη φωτοεκτομή η επιφάνεια του κερατοειδή καλύπτεται από τα κύτταρα του επιθηλίου που αφαιρέθηκαν πριν την ακτινοβολήση. Εικάζεται ότι με αυτόν τον τρόπο η επουλωτική δραστηριότητα στον κερατοειδή θα μένει σε χαμηλά επίπεδα, όπως ακριβώς συμβαίνει στην τεχνική LASIK (για την οποία θα αναφερθούμε παρακάτω) και ταυτόχρονα ο κερατοειδής δε θα υπόκειται στον κίνδυνο των πιθανών επιπλοκών που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη τεχνική (σχήμα: 15).



Σχήμα 15: Τα στάδια της επιφανειακής τεχνικής Epi-LASIK.

1. Το επιθήλιο αφαιρείται μηχανικά με τη βοήθεια του επικερατόμου.
2. Το excimer laser χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει την επιφάνεια του κερατοειδή.
3. Το επιθήλιο επανατοποθετείται στην αρχική του θέση.
4. Ο επιθηλιακός κρημνός δρα σα "ζωντανός" φακός επαφής στη νέα διαμορφωμένη επιφάνεια του κερατοειδή.

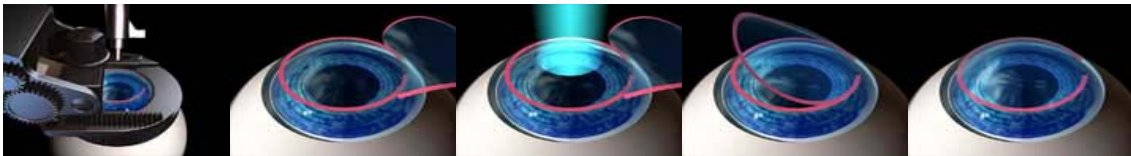
1.4.5.4 Ενδοστρωματική κερατοσμίλευση με Laser (Laser in-Situ Keratomileusis - LASIK)

Μια εναλλακτική μέθοδος διαθλαστικής χειρουργικής με χρήση του Excimer laser, η LASIK προτάθηκε το 1989 από τον Παλλήκαρη και τους συνεργάτες του. Η μέθοδος

αυτή που χρησιμοποιείται διεθνώς για τη διόρθωση μεσαίων και υψηλών διαθλαστικών σφαλμάτων, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στο Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Η κερατοσμίλευση με laser συνδυάζει τις εξαιρετικές ιδιότητες της ακτινοβολίας 193 nm Excimer laser στην εκτομή του ιστού, με ταυτόχρονη διατήρηση της ανατομικής διάταξης των στοιβάδων του κερατοειδούς και της στοιβάδας του Bowman, πράγμα που εξασφαλίζει την οπτική ποιότητα. Συνίσταται στη δημιουργία ενός κερατοειδικού κρημνού (πάχους περίπου 140μm) με χρήση ενός ειδικού εργαλείου (μικροκερατόμου) και στην έκθεση του υποκείμενου στρώματος του κερατοειδή στην κατανομή φωτοεκτομής.

Ο κερατοειδικός κρημνός επανατοποθετείται στην επιφάνεια του ακτινοβολημένου στρώματος, με αποτέλεσμα την ταχύτερη αποκατάσταση της όρασης, τη μείωση του μετεγχειρητικού πόνου και την ελαχιστοποίηση της επουλωτικής δραστηριότητας του κερατοειδή. Δεν χρειάζεται προστατευτικός φακός ή ράμματα και δεν υπάρχει πόνος ή ενόχληση μετεγχειρητικά. Κατά αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η άμεση αποκατάσταση της όρασης και ελαχιστοποιείται η πιθανότητα κάποιας θολερότητας (haze) του κερατοειδούς μετεγχειρητικά. Πιθανές επιπλοκές σε αυτήν την τεχνική προέρχονται κυρίως από δυσλειτουργίες του μικροκερατόμου (σχήμα: 16).



Σχήμα 16: Τα στάδια της "εν τω βάθη" τεχνικής LASIK.

1. Με τη βοήθεια του μικροκερατόμου δημιουργείται ο κερατοειδικός κρημνός.
2. Ο κερατοειδικός κρημνός ανασηκώνεται, ενώ παραμένει συνδεδεμένος στο ένα άκρο του.
3. Το excimer laser χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει την επιφάνεια του κερατοειδή.
4. Ο προστατευτικός κερατοειδικός κρημνός επανατοποθετείται στη θέση του.
5. Η νέα διαμορφωμένη επιφάνεια του κερατοειδή.

2.1 Εισαγωγή

Στην καθημερινή κλινική πράξη, η διακριτική ικανότητα του συστήματος όρασης αξιολογείται με μια απλή σχετικά μέθοδο, αυτή της **οπτικής οξύτητας**. Η οπτική οξύτητα αποτελεί την πρότυπη μέτρηση διακριτικής ικανότητας, κυρίως γιατί ο υπολογισμός αυτής είναι απλός, γρήγορος μα κυρίως εύκολος και κατανοητός από τους εξεταζόμενους. Η μέτρησή της πραγματοποιείται με τη χρήση οπτότυπων, που αποτελούνται από **μαύρα σύμβολα** (γράμματα ή αριθμούς) σε **λευκό background**, που σταδιακά το μέγεθός τους μειώνεται⁴.

Επειδή όμως η οπτική οξύτητα περιέχει περιορισμένη αξιολόγηση της διακριτικής ικανότητας του οφθαλμού, θα μπορούσαμε να πούμε πως δεν αποτελεί από μόνη της σωστό μέτρο για την αξιολόγηση της λειτουργικής όρασης, αφού ως **λειτουργική όραση** ορίζουμε την ικανότητα ενός ατόμου να διακρίνει διάφορα σχήματα στον περιβάλλοντα χώρο, τα οποία παρουσιάζουν διακύμανση ως προς το σχήμα, το μέγεθος και το contrast. Για να γίνει κατανοητός ο συσχετισμός των φυσικών χαρακτηριστικών των εικόνων που δεχόμαστε από τον περιβάλλοντα χώρο με τις φυσιολογικές λειτουργίες και αποκρίσεις των νευρώνων και επίσης με την αντιλαμβανόμενη απόκριση (που ολοκληρώνεται σε ανώτερα στάδια επεξεργασίας του οπτικού σήματος, στον εγκέφαλο), είναι απαραίτητη η ανάπτυξη λειτουργικών οπτικών δοκιμασιών.

Μια τέτοια μέθοδος, γνωστή ως **ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης** (contrast sensitivity), αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '60. Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης αποτελεί σήμερα μια **ψυχοφυσική εξέταση** της ποιότητας της όρασης. Βασίζεται στην προβολή ερεθισμάτων με κάποια περιοδική διαμόρφωση (όπως τα gratings), με διαφορετική χωρική συχνότητα⁵, φωτεινότητα και contrast. Κατά την δοκιμασία αυτή προβάλλεται ένα ερέθισμα (grating) συγκεκριμένης χωρικής συχνότητας

⁴ Το μέγεθος των συμβόλων που χρησιμοποιούνται στα διάφορα οπτότυπα έχει επιλεγεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να στηρίζεται στο γεγονός ότι η διακριτική ικανότητα του οφθαλμού είναι περίπου 1 λεπτό της μοίρας (1 arcmin). Κάθε σύμβολο είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να περικλείεται σε ένα τετράγωνο του οποίου το μήκος της κάθε πλευράς είναι πενταπλάσιο του πάχους των γραμμών που αποτελούν το σύμβολο. Η οπτική οξύτητα εκφράζεται με ένα κλάσμα, του οποίου ο αριθμητής είναι η απόσταση του εξεταζόμενου από το οπτότυπο (για τα οπτότυπα Snellen αυτή αντιστοιχεί με 6 μέτρα) και ο παρονομαστής είναι η απόσταση στην οποία το γράμμα ή ο αριθμός φαίνονται υπό γωνία 5 arcmin.

⁵ Χωρική συχνότητα (spatial frequency σε cycles/degree) είναι αντιστρόφως ανάλογη της χωρικής περιόδου, δηλαδή ράβδοι με μικρότερο πάχος παρουσιάζουν μεγαλύτερη χωρική συχνότητα. Ένας κύκλος εκτείνεται για 360° χωρικής φάσης.

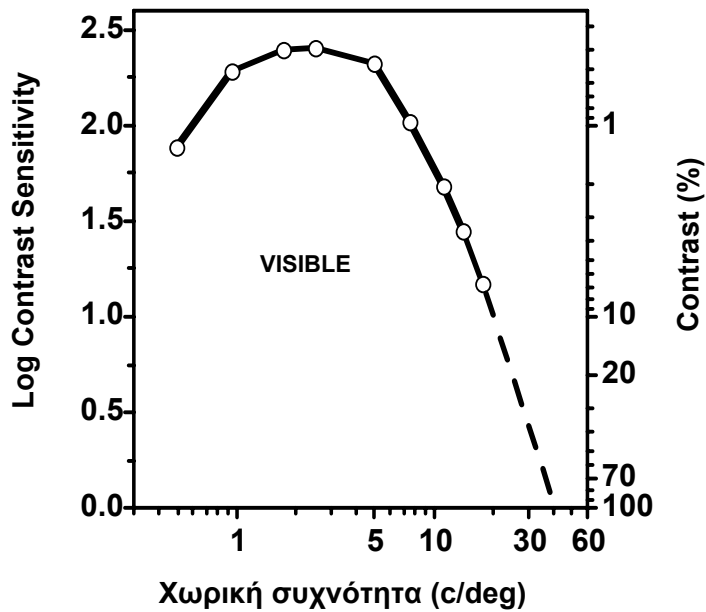
του οποίου μεταβάλλεται το contrast και ο εξεταζόμενος καλείται να βρει το ελάχιστο contrast (C_{min}) για το οποίο το grating είναι ορατό. Έτσι επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της ευαισθησίας του εξεταζόμενου για την αντίληψη (**ανίχνευση ή αναγνώριση**) ενός ερεθίσματος. Η μεταβλητή που χρησιμοποιείται είναι η φωτεινή αντίθεση (contrast) μεταξύ του ερεθίσματος και του περιβάλλοντός του (background). Η **ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (Contrast Sensitivity, CS)** ορίζεται ως το αντίστροφο του ελάχιστου contrast C_{min} , έτσι **$CS=1/C_{min}$** .

Μια δοκιμασία ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης περιέχει συνήθως μετρήσεις ουδούς για ημιτονοειδή grating μιας σειράς συχνοτήτων μεταξύ 0.5 και 20 c/deg. Το σχήμα 17 απεικονίζει μια **τυπική καμπύλη ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (Contrast Sensitivity Function, CSF)** του ανθρώπου. Η χωρική συχνότητα, η ευαισθησία αντίθεσης, καθώς και το contrast παρίστανται σε λογαριθμικούς άξονες.

Η **μέγιστη ευαισθησία** παρουσιάζεται συνήθως για χωρικές συχνότητες μεταξύ των **3 έως 5 c/deg**. Η ικανότητα που οπτικού συστήματος να αντιλαμβάνεται λεπτομέρειες της οπτικής εικόνας ελέγχεται με τις υψηλές χωρικές συχνότητες των γραμμωτών παραστάσεων, ενώ η ικανότητα αντίληψης των αδρών στοιχείων της εικόνας ελέγχεται με τις χαμηλές χωρικές συχνότητες. Για χωρικές συχνότητες μικρότερες των 2 c/deg παρατηρείται μια βαθμιαία μείωση στην ευαισθησία, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο lateral inhibition ("παράπλευρη αναστολή") λόγω των ανταγωνιστικών μηχανισμών μεταξύ κέντρου και περιφέρειας των νευρώνων⁶. Η μείωση της ευαισθησίας σε χωρικές συχνότητες μεγαλύτερες από 5 c/deg είναι σχεδόν γραμμική και οφείλεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό σε οπτικούς παράγοντες (π.χ οπτικές εκτροπές του οφθαλμού) και στο γεγονός ότι ο αριθμός νευρώνων συντονισμένων σε πολύ υψηλές συχνότητες είναι μικρός. Το σημείο στο οποίο η καμπύλη της ευαισθησίας αντίθεσης τέμνει το άξονα x αποτελεί τη μέγιστη διακριτική ικανότητα του οφθαλμού περίπου 45 c/deg⁷.

⁶ Το μέγεθος των υποδεκτικών πεδίων των γαγγλιακών κυττάρων καθορίζει την ιδανική χωρική συχνότητα που προκαλεί τη μέγιστη απόκριση του κυττάρου (π.χ μικρά υποδεκτικά πεδία παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκριση στις υψηλές χωρικές συχνότητες). Λόγω του γεγονότος ότι στην περιοχή του κεντρικού βοθρίου βρίσκονται επί το πλείστον τα μικρότερα σε μέγεθος κύτταρα (parvo) αναμένεται χαμηλές χωρικές συχνότητες να μην προκαλούν τη μέγιστη απόκρισή τους.

⁷ 10/10 οπτική οξύτητα αντιστοιχούν σε 30 c/deg.



Σχήμα 17: Η τυπική καμπύλη ευαισθησίας στην φωτεινή αντίθεση (CSF).

Η λειτουργική ικανότητα της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης αποκαλύπτει στοιχεία της όρασης του ανθρώπου που δε μπορούν να φανούν με άλλους τρόπους μέτρησης, όπως η οπτική οξύτητα. Κατά τη μέτρηση της οπτικής οξύτητας ενδιαφερόμαστε μόνο για το κατά πόσο η ελάττωση του μεγέθους του στόχου ελαττώνει την όραση. Όταν όμως μετράμε τη λειτουργική ικανότητα της ευαισθησίας στην αντίθεση, ενδιαφερόμαστε για το κατά πόσο, τόσο η αντίθεση όσο και το μέγεθος του στόχου επηρεάζουν την όραση. Δεν είναι άλλωστε λίγες οι φορές που δύο άνθρωποι μπορεί να έχουν ίδια οπτική οξύτητα, αλλά διαφορετική ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης. Η βασική διαφορά λοιπόν μεταξύ της εξέτασης της όρασης με ημιτονοειδείς γραμμωτές παραστάσεις και της συνηθισμένης δοκιμασίας με οπτότυπα Snellen είναι ότι στη δεύτερη μεταβάλλεται μόνο μια παράμετρος, ενώ στην πρώτη μεταβάλλονται δύο παράμετροι.

Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η μέτρηση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης όχι μόνο συμπληρώνει, αλλά επεκτείνει την αξιολόγηση της οπτικής συμπεριφοράς που παρέχεται από μία απλή μέτρηση της οπτικής οξύτητας. Αν και η εξέταση της απαιτεί περισσότερο χρόνο και "ιδιαίτερη" συνεργασία του εξεταζόμενου, μας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα όρασής του, και την ικανότητά του να διακρίνει ερεθίσματα (εικόνες ή γράμματα) χαμηλού contrast.

2.1.2 Μεθοδολογίες εύρεσης της ουδούς

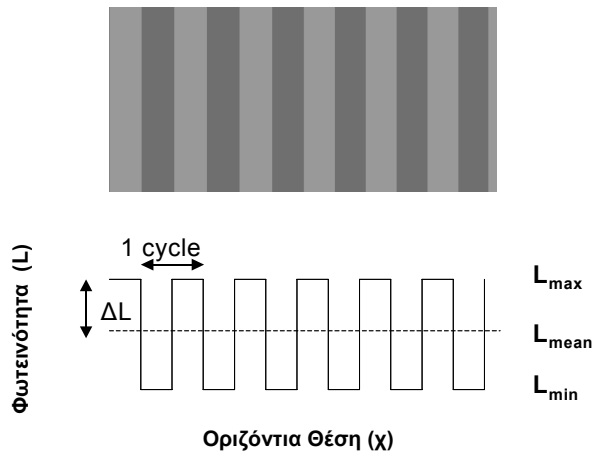
Σχεδόν όλες οι ψυχοφυσικές μέθοδοι, όπως και η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης, είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να καταλήγουν στην καταγραφή μιας ουδούς. Η εξέταση μπορεί να περιλαμβάνει την ανίχνευση του ερεθίσματος (**detection task**), την αναγνώρισή του (**recognition task**) ή ακόμα και τη διάκρισή του από κάποιο άλλο (**discrimination task**). Σημαντικό ρόλο στην καταγραφή της ουδούς έχει το είδος της εξέτασης και η μεθοδολογία που ακολουθείται. Απαραίτητο είναι να τονιστεί ότι η τιμή της ουδούς εξαρτάται και από το «κριτήριο» που έχει θέσει ο κάθε εξεταζόμενος σχετικά με την ανίχνευση του ερεθίσματος.

Υπάρχει λοιπόν μια σειρά πολύ χρήσιμων (για τη μελέτη των ικανοτήτων του οπτικού συστήματος) μεθοδολογιών οι οποίες υπολογίζουν την ουδό και είναι οι ακόλουθες:

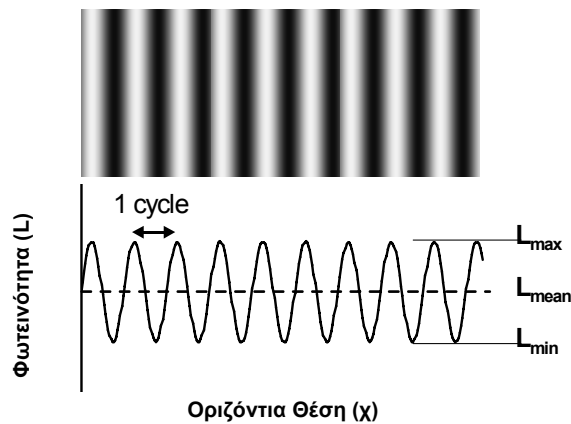
- ☛ **Η μέθοδος της «ρύθμισης» (method of adjustment)**, όπου ο εξεταζόμενος είναι ελεύθερος να ρυθμίσει μια μεταβλητή (π.χ. την ένταση του ερεθίσματος), αυξομειώνοντας την μέχρι να καταλήξει σε μια απόκριση.
- ☛ **Η μέθοδος των ορίων (method of limits)**, όπου οι «μεταβλητές» των ερεθισμάτων παρουσιάζονται σε μια αυξανόμενη (ascending / non-seeing to seeing) ή σε μια μειούμενη (descending / seeing to non-seeing) ακολουθία.
- ☛ **Η μέθοδος των προ-καθορισμένων τιμών (method of constant stimuli)**, όπου παρουσιάζεται μια σειρά από προ-καθορισμένες μεταβλητές ερεθισμάτων, μικρότερες και μεγαλύτερες της ουδούς σε τυχαία ακολουθία και για αρκετές φορές. Ο εξεταζόμενος καλείται να αποκρίνεται κάθε φορά με ένα "ναι" ή με ένα "όχι" ανάλογα με το εάν ανιχνεύει ή όχι το ερέθισμα που προβάλλεται. Απαραίτητη για την εύρεση της ουδούς είναι η γραφική παράσταση του ποσοστού των καταφατικών απαντήσεων συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών (γνωστή ως psychometric function, ή ως frequency-of-seeing καμπύλη).
- ☛ **Η μέθοδος της υποχρεωτικής επιλογής (forced-choice procedure)**, όπου ο εξεταζόμενος θα πρέπει να διαλέξει μια μεταξύ δύο ή τριών μεταβλητών που παρουσιάζονται. Η παρουσίαση τους μπορεί να είναι ή ταυτόχρονη (spatial forced-choice), ή διαδοχική (temporal forced-choice).
- ☛ **Η μέθοδος της προσαρμογής (adaptive method)**, η οποία αποτελεί εξέλιξη της μεθόδου των ορίων και στις οποίες υπολογιστικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την εύρεση της ουδού.

2.1.3 Gratings

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ο απλούστερος τρόπος για την αξιολόγηση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity), είναι η χρησιμοποίηση ερεθισμάτων με κάποια περιοδική διαμόρφωση, όπως τα gratings τα οποία πλεονεκτούν στο ότι μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά. Τα gratings αποτελούνται από εναλλασσόμενες φωτεινές και σκοτεινές ράβδους. Ανάλογα με τη διαμόρφωση που παρουσιάζει η φωτεινότητα των pixels κατά μήκος της οριζόντιας διάστασης της οθόνης (x), διακρίνουμε τα **square - wave gratings** (τετράγωνη χωρική διαμόρφωση) (σχήμα: 18) και τα **sine-wave gratings** (ημιτονοειδή χωρική διαμόρφωση) (σχήμα: 19).



Σχήμα 18: Grating με τετραγωνική χωρική διαμόρφωση . Ακριβώς από κάτω παριστάνεται γραφικά η διαμόρφωση της φωτεινότητας. Η φωτεινότητα είναι ίδια και για τα δύο gratings, το μόνο που αλλάζει είναι το contrast (χαμηλότερο για το grating με την τετραγωνική διαμόρφωση).



Σχήμα 19: Grating με ημιτονοειδή χωρική διαμόρφωση αντίστοιχα. Ακριβώς από κάτω παριστάνεται γραφικά η διαμόρφωση της φωτεινότητας.

Τα απλούστερα gratings είναι τα ημιτονοειδούς διαμόρφωσης gratings. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι περιέχουν μια μόνο χωρική συχνότητα. Αυτά μπορεί να είναι κάθετα, δηλαδή η φωτεινότητα να διαμορφώνεται περιοδικά μόνον στην οριζόντια κατεύθυνση ή να σχηματίζουν κάποια γωνία με τον οριζόντιο άξονα. Η μαθηματική εξίσωση της διαμόρφωσης φωτεινότητας για ένα απλό ημιτονοειδές κάθετο grating είναι:

$$L(x) = L_{\text{mean}}[1 + C \sin(2\pi Fx + \phi)]$$

όπου $L(x)$ η φωτεινότητα στην θέση x , L_{mean} είναι η μέση φωτεινότητα της οθόνης, C contrast, F η χωρική συχνότητα και ϕ η φάση. Επομένως για να περιγραφεί ένα grating είναι απαραίτητος ο καθορισμός ορισμένων παραμέτρων:

- ☛ **Της χωρικής συχνότητας F** (σε cycles / degree), η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της χωρικής περιόδου, δηλαδή ράβδοι με μικρότερο πάχος παρουσιάζουν μεγαλύτερη χωρική συχνότητα. Ένας κύκλος εκτείνεται για 360° χωρικής φάσης.
- ☛ **Της φωτεινότητας της οθόνης (L_{mean})**, η οποία αποτελεί τη μέση τιμή της διαμόρφωσης

$$L_{\text{mean}} = (L_{\text{max}} + L_{\text{min}}) / 2.$$

- ☛ **Του contrast C** (αντίθεση φωτεινότητας), το οποίο εκφράζεται συνήθως ποσοστιαία (% C). Σύμφωνα με τον Michelson το contrast ορίζεται ως εξής:

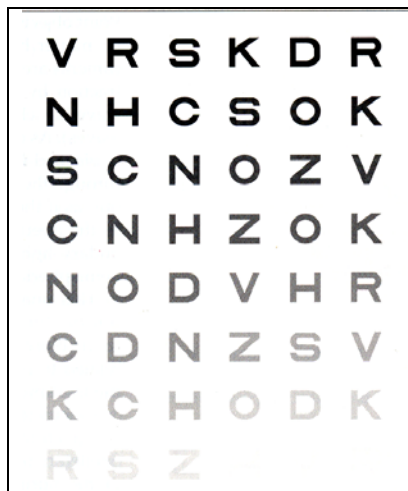
$$\text{Contrast} = (L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) / (L_{\text{max}} + L_{\text{min}}).$$

- ☛ **Της φάσης**, η οποία περιγράφει τη θέση του grating σε σχέση με τη θέση ενός άλλου. Αν υποθέσουμε ότι δύο gratings έχουν την ίδια φάση, τότε η κορύφωση της φωτεινότητάς τους πραγματοποιείται στο ίδιο σημείο, ενώ αν έχουν 180° διαφορά φάσης τότε στο ελάχιστο σημείο που η φωτεινότητα του ενός είναι μέγιστη, η φωτεινότητα του άλλου είναι ελάχιστη.
- ☛ **Του προσανατολισμού**, που περιγράφει τη γωνία που σχηματίζει το grating με τον οριζόντιο άξονα (συνήθως χρησιμοποιούνται κάθετα gratings).

2.1.4 Όργανα μέτρησης της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης στην κλινική πράξη

Για αρκετά χρόνια οι ερευνητές προσπαθούν να δημιουργήσουν ένα απλό και αποτελεσματικό τεστ για την εξέταση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης. Η σπουδαιότητα της διάκρισης των στόχων με χαμηλή αντίθεση φαίνεται να αναγνωρίστηκε από το 1881 και το πρώτο επίσημο τεστ πραγματοποιήθηκε το 1918 από τον G.Young. Στις μέρες μας τα οπτότυπα που συναντούμε πιο συχνά είναι τα οπτότυπα Pelli-Robson, τα οπτότυπα Bailey-Lovie και τα οπτότυπα Vistech VCTS και Vector Vision CSV-1000.

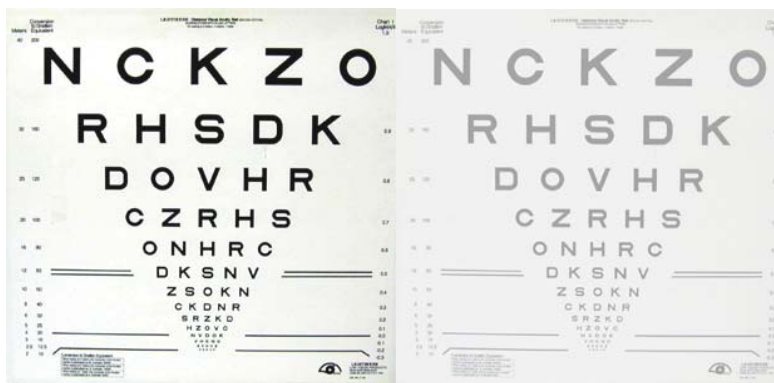
Οπτότυπα Pelli-Robson. Τα συγκεκριμένα οπτότυπα αποτελούνται από γράμματα ίδιου μεγέθους που ελαττώνονται σταδιακά σε contrast . Με τον τρόπο αυτό αξιολογείται η ευαισθησία στο contrast και όχι η διακριτική ικανότητα του οφθαλμού (σχήμα: 20).



Σχήμα 20: Το οπτότυπο Pelli-Robson.

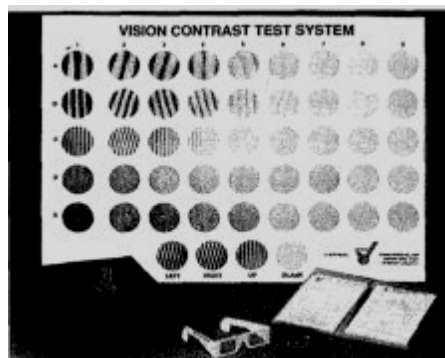
Οπτότυπα Bailey-Lovie. Πρόκειται για οπτότυπα που στηρίζονται στην κλίμακα $\log\text{MAR}^8$ (στο λογάριθμο της ελάχιστης γωνίας ευκρίνειας), με τα οποία καθίσταται δυνατή η μέτρηση της οπτικής οξύτητας για δύο διαφορετικές αντιθέσεις φωτεινότητας (contrast) των γραμμάτων, 90% (στο σχήμα 21 αριστερά) και 10% (στο σχήμα 21 δεξιά).

⁸ Η εξίσωση με την οποία είναι δυνατός ο υπολογισμός της οπτικής οξύτητας με μετατροπή από $\log\text{MAR}$ σε δεκαδική παράσταση (decimal) και αντίστροφα είναι η παρακάτω:
 $\text{decimal} = \text{antilog}(-\log\text{MAR}) = 10^{-\log\text{MAR}}$
 $\log\text{MAR} = -\log(\text{decimal acuity})$



Σχήμα 21: Οπτότυπα Bailey-Lovie.

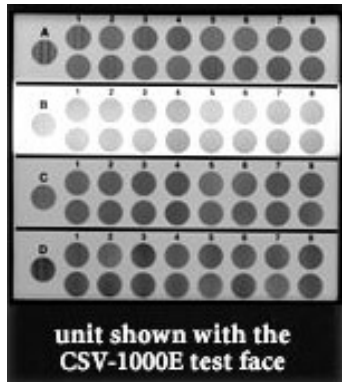
Οπτότυπα Vistech VCTS. Η εταιρεία Vistech έχει κατασκευάσει οπτότυπα που αποτελούνται από πέντε σειρές γραμμωτών παραστάσεων με ημιτονοειδή διαμόρφωση μεταβολής της φωτεινότητάς τους. Κάθε σειρά ελέγχει μια συγκεκριμένη χωρική συχνότητα (1.5, 3, 6, 12 και 18 c/deg). Κάθε χωρική συχνότητα (σειρά) του τεστ αρχίζει με παράσταση μεγάλης αντίθεσης. Η αντίθεση των γραμμωτών παραστάσεων που ακολουθούν σταδιακά μειώνεται από τη μια παράσταση στην άλλη, από τα αριστερά προς τα δεξιά. Η κατεύθυνση των ταινιών (προσανατολισμός) κάθε γραμμωτής παράστασης διαφέρει και μπορεί να είναι κατακόρυφη, κεκλιμένη δεξιά ή αριστερά (σχήμα: 22).



Σχήμα 22: Το μοντέλο 6500 της εταιρείας Vistech.

Οπτότυπα Vector Vision CSV-1000. Αποτελείται από ένα αυτόφωτο τηλεχειριζόμενο οπτότυπο. Ο εξεταζόμενος τοποθετείται σε απόσταση 2.5 μέτρων από τον πίνακα. Στον πίνακα υπάρχουν τέσσερις διπλές σειρές κύκλων με οκτώ ζεύγη κύκλων κάθε σειρά. Σε κάθε ζεύγος ο ένας μόνο κύκλος περιέχει τη γραμμωτή παράσταση. Ο βαθμός αντίθεσης κάθε σειράς μειώνεται προοδευτικά καθώς

προχωρούμε από αριστερά προς τα δεξιά. Από τον εξεταζόμενο ζητάμε να βρει ποιος από τους δύο κύκλους κάθε ζεύγους περιέχει τη γραμμωτή παράσταση και σημειώνετε σε διάγραμμα την τελευταία σωστή απάντηση (σχήμα: 23).



Σχήμα 23: Το οπτότυπο CSV-1000.

Κατάλληλα προγράμματα που εκτελούνται σε **ηλεκτρονικό υπολογιστή** και προβάλλονται σε **οθόνη** έχουν αναπτυχθεί στις μέρες μας, προκειμένου να υλοποιήσουν τις δοκιμασίες της οπτικής οξύτητας και της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης. Η ευαισθησία (sensitivity) και ο βαθμός αριότητας (specificity) αυτών των δοκιμασιών εξαρτάται από την ικανότητα του λογισμικού να προσδιορίσει με ακρίβεια το μικρότερο contrast που απαιτείται για την αντίληψη ενός ερεθίσματος (μέθοδος αναζήτησης ουδούς) και από την ανάλυση και τη χρωματική πιστότητα της οθόνης (χρήση κάρτας γραφικών υψηλής τεχνολογίας και οθόνης υψηλής ανάλυσης). Ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι το Freiburg test (Bach, 1996) στο οποίο χρησιμοποιείται το **Landolt C** και ο εξεταζόμενος καλείται να αναγνωρίσει την κατεύθυνση στην οποία το σύμβολο είναι στραμμένο (σχήμα: 24).



Σχήμα 24: Το Landolt C σε 4 διαφορετικά contrast.

2.1.5 Πρακτικές εφαρμογές της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης

Η μέτρηση της ευαισθησίας με τη βοήθεια ερεθισμάτων που έχουν κάποια περιοδική διαμόρφωση, εκτιμά τη συνολική διαβιβαστική ικανότητα του οπτικού μας συστήματος, που είναι το αλγεβρικό άθροισμα της διαβιβαστικής ικανότητας των οπτικών μας μέσων και της διαβιβαστικής ικανότητας του νευρικού μας συστήματος. Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι τόσο οι νόσοι που επηρεάζουν τη διαφάνεια των οπτικών μας μέσων, όσο και οι νόσοι που επηρεάζουν την ακεραιότητα των νευρικών κυττάρων της οπτικής οδού, επηρεάζουν την ευαισθησία της φωτεινής αντίθεσης.

Ηλικία. Η ευαισθησία στην αντίθεση ενός βρέφους 3 έως 6 μηνών είναι πολύ διαφορετική από αυτή του ενήλικα. Η καμπύλη ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης του βρέφους είναι μικρότερη, έχει υψηλότερο ουδό ευαισθησίας, ενώ δε φτάνει το ύψος των χωρικών συχνοτήτων του ενήλικα. Όσον αφορά τις υψηλές χωρικές συχνότητες η καμπύλη ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης μοιάζει περισσότερο με αυτή της γάτας, δηλαδή το βρέφος δεν μπορεί να διακρίνει λεπτομέρειες, όμως στις χαμηλές συχνότητες μοιάζει με του ενήλικα δηλαδή δε μπορεί να διακρίνει μεγάλα αντικείμενα που έχουν μικρή αντίθεση. Ένα επιπλέον μειονέκτημα του βρέφους είναι ότι στις χωρικές συχνότητες που έχει κοινές με τον ενήλικα το βρέφος χρειάζεται μεγαλύτερη αντίθεση για να διακρίνει αντικείμενα που βρίσκονται στις συχνότητες αυτές. Η μειωμένη ευαισθησία των βρεφών στις υψηλές συχνότητες οφείλεται στο ανώριμο νευρικό τους σύστημα. Αξιοσημείωτη είναι η αύξηση της ευαισθησίας αντίθεσης κατά τους 6 πρώτους μήνες ζωής, ηλικία κατά την οποία η μέγιστη διακριτική ικανότητα δε ξεπερνά τα 5/10. Η βελτίωση αυτή μπορεί να ανασταλεί στις περιπτώσεις που το βρέφος δε δέχεται φυσιολογικά οπτικά ερεθίσματα. Σε μεγαλύτερα ηλικιακά group (η ευαισθησία στην αντίθεση παραμένει σταθερή μέχρι την ηλικία των 40 χρόνων περίπου) η μείωση της ευαισθησίας αντίθεσης εμφανίζεται να είναι πιο έντονη για τις χαμηλές συχνότητες. Επομένως, η ελάττωση δεν οφείλεται καθαρά σε οπτικούς λόγους, αλλά κυρίως στην εκφύλιση των νευρώνων **Magno**⁹ στην οπτική οδό.

⁹ Τα γαγγλιακά κύτταρα του αμφιβληστροειδή χωρίζονται σε δύο κατηγορίες με βάση τα φυσιολογικά και ανατομικά τους χαρακτηριστικά. Τα **κύτταρα M** είναι λίγα σε αριθμό, βρίσκονται στην περιφέρεια του αμφιβληστροειδή κι έχουν μεγάλο υποδεκτικό πεδίο με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μειωμένη χωρική συχνότητα (οπτική οξύτητα). Τα **κύτταρα P** είναι 10 φορές περισσότερα σε αριθμό κι έχουν μικρό υποδεκτικό πεδίο. Η χωρική τους συχνότητα είναι υψηλή λόγω του μεγέθους τους αλλά και της δυνατότητας άθροισης των αποκρίσεών τους. Βρίσκονται κυρίως στην περιοχή του κεντρικού βοθρίου, όπου οι απαιτήσεις εκκρινούς όρασης είναι υψηλές.

Γλαύκωμα. Η πρώιμη ανίχνευση της βλάβης του οπτικού νεύρου που προκαλείται από το γλαύκωμα θεωρείται πολύ σημαντική. Η ενδοφθάλμια πίεση, η οπτική οξύτητα και ο έλεγχος των οπτικών πεδίων δεν αποτελούν στις μέρες μας ευαίσθητους δείκτες πρώιμης γλαυκωματικής βλάβης. Γνωρίζοντας ότι το γλαύκωμα (στα πρώτα του στάδια) επηρεάζει την περιφεριακή όραση, μπορεί να διαγνωστεί και ως μείωση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης σε χαμηλές χωρικές συχνότητες. Βιβλιογραφικές μελέτες αναφέρουν ότι όταν η οπτική οξύτητα μειωθεί, μπορεί να υπάρχει καταστροφή μέχρι και 50% των οπτικών νευρικών ινών, ενώ όταν στην αυτόματη περιμετρία παρατηρηθεί μείωση της ευαισθησίας κατά 5 dB, το 20% των γαγγλιακών κυττάρων του αμφιβληστροειδούς έχουν χαθεί. Ακόμα, όταν η μείωση της ευαισθησίας είναι 10 dB, η απώλεια των γαγγλιακών κυττάρων φτάνει το 40% (Quigley et al., 1982).

Αρκετές ψυχοφυσικές δοκιμασίες έχουν προταθεί για τη διευκόλυνση της πρώιμης ανίχνευσης γλαυκωματικών βλαβών. Σε αρκετές μελέτες αναφέρεται διαταραχή στην αντίληψη των χρωμάτων και στην ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης. Υπήρξαν ομάδες που χρησιμοποίησαν τα οπτότυπα **Pelli-Robson** για τη διόφθαλμη εκτίμηση της ευαισθησίας αντίθεσης σε ασθενείς με γλαύκωμα που η οπτική τους οξύτητα ήταν $\geq 7/10$ και με βλάβη των οπτικών πεδίων που δε ξεπερνούσε τα -5 dB στις κεντρικές 10° και ένα μέσο όρο -10 dB στο πρόγραμμα 30-2 του περιμέτρου Humphrey, σε σύγκριση με ασθενείς που παρουσίαζαν οφθαλμική υπέρταση και σε υγιείς εξεταζόμενους. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι οι γλαυκωματικοί ασθενείς παρουσίαζαν σημαντική μείωση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης σε σχέση τις δύο άλλες ομάδες (Bassi et al., 1991).

Καταρράκτης. Για πολλά χρόνια η εξέταση της οπτικής οξύτητας αποτελούσε την κύρια ένδειξη της οπτικής λειτουργίας στην εκτίμηση των καταρρακτών. Ασθενείς με πρώιμο καταρράκτη παραπονιούνται συνήθως για μείωση της όρασής τους, ενώ η μέτρηση της οπτικής τους οξύτητας δε φαίνεται να μπορεί να τη διαγνώσει. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι καταρράκτης κάθε μορφής αυξάνει την ενδοφθάλμια σκέδαση του φωτός, ελαττώνοντας έτσι την αντίθεση της εικόνας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου και επομένως και της ευαισθησίας αντίθεσης. Αν η σκέδαση είναι ευρείας γωνίας, η ευαισθησία στην αντίθεση θα παρουσιάζει μείωση σε όλες σχεδόν τις χωρικές συχνότητες, ενώ αν η σκέδαση είναι στενής γωνίας μείωση ευαισθησίας θα παρατηρείται μόνο στις υψηλές συχνότητες.

Αμβλυωπία. Στις μέρες μας η αμβλυωπία θεωρείται μια από τις συχνότερες αιτίες απώλειας της όρασης. Η συχνότητα της στο γενικό πληθυσμό κυμαίνεται από 2.0 έως 2.5%, ενώ αντιπροσωπεύει τη συχνότερη αιτία μειωμένης όρασης στα παιδιά και τους

νέους. Στις περιπτώσεις αμβλυωπίας η ευαισθησία στην αντίθεση εμφανίζει διαταραχή, αλλά οι ασθενείς με αμβλυωπία εμφανίζουν μεγαλύτερη μείωση οπτικής οξύτητας σε σχέση με τη μείωση που παρουσιάζουν στην ευαισθησία αντίθεσης. Οι διαταραχές της ευαισθησίας στην αντίθεση είναι χαρακτηριστικές και μπορούν να βοηθήσουν και να οδηγήσουν στη διαφορική διάγνωση της αμβλυωπίας και της εκφύλισης του οπτικού νεύρου.

Διαθλαστική επέμβαση. Η ευαισθησία στην αντίθεση επηρεάζεται μετά από επέμβαση για διόρθωση του διαθλαστικού σφάλματος. Σε υπάρχουσες δημοσιεύσεις έχει μελετηθεί η αλλαγή στην ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης πριν και μετά τη διαθλαστική χειρουργική. Έχει αναφερθεί ότι οι χωρικές συχνότητες που επηρεάζονται περισσότερο είναι αυτές των ≥ 12 c/deg, επειδή η θόλωση που προκαλείται από το υπολειπόμενο διαθλαστικό σφάλμα και τις οπτικές εκτροπές επηρεάζει περισσότερο τις υψηλές χωρικές συχνότητες, ενώ μεγαλύτερη μείωση στην ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης παρουσιάζουν οι ασθενείς με μεγαλύτερο διαθλαστικό σφάλμα.

2.2 Σκοπός της μελέτης

Σκοπός της παρούσης μελέτης ήταν να αξιολογηθεί η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης μετά από διαθλαστική χειρουργική (έναν και τρεις μήνες μετεγχειρητικά) και να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των δύο πιο διαδεδομένων τεχνικών, της επιφανειακής φωτοδιαθλαστικής κερατεκτομής (PRK) και της ενδοστρωματικής κερατοσμίλευσης με laser (LASIK). Παράλληλα, αξιολογήθηκε η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης προ-εγχειρητικά σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού και για δύο τεχνητές κόρες διαφορετικής διαμέτρου με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης των εκτροπών υψηλής τάξης στην ποιότητα όρασης.

3.1 Συμμετέχοντες

Η συλλογή και ανάλυση των δεδομένων έλαβε χώρα στην Ιατρική Σχολή του Πανεπιστημίου Κρήτης, στο Ινστιτούτο Οπτικής και Όρασης. Οι συμμετέχοντες απετέλεσαν υποψηφίους για διαθλαστική επέμβαση προκειμένου να διορθώσουν το διαθλαστικό τους σφάλμα.

Τα κριτήρια επιλογής των συμμετεχόντων ήταν τα ακόλουθα:

Ηλικία: Άνω των 17 ετών και το διαθλαστικό τους σφάλμα να έχει παραμείνει σταθερό για μια διετία τουλάχιστον.

Εύρος διαθλαστικής ανωμαλίας: Μυωπία έως 7D και αστιγματισμός έως 3D (αποκλείστηκαν οι υπερμέτρωπες).

Κάποιες καταστάσεις που ορίζονται ως σχετικές αντενδείξεις για την επέμβαση με laser απετέλεσαν και κριτήρια αποκλεισμού για τους συμμετέχοντες. Τέτοιες ήταν οι:

Ξηροφθαλμία: Η οποία είναι δυνατόν να επιδεινωθεί μετά την επέμβαση.

Λήψη φαρμάκων: Όπως η κορτιζόνη και τα ανοσοκατασταλτικά και η νόσηση από αυτοάνοσα νοσήματα, αφού μπορούν να οδηγήσουν στην καθυστέρηση της επούλωσης του χειρουργικού τραύματος.

Υπαρξη ουλών στον κερατοειδή.

Κύηση και γαλουχία.

Οφθαλμικές παθήσεις: Ο καταρράκτης, το προχωρημένο γλαύκωμα, τα νοσήματα και οι ανωμαλίες του κερατοειδούς.

Από τους συμμετέχοντες που ήσαν χρήστες φακών επαφής ζητήθηκε η διακοπή χρήσης τους για 3 εβδομάδες στην περίπτωση μαλακών φ.ε και για 8 εβδομάδες τουλάχιστον στην περίπτωση ημίσκληρων φ.ε πριν από τον προ-εγχειρητικό έλεγχο.

Στη μελέτη έλαβαν μέρος 23 συμμετέχοντες εκ των οποίων οι 15 ήταν άνδρες και οι 8 γυναίκες. Οι 10 από αυτούς υπεβλήθησαν σε ενδοστρωματική κερατοσμίλευση (LASIK), ενώ οι υπόλοιποι 13 σε επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή (PRK)¹⁰.

Παρόμοιες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε άλλα 9 άτομα που απετέλεσαν την ομάδα "ελέγχου".

¹⁰ Οι επεμβατικοί χειρισμοί για όλους τους συμμετέχοντες πραγματοποιήθηκαν με το Laser Allegretto Wave Eye-Q Version 1010 400Hz, Wavelight Technologies - Germany.

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας: 2) παρουσιάζονται αναλυτικά τα προεγχειρητικά στοιχεία των συμμετεχόντων.

A/A	ΣΥΜ/ΧΟΝ	ΦΥΛΟ	ΗΛΙΚΙΑ	ΚΥΡ/ΧΟΣ ΟΦΘ/ΜΟΣ	ΔΙΑΘ. ΣΦΑΛΜΑ (ΣΦΑΙΡΩΜΑ)	ΔΙΑΘ. ΣΦΑΛΜΑ (ΑΣΤΙΓΜΑ ΤΙΣΜΟΣ)	ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ	ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΟΠΤΙΚΗ ΟΞΥΤΗΤΑ (decimal)	ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΟΠΤΙΚΗ ΟΞΥΤΗΤΑ (LogMAR)	ΔΙΑΘ. ΕΠΕΜΒΑΣΗ
1	NK	M	27	OD	-6.25	-0.25	-6.38	1.00	0.00	LASIK
2	EA	M	24	OD	-5.25	-1.50	-6.00	1.20	-0.08	LASIK
3	EP	F	32	OD	-2.50	-0.75	-2.88	1.00	0.00	LASIK
4	EP.	F	36	OD	-1.00	-3.25	-2.63	1.02	-0.01	LASIK
5	FT	F	22	OS	-4.75	-0.75	-5.13	1.00	0.00	LASIK
6	MK.	M	21	OD	-5.50	-0.50	-5.75	0.70	0.15	LASIK
7	GP	M	35	OD	-2.25	-0.50	-2.50	1.20	-0.08	LASIK
8	SP	M	26	OD	-4.50	-0.25	-4.63	0.95	0.02	LASIK
9	SM.	M	17	OS	-4.75	-0.25	-4.88	1.00	0.00	LASIK
10	MM	M	29	OS	-3.25	-1.00	-3.75	1.50	-0.18	LASIK
11	MK	M	17	OD	-3.00	-0.50	-3.25	1.00	0.00	PRK
12	ME	F	27	OD	-3.75	-0.75	-4.13	0.95	0.02	PRK
13	SN	F	23	OS	-5.00	-0.25	-5.13	1.35	-0.13	PRK
14	IA	M	22	OD	-2.50	-0.25	-2.63	1.00	0.00	PRK
15	SO	F	23	OD	-4.00	0.00	-4.00	1.00	0.00	PRK
16	EK	F	19	OS	-2.75	-1.25	-3.38	1.00	0.00	PRK
17	FD	M	29	OD	-2.25	-1.00	-2.75	1.50	-0.18	PRK
18	BK	M	25	OD	-2.00	-0.50	-2.25	1.50	-0.18	PRK
19	EP..	F	27	OD	-5.50	-0.75	-5.88	1.00	0.00	PRK
20	DDB	M	25	OD	-2.75	-0.25	-2.88	1.50	-0.18	PRK
21	DDB	M	25	OS	-3.00	-0.50	-3.25	1.20	-0.08	PRK
22	SM	M	31	OD	-3.00	-0.25	-3.13	1.00	0.00	PRK
23	GP.	M	22	OS	-4.50	-0.75	-4.88	0.95	0.02	PRK

Πίνακας 2: Περιλαμβάνει στοιχεία του κάθε εξεταζόμενου (π.χ το φύλο, την ηλικία, τον κυρίαρχο οφθαλμό, το διαθλαστικό σφάλμα, το σφαιρικό ισοδύναμο, την καλύτερη διορθωμένη ο.ο και το είδος της διαθλαστικής επέμβασης που υποβλήθηκε καθέναν από αυτούς).

Ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση για την ηλικία, το σφαίρωμα, τον αστιγματισμό, το σφαιρικό ισοδύναμο και την καλύτερη διορθωμένη οπτική οξύτητα όλων των συμμετεχόντων, αλλά και για κάθε μια ομάδα ξεχωριστά παρουσιάζονται στους πίνακες 3, 4 και 5.

23 ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΕΣ	Μέσος όρος (mean)	Τυπική απόκλιση (stdev)
Ηλικία	25.39	± 5.06
Διαθλαστικό σφάλμα (σφαίρωμα) (σε D)	-3.65	± 1.37
Διαθλαστικό σφάλμα (αστιγματισμός) (σε D)	-0.70	± 0.67
Σφαιρικό ισοδύναμο (σφαίρωμα + αστιγματισμός / 2) (σε D)	-4.00	± 1.28
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (σε δεκαδική κλίμακα - decimal)	1.11	± 0.22
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (σε λογαριθμική κλίμακα - LogMAR)	-0.04	± 0.08

Πίνακας 3: Περιλαμβάνει το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση των προ-εγχειρητικών στοιχείων των συμμετεχόντων.

10 ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΕΣ (LASIK)	Μέσος όρος (mean)	Τυπική απόκλιση (stdev)
Ηλικία	26.9	± 6.19
Διαθλαστικό σφάλμα (σφαίρωμα) (σε D)	-4.00	± 1.67
Διαθλαστικό σφάλμα (αστιγματισμός) (σε D)	-0.90	± 0.91
Σφαιρικό ισοδύναμο (σφαίρωμα + αστιγματισμός / 2) (σε D)	-4.45	± 1.44
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (σε δεκαδική κλίμακα - decimal)	1.06	± 0.21
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (σε λογαριθμική κλίμακα - LogMAR)	-0.02	± 0.09

Πίνακας 4: Περιλαμβάνει το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση των προ-εγχειρητικών στοιχείων των 11 συμμετεχόντων που υπεβλήθησαν σε ενδοστρωματική κερατοσμίλευση (LASIK).

13 ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΕΣ (PRK)	Μέσος όρος (mean)	Τυπική απόκλιση (stdev)
Ηλικία	24.23	± 3.85
Διαθλαστικό σφάλμα (σφαίρωμα) (σε D)	-3.38	± 1.08
Διαθλαστικό σφάλμα (αστιγματισμός) (σε D)	-0.54	± 0.35
Σφαιρικό ισοδύναμο (σφαίρωμα + αστιγματισμός / 2) (σε D)	-3.65	± 1.08
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (σε δεκαδική κλίμακα - decimal)	1.15	± 0.23
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (σε λογαριθμική κλίμακα - LogMAR)	-0.05	± 0.08

Πίνακας 5: Περιλαμβάνει το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση των προ-εγχειρητικών στοιχείων των 12 συμμετεχόντων που υπεβλήθησαν σε επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή (PRK).

3.2 Διαδικασία καταγραφής - Όργανα μέτρησης

Η οφθαλμολογική εξέταση περιλαμβάνει τη λήψη οφθαλμολογικού ιστορικού και την κλινική εξέταση, ενώ κάποιες φορές επιβάλλεται να γίνονται και ειδικές συμπληρωματικές οφθαλμολογικές εξετάσεις (όπως κερατοσκοπία, κορογραφία κ.λ.π).

Οφθαλμολογικό ιστορικό: Μας προσανατολίζει προς τη σωστή κατεύθυνση για τη διαγνωστική προσέγγιση του προβλήματος του ασθενούς. Συνίσταται στην περιγραφή του ατομικού και του οικογενειακού ιστορικού και στην περιγραφή των συμπτωμάτων της νόσου.

Κλινική εξέταση: Περιλαμβάνει την επισκόπηση, ψηλάφηση, εξέταση της όρασης, εξέταση στη σχισμοειδή λυχνία, την κερατομετρία, αισθησιμετρία, τονομετρία, τον έλεγχο της δακρυϊκής λειτουργίας, των αντανακλαστικών της κόρης και της οφθαλμοκινητικότητας και τέλος τη βυθοσκόπηση.

Οπτική οξύτητα. Ελέγχθηκε σε απόσταση 4 μέτρων¹¹. Χρησιμοποιήθηκαν οπτότυπα με αριθμούς σε δεκαδική κλίμακα (projector). Τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα παρακάτω:

- ☞ Τοποθετήθηκε ο εκάστοτε συμμετέχον στην προκαθορισμένη απόσταση από ένα καλά φωτισμένο οπτότυπο. Αν χρησιμοποιούσε γυαλιά για τη μακρινή όραση έπρεπε να τα φορούσε και κατά την εξέταση.
- ☞ Ο δεξιός οφθαλμός εξετάστηκε και καταγράφηκε πρώτος. Καλύφθηκε πλήρως ο αριστερός οφθαλμός χρησιμοποιώντας μια αδιαφανή καλύπτρα.
- ☞ Ζητήθηκε από τον εξεταζόμενο να διαβάσει τη μικρότερη γραμμή στην οποία μπορούσε να ξεχωρίσει περισσότερα από τα μισά γράμματα και καταγράφηκε η οπτική του οξύτητα.
- ☞ Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τον αριστερό οφθαλμό¹².

Διαθλαστικό σφάλμα. Για τον υπολογισμό του διαθλαστικού σφάλματος ακολουθήθηκε η συμβατική δοκιμασία η οποία αποτελείται από: το σταυροειδή κύλινδρο και από τον τελικό έλεγχο του σφαιρώματος.

Σταυροειδής κύλινδρος. Αποτελεί ένα συνδυασμό ενός σφαιρικού και ενός κυλινδρικού φακού με αντίθετα πρόσημα και δύναμη κυλίνδρου διπλάσια από την

¹¹ Για πρακτικούς λόγους θεωρείται ότι η απόσταση αυτή ισοδυναμεί με το οπτικό άπειρο.

¹² Η εξέταση περιελάμβανε τη μέτρηση της μη διορθωμένης και της καλύτερα διορθωμένης οπτικής οξύτητας στη δεκαδική κλίμακα, η οποία πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του φορόπτερου (Phorolux2- Rodenstock) σε μεσοπτικές συνθήκες (περιβαλλοντικός φωτισμός).

δύναμη του σφαιρώματος. Χρησιμοποιήθηκε στον τελικό έλεγχο και ρύθμιση του άξονα και της δύναμης ενός διορθωτικού κυλινδρικού φακού.

Τελικός έλεγχος του σφαιρώματος: Πραγματοποιήθηκε στο τέλος της διαθλαστικής εξέτασης αφού πρωτίστως είχε προκληθεί μια μικρή υποδιόρθωση της μυωπίας ή μια υπερδιόρθωση της υπερμετρωπίας. Αυτό οφείλεται σε τρεις λόγους:

- ☞ Στο βάθος του πεδίου του οποίου όλο το εύρος μετακινείται μεταξύ οπτότυπου και ασθενούς.
- ☞ Σε κάποια μικρή ανοχή του ματιού στη θόλωση της εικόνας.
- ☞ Στο γεγονός ότι το οπτότυπο δεν ήταν τοποθετημένο στο άπειρο, αλλά σε μια απόσταση από το μάτι την οποία εμείς καθιστούμε άπω σημείο του. Στην προκειμένη περίπτωση το σφάλμα για τα 4 μέτρα ήταν $\frac{1}{4} D = 0.25 D$.

Για τον τελικό έλεγχο του σφαιρώματος χρησιμοποιήθηκε η **διχρωματική δοκιμασία**. Η δοκιμασία αυτή στηρίζεται στην αρχή ότι η καλύτερη οπτική οξύτητα για το πολυχρωματικό φως επιτυγχάνεται όταν το μέσο του φάσματος, δηλαδή, το κίτρινο χρώμα εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή. Το πράσινο εστιάζεται πιο μπροστά και το κόκκινο πιο πίσω σε ίση απόσταση από το κίτρινο.

Μέτρηση του μεγέθους της κόρης. Πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του κορόμετρου (Colvard Pupillometer OASIS 5145), αφού προηγουμένως είχε ζητηθεί από τον εξεταζόμενο να διατηρεί ταυτόχρονα και τα δύο του μάτια ανοιχτά, προκειμένου να υπολογιστεί το πραγματικό της μέγεθος στις ίδιες συνθήκες εξέτασης (είναι γνωστό ότι ο συνεχής φωτισμός του ενός οφθαλμού προκαλεί συνεχή μύση του άλλου).

Χαρακτηριστικά και δράση των μυδριατικών φαρμάκων. Για τη μέτρηση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης και των εκτροπών ήταν απαραίτητη η μυδρίαση της κόρης, για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν φαρμακευτικές ουσίες σε μορφή κολλυρίων που προκαλούν μυδρίαση του εξεταζόμενου οφθαλμού. Στη συγκεκριμένη μελέτη έγινε ενστάλαξη φαινυλεφρίνης και τροπικαμίδης, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

- ☞ **Φαινυλεφρίνη.** Είναι ένα συμπαθομιμητικό φάρμακο που διεγείρει άμεσα τους α-αδρενεργείς υποδοχείς. Η ενστάλαξή του στο μάτι προκαλεί γρήγορη μυδρίαση (σε λιγότερο από 20 λεπτά) που διαρκεί 6-10 ώρες. Η φαινυλεφρίνη¹³ ως διάλυμα 10% ενδείκνυται ως μυδριατικό και μερικές από τις χρήσεις του είναι για διαστολή της κόρης σε ραγοειδίτιδα, γλαύκωμα ανοικτής γωνίας, χειρουργικές επεμβάσεις,

¹³ Φαινυλεφρίνη (Faiylephrine Hydrochloride 10%). Ανήκει στην κατηγορία των συμπαθομιμητικών φαρμάκων. Υπεύθυνος κυκλοφορίας και παρασκευαστής: ΚΟΠΕΡ Α.Ε Φαρμακευτική Βιομηχανία.

διάθλαση (όταν δεν απαιτείται κυκλοπληγία), οφθαλμοσκοπική εξέταση για διαγνωστικούς σκοπούς. Πάντως η μυδρίαση που προκαλείται δεν είναι τόσο έντονη και η κόρη διατηρεί την αντίδρασή της στο φως. Για τους λόγους αυτούς η φαινυλεφρίνη σπανίως χρησιμοποιείται μόνη της ως μυδριατικό.

☞ **Τροπικαμίδη.** Ανήκει και αυτό στην κατηγορία των συμπαθομιμητικών φαρμάκων. Η μέγιστη μυδρίαση επιτυγχάνεται 30 περίπου λεπτά μετά την ενστάλαξη και η επίδραση παρέρχεται μετά από 4 με 5 ώρες. Η τροπικαμίδη¹⁴ ως διάλυμα 0,5% ενδείκνυται για διαγνωστικούς (οφθαλμοσκόπηση, αναζήτηση διαθλαστικών ανωμαλιών) και θεραπευτικούς σκοπούς (πρόκληση μυδρίασης) πριν και μετά από ενδοφθάλμιες χειρουργικές επεμβάσεις. Η φαινυλεφρίνη ενισχύει το μυδριατικό αποτέλεσμα, στοιχείο που επιτρέπει το μεταξύ τους συνδυασμό. Όταν απαιτείται μέγιστη μυδρίαση, είναι ιδανικός ο συνδυασμός των δυο, γιατί η δράση τους είναι αθροιστική. Προηγούμενη ενστάλαξη αναισθητικού ενισχύει το μυδριατικό αποτέλεσμα του συνδυασμού.

Μέτρηση Μετώπου κύματος. Πραγματοποιήθηκε με εξειδικευμένα συστήματα μέτρησης των εκτροπών του οφθαλμού των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε αισθητήρα Shack-Hartmann. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια ακτίνα φωτός [(SLD: Super Luminescence Photodiode) - φωτοδίοδος υψηλής λαμπρότητας], η οποία εισέρχεται στον οφθαλμό από το άνοιγμα της κόρης. Η ακτίνα αυτή αντανακλάται από τον αμφιβληστροειδή και σα δεύτερη πηγή φωτός εξέρχεται από τον οφθαλμό. Η ακτίνα στην πορεία της μέσα από το μάτι υπόκειται κάποια ανάλογη παραμόρφωση από τα σφάλματα και τις ατέλειες των μέσων που διέρχεται και καταλήγει σε μια συστοιχία φακών. Η ανακλώμενη ακτινοβολία οδηγείται στον αισθητήρα Shack-Hartmann μέσω οπτικού συστήματος το οποίο απεικονίζει το επίπεδο της κόρης του οφθαλμού στο επίπεδο της διάταξης των μικροφακών του αισθητήρα. Με τον τρόπο αυτό η παραμόρφωση του μετώπου κύματος που μετράται από τον αισθητήρα αντιστοιχεί στις εκτροπές του οφθαλμού όταν αυτές έχουν αναχθεί στο επίπεδο της κόρης.

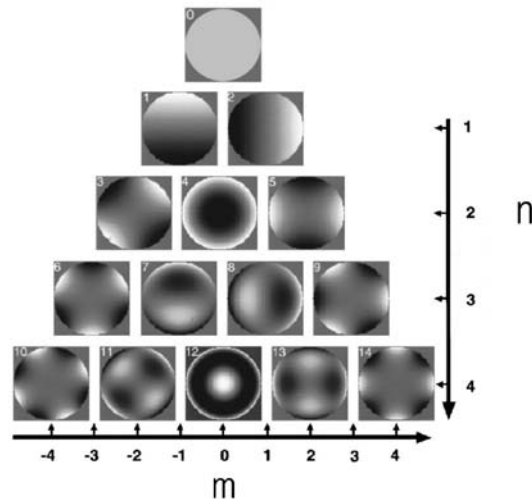
Η συσκευή ανίχνευσης μετώπου κύματος (COAS - Complete Ophthalmic Analysis System, Wavefront Sciences, Ltd), έχει τη δυνατότητα συνεχούς καταγραφής του διαθλαστικού προφίλ του οφθαλμού, λαμβάνοντας μέχρι 7.8 μετρήσεις/sec των εκτροπών χαμηλής (μυωπία, υπερμετρωπία, αστιγματισμός) και υψηλής (σφαιρική εκτροπή, κόμη, καμπύλωση πεδίου) τάξης.

¹⁴ Τροπικαμίδη (Tropicamide 0.5%). Ανήκει και αυτό στην κατηγορία των συμπαθομιμητικών φαρμάκων. Υπεύθυνος κυκλοφορίας και παρασκευαστής: DEMO ABEE.

Για ένα οπτικό σύστημα ο πιο γνωστός τρόπος μαθηματικής έκφρασης, ταξινόμησης και ποσοτικοποίησης των αποκλίσεων είναι τα πολυώνυμα Zernike. Τα πολυώνυμα αυτά είναι ορθογώνια, κανονικοποιημένα και αποτελούν βάση του χώρου των συνεχών συναρτήσεων που είναι ορισμένες μέσα σε μοναδιαίο κύκλο. Για την αξιολόγηση των σφαλμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε η απευθείας τιμή του συντελεστή του πολυωνύμου Zernike που αντιστοιχεί στο μέγεθος του σφάλματος ή η τιμή του RMS (Root Mean Square)¹⁵. Το μέτωπο κύματος $W(\rho, \theta)$ μπορεί να γραφεί σαν επαλληλία των πολυωνύμων Zernike ως εξής:

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n,m} C_n^m Z_n^m$$

όπου C_n^m ο συντελεστής που προκύπτει από το ανάπτυγμα για το πολυώνυμο Z_n^m (n : η τάξη του όρου, m : η συχνότητά του).



Σχήμα 25: Γραφικές παραστάσεις των δεκαπέντε πρώτων πολυωνύμων Zernike. Με n σημειώνεται ο ακτινικός όρος (τάξη της εκτροπής) και με m ο γωνιακός. (Thibos et al - 2002).

Όπως είναι κατανοητό, όσο περισσότεροι όροι των πολυωνύμων προστίθενται στο παραπάνω άθροισμα με τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια προσεγγίζεται το μέτωπο του κύματος. Πρακτικά, δεδομένης και της περιορισμένης ακρίβειας των συστημάτων μέτρησης των οφθαλμικών εκτροπών, για χρήση στην οφθαλμολογία χρησιμοποιούνται όροι μέχρι και 4^{ης} τάξης. Οι τιμές των συντελεστών των πολυωνύμων Zernike συνδέονται (κατά προσέγγιση) με τις συνήθεις εκτροπές. Για παράδειγμα τα

¹⁵ Το RMS είναι μια παράμετρος που χρησιμοποιείται για να εκφράσει το μέγεθος του "συνολικού" οπτικού σφάλματος και αναφέρεται στην απόκλιση ενός οπτικού συστήματος από το ιδανικό. Πιστεύεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο περισσότερα είναι τα σφάλματα του συστήματος.

C_2^{-2} C_2^2 συνδέονται με τον αστιγματισμό, το C_2^0 με το σφαιρώμα και το σφαιρικό ισοδύναμο, το C_4^0 με τη σφαιρική εκτροπή και τα C_3^{-1} C_3^1 με τις εκτροπές που είναι γνωστές ως κόμα (οριζόντιο και κάθετο).

Οι εκτροπές υψηλής τάξης μετρήθηκαν για τον καθένα συμμετέχοντα πριν τη διαθλαστική επέμβαση, ένα και τρεις μήνες μετά από αυτήν. Η καταγραφή και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια Η/Υ στο πρόγραμμα Excel και ο μαθηματικός υπολογισμός στο πρόγραμμα MATLAB. Οι οφθαλμικές εκτροπές εκφράστηκαν με 15 Zernike πολυώνυμα κατά OSA Notation. Το RMS High υπολογίστηκε από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων όλων των εκτροπών τρίτης και τετάρτης τάξης:

$$\text{RMS High} = \sqrt{[(Z^3_{-3})^2 + (Z^3_{-1})^2 + (Z^3_1)^2 + (Z^3_3)^2 + (Z^4_{-4})^2 + (Z^4_{-2})^2 + (Z^4_0)^2 + (Z^4_2)^2 + (Z^4_4)^2]},$$

ενώ το RMS της σφαιρικής εκτροπής από την τετραγωνική ρίζα του $(Z^4_0)^2$. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε για διάμετρο κόρης 6 και 3mm. Η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε σε σκοτεινό χώρο, ενώ ζητήθηκε από τον εκάστοτε συμμετέχοντα να προσηλώνει με τον άλλο του οφθαλμό σε μακρινό στόχο με σκοπό την αποφυγή πιθανής προσαρμογής.

Μέτρηση ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης. Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας Gabor gratings¹⁶ που παρουσιάζονταν σε μια οθόνη Sony GDM F-520 CRT (με ρυθμό ανανέωσης 120 Hz) με τη βοήθεια μιας κάρτας γραφικών (CRS, Rochester, UK). Τα ερεθίσματα πολλαπλασιάστηκαν με μια Gaussian συνάρτηση, με διάμετρο 100 pixels στο μισό ύψος του Gaussian προφίλ (με τυπική απόκλιση 1.2 deg σε απόσταση 2 μέτρων¹⁷). Έξι χωρικές συχνότητες 1, 2, 4, 8, 12, 16 c/deg εξετάστηκαν (σε κάθετο προσανατολισμό - 90deg), ενώ καταγραφόταν η μέση τιμή τριών μετρήσεων (threshold). Το threshold καθορίστηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο binary-search (που στηρίζεται στη σκάλα αναζήτησης) με ανάλυση contrast της τάξης του 1dB (0.05 log units). Αρχικά το ερέθισμα παρουσιαζόταν με μια αντίθεση της τάξης των 16dB [κλίμακα decibel (**CS** σε dB = $-20 \log_{10} \mathbf{C}$)]. Αν το ερέθισμα ήταν ορατό από τον εξεταζόμενο, τότε το contrast μειωνόταν κατά 16dB, στην αντίθετη περίπτωση

¹⁶ Gabor grating: η μαθηματική εξίσωση της διαμόρφωσης φωτεινότητας για ένα ημιτονοειδές grating είναι $L(x) = L \text{ mean } [1 + C \sin(2\pi Fx + \phi)]$, όπου $L(x)$ η φωτεινότητα στη θέση x , $L \text{ mean}$ η μέση φωτεινότητα της οθόνης, C το κόντραστ, F η χωρική συχνότητα και ϕ η φάση.

¹⁷ Οι ακμές που δημιουργούνται στο σύνορο του ερεθίσματος με την οθόνη είναι δυνατόν να επηρεάσουν την ανιχνευσιμότητα του grating. Η ομαλή μείωση της φωτεινότητας στα άκρα του ερεθίσματος 'σβήνει' τις ακμές, που διαφορετικά θα καθιστούσαν το ερέθισμα πιο ανιχνεύσιμο.

αυξανόταν κατά 16dB. Σταδιακά το "σκαλοπάτι" αύξησης/μείωσης μειωνόταν στο μισό (π.χ 8, 4, 2) μέχρι να είναι ίσο με 1 dB. Κατά συνέπεια, το threshold μπορούσε να καθοριστεί σε έξι βήματα.

Διαδικασία μέτρησης. Οι συμμετέχοντες που έλαβαν μέρος στη συγκεκριμένη μελέτη δεν είχαν πρότερη εμπειρία σε ψυχοφυσικές μετρήσεις. Τα διαθλαστικά τους σφάλματα ήταν διορθωμένα για την απόσταση των δύο μέτρων στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, ενώ τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν από τον κυρίαρχο (dominant) οφθαλμό τους. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μέσα σε σκοτεινό δωμάτιο προεγχειρητικά, ένα μήνα και τρεις μήνες μετά τη διαθλαστική επέμβαση. Τεχνητή κόρη (artificial pupil) 3 και 6mm χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να απομονωθεί η επίδραση των εκτροπών στη μέτρηση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης. Είναι γνωστό ότι οι εκτροπές είναι σημαντικές για μεγάλες διαμέτρου κόρες, οπότε αυτό που αναμένεται είναι ότι η επίδραση θα είναι πιο εμφανής στην δεύτερη περίπτωση. Μείωση της διαμέτρου της κόρης στο μισό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της επιφάνειας εμβαδού της κόρης κατά 4 φορές, με αποτέλεσμα να προκύπτει μείωση της αμφιβληστροειδικής φωτεινότητας¹⁸ κατά 4 φορές. Για αυτό το λόγο (για να απομονωθεί η επίδραση της φωτεινότητας) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και για 30 cd/m² στην περίπτωση των 3mm και 7.5 cd/m² στην περίπτωση των 6mm τεχνητής κόρης. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για μέση φωτεινότητα grating 30 cd/m² και για κόρη 6mm προκειμένου να γίνει αξιολόγηση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης σε συνθήκες διαφορετικού φωτισμού.

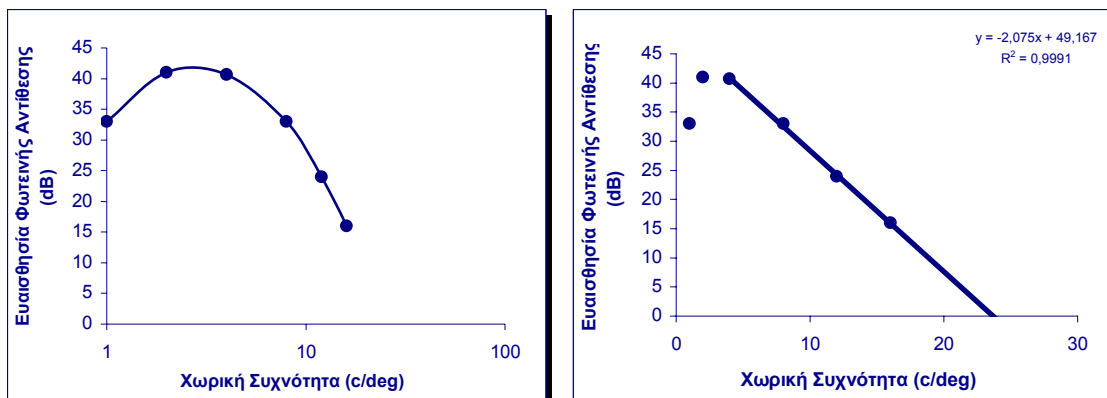
¹⁸ $T = \pi r^2 \cdot L$ [Όπου T: η αμφιβληστροειδική φωτεινότητα (μετρούμενη σε trolands) και L: η φωτεινότητα του ερεθίσματος (μετρούμενη σε cd/m²)].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσης μελέτης παραθέτονται στις παρακάτω παραγράφους. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίδρασης της φωτεινότητας και της διαμέτρου της κόρης σε όλους τους εξεταζόμενους προ-εγχειρητικά. Στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση της οπτικής οξύτητας και της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης μετεγχειρητικά (για έναν και τρεις μήνες) για τις δύο μεθόδους διαθλαστικής επέμβασης. Τέλος αξιολογούνται οι εκτροπές υψηλής τάξης προ-εγχειρητικά, μετεγχειρητικά και η συσχέτισή τους με την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης.

4.1 Αξιολόγηση ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή η καμπύλη ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (εκφρασμένη σε μονάδες dB) συνήθως παριστάνεται συναρτήσεως της χωρικής συχνότητας σε λογαριθμική κλίμακα (σχήμα: 26α)¹⁹. Τα ίδια δεδομένα μπορούν να παρασταθούν σε γραμμική κλίμακα. Αυτό είναι χρήσιμο για την εύρεση της μέγιστης διακριτικής ικανότητας του εξεταζόμενου (είναι γνωστό ότι η ευαισθησία μειώνεται γραμμικά για χωρικές συχνότητες > 4 c/deg) (σχήμα 26β).



Σχήμα 26: Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης συναρτήσεως της χωρικής συχνότητας σε λογαριθμική κλίμακα (αριστερά) και γραμμική κλίμακα (δεξιά) για τον ίδιο εξεταζόμενο (subject: MK για τη συνθήκη των 6mm διαμέτρου κόρης και για φωτεινότητα grating 7.5cd/m²). Παρατηρούμε ότι η ευαισθησία μειώνεται γραμμικά για χωρικές συχνότητες > 4 c/deg στη δεύτερη περίπτωση. Το σημείο που η γραμμή τέμνει τον άξονα x αποτελεί τη μέγιστη διακριτική ικανότητα του εξεταζόμενου σε αυτή την συνθήκη.

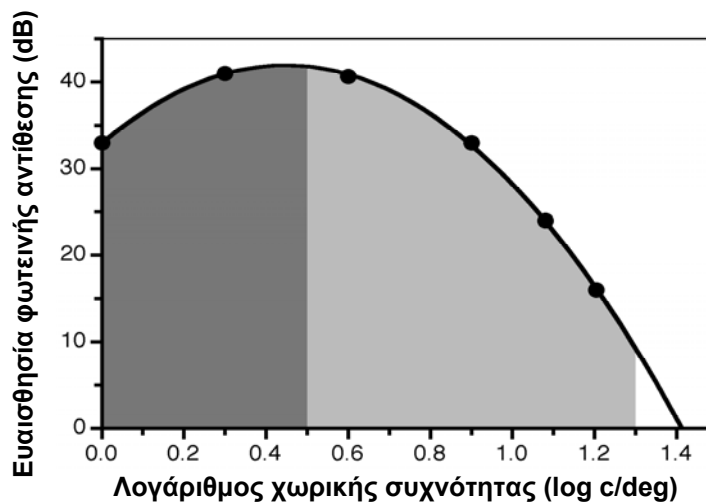
¹⁹ Στο παράρτημα παραθέτονται οι καμπύλες φωτεινής ευαισθησίας συναρτήσεως της χωρικής συχνότητας σε λογαριθμική κλίμακα για κάθε ένα συμμετέχοντα προ-εγχειρητικά και μετεγχειρητικά (τον 1^ο και 3^ο μήνα).

Για την καλύτερη ποσοτικοποίηση και αξιολόγηση της καμπύλης ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης είναι αναγκαία η χρήση κατάλληλων μετρικών. Μέτρο αξιολόγησης της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης για κάθε ένα συμμετέχοντα απετέλεσε η μέγιστη διακριτική ικανότητα του εκάστοτε συμμετέχοντα η οποία υπολογίστηκε από το σημείο του άξονα x (cut-off frequency) το οποίο έτεμνε η γραμμική συσχέτιση (σχήμα: 26β).

Μια άλλη μετρική που έχει χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες μελέτες (Jiang et al. 1990) αποτελεί το «εμβαδόν» που περικλείεται από την καμπύλη ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης και τους άξονες (x, y). Για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της, τα δεδομένα παραστήθηκαν γραφικά συναρτήσει του λογάριθμου της χωρικής συχνότητας (Σχήμα: 27) σε γραμμική κλίμακα (οι συχνότητες 1, 2, 4, 8, 12, 16 c/deg, αντιστοιχούν σε λογαριθμικές τιμές 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.08, 1.2 log c/deg). Στα δεδομένα παρεμβλήθηκαν πολυωνυμικές συναρτήσεις δευτέρου βαθμού της μορφής $y=ax^2+bx+c$, οι οποίες περιγράφουν πολύ ικανοποιητικά τα δεδομένα (η μέση τιμή του συντελεστή συσχέτισης, R^2 , για όλους τους εξεταζόμενους και για όλες τις συνθήκες ήταν 0.95, και κυμάνθηκε μεταξύ 0.78 και 0.99). Επειδή είναι γνωστό ότι διαφορετικές συνθήκες επηρεάζουν επιλεκτικά τις χαμηλές και τις υψηλές χωρικές συχνότητες, το «εμβαδόν» υποδιαιρέθηκε σε δύο χωρία για να υπολογιστεί ξεχωριστά η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης για χαμηλές (0.0 έως 0.5 log c/deg) και οι υψηλές χωρικές συχνότητες (0.5 έως 1.3 c/deg). Για την αξιολόγηση του «εμβαδού» υπολογίστηκαν ξεχωριστά τα ολοκληρώματα για τις χαμηλές, τις υψηλές και τις συνολικές λογαριθμικές χωρικές συχνότητες, ως εξής:

$$E_{low} = \int_{0}^{0.5} f(x)dx, E_{high} = \int_{0.5}^{1.3} f(x)dx, E_{all} = \int_{0}^{1.3} f(x)dx$$

low
high
all

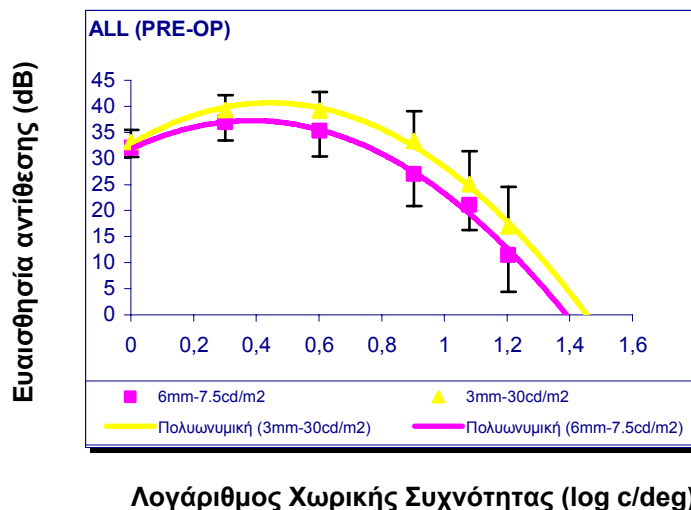


Σχήμα 27: Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης συναρτήσει του λογάριθμου της χωρικής συχνότητας σε γραμμική κλίμακα για τον εξεταζόμενο του σχήματος 26. Η περιοχή που είναι χρωματισμένη με σκούρο γκρι αποτελεί το εμβαδόν των χαμηλών συχνοτήτων E_{low} , ενώ αυτή με το ανοιχτόχρωμο γκρι αποτελεί το εμβαδόν των υψηλών χωρικών συχνοτήτων E_{high} .

4.2 Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης - Διάμετρος κόρης

Προκειμένου να αξιολογηθεί η σημασία της διαμέτρου της κόρης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης για 6mm διάμετρο κόρης (φωτεινότητα grating 7.5 cd/m²) και για 3mm (φωτεινότητα grating 30 cd/m²) (και στις δύο περιπτώσεις η αμφιβληστροειδική φωτεινότητα (T) ήταν σταθερή και ίση με 212 td [$T = \pi r^2 L$, βλ. κεφάλαιο: 3, διαδικασία μέτρησης ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης]). Η μέγιστη διακριτική ικανότητα (cut-off frequency) για την πρώτη συνθήκη ήταν 22.14 (c/deg), ενώ για τη δεύτερη συνθήκη 25.15 (c/deg).

Στη γραφική παράσταση (σχήμα: 28) που ακολουθεί μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα προ-εγχειρητικά στοιχεία (μέσες τιμές) των συμμετεχόντων κατά πόσο επηρέασε την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης το μέγεθος της κόρης. Είναι εμφανές ότι οι συμμετέχοντες παρουσίαζαν μεγαλύτερη ευαισθησία όταν η διάμετρος της κόρης ήταν 3mm, ενώ φαίνεται να μην επηρεάζονται οι χαμηλές, όσο οι μεσαίες και οι υψηλές συχνότητες.

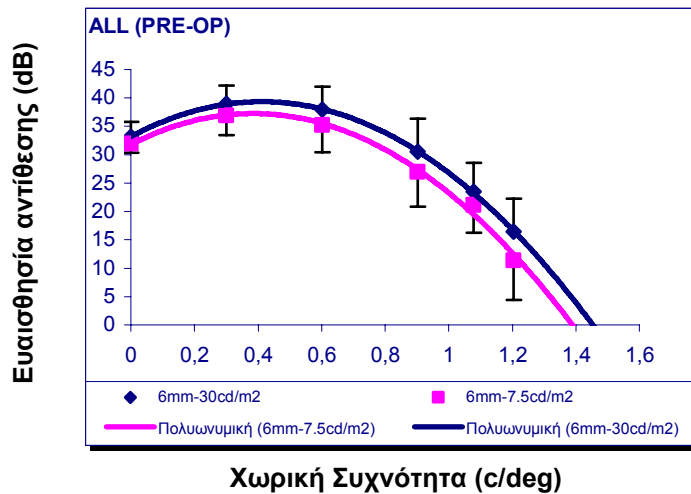


Σχήμα 28: Καμπύλες ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης για διαφορετικό μέγεθος κόρης. Η αμφιβληστροειδική φωτεινότητα ήταν ίση με 212 td και στις δύο συνθήκες. Τα σημεία αποτελούν τις μέσες τιμές μεταξύ των συμμετεχόντων, ενώ έχει παρασταθεί και το εύρος της τυπικής απόκλισης.

4.3 Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης – Φωτεινότητα grating

Για να αξιολογηθεί η σημασία της φωτεινότητας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης για 6mm διάμετρο κόρης και για φωτεινότητα grating 30 και 7.5 cd/m² (και αντίστοιχη αμφιβληστροειδική φωτεινότητα 848 και 212 td). Η μέγιστη διακριτική ικανότητα (cut-off frequency) για την πρώτη συνθήκη ήταν 25.13 (c/deg), ενώ για τη δεύτερη συνθήκη 22.14 (c/deg).

Στη γραφική παράσταση (σχήμα: 29) μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα προ-εγχειρητικά στοιχεία των συμμετεχόντων, κατά πόσο επηρέασε την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης η διαφορετική φωτεινότητα. Είναι εμφανές ότι οι συμμετέχοντες παρουσίαζαν μεγαλύτερη ευαισθησία όταν η φωτεινότητα του grating ήταν 30 cd/m². Σημαντικό και εδώ είναι το γεγονός ότι η χαμηλή φωτεινότητα επηρεάζει όχι τόσο τις χαμηλές χωρικές συχνότητες όσο τις μεσαίες και τις υψηλές.



Σχήμα 29: Καμπύλες ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης για τα δύο επίπεδα φωτισμού. Τα σημεία αποτελούν τις μέσες τιμές μεταξύ των συμμετεχόντων, ενώ έχει παρασταθεί και το εύρος της τυπικής απόκλισης.

4.4 Διαθλαστική χειρουργική

4.4.1 Διαθλαστική χειρουργική και οπτική οξύτητα

Κατά το μετεγχειρητικό έλεγχο που ακολούθησε ένα μήνα μετά τη διαθλαστική επέμβαση και οι 23 συμμετέχοντες προσήλθαν και εξετάστηκαν, ενώ τρεις μήνες μετά οι 19 από τους 23. Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται αναλυτικά τα μετεγχειρητικά στοιχεία των συμμετεχόντων ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση.

	POSTOP 1 MONTH					POSTOP 3 MONTHS					
ΣΥΜ/ΧΟΝ	ΔΙΑΘ. ΣΦΑΛΜΑ (ΣΦ/ΜΑ)	ΔΙΑΘ. ΣΦΑΛΜΑ (ΑΣΤΙΓ/ΣΜΟΣ)	ΣΦ. ΙΣΟΔΥΝ ΑΜΟ	ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΔΙΟΡ/ΝΗ ΟΡΑΣΗ (decimal)	ΜΗ ΔΙΟΡ/ΝΗ ΟΡΑΣΗ (decimal)	ΔΙΑΘ. ΣΦΑΛΜΑ (ΣΦ/ΜΑ)	ΔΙΑΘ. ΣΦΑΛΜΑ (ΑΣΤΙΓ/ΣΜΟΣ)	ΣΦ. ΙΣΟΔΥΝ ΑΜΟ	ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΔΙΟΡ/ΝΗ ΟΡΑΣΗ (decimal)	ΜΗ ΔΙΟΡ/ΝΗ ΟΡΑΣΗ (decimal)	ΔΙΑΘ. ΕΠΕΜ/ΣΗ
NK	+0.50	-1.00	0.00	1.20	1.00	+0.50	-1.00	0.00	1.20	1.00	LASIK
EA	+0.75	-0.50	+0.50	1.05	1.05	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	LASIK
EP	-0.50	-0.25	-0.62	1.00	1.00	-0.50	-0.50	-0.75	1.05	1.05	LASIK
EP.	+0.25	-1.00	-0.25	1.00	0.80	+0.25	-1.00	-0.25	0.90	0.70	LASIK
FT	+1.00	-0.50	+0.75	0.95	0.80	+0.50	-0.50	+0.25	0.95	0.95	LASIK
MK.	-0.75	0.00	-0.75	1.00	1.00	-0.50	-1.00	-1.00	0.80	0.70	LASIK
GP	-0.75	-0.50	-1.00	1.00	0.95	0.00	+0.75	+0.37	1.20	1.20	LASIK
SP	0.00	0.00	0.00	1.20	1.20	+0.25	0.00	+0.25	1.20	1.20	LASIK
SM.	-0.25	-0.50	-0.50	1.00	0.95	-0.25	-0.25	-0.37	1.05	1.00	LASIK
MM	-0.25	0.00	-0.25	1.20	1.20						LASIK
MK	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	+0.75	-0.25	+0.62	1.20	1.05	PRK
ME	+0.25	-0.50	0.00	0.85	0.80	+0.50	-0.50	+0.25	0.95	0.85	PRK
SN	+0.50	-0.25	+0.37	0.80	0.70	+0.50	-0.50	+0.25	1.05	0.95	PRK
IA	0.00	-0.75	-0.37	1.05	0.80	0.00	-0.50	-0.25	1.20	1.00	PRK
SO	+0.50	-0.75	+0.12	1.00	0.90	+0.50	-0.50	+0.25	1.00	0.95	PRK
EK	-0.50	0.00	-0.50	1.00	0.95	-0.25	-0.25	-0.37	1.20	1.20	PRK
FD	0.00	-0.75	-0.37	1.05	1.05	0.00	0.00	0.00	1.20	1.20	PRK
BK	+0.50	-0.50	+0.25	0.90	0.80	+0.50	-0.25	+0.37	1.00	1.00	PRK
EP..	0.00	-0.50	-0.25	1.00	0.90	0.00	-0.25	-0,125	1.20	1.00	PRK
DDB	0.00	-0.25	-0.12	1.20	1.20	0.00	0.00	0.00	1.20	1.20	PRK
DDB	+0.25	-0.25	+0,12	1.20	1.20	0.00	0.00	0.00	1.40	1.40	PRK
SM	+0.25	-1.00	-0.25	1.20	1.00						PRK
GP.	+0.50	-0.75	+0,12	0.95	0.85						PRK

Πίνακας 6: Περιλαμβάνει στοιχεία του κάθε εξεταζόμενου ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση (π.χ το υπολειπόμενο διαθλαστικό σφάλμα, το σφαιρικό ισοδύναμο, την καλύτερη και τη μη διορθωμένη οπτική οξύτητα και το είδος της διαθλαστικής επέμβασης που υποβλήθηκε καθένas από αυτούς).

Ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση για το υπολειπόμενο διαθλαστικό σφάλμα, το σφαιρικό ισοδύναμο, την καλύτερη και μη διορθωμένη οπτική οξύτητα όλων των συμμετεχόντων ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση παρουσιάζονται στον πίνακα 7.

23 ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΕΣ	POSTOP 1M		POSTOP 3M	
	Μέσος όρος (mean)	Τυπική απόκλιση (stdev)	Μέσος όρος (mean)	Τυπική απόκλιση (stdev)
Διαθλαστικό σφάλμα (σφαίρωμα) (σε D)	0.10	± 0.46	0.14	± 0.36
Διαθλαστικό σφάλμα (αστιγματισμός) (σε D)	-0.46	± 0.33	-0.33	± 0.41
Σφαιρικό ισοδύναμο (σφαίρωμα + αστιγματισμός / 2) (σε D)	-0.13	± 0.41	-0.03	± 0.39
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (σε δεκαδική κλίμακα - decimal)	1.03	± 0.12	1.12	± 0.17
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (κλίμακα LogMAR)	-0.01	± 0.05	-0.05	± 0.07
Μη διορθωμένη ο.ο (σε δεκαδική κλίμακα - decimal)	0.96	± 0.15	1.06	± 0.20
Μη διορθωμένη ο.ο (κλίμακα LogMAR)	0.02	± 0.07	-0.02	± 0.08

Πίνακας 7: Περιλαμβάνει το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση των μετεγχειρητικών στοιχείων όλων των συμμετεχόντων ένα και τρεις μήνες μετά τη διαθλαστική επέμβαση.

4.4.1.2 Μετεγχειρητική αξιολόγηση (LASIK subjects)

Ένα μήνα μετά την επέμβαση σχεδόν και οι 10 (κατά μέσο όρο) συμμετέχοντες που υπεβλήθησαν σε ενδοστρωματική κερατοσμίλευση παρουσίασαν οπτική οξύτητα (σε δεκαδική κλίμακα) ίση με 1.00, ενώ τρεις μήνες μετά αυτή αυξήθηκε ελάχιστα και έφτασε το 1.03. Το διαθλαστικό τους σφάλμα (σφαίρωμα) κατά μέσο όρο μηδενίστηκε (0.00 ± 0.61), ενώ παρέμεινε ένα μικρό ποσοστό αστιγματισμού (-0.43 ± 0.37).

Τρεις μήνες μετά την επέμβαση το υπολειπόμενο σφαίρωμα έγινε ελαφρά υπερμετρωπικό (0.03 ± 0.38), ενώ η τιμή του υπολειπόμενου αστιγματισμού μειώθηκε (-0.39 ± 0.59). Παρατηρήθηκε μια μικρή βελτίωση στην οπτική τους οξύτητα με διόρθωση (1.09 ± 0.21) και χωρίς διόρθωση (1.03 ± 0.25). Στον πίνακα 8 και στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (σχήμα: 30) παρουσιάζονται τα προεγχειρητικά και μετεγχειρητικά στοιχεία των συμμετεχόντων ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση.

LASIK SUBJECTS	PREOP		POSTOP 1M		POSTOP 3M	
	Μέσος όρος (mean)	Τυπική απόκλιση (stdev)	Μέσος όρος (mean)	Τυπική απόκλιση (stdev)	Μέσος όρος (mean)	Τυπική απόκλιση (stdev)
Διαθλαστικό σφάλμα (σφαίρωμα)	-4.00	± 1.67	0.00	± 0.61	0.03	± 0.38
Διαθλαστικό σφάλμα(αστιγματισμός)	- 0.90	± 0.91	- 0.43	± 0.37	-0.39	± 0.59
Σφαιρικό ισοδύναμο (σφαίρωμα + αστιγματισμός / 2)	-4.45	± 1.44	- 0.21	± 0.55	- 0.17	± 0.47
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (σε δεκαδική κλίμακα - decimal)	1.06	± 0.21	1.06	± 0.10	1.09	± 0.21
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (κλίμακα LogMAR)	- 0.02	± 0.09	- 0.02	± 0.04	- 0.03	± 0.08
Μη διορθωμένη ο.ο (σε δεκαδική κλίμακα - decimal)	0.06	± 0.11	1.00	± 0.14	1.03	± 0.25
Μη διορθωμένη ο.ο (κλίμακα LogMAR)	1.22	± 0.97	0.01	± 0.06	0.00	± 0.11

Πίνακας 8: Περιλαμβάνει το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση των προ-εγχειρητικών και μετεγχειρητικών στοιχείων των συμμετεχόντων ένα και τρεις μήνες μετά τη διαθλαστική επέμβαση (LASIK).

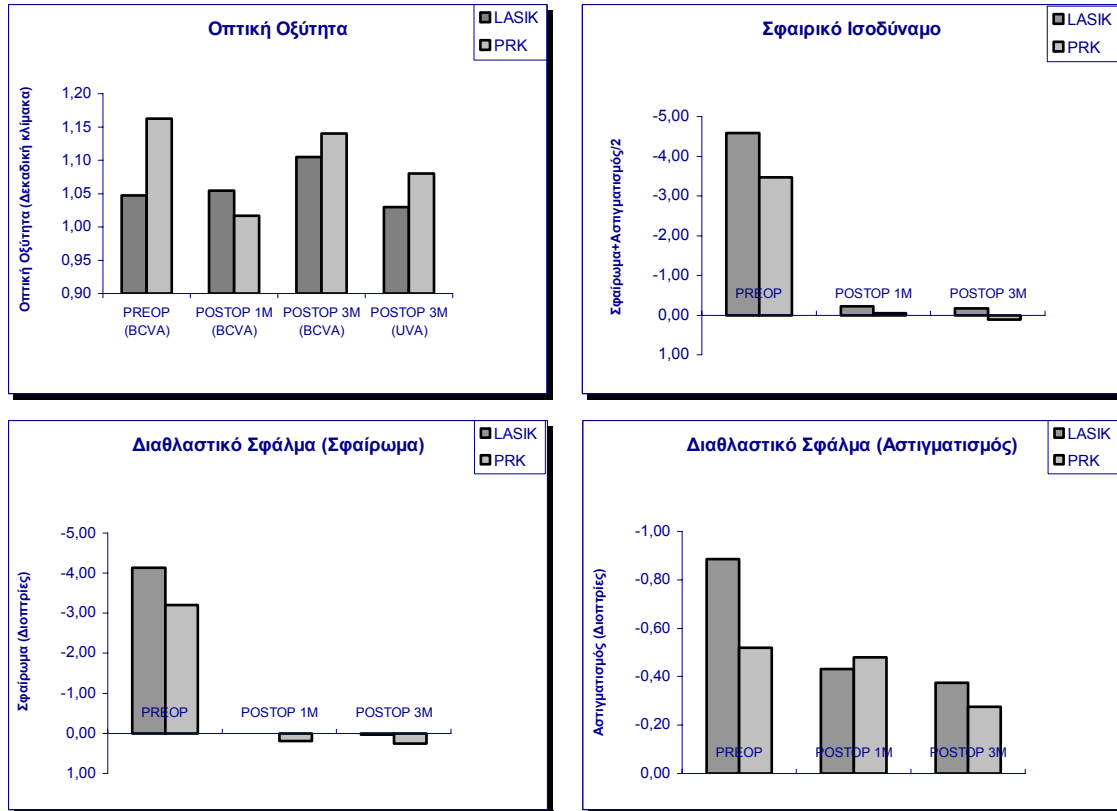
4.4.1.3 Μετεγχειρητική αξιολόγηση (PRK subjects)

Οι 13 συμμετέχοντες που υπεβλήθησαν σε επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή ένα μήνα μετά την επέμβαση παρουσίασαν κατά μέσο όρο οπτική οξύτητα ίση με 0.93 ± 0.15 . Το διαθλαστικό τους σφάλμα (σφαίρωμα) έγινε ελαφρά υπερμετρωπικό (0.17 ± 0.30), ενώ παρέμεινε ένα μικρό ποσοστό αστιγματισμού (-0.48 ± 0.31).

Τρεις μήνες μετά την επέμβαση το υπολειπόμενο θετικό σφαίρωμα αυξήθηκε ελάχιστα (0.23 ± 0.33), ενώ η τιμή του υπολειπόμενου αστιγματισμού μειώθηκε (-0.27 ± 0.21). Παρατηρήθηκε μια μικρή βελτίωση στην οπτική τους οξύτητα με διόρθωση (1.15 ± 0.13) και χωρίς διόρθωση (1.07 ± 0.16). Αξιοσημείωτο είναι ότι μεγαλύτερη βελτίωση οπτικής οξύτητας τρεις μήνες μετά τη διαθλαστική επέμβαση (σε σχέση με την οπτική οξύτητα του μήνα) και καλύτερη οπτική οξύτητα και με και χωρίς διόρθωση εμφάνισαν αυτοί που είχαν υποβληθεί σε PRK (σε σχέση με αυτούς που είχαν υποβληθεί σε LASIK). Στον πίνακα 9 και στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (σχήμα: 30) παρουσιάζονται τα προ-εγχειρητικά και μετεγχειρητικά στοιχεία των συμμετεχόντων ένα μήνα και τρεις μετά την επέμβαση.

PRK SUBJECTS	PREOP		POSTOP 1M		POSTOP 3M	
	Μέσος όρος (mean)	Τυπική απόκλιση (stdev)	Μέσος όρος (mean)	Τυπική απόκλιση (stdev)	Μέσος όρος (mean)	Τυπική απόκλιση (stdev)
Διαθλαστικό σφάλμα (σφαίρωμα)	-3.38	± 1.08	0.17	± 0.30	0.23	± 0.33
Διαθλαστικό σφάλμα(αστιγματισμός)	-0.54	± 0.35	-0.48	± 0.31	-0.27	± 0.21
Σφαιρικό ισοδύναμο (σφαίρωμα + αστιγματισμός / 2)	-3.65	± 1.08	-0.07	± 0.27	0.09	± 0.29
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (σε δεκαδική κλίμακα - decimal)	1.15	± 0.23	1.02	± 0.13	1.15	± 0.13
Καλύτερη διορθωμένη ο.ο (κλίμακα LogMAR)	-0.05	± 0.08	0.00	± 0.06	-0.06	± 0.05
Μη διορθωμένη ο.ο (σε δεκαδική κλίμακα - decimal)	0.03	± 0.09	0.93	± 0.15	1.07	± 0.16
Μη διορθωμένη ο.ο (κλίμακα LogMAR)	1.51	± 1.07	0.03	± 0.07	-0.03	± 0.06

Πίνακας 9: Περιλαμβάνει το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση των προ-εγχειρητικών και μετεγχειρητικών στοιχείων των συμμετεχόντων ένα και τρεις μήνες μετά τη διαθλαστική επέμβαση (PRK).



Σχήμα 30: Παρουσιάζονται σχηματικά οι μέσες τιμές που προέκυψαν στην οπτική οξύτητα, στο σφαιρικό ισοδύναμο και στο διαθλαστικό σφάλμα (σφαιρώμα και αστιγματισμός) μετά τη διαθλαστική χειρουργική και για τις δύο ομάδες (LASIK και PRK).

4.4.2 Διαθλαστική χειρουργική και ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης

4.4.2.1 Μετεγχειρητική αξιολόγηση (LASIK subjects)

Κατά τον προεγχειρητικό έλεγχο αλλά και ένα μήνα μετά την επέμβαση οι μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης πραγματοποιήθηκαν με την καλύτερη διόρθωση των συμμετεχόντων. Τρεις μήνες μετά οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την καλύτερη διόρθωση (BCVA) και χωρίς αυτήν (UVA) του εκάστοτε συμμετέχοντα και μόνο για τις δύο από τις τρεις συνθήκες (6mm κόρη - 7.5 cd/m² φωτεινότητα grating και 3mm κόρη - 30 cd/m² φωτεινότητα grating).

Στον πίνακα 10 και στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (σχήμα: 31 και 33) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των συμμετεχόντων που υπεβλήθησαν σε ενδοστρωματική κερατοσμίλευση πριν, ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση για τις τρεις συνθήκες μετρήσεων. Είναι χαρακτηριστική η βελτίωση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης στους τρεις μήνες (τόσο σε σύγκριση με τις τιμές του μήνα και τις προ-εγχειρητικές), ενώ όταν οι μετρήσεις γίνονται χωρίς την καλύτερη διόρθωση παρατηρείται σημαντική μείωση.

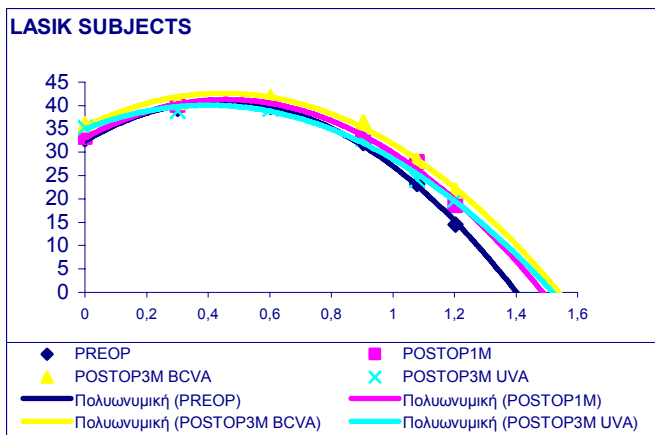
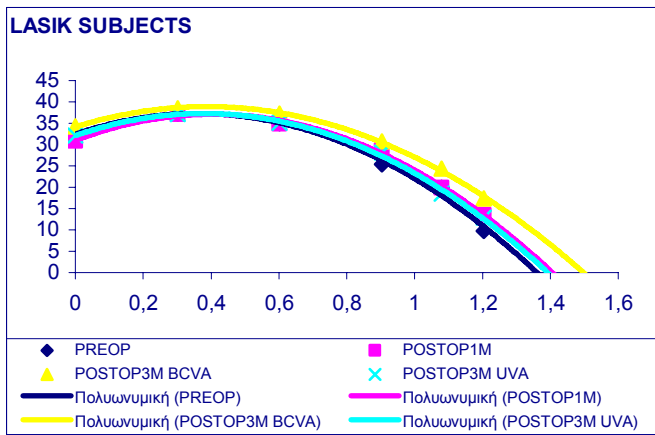
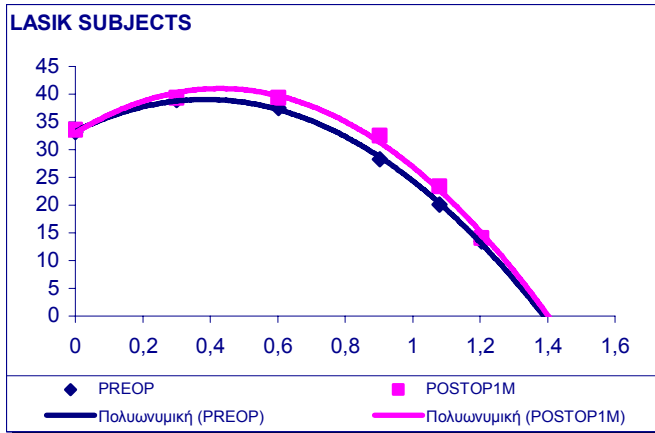
LASIK SUBJECTS	PREOP	POSTOP 1 MONTH
6mm - 30cd/m²		
Low sfs	22.62 ± 2.03	23.76 ± 2.06
High sfs	18.39 ± 4.01	19.93 ± 3.87
All sfs	41.02 ± 5.64	43.69 ± 5.65
Cut - off frequency	23.64 ± 5.41	23.02 ± 4.40

LASIK SUBJECTS	PREOP	POSTOP 1 MONTH	POSTOP 3 MONTHS (BCVA)	POSTOP 3 MONTHS (UVA)
6mm - 7.5cd/m²				
Low sfs	21.89 ± 1.78	21.83 ± 1.87	22.79 ± 1.90	21.83 ± 2.42
High sfs	16.63 ± 3.52	17.70 ± 4.27	20.31 ± 5.08	17.47 ± 5.29
All sfs	38.53 ± 4.73	39.54 ± 5.98	43.10 ± 6.56	39.30 ± 7.47
Cut - off frequency	21.61 ± 4.27	21.95 ± 3.37	25.62 ± 5.98	22.33 ± 5.40

LASIK SUBJECTS	PREOP	POSTOP 1 MONTH	POSTOP 3 MONTHS (BCVA)	POSTOP 3 MONTHS (UVA)
3mm - 30cd/m²				
Low sfs	23.46 ± 1.72	23.63 ± 2.07	24.68 ± 1.68	23.63 ± 2.30
High sfs	19.99 ± 3.06	22.24 ± 4.12	23.79 ± 4.41	21.79 ± 6.05
All sfs	43.44 ± 4.09	45.88 ± 5.97	48.47 ± 5.30	45.42 ± 7.92
Cut - off frequency	24.32 ± 5.08	25.31 ± 3.38	30.68 ± 9.90	28.47 ± 9.49

Πίνακας 10: Περιλαμβάνει το μέσο όρο από το εμβαδόν των χαμηλών, υψηλών και συνολικών χωρικών συχνοτήτων προεγχειρητικά, ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση (LASIK).

Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Σχήμα 31: Καμπύλες ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης προ-εγχειρητικά, ένα και τρεις μήνες μετά τη διαθλαστική επέμβαση (LASIK) για τις τρεις συνθήκες. Στον 3^ο μήνα αξιολογήθηκε η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης με και χωρίς σφαιρο-κυλινδρική διόρθωση.

4.4.3 Μετεγχειρητική αξιολόγηση (PRK subjects)

Ο ίδιος τρόπος ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε και για τους συμμετέχοντες που υπεβλήθησαν σε επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή. Ο πίνακας 11 και οι γραφικές παραστάσεις στο σχήμα: 32 παρουσιάζουν τα συγκεντρωτικά στοιχεία των συμμετεχόντων προ-εγχειρητικά, ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση για τις τρεις συνθήκες.

Χαρακτηριστική είναι και εδώ η βελτίωση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης ένα μήνα μετά την επέμβαση, ωστόσο παρατηρούμε ότι η μέγιστη διακριτική ικανότητα των συμμετεχόντων μειώνεται. Τρεις μήνες μετά την επέμβαση η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης και η μέγιστη διακριτική ικανότητα βελτιώνονται (σε σύγκριση με τις τιμές του μήνα), ενώ όταν οι μετρήσεις γίνονται χωρίς την καλύτερη διόρθωση παρατηρείται σημαντική μείωση.

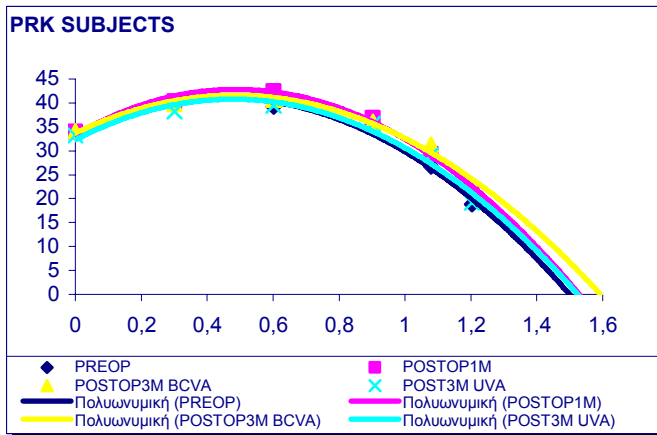
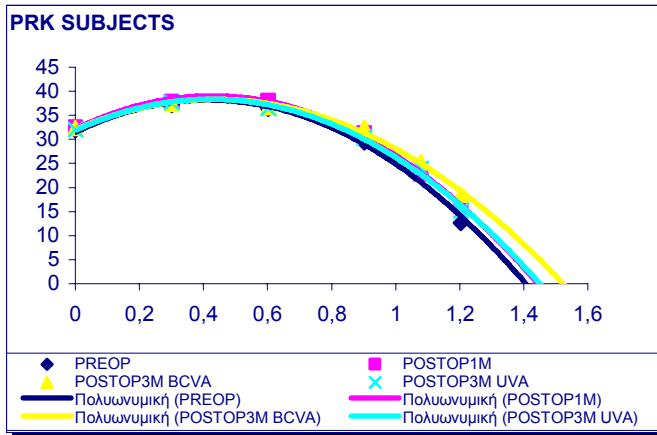
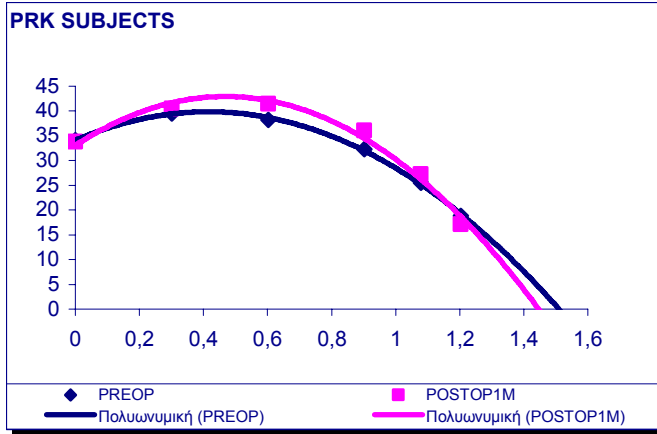
PRK SUBJECTS	PREOP	POSTOP 1 MONTH
6mm - 30cd/m²		
Low sfs	22.99 ± 1.92	23.54 ± 1.94
High sfs	21.61 ± 3.79	21.40 ± 2.90
All sfs	44.60 ± 5.60	44.94 ± 4.36
Cut - off frequency	28.32 ± 5.54	25.29 ± 4.23

PRK SUBJECTS	PREOP	POSTOP 1 MONTH	POSTOP 3 MONTHS (BCVA)	POSTOP 3 MONTHS (UVA)
6mm - 7.5cd/m²				
Low sfs	21.77 ± 2.13	21.91 ± 1.74	21.93 ± 2.31	21.76 ± 2.47
High sfs	18.26 ± 3.93	18.59 ± 3.59	20.30 ± 4.41	18.94 ± 4.42
All sfs	40.03 ± 5.82	40.49 ± 4.98	42.23 ± 6.68	40.70 ± 6.74
Cut - off frequency	23.51 ± 3.86	23.31 ± 3.82	26.80 ± 2.34	24.74 ± 3.94

PRK SUBJECTS	PREOP	POSTOP 1 MONTH	POSTOP 3 MONTHS (BCVA)	POSTOP 3 MONTHS (UVA)
3mm - 30cd/m²				
Low sfs	23.23 ± 1.61	23.69 ± 1.61	23.53 ± 1.63	22.81 ± 2.01
High sfs	22.20 ± 3.94	23.23 ± 3.01	23.65 ± 3.68	21.94 ± 3.80
All sfs	45.43 ± 5.23	46.92 ± 4.01	47.18 ± 5.18	44.75 ± 5.65
Cut - off frequency	28.72 ± 8.54	28.57 ± 4.36	30.44 ± 4.13	27.09 ± 4.76

Πίνακας 11: Περιλαμβάνει το μέσο όρο από το εμβαδόν των χαμηλών, υψηλών και συνολικών χωρικών συχνοτήτων προεγχειρητικά, ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση (PRK).

Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Σχήμα 32: Καμπύλες ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης προ-εγχειρητικά, ένα και τρεις μήνες μετά τη διαθλαστική επέμβαση (PRK) για τις τρεις συνθήκες.

4.4.4 LASIK VS PRK

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί αξιολόγηση για την κάθε μια τεχνική ξεχωριστά, αλλά ταυτόχρονα και για τις δύο μαζί, συγκεντρώθηκαν στον πίνακα 12 οι μέσοι όροι και οι τυπικές αποκλίσεις των χαμηλών, υψηλών και συνολικών τιμών της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (προ-εγχειρητικά, ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση). Στο σχήμα 34 πραγματοποιείται σύγκριση των μετρικών που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης για τις δύο τεχνικές.

	3mm - 30cd/m ²			6mm - 30cd/m ²			6mm - 7.5cd/m ²		
--	---------------------------	--	--	---------------------------	--	--	----------------------------	--	--

PREOP	low	high	all	low	high	all	low	high	all
LASIK									
mean	23.46	19.99	43.44	22.62	18.39	41.02	21.89	16.63	38.53
stdev	±1.72	±3.06	±4.09	±2.03	±4.01	±5.64	±1.78	±3.52	±4.73
PRK									
mean	23.23	22.20	45.43	22.99	21.61	44.60	21.77	18.26	40.03
stdev	±1.61	±3.94	±5.23	±1.92	±3.79	±5.60	±2.13	±3.93	±5.82

	3mm - 30cd/m ²			6mm - 30cd/m ²			6mm - 7.5cd/m ²		
--	---------------------------	--	--	---------------------------	--	--	----------------------------	--	--

POSTOP 1M	low	high	all	low	high	all	low	high	all
LASIK									
mean	23.63	22.24	45.88	23.76	19.93	43.69	21.83	17.70	39.54
stdev	±2.07	±4.12	±5.97	±2.06	±3.87	±5.65	±1.87	±4.27	±5.98
PRK									
mean	23.69	23.23	46.92	23.54	21.40	44.94	21.91	18.59	40.49
stdev	±1.61	±3.01	±4.01	±1.94	±2.90	±4.36	±1.74	±3.59	±4.98

	3mm - 30cd/m ² BCVA			3mm - 30cd/m ² UVA			6mm - 7.5cd/m ² BCVA			6mm - 7.5cd/m ² UVA		
--	-----------------------------------	--	--	----------------------------------	--	--	---------------------------------	--	--	-----------------------------------	--	--

POSTOP 3M	low	high	all	low	high	all	low	high	all	low	high	all
LASIK												
mean	24.68	23.79	48.47	23.63	21.79	45.42	22.79	20.31	43.10	21.83	17.47	39.30
stdev	±1.68	±4.41	±5.30	±2.30	±6.05	±7.92	±1.90	±5.08	±6.56	±2.42	±5.29	±7.47
PRK												
mean	23.53	23.65	47.18	22.81	21.94	44.75	21.93	20.30	42.23	21.76	18.94	40.70
stdev	±1.63	±3.68	±5.18	±2.01	±3.80	±5.65	±2.31	±4.41	±6.68	±2.47	±4.42	±6.74

Πίνακας 12: Περιλαμβάνει το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση από το εμβαδόν των χαμηλών, υψηλών και συνολικών χωρικών συχνοτήτων (προ-εγχειρητικά, ένα και τρεις μήνες μετά) και για τις δύο τεχνικές διαθλαστικής επέμβασης.

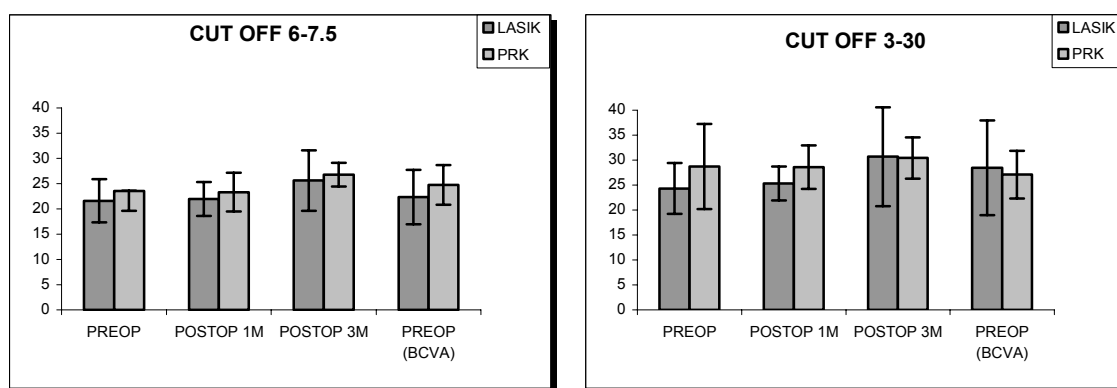
Παρατηρούμε ότι προ-εγχειρητικά μεγαλύτερη ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (και για τις τρεις συνθήκες και για όλο το εύρος των χωρικών συχνοτήτων) παρουσίαζαν οι

συμμετέχοντες που υπεβλήθησαν σε επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή (PRK) (σχήμα: 33).

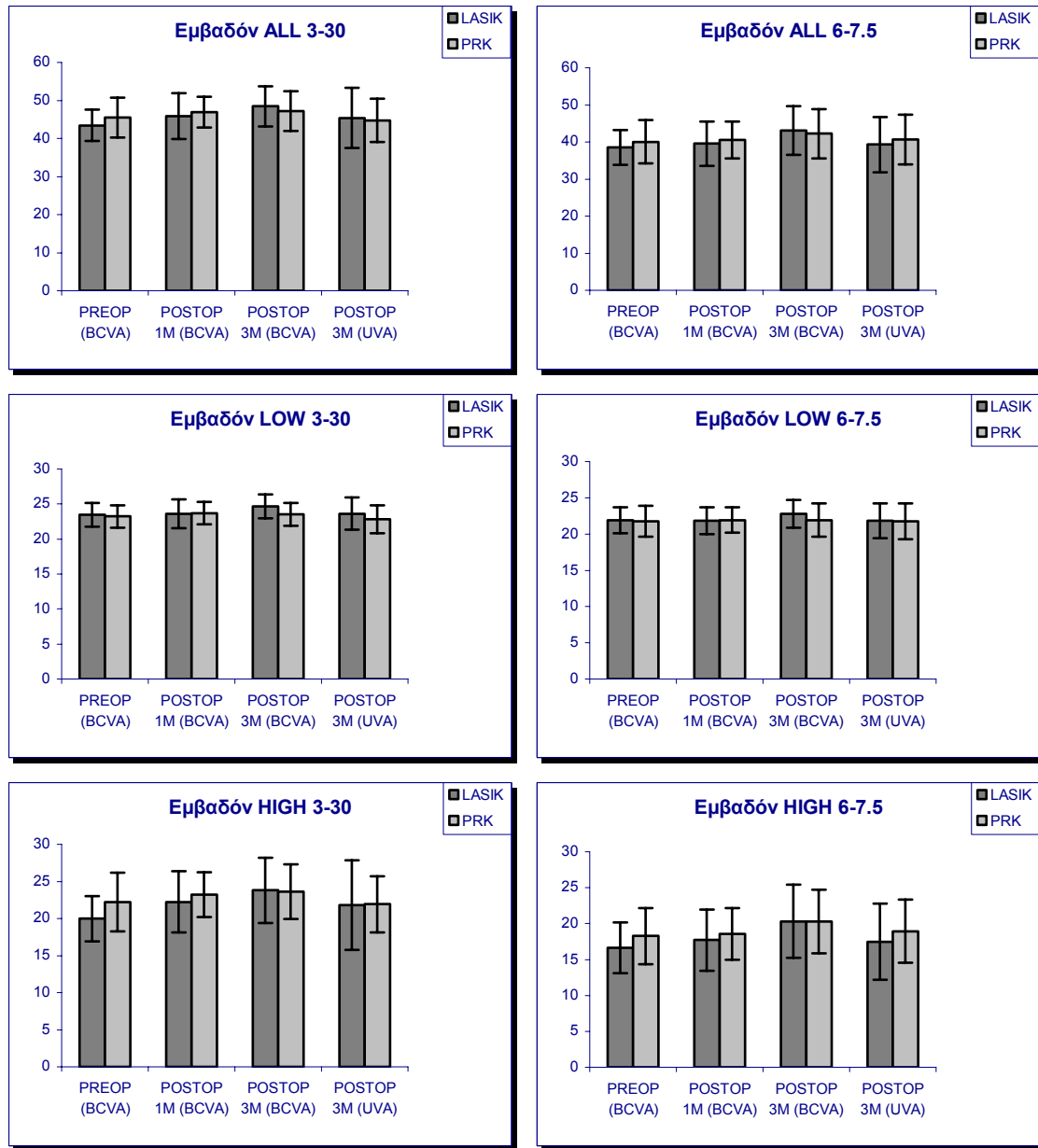
Στον ένα μήνα μετεγχειρητικά εξακολουθούν να παρατηρούνται κατά μέσο όρο μεγαλύτερες τιμές στην ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (και για τις τρεις συνθήκες και για όλο το εύρος των χωρικών συχνοτήτων, αν και η βελτίωση είναι πιο εμφανής στις υψηλές συχνότητες) στους εξεταζόμενους που υπεβλήθησαν σε επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή (PRK). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε σχέση με τις προεγχειρητικές τιμές, οι συμμετέχοντες που υπεβλήθησαν σε ενδοστρωματική κερατοσμίλευση (LASIK) παρουσίασαν μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης (σχήμα: 33).

Στους τρεις μήνες μετά την επέμβαση μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του 1^{ου} μετεγχειρητικού μήνα) παρουσιάζουν οι συμμετέχοντες που υπεβλήθησαν σε ενδοστρωματική κερατοσμίλευση (LASIK) [και για τις δύο συνθήκες και για όλο το εύρος των χωρικών συχνοτήτων (με την καλύτερη διόρθωση)]. Οι διαφορές μεταξύ των δύο ομάδων είναι πολύ μικρές.

Τέλος, στη συνθήκη αξιολόγησης της ευαισθησίας χωρίς σφαιρο-κυλινδρική διόρθωση παρουσιάζεται μείωσή της, κυρίως για τις υψηλές συχνότητες με τα αποτελέσματα να είναι πιο εμφανή για την ομάδα LASIK. Αξιοσημείωτο είναι πως και για τις δύο ομάδες οι τιμές της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης χωρίς την καλύτερη διόρθωση τρεις μήνες μετά την επέμβαση είναι σχεδόν ίδιες με αυτές που είχαν οι συμμετέχοντες ένα μήνα μετά την επέμβαση.



Σχήμα: 33 Η αλλαγή στη μέγιστη διακριτική ικανότητα (για τις δύο συνθήκες) για τις δύο ομάδες. (μονάδες σε c/deg). Παρατηρήστε ότι σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη διακριτική ικανότητα είναι μεγαλύτερη στην συνθήκη αξιολόγησης της ευαισθησίας με τεχνητή κόρη 3mm.



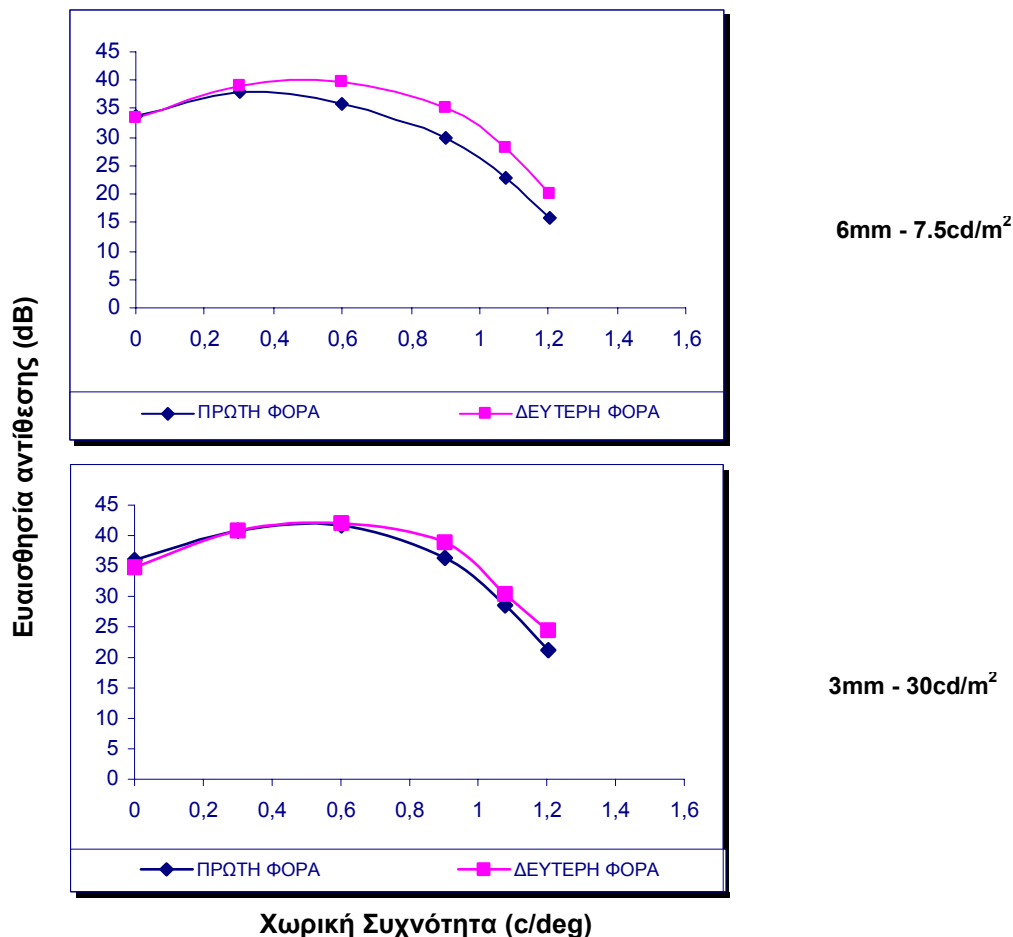
Σχήμα 34: Παρουσιάζεται σχηματικά το εμβαδόν για τις συνολικές, χαμηλές και υψηλές χωρικές συχνότητες (all-low-high) για τις δύο συνθήκες και για τις δύο μεθόδους προ-εγχειρητικά και μετεγχειρητικά (οι μονάδες είναι εκφρασμένες σε log cd/m² * dB).

4.5 Η σημασία της εκμάθησης

Ένα σημαντικό στοιχείο που είναι πιθανόν να έχει επηρεάσει κατά ένα βαθμό τις μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης αποτελεί η «εκμάθηση», η εξοικείωση δηλαδή των συμμετεχόντων με την συγκεκριμένη δοκιμασία. Για να εκτιμηθεί η σημασία της εκμάθησης πραγματοποιήθηκαν σε δύο συνεδρίες μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής

αντίθεσης σε 9 άτομα [εκ των οποίων οι 7 ήταν άνδρες και οι 2 γυναίκες (DK, TA, BD, SP, DDB, BK, SM, OG, NT)], τα οποία απετέλεσαν την ομάδα "ελέγχου". Μεταξύ των δύο μετρήσεων μεσολάβησε διάστημα τουλάχιστον ενός μήνα, ενώ εξετάστηκαν μόνο οι δύο συνθήκες (6mm διάμετρο κόρης - 7.5cd/m² φωτεινότητα grating και 3mm διάμετρο κόρης - 30cd/m² φωτεινότητα grating).

Στο σχήμα 35 παρουσιάζονται γραφικά οι συγκεντρωτικές καμπύλες ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης των 9 ατόμων την πρώτη και τη δεύτερη φορά, ένα μήνα μετά. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι τη δεύτερη φορά υπάρχει σημαντική βελτίωση της ευαισθησίας όχι τόσο για τις χαμηλές, όσο για τις μεσαίες και υψηλές χωρικές συχνότητες (περίπου 2-4 dB), καθώς και για την μέγιστη διακριτική ικανότητα. Αυτή η διαφορά ήταν περισσότερο εμφανής για την πρώτη συνθήκη μέτρησης (6mm - 7.5 cd/m²).



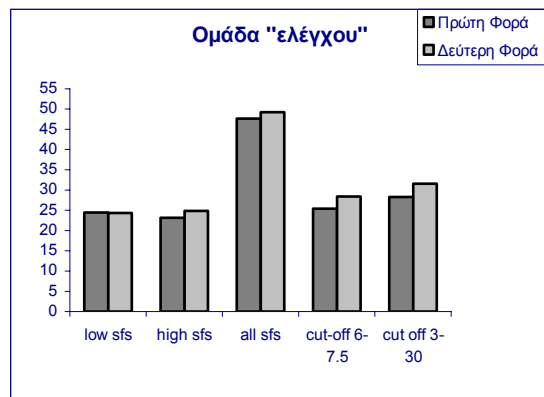
Σχήμα 35: Οι καμπύλες ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης την πρώτη και δεύτερη φορά για την ομάδα "ελέγχου".

Στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας: 13) συμπεριλαμβάνονται οι υπολογισμένες μέσες τιμές του εμβαδού της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης για τις χαμηλές, τις υψηλές και τις συνολικές χωρικές συχνότητες και τη μέγιστη διακριτική ικανότητα την πρώτη και τη δεύτερη φορά. Χαρακτηριστική είναι και εδώ η βελτίωση της ευαισθησίας κυρίως των υψηλών συχνοτήτων. Στο Σχήμα 36 παρουσιάζονται γραφικά οι παραπάνω τιμές.

ΟΜΑΔΑ "ΕΛΕΓΧΟΥ"	Πρώτη φορά	Δεύτερη φορά	Διαφορά (Πρώτης + Δεύτερης φορές)
6mm - 7.5cd/m²			
Low sfs	22.16	23.18	+ 1.02
High sfs	18.87	22.43	+ 3.56
All sfs	41.04	45.61	+ 4.57
Cut - off frequency	25.41	28.37	+ 2.96

ΟΜΑΔΑ "ΕΛΕΓΧΟΥ"	Πρώτη φορά	Δεύτερη φορά	Διαφορά (Πρώτης + Δεύτερης φορές)
3mm - 30cd/m²			
Low sfs	24.44	24.31	- 0.13
High sfs	23.21	24.83	+ 1.62
All sfs	47.65	49.14	+ 1.49
Cut - off frequency	28.32	31.56	+ 3.24

Πίνακας 13: Περιλαμβάνει το εμβαδόν των χαμηλών, υψηλών και συνολικών χωρικών συχνοτήτων και για τις τρεις συνθήκες.



Σχήμα 36: Σχηματική απεικόνιση του εμβαδού των χαμηλών, υψηλών, συνολικών χωρικών συχνοτήτων και της διακριτικής ικανότητας την πρώτη και τη δεύτερη φορά για την ομάδα "ελέγχου" (οι μονάδες είναι εκφρασμένες σε $\log \text{cd/m}^2 \cdot \text{dB}$).

4.6 Διαθλαστική χειρουργική και εκτροπές υψηλής τάξης

4.6.1 Εκτροπές υψηλής τάξης - Αξιολόγηση

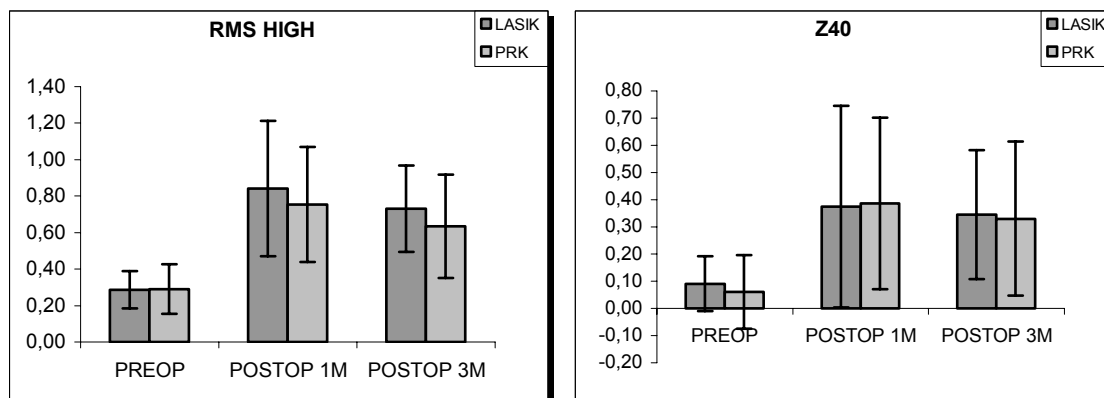
Στους πίνακες 14 και 15 παρουσιάζονται αναλυτικά η συνολική τιμή των εκτροπών υψηλής τάξης (RMS High) και της σφαιρικής εκτροπής (Z40) για κάθε ένα συμμετέχοντα. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων παρατηρείται αύξηση των εκτροπών υψηλής τάξης, καθώς και της σφαιρικής εκτροπής ένα μήνα μετά την επέμβαση, ενώ τρεις μήνες μετά οι τιμές αυτών παρουσιάζουν μια μικρή μείωση, χωρίς να πλησιάζουν όμως τις προ-εγχειρητικές τιμές. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εκτροπές υψηλής τάξης αυξήθηκαν ένα μήνα μετά την επέμβαση κατά 2.7 φορές (μικρότερη αύξηση για την ομάδα PRK), ενώ η σφαιρική εκτροπή κατά 4 φορές. Από τις γραφικές παραστάσεις (σχήμα: 37α) είναι εμφανές ότι μετεγχειρητικά το 50% των εκτροπών υψηλής τάξης οφείλονται στη σφαιρική εκτροπή (το αντίστοιχο ποσοστό της σφαιρικής εκτροπής προ-εγχειρητικά ήταν το 25%), ενώ παρατηρείται πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ της μεταβολής του τρίτου και του πρώτου μήνα για τις τιμές της σφαιρικής εκτροπής σε σχέση με το προ-εγχειρητικό σφαιρικό ισοδύναμο (όσο μεγαλύτερο το σφαιρικό ισοδύναμο, τόσο μεγαλύτερη η αλλαγή στο Z40) (σχήμα: 37β).

PREOP	6mm		POSTOP 1M	6mm		POSTOP 3M	6mm	
SUBJECT	RMS HIGH	Z40	SUBJECT	RMS HIGH	Z40	SUBJECT	RMS HIGH	Z40
NK			NK	0.88	0.38	NK	1.27	0.42
EA	0.28	0.13	EA			EA	0.61	0.51
EP	0.27	0.17	EP	0.72	0.30	EP	0.57	0.23
EP.	0.25	0.02	EP.	1.15	0.25	EP.	0.67	-0.01
FT	0.24	0.14	FT	1.59	0.83	FT	0.64	0.50
MK.	0.34	0.01	MK.	0.70	0.21	MK.	0.64	0.30
GP	0.52	0.26	GP			GP	0.96	0.37
SP	0.23	0.07	SP	0.71	0.31	SP	0.67	0.27
SM.	0.31	-0.01	SM.	0.51	0.47	SM.	0.54	0.50
EP..	0.24	0.12	EP..	0.77	0.47	EP..	0.75	0.48
MM	0.15	0.02	MM	0.47	0.24	MM		
MK	0.17	0.13	MK	1.38	0.56	MK	0.79	0.38
ME	0.66	0.30	ME	1.12	0.70	ME	0.91	0.63
SN			SN	1.14	0.54	SN	1.07	0.56
IA	0.22	-0.03	IA	0.34	0.23	IA	0.78	0.36
SO	0.22	0.00	SO	0.62	0.39	SO	0.85	0.43
EK	0.41	0.03	EK	0.32	0.13	EK	0.35	0.17
FD	0.23	0.02	FD	0.44	0.23	FD	0.31	0.01
BK	0.37	0.07	BK	0.65	0.36	BK	0.37	0.26
DDB	0.18	-0.04	DDB	0.72	0.23	DDB	0.55	0.22
DDB	0.29	-0.06	DDB	0.80	0.29	DDB	0.24	0.13
SM	0.21	0.05	SM	0.89	0.62	SM		
GP.	0.28	0.14	GP.	0.62	0.29	GP.		
MEAN	0.29	0.07	MEAN	0.79	0.38	MEAN	0.68	0.34
STDEV	0.12	0.10	STDEV	0.33	0.18	STDEV	0.26	0.18

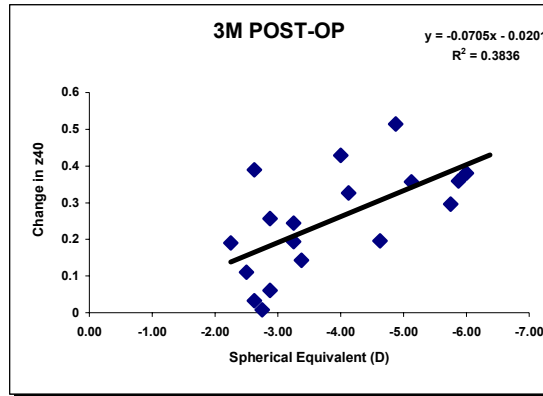
Πίνακας 22: Περιλαμβάνει τις εκτροπές υψηλής τάξης και τη σφαιρική εκτροπή των συμμετεχόντων προ-εγχειρητικά, ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση για 6mm μέγεθος κόρης.

PREOP	3mm		POSTOP 1M	3mm		POSTOP 3M	3mm	
SUBJECT	RMS HIGH	Z40	SUBJECT	RMS HIGH	Z40	SUBJECT	RMS HIGH	Z40
NK			NK	0.10	0.02	NK	0.15	0.03
EA	0.03	0.01	EA			EA	0.05	0.03
EP	0.03	0.01	EP	0.08	0.02	EP	0.06	0.01
EP.	0.03	0.00	EP.	0.13	0.02	EP.	0.08	0.00
FT	0.03	0.01	FT	0.17	0.05	FT	0.06	0.03
MK.	0.04	0.00	MK.	0.08	0.01	MK.	0.07	0.02
GP	0.05	0.02	GP			GP	0.11	0.02
SP	0.02	0.00	SP	0.08	0.02	SP	0.08	0.02
SM.	0.04	0.00	SM.	0.04	0.03	SM.	0.04	0.03
EP..	0.02	0.01	EP..	0.08	0.03	EP..	0.08	0.03
MM	0.02	0.00	MM	0.05	0.02	MM		
MK	0.02	0.01	MK	0.16	0.03	MK	0.09	0.02
ME	0.07	0.02	ME	0.11	0.04	ME	0.09	0.04
SN			SN	0.12	0.03	SN	0.11	0.04
IA	0.03	0.00	IA	0.03	0.01	IA	0.08	0.02
SO	0.03	0.00	SO	0.06	0.02	SO	0.09	0.03
EK	0.04	0.00	EK	0.03	0.01	EK	0.03	0.01
FD	0.03	0.00	FD	0.05	0.01	FD	0.04	0.00
BK	0.05	0.00	BK	0.07	0.02	BK	0.03	0.02
DDB	0.02	0.00	DDB	0.09	0.01	DDB	0.06	0.01
DDB	0.03	0.00	DDB	0.09	0.02	DDB	0.03	0.01
SM	0.02	0.00	SM	0.08	0.04	SM		
GP.	0.03	0.01	GP.	0.07	0.02	GP.		
MEAN	0.03	0.00	MEAN	0.09	0.02	MEAN	0.07	0.02
STDEV	0.01	0.01	STDEV	0.04	0.01	STDEV	0.03	0.01

Πίνακας 23: Περιλαμβάνει τις εκτροπές υψηλής τάξης και τη σφαιρική εκτροπή των συμμετεχόντων προ-εγχειρητικά, ένα και τρεις μήνες μετά την επέμβαση για 3mm μέγεθος κόρης.



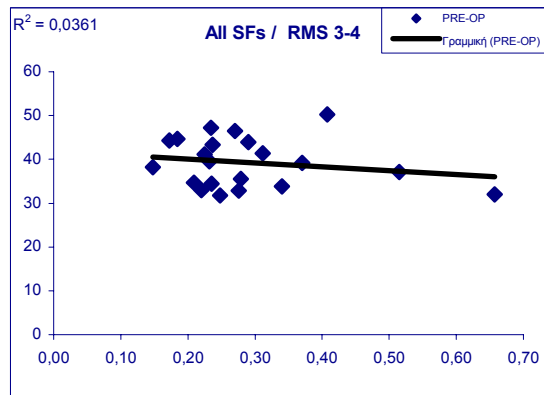
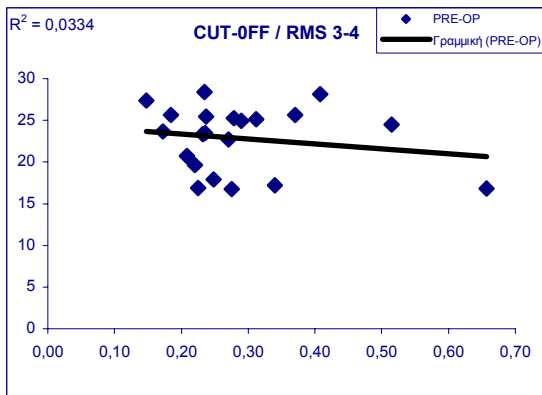
Σχήμα 37α: Συνολικές εκτροπές υψηλής τάξης (αριστερά) και σφαιρικής εκτροπής (δεξιά) για τους συμμετέχοντες που υπεβλήθησαν σε ενδοστρωματική κερατοσμίλευση (LASIK) και σε επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή (PRK), προ-εγχειρητικά και μετεγχειρητικά (για τον 1^ο και τον 3^ο μήνα).

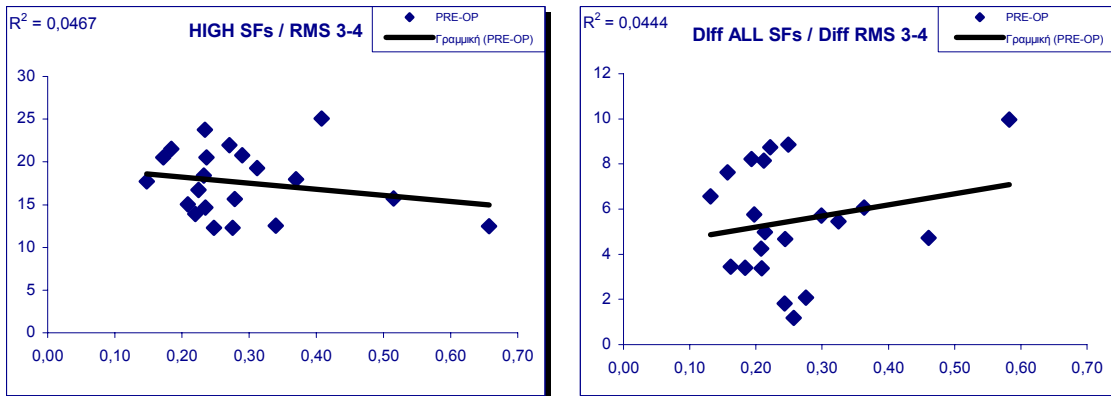


Σχήμα 37β: Μεταβολή (3 μήνες μετεγχειρητικά – προ-εγχειρητικά) της σφαιρικής εκτροπής σε σχέση με το προ-εγχειρητικό σφαιρικό ισοδύναμο.

4.6.2 Η επίδραση των εκτροπών υψηλής τάξης στην ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης

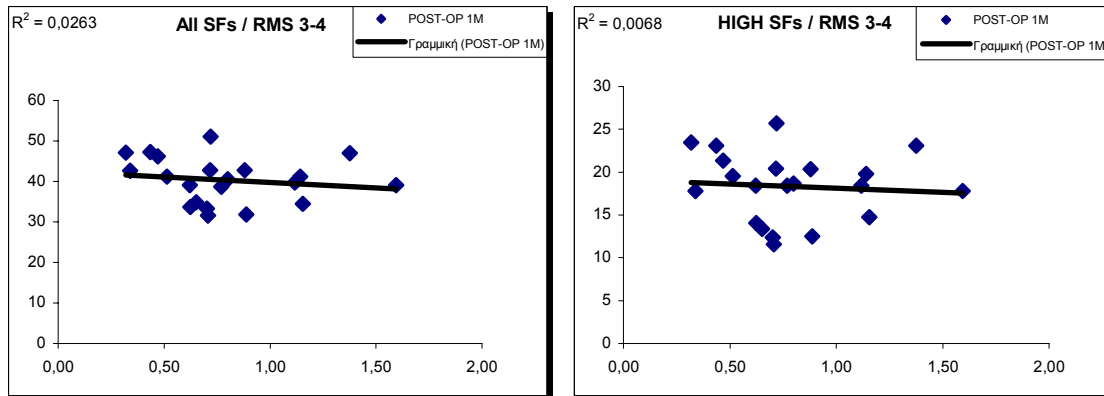
Προ-εγχειρητικά. Θέλοντας να διερευνηθεί η επίδραση των εκτροπών υψηλής τάξης στην ποιότητα όρασης παραστήθηκε γραφικά α) η μέση διακριτική ικανότητα συναρτήσει των εκτροπών υψηλής τάξης, β) το εμβαδόν των συνολικών χωρικών συχνοτήτων συναρτήσει των εκτροπών υψηλής τάξης γ) το εμβαδόν των υψηλών χωρικών συχνοτήτων συναρτήσει των εκτροπών υψηλής τάξης και δ) η διαφορά του εμβαδού των υψηλών χωρικών συχνοτήτων συναρτήσει της διαφοράς των εκτροπών υψηλής τάξης (μεταξύ 6 και 3mm). Είναι προφανές ότι αν και υπάρχει μια τάση συσχέτισης η οποία δεν είναι σημαντική (σχήμα: 38).



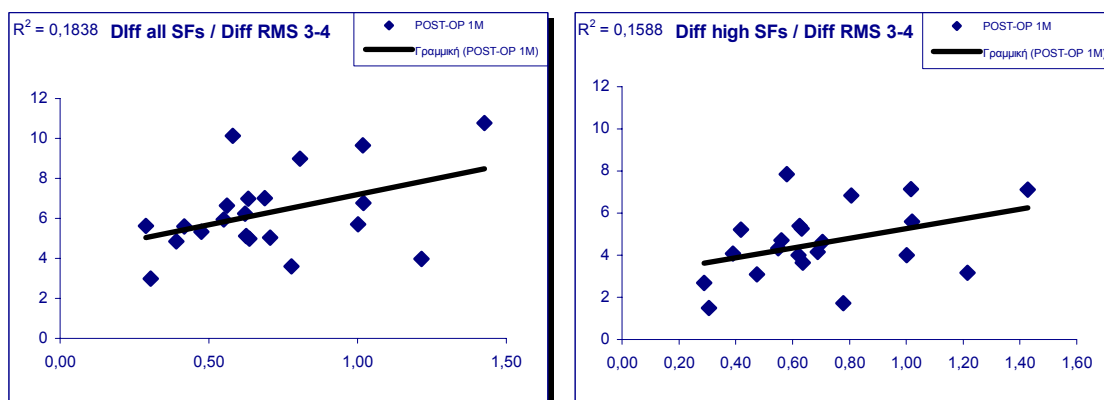


Σχήμα 38: Σχηματική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ της μέγιστης διακριτικής ικανότητας (μονάδες σε c/deg), των συνολικών χωρικών συχνοτήτων, των υψηλών χωρικών συχνοτήτων και της διαφοράς του εμβαδού μεταξύ των συνολικών χωρικών συχνοτήτων με τις εκτροπές υψηλής τάξης (οι μονάδες είναι εκφρασμένες σε $\log \text{cd/m}^2 \cdot \text{dB}$).

Μετεγχειρητικά (1^{ος} μήνας). Κατά τον ίδιο τρόπο αναλύθηκαν τα μετεγχειρητικά στοιχεία του πρώτου μήνα μετά την επέμβαση προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπήρχε συσχέτιση μεταξύ α) του εμβαδού των συνολικών χωρικών συχνοτήτων και των εκτροπών υψηλής τάξης, β) του εμβαδού των υψηλών χωρικών συχνοτήτων και των εκτροπών υψηλής τάξης (σχήμα: 39α), γ) της διαφοράς του εμβαδού των συνολικών χωρικών συχνοτήτων και των εκτροπών υψηλής τάξης και τέλος δ) της διαφοράς μεταξύ των υψηλών χωρικών συχνοτήτων και της διαφοράς των εκτροπών υψηλής τάξης (σχήμα: 39β). Από την ανάλυση των δεδομένων, όπως φαίνεται και στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις παρατηρήθηκε μια πολύ μικρή συσχέτιση ($R^2=0.18$ και 0.16) μεταξύ του εμβαδού των συνολικών χωρικών συχνοτήτων και των εκτροπών υψηλής τάξης και μεταξύ του εμβαδού των υψηλών χωρικών συχνοτήτων και των εκτροπών υψηλής τάξης. Από την ανάλυση μεταξύ της διαφοράς του εμβαδού των συνολικών χωρικών συχνοτήτων και των εκτροπών υψηλής τάξης και της διαφοράς μεταξύ των υψηλών χωρικών συχνοτήτων και της διαφοράς των εκτροπών υψηλής τάξης δεν παρατηρήθηκε σημαντική συσχέτιση.



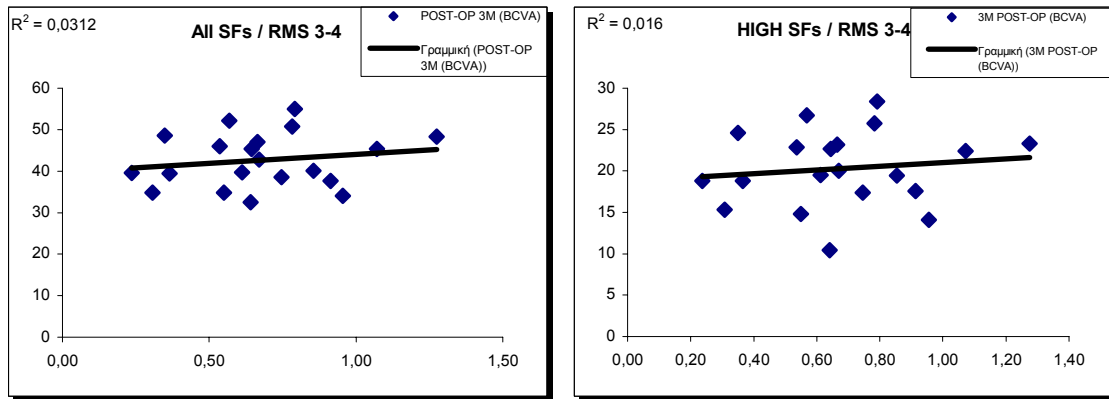
Σχήμα 39α: Σχηματική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ των συνολικών (αριστερά) και υψηλών χωρικών συχνοτήτων (δεξιά) και των εκτροπών υψηλής τάξης για ένα μήνα μετεγχειρητικά (οι μονάδες είναι εκφρασμένες σε $\log \text{cd/m}^2 * \text{dB}$).



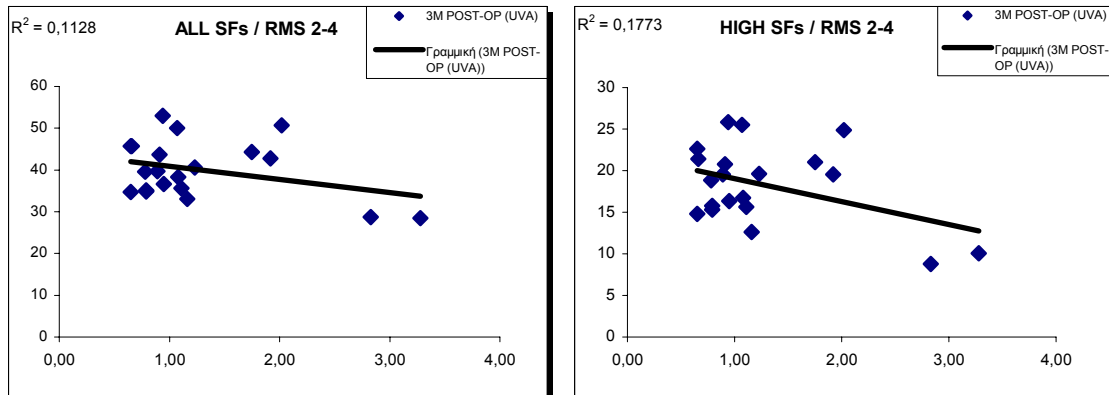
Σχήμα 39β: Σχηματική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ της διαφοράς των συνολικών (αριστερά) και υψηλών χωρικών συχνοτήτων (δεξιά) και της διαφοράς των εκτροπών υψηλής τάξης για ένα μήνα μετεγχειρητικά (οι μονάδες είναι εκφρασμένες σε $\log \text{cd/m}^2 * \text{dB}$).

Μετεγχειρητικά (3^{ος} μήνας). Τα μετεγχειρητικά στοιχεία του τρίτου μήνα μετά την επέμβαση αναλύθηκαν με τον ίδιο τρόπο για να διαπιστωθεί εάν υπήρχε συσχέτιση μεταξύ α) του εμβαδού των συνολικών χωρικών συχνοτήτων και των εκτροπών υψηλής τάξης, β) των υψηλών χωρικών συχνοτήτων και των εκτροπών υψηλής τάξης. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για την καλύτερη και για τη μη διορθωμένη όραση. Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (σχήμα: 40α και 40β) φαίνεται να μην υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της διαφοράς του εμβαδού των συνολικών χωρικών συχνοτήτων και της διαφοράς μεταξύ των υψηλών χωρικών συχνοτήτων [(για μετρήσεις με σφαιροκυλινδρική διόρθωση (BCVA)] με τη διαφορά των εκτροπών υψηλής τάξης. Ενώ παρατηρείται μια σκετικά καλή συσχέτιση μεταξύ των συνολικών και υψηλών χωρικών

συχνοτήτων και των συνολικών εκτροπών τρεις μήνες μετεγχειρητικά [για μετρήσεις χωρίς με σφαιρο-κυλινδρική διόρθωση (UVA)].



Σχήμα 40α: Σχηματική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ των συνολικών (αριστερά) και υψηλών (δεξιά) χωρικών συχνοτήτων και των εκτροπών υψηλής τάξης τρεις μήνες μετεγχειρητικά με την καλύτερη διόρθωση (οι μονάδες είναι εκφρασμένες σε $\log \text{cd/m}^2 \cdot \text{dB}$).



Σχήμα 40β: Σχηματική απεικόνιση της συσχέτισης μεταξύ των συνολικών (αριστερά) και υψηλών (δεξιά) χωρικών συχνοτήτων και των συνολικών εκτροπών τρεις μήνες μετεγχειρητικά χωρίς διόρθωση (οι μονάδες είναι εκφρασμένες σε $\log \text{cd/m}^2 \cdot \text{dB}$).

5.1 Εισαγωγή

Στην καθημερινή κλινική πράξη, η διακριτική ικανότητα του οπτικού συστήματος αξιολογείται με μια απλή σχετικά μέθοδο, αυτή της οπτικής οξύτητας, η οποία αποτελεί την πρότυπη μέτρηση διακριτικής ικανότητας, κυρίως γιατί ο υπολογισμός αυτής είναι απλός, γρήγορος μα κυρίως εύκολος και κατανοητός από τους εξεταζόμενους. Η μέτρηση της πραγματοποιείται με χρήση απλών, πρότυπων οπτότυπων που αποτελούνται από "μαύρα" σύμβολα (γράμματα ή αριθμούς) σε λευκό background.

Επειδή όμως η οπτική οξύτητα περιέχει περιορισμένη αξιολόγηση της διακριτικής ικανότητας του οφθαλμού, είναι κατανοητό πως δεν αποτελεί από μόνη της σωστό μέτρο για την αξιολόγηση της λειτουργικής όρασης.

Αν και η εξέταση της απαιτεί περισσότερο χρόνο και "ιδιαίτερη" συνεργασία του εξεταζόμενου, παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα όρασής του και την ικανότητά του να διακρίνει ερεθίσματα (εικόνες ή γράμματα) χαμηλού contrast για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ως αποτέλεσμα, πιο εξειδικευμένες δοκιμασίες αναπτύχθηκαν με σκοπό κυρίως την αξιολόγηση της διακριτικής ικανότητας με τη χρήση οπτότυπων με σύμβολα χαμηλού contrast. Πιο πρόσφατα για την αξιολόγηση της ποιότητας της όρασης η δοκιμασία της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλα κατασκευασμένων οπτότυπων ή μέσω της προβολής ερεθισμάτων σε βαθμονομημένη οθόνη και χρήση κατάλληλου λογισμικού.

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο να μελετήσει την επίδραση των εκτροπών υψηλής τάξης στην ποιότητα όρασης, ενώ παράλληλα μελέτησε τη μεταβολή της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης μετά από διαθλαστική χειρουργική.

5.2 Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης

5.2.1 Η σημασία της διαμέτρου της κόρης

Από τα αποτελέσματα και από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε γίνεται εμφανές ότι όταν η αμφιβληστροειδική φωτεινότητα είναι σταθερή, μεγαλύτερη ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης παρουσιάζεται σε κόρη διαμέτρου 3mm σε σχέση με τα 6mm. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού έχει διαπιστωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της κόρης, τόσο πιο σημαντική είναι η επίδραση των οφθαλμικών εκτροπών στην ποιότητα του αμφιβληστροειδικού ειδώλου. Η μείωση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης είναι μεγαλύτερη στις υψηλές χωρικές συχνότητες (σε σχέση με τις χαμηλές και τις μεσαίες), κάτι που συμφωνεί με την παραδοχή ότι οι εκτροπές περιορίζουν κυρίως τη μέγιστη διακριτική ικανότητα του οφθαλμού (δηλαδή τις υψηλές χωρικές συχνότητες). Βέβαια δε βρέθηκε ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ της διαφοράς της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (3 και 6mm) και των εκτροπών υψηλής τάξης, όπως ήταν αναμενόμενο. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι το RMS high δεν αποτελεί την καλύτερη μετρική της επίδρασης των εκτροπών στην ποιότητα της όρασης, κάτι που έχει καταγραφεί και σε άλλες μελέτες (Thibos et al., 2002).

5.2.2 Η σημασία της φωτεινότητας

Από τα αποτελέσματα μας καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης ελαττώνεται σημαντικά σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, κάτι που βέβαια ήταν αναμενόμενο, αφού είναι γνωστό ότι σε συνθήκες μεσοπικές μειώνεται η οπτική οξύτητα. Η ευαισθησία του οφθαλμού στην αντίθεση φωτεινότητας παρουσιάζει την ίδια τάση με τη διαφορά ότι η μείωση δεν είναι ομοιόμορφη για όλες τις χωρικές συχνότητες. Η χωρική συχνότητα για την οποία η ευαισθησία αντίθεσης είναι μέγιστη μετατοπίζεται προς τις μικρότερες τιμές (από 4 στα 2 c/deg στην παρούσα μελέτη). Η μέγιστη διακριτική ικανότητα μειώνεται σχεδόν γραμμικά με την ελάττωση της μέσης φωτεινότητας του grating. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού οι Μ νευρώνες που παρουσιάζουν μεγαλύτερα υποδεκτικά πεδία είναι υπεύθυνα για την αντίληψη της όρασης σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού (DeValois et al., 1974).

5.3 Διαθλαστική χειρουργική - Οπτική οξύτητα - Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης – Εκτροπές

Στην παρούσα μελέτη από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε 23 συμμετέχοντες (10 από τους οποίους υπεβλήθησαν σε ενδοστρωματική κερατοσμίλευση και 13 σε επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή) προ-εγχειρητικά και μετεγχειρητικά (ένα και τρεις μήνες) συμπεράναμε ότι:

Η οπτική οξύτητα (για την ομάδα LASIK) ένα μήνα μετά την επέμβαση ήταν κατά μέσο όρο ίση με 1.00 (σε δεκαδική κλίμακα) (προ-εγχειρητική οπτική οξύτητα 1.06), ενώ τρεις μήνες μετά αυτή αυξήθηκε ελάχιστα και έφτασε το 1.03. Το διαθλαστικό τους σφάλμα (σφαίρωμα) κατά μέσο όρο μηδενίστηκε, ενώ παρέμεινε ένα μικρό ποσοστό αστιγματισμού. Τρεις μήνες μετά την επέμβαση το υπολειπόμενο σφαίρωμα έγινε ελαφρά υπερμετρωπικό, ενώ η τιμή του υπολειπόμενου αστιγματισμού μειώθηκε. Παρατηρήθηκε μια μικρή βελτίωση στην οπτική τους οξύτητα με και χωρίς σφαιρο-κυλινδρική διόρθωση.

Οι 13 συμμετέχοντες που ανήκαν στην ομάδα PRK ένα μήνα μετά την επέμβαση παρουσίασαν (κατά μέσο όρο) οπτική οξύτητα ίση με 0.93 (προ-εγχειρητική οπτική οξύτητα 1.15). Το διαθλαστικό τους σφάλμα (σφαίρωμα) έγινε ελαφρά υπερμετρωπικό και παρέμεινε και ένα μικρό ποσοστό αστιγματισμού. Τρεις μήνες μετά την επέμβαση το υπολειπόμενο θετικό σφαίρωμα αυξήθηκε ελάχιστα, ενώ η τιμή του υπολειπόμενου αστιγματισμού μειώθηκε. Παρατηρήθηκε μια μικρή βελτίωση στην οπτική τους οξύτητα με σφαιρο-κυλινδρική διόρθωση σε σχέση με αυτήν που δεν έφερε διόρθωση. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι μεγαλύτερη βελτίωση οπτικής οξύτητας τρεις μήνες μετά τη διαθλαστική επέμβαση (σε σχέση με την οπτική οξύτητα του μήνα) και καλύτερη οπτική οξύτητα και με και χωρίς διόρθωση εμφάνισαν αυτοί που είχαν υποβληθεί σε PRK (σε σχέση με αυτούς που είχαν υποβληθεί σε LASIK).

Οι εκτροπές υψηλής τάξης. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων παρατηρείται αύξηση των εκτροπών υψηλής τάξης και κυρίως της σφαιρικής εκτροπής ένα μήνα μετά την επέμβαση, ενώ τρεις μήνες μετά οι τιμές αυτών παρουσιάζουν μια μικρή μείωση, χωρίς όμως να πλησιάζουν τις προ-εγχειρητικές τιμές. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εκτροπές υψηλής τάξης αυξήθηκαν ένα μήνα μετά την επέμβαση κατά 2.7 φορές (μικρότερη αύξηση για την ομάδα PRK), ενώ η σφαιρική εκτροπή κατά 4 φορές. Από τις γραφικές παραστάσεις που υπάρχουν στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων είναι εμφανές ότι μετεγχειρητικά το 50% των εκτροπών υψηλής τάξης οφείλονται στη σφαιρική εκτροπή. Μελέτες αναφέρουν σημαντική αύξηση των εκτροπών υψηλής τάξης ένα μήνα

μετά την επέμβαση (Marcos 2001 ; Pallikaris et al. 2002 ; Ninomiya et al. 2003) κάτι που διαπιστώνεται και στην παρούσα μελέτη.

Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης. Μεγαλύτερη ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (και για τις τρεις συνθήκες και για όλο το εύρος των χωρικών συχνοτήτων) παρουσίαζαν οι συμμετέχοντες που υπεβλήθησαν σε επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή (PRK).

Ένα μήνα μετά την επέμβαση εξακολουθούν να παρατηρούνται κατά μέσο όρο μεγαλύτερες τιμές στην ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (και για τις τρεις συνθήκες και για όλο το εύρος των χωρικών συχνοτήτων, αν και η βελτίωση είναι πιο εμφανής στις υψηλές συχνότητες) στους εξεταζόμενους που υπεβλήθησαν σε επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή (PRK). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε σχέση με τις προεγχειρητικές τιμές, οι συμμετέχοντες που υπεβλήθησαν σε ενδοστρωματική κερατοσμίλευση (LASIK) παρουσίασαν μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης.

Τρεις μήνες μετεγχειρητικά μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του 1^{ου} μετεγχειρητικού μήνα) παρουσίασαν οι συμμετέχοντες που υπεβλήθησαν σε ενδοστρωματική κερατοσμίλευση (LASIK) [και για τις δύο συνθήκες και για όλο το εύρος των χωρικών συχνοτήτων (με την καλύτερη διόρθωση)]. Στη συνθήκη αξιολόγησης της ευαισθησίας χωρίς σφαιροκυλινδρική διόρθωση παρουσιάζεται μείωσή της, κυρίως για τις υψηλές συχνότητες με τα αποτελέσματα να είναι πιο εμφανή για την ομάδα LASIK. Αυτό πιθανότητα οφείλεται στο γεγονός ότι το προ-εγχειρητικό διαθλαστικό σφάλμα ήταν μεγαλύτερο κατά μέσο όρο για την ομάδα LASIK.

Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης παρουσιάζει μια μη αναμενόμενη βελτίωση και για τις δύο ομάδες ένα μήνα μετά την επέμβαση. Θα αναμέναμε η αύξηση των εκτροπών και η σκέδαση (ιδιαίτερα στην περίπτωση της ομάδας PRK) να επιδρά αρνητικά στην ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης. Ένας παράγοντας που πιθανότατα επηρέασε τις μετρήσεις μας είναι η εκμάθηση της δοκιμασίας. Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην ομάδα ελέγχου διαπιστώθηκε ότι υπήρξε σημαντική βελτίωση τη δεύτερη φορά της μέτρησης της τάξης των 4.56 dB (για το εμβαδόν των συνολικών χωρικών συχνοτήτων), των 3.56 dB (για το εμβαδόν των υψηλών χωρικών συχνοτήτων) και 3.0 c/deg (για τη μέγιστη διακριτική ικανότητα). Αν λάβουμε υπόψιν τον παράγοντα "εκμάθηση", θα παρατηρήσουμε ότι η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης μειώνεται σε σχέση με τις προ-εγχειρητικές τιμές, ιδιαίτερα για τις υψηλές χωρικές συχνότητες. Οι τιμές τρεις μήνες μετεγχειρητικά δείχνουν επαναφορά στα προ-εγχειρητικά επίπεδα. Να

σημειωθεί ότι και μετεγχειρητικά, αν και παρατηρείται μια μικρή συσχέτιση των εκτροπών υψηλής τάξης με την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης, αυτή δεν είναι σημαντική.

Σε υπάρχουσες δημοσιεύσεις έχει μελετηθεί η αλλαγή στην ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης πριν και μετά τη διαθλαστική χειρουργική. Σχεδόν όλες αυτές οι μελέτες χρησιμοποίησαν πρότυπα οπτότυπα για την αξιολόγηση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (π.χ. Vistech, Vector Vision) τα οποία παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα: όπως μειωμένη ακρίβεια και επαναληψιμότητα, περιορισμένο εύρος χωρικών συχνοτήτων, ενώ επηρεάζονται σημαντικά από τις συνθήκες εξέτασης (π.χ. περιβαλλοντικός φωτισμός, μέγεθος κόρης κτλ.). Μάλιστα μερικές από αυτές δεν αξιολόγησαν την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης για ασθενείς που έφεραν την καλύτερη διόρθωση. Αυτές οι μελέτες αναφέρουν μια σταδιακή μείωση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης από την πρώτη κιόλας μετεγχειρητική βδομάδα μέχρι και για τους τρεις επόμενους μήνες, ενώ έχει διαπιστωθεί επαναφορά μετά τους έξι μήνες (Lackner et al. 2003 ; Chan et al. 2002 ; Pop et al. 2004). Έχει αναφερθεί ότι οι χωρικές συχνότητες που επηρεάζονται περισσότερο είναι αυτές των ≥ 12 c/deg (Montes-Mico et al. 2001), επειδή η θόλωση που προκαλείται από υπολειπόμενο διαθλαστικό σφάλμα (αστιγματισμό) και τις οπτικές εκτροπές επηρεάζει περισσότερο τις υψηλές χωρικές συχνότητες, ενώ μεγαλύτερη μείωση στην ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης παρουσιάζουν οι ασθενείς με μεγαλύτερο διαθλαστικό σφάλμα (Tumbocon et al. 2004).

Τα θετικά αποτελέσματα της παρούσης μελέτης είναι πιθανόν να οφείλονται στο γεγονός ότι οι διαθλαστικές επεμβάσεις πραγματοποιήθηκαν με το laser τελευταίας γενιάς (Allegretto, Wavelight), με σημαντικά βελτιωμένους αλγόριθμους και μικρότερη εισαγωγή εκτροπών (και κυρίως σφαιρικής εκτροπής).

5.4 Περιορισμοί παρούσης εργασίας

Σκέδαση. Σημαντικό οπτικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ένα μεγάλο ποσοστό των ασθενών που υποβάλλονται σε διαθλαστική επέμβαση είναι το θάμβος οράσεως (halo effect - glare) με αποτέλεσμα την ελάττωση της οπτικής τους οξύτητας σε συνθήκες κυρίως χαμηλού φωτισμού. Το θάμβος που προκαλεί ανικανότητα (disability glare) περιγράφεται σαν ελαττωμένη ικανότητα διάκρισης στόχου που προκαλείται από την παρουσία φωτεινής πηγής κάπου αλλού μέσα στο οπτικό πεδίο και οφείλεται σε διαταραχή της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης. Μπορεί να παρουσιαστεί είτε σαν "πέπλο" (veiling glare), όταν υπάρχει έντονος φωτισμός, όπως μια ηλιόλουστη μέρα, είτε από κατευθυνόμενο φωτισμό (directional glare), όταν υπάρχει συγκεκριμένη φωτεινή πηγή, όπως, τα φώτα των αυτοκινήτων που έρχονται από απέναντι, κατά τη διάρκεια νυχτερινής οδήγησης. Το θάμβος οφείλεται κυρίως στη σκέδαση που προέρχεται από μερική απώλεια της διαύγειας του κερατοειδή, λόγω της επούλωσης της επιφάνειας του κερατοειδή η οποία διαρκεί για ένα διάστημα 3-6 μηνών μετά την επέμβαση. Βιβλιογραφικές αναφορές έχουν εντοπίσει το πρόβλημα της μεταχειρουργικής σκέδασης σε ασθενείς που είχαν υποβληθεί σε επιφανειακή φωτοδιαθλαστική κερατεκτομή (PRK). Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η σκέδαση αυξάνεται μετά την διαθλαστική χειρουργική, κυρίως τις πρώτες μετεγχειρητικές εβδομάδες, ενώ η τιμή της παραμένει υψηλότερη από τα προ-εγχειρητικά επίπεδα ακόμη και 6 μήνες μετεγχειρητικά (DeBrouwere et al., 2005). Αξιοσημείωτη είναι η αύξηση που παρουσιάζεται στην πυκνότητα των κερατοκυττάρων, η αλλαγή στη μορφολογία τους, ενώ μελέτες αναφέρουν παρουσία ενεργοποιημένων κερατοκυττάρων και μερική απώλεια του βαθμού οργάνωσης των διαδοχικών στρώσεων κολλαγόνου (fibroblasts) (Efron et al., 2003).

Στην περίπτωσή μας, οι ασθενείς της ομάδας PRK εμφάνισαν την ίδια ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης με την ομάδα LASIK αν και οι εκτροπές υψηλής τάξης είναι μικρότερες. Η σκέδαση ίσως αποτελεί έναν παράγοντα που επηρεάζει την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης, σε όλο το εύρος των χωρικών συχνοτήτων.

Διάθλαση. Οι μετρήσεις μας πραγματοποιήθηκαν για την καλύτερη διορθωμένη από σφαιρο-κυλινδρικά σφάλματα όραση, αυτή η μέτρηση αναφοράς δεν είναι απόλυτη αφού διαφορετικοί εξεταστές μπορούν να καταλήξουν σε διαφορετική διάθλαση για τον ίδιο ασθενή (διαφορετική τεχνική διάθλασης) και ιδιαίτερα στην περίπτωση ασθενών που έχουν υποστεί διαθλαστική χειρουργική, λόγω της πολυεστιακότητας που μπορεί να παρουσιάζεται.

Τροπικαμίδη. Είναι γνωστό ότι το συγκεκριμένο φαρμακευτικό σκεύασμα επηρεάζει σε μικρό ποσοστό (σε σχέση με την κυκλοπεντολάτη) την ικανότητα προσαρμογής του οφθαλμού, ωστόσο οι μετρήσεις λόγω της απόστασης της εξέτασης (των 2 μέτρων) δεν εικάζεται ότι επηρεάστηκαν, αφού αυτό θα συνέβαινε αν η απόσταση της εξέτασης ήταν μεγαλύτερη και αν η ηλικία των ατόμων στα οποία είχε γίνει ενστάλαξη ήταν μεγαλύτερη από 35, αφού άτομα μικρότερης ηλικίας μπορούν να προσαρμόζουν ακόμα και σε απόσταση μεγαλύτερη των 2 μέτρων.

LASIK VS PRK. Ένας παράγοντας που έπρεπε να είχε συνυπολογιστεί προκειμένου τα αποτελέσματά μας να ήσαν απόλυτα συγκρίσιμα μεταξύ τους ήταν οι δύο ομάδες των συμμετεχόντων (LASIK subjects - PRK subjects) να είχαν τον ίδιο αύξοντα αριθμό, τον ίδιο μέσο όρο ηλικίας και το ίδιο μέγεθος διαθλαστικού σφάλματος. Αν και ο τελευταίος παράγοντας μάλλον δε θα μπορούσε να ικανοποιηθεί εύκολα, αφού η τεχνική PRK χρησιμοποιείται κυρίως για τη διόρθωση χαμηλών διαθλαστικών σφαλμάτων, ενώ η τεχνική LASIK για τη διόρθωση μεσέων και υψηλών.

Μετεγχειρητική αξιολόγηση. Μεγαλύτερη έμφαση στα αποτελέσματά μας θα δινόταν αν υπήρχε και μέτρηση 6 μήνες μετεγχειρητικά, για να παρατηρήσουμε περαιτέρω βελτίωση. Οι μετρήσεις των συμμετεχόντων για την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης θα μπορούσε να αξιολογηθεί και 6 μήνες μετά την επέμβαση προκειμένου να διαπιστωθεί η βελτίωση σε αυτήν μετά από μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Εκμάθηση. Ένας παράγοντας που επηρεάζει σχεδόν πάντα όλες τις υποκειμενικές μετρήσεις, είναι η εκμάθηση. Μετά από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ομάδα ελέγχου διαπιστώθηκε σημαντική βελτίωση στην ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης τη δεύτερη φορά των μετρήσεων. Από αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ίσως οι μετρήσεις μας να είχαν μεγαλύτερη αξιοπιστία εάν οι συμμετέχοντες είχαν πρότερη εμπειρία σε ψυχοφυσικές μετρήσεις (τουλάχιστον μια φορά), ώστε να είναι εξοικειωμένοι με τις απαιτήσεις που έχει μια τέτοιου είδους μέτρηση.

5.5 Μελλοντική Εργασία

Στο μέλλον θα πρέπει να γίνει προσπάθεια να βρεθεί ένας τρόπος μέτρησης με σκοπό τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για μια ολοκληρωμένη μέτρηση φωτεινής ευαισθησίας. Για παράδειγμα θα μπορούσε να αναπτυχθεί μια προσιτή τεχνική η οποία θα αξιολογούσε το εύρος των χωρικών συχνοτήτων που γίνονται αντιληπτές για ένα σταθερό contrast.

Επίσης ιδιαίτερη αξία φαίνεται να αποκτά η αξιολόγηση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης σε ασθενείς που παρουσιάζουν παθήσεις του αμφιβληστροειδή οι οποίες δε μειώνουν την οπτική οξύτητα τόσο, όσο την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (τέτοιες παθήσεις δεν είναι εύκολο να διαγνωστούν). Πολύ αξιόπιστες (για την ποιότητα της όρασης) μετρήσεις φαίνεται να παρέχει η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης σε ασθενείς που θα υποβληθούν σε επέμβαση καταρράκτη, γλαυκώματος και τοποθέτησης πολυεστιακών ενδοφακών. Οι τελευταίοι αποτελούνται από ζώνες διαφορετικής διαθλαστικής ισχύος και ανάλογα με τη διάμετρο της κόρης "ενεργοποιούνται" οι ζώνες για την κοντινή ή για τη μακρινή όραση, οπότε η αξιολόγηση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης για διαφορετικά μεγέθη κόρης (π.χ 3 και 6mm) μπορεί να μας δώσει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το βάθος πεδίου με ικανοποιητική όραση.

Βιβλία:

1. Νευροεπιστήμη και Συμπεριφορά. Eric R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell.
2. Εισαγωγή στην Οφθαλμολογία και στη Νευροοφθαλμολογία. Κωνσταντίνος Γ.Ψύλλας. University Studio Press.
3. Μελέτη των οπτικών και φυσικών παραμέτρων που υπεισέρχονται στην επικέντρωση και διαμόρφωση φωτοαποδομούμενης υδρογέλης στην επιφάνεια του κερατοειδή. Διδακτορική διατριβή Χαρίλαου Γκίνη.
4. Visual Perception - A Clinical Orientation second edition. Steven H. Schwartz.

Άρθρα:

1. Igor Kaiserman, Rossen Hazarbassnov, David Varssano, Aharon Grinbaum. Contrast sensitivity after wave front-guided lasik. *Ophthalmology* 2004; 111:454-457.
2. Birgit Lackner, Stefan Pieh, Martin A. Funovics, Gerald Schmidinger, Carmen Franz, Christian Simader, Christian Skorpik. Influence of spectacle-related changes in retinal image size on contrast sensitivity function after laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2004; 30:626-632.
3. K Pesudovs, C A Hazel, R M L Doran, D B Elliott. The usefulness of vistech and fact contrast sensitivity charts for cataract and refractive surgery outcomes research. *Br J Ophthalmol* 2004; 88:11-16.
4. Yuan-Chieh Lee, Fung-Rong Hu, I-Jong Wang. Quality of vision after laser in situ keratomileusis. Influence of dioptric correction and pupil size on visual function. *J Cataract Refract Surg* 2003; 29:769-777.
5. Jay W.W. Chan, Marion H. Edwards, George C.Woo, Victor C.P.Woo. Contrast sensitivity after laser in situ keratomileusis. One-year follow-up. *J Cataract Refract Surg* 2002; 28:1774-1779.
6. Laura Oliveira-Soto and W. Neil Charman. Some possible longer-term ocular changes following excimer laser refractive surgery. *Ophthalm. Physiol. Opt.* 2002 22:274-288.

7. Robert Montes-Mico, Jorge L. Alio, Gonzalo Munoz. Contrast sensitivity and spatial frequency spectrum after refractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 2003 -Vol. 29.
8. J. L. Barbur, C. Chisholm, D. F. Edgar and J. A. Harlow. New test for assessing visual performance following corneal refractive surgery. *Vision Science and its applications*, Vol. 1, 82-85.
9. Dulaney DD, Barnet RW, Perkins SA, Kezirian GM. Laser in situ keratomileusis for myopia and astigmatism: 6 month results. *J Cataract Refract Surg*. 1998 Jun; 24(6):758-64.
10. Montes-Mico R, Charman WN. Mecopic contrast sensitivity function after excimer laser photorefractive keratectomy. *J Refract Surg*. 2002; 9-13.
11. Mrochen M, Semchishen V. From scattering to wavefronts-what's in between? *J Refract Surg*. 2003; 597-601.
12. Pop M, Payette Y. Correlation of wavefront data and corneal asphericity with contrast sensitivity after laser in situ keratomileusis for myopia. *J Refract Surg*. 2004; 678-84.
13. Montes-Mico R, Charman WN. Choise of spatial frequency for contrast sensitivity evaluation after corneal refractive surgery. *J Refract Surg*. 2001; 646-51.
14. Russell L Woods, Joanne M Wood. The role of contrast sensitivity charts and contrast letter charts in clinical practice. *Clinical and Exrerimental Optometry* 1995.
15. Richard S. Hoffman, Mark Packer, I. Howard Fine. Contrast sensitivity and laser in situ keratomileusis.
16. Arthur Bradley, John Hook, John Haeseker. A comparison of clinical visual and contrast sensitivity charts: effect of uncorrected myopia. *Ophthal. Physiol. Opt.*, 1991, Vol. 11.
17. Joseph Anthony J. Tumbocon, Palanisamy Suresh, Allan Slomovic, David S. Rootman. The effect of laser in situ keratomileusis in low contrast vision. *J Refract Surg*. 2004; Vol.20.
18. W. N. Charman, N. Chateau. The prospects for super-acuity: limits to visual performance after correction of monochromatic ocular aberration. *Ophthalmic and Physiological Optics* 2003. Vol.23, Issue 6, Page 479.

19. Mihai Pop, Yves Payette. Correlation of wavefront data and corneal asphericity with contrast sensitivity after laser in situ keratomileusis. J Refract Surg. 2004; Vol.20.
20. Ninomiya S, Maeda N, Kuroda T, Fujikado T, Tano Y. Comparison of ocular high-order aberrations and visual performance between photorefractive keratectomy and laser in situ keratomileusis for myopia. Ophthalmology 2003; 29-34.
21. Susana Marcos. Aberrations and visual performance following standard laser vision correction. J Refract Surg. 2001; Vol.17.
22. David Williams, Geun-Young Yoon, Jason Porter, Antonio Guirao, Heidi Hofer, Ian Cox. Visual benefit of correcting higher order aberrations of the eye. J Refract Surg. 2000; Vol.16.
23. Bai-Chuan Jiang, Charles T. Scialfa, Richard A. Tyrrell, Philip M. Garvey, Herschel W. Leibowitz. Bandwidth of the contrast sensitivity function an index of spatial vision with application to refraction. Optometry and Vision Science. Vol.67, No. 4, pp. 260-267.
24. Pallikaris IG, Kymionis GD, Panagopoulou SI, Siganos CS, Theodorakis MA, Pallikaris AI. Induced optical aberrations following formation of a laser in situ keratomileusis flap. J Refract Surg. 2002; 1737-41.
25. Ginis H, Plainis S, Pallikaris A. A variability of wavefront aberration measurements in small pupil sizes using a clinical Shack-Hartmann aberrometer. BMC Ophthalmol 2004.

Σημειώσεις μεταπτυχιακού προγράμματος "Οπτική και Όραση":

☛ Από Χαρίλαο Γκίνη:

1. Αλληλεπίδραση laser -κερατοειδή και εισαγωγικές έννοιες της διαθλαστικής χειρουργικής (Α εξάμηνο: Όραση και Φυσιολογική Οπτική).
2. Το οπτικό σύστημα του κερατοειδή (Α εξάμηνο: Όραση και Φυσιολογική Οπτική).
3. Μέτρηση των εκτροπών του οφθαλμού. (Γ εξάμηνο: Φυσιολογική Οπτική και Εφαρμογές II)

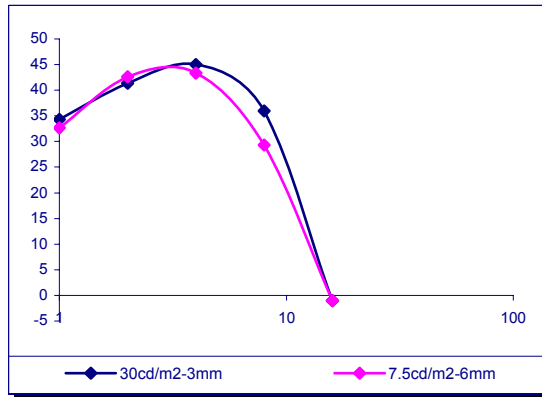
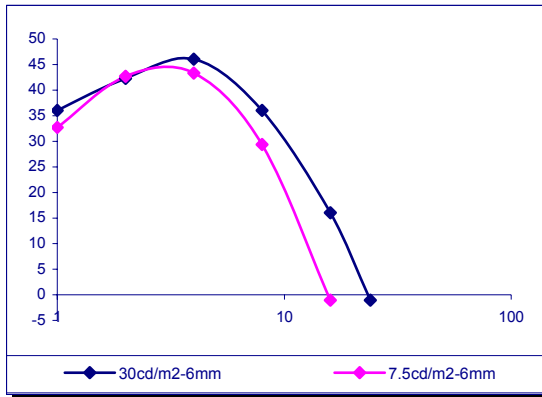
☛ Από Σωτήρη Πλαΐνη:

1. Προσαρμοστική ικανότητα του κρυσταλλοειδή φακού (Α εξάμηνο: Όραση και Φυσιολογική Οπτική).

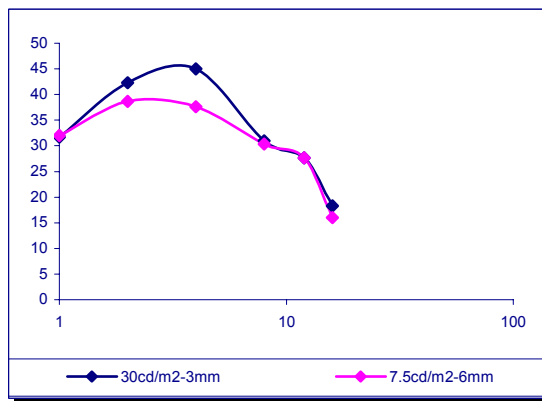
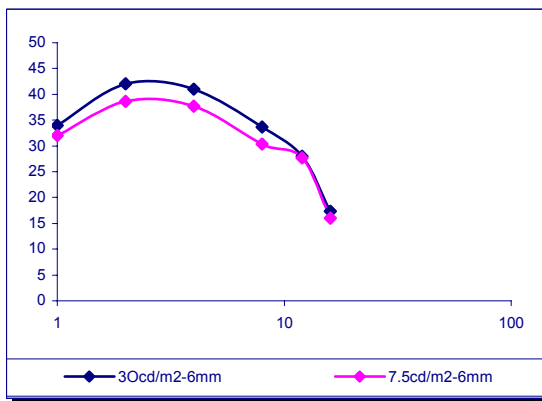
2. Νευροφυσιολογία του αμφιβληστροειδή και της οπτικής οδού (Α εξάμηνο: Όραση και Φυσιολογική Οπτική).
3. Οπτική οξύτητα: Μεθοδολογία, περιοριστικοί παράγοντες (Β εξάμηνο: Φυσιολογική Οπτική και Εφαρμογές II).
4. Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity) (Β εξάμηνο: Φυσιολογική Οπτική και Εφαρμογές II).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

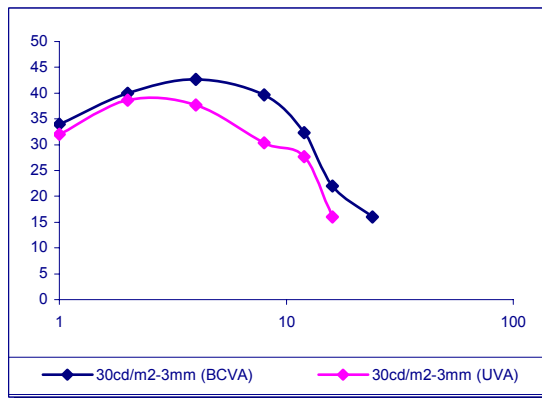
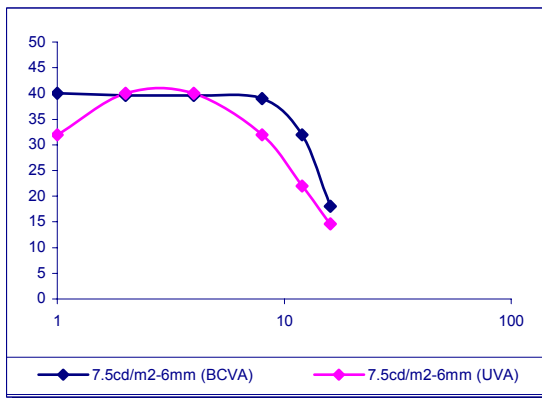
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

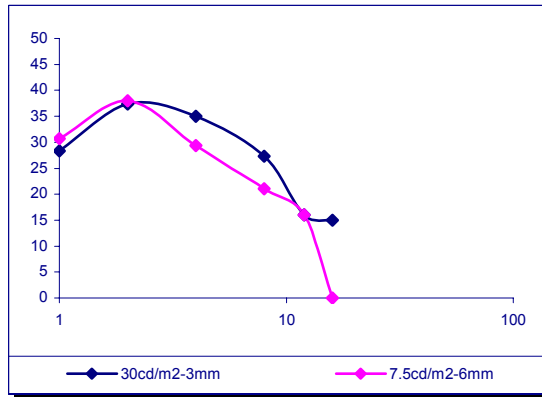
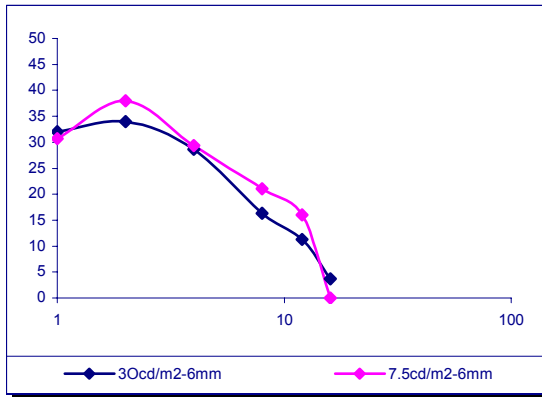


3 months

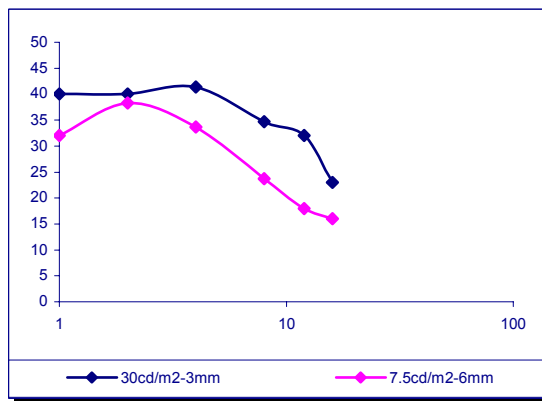
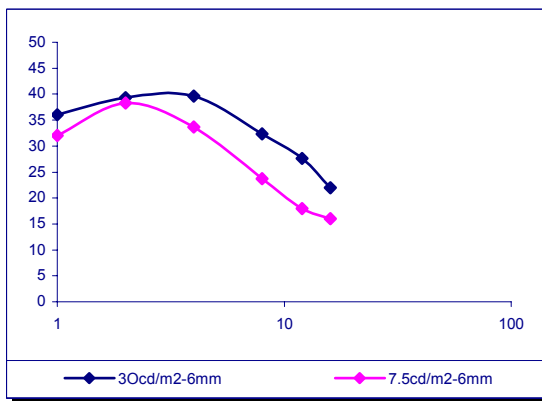
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: NK

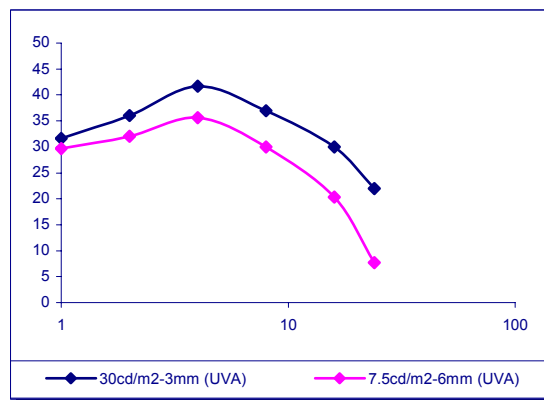
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

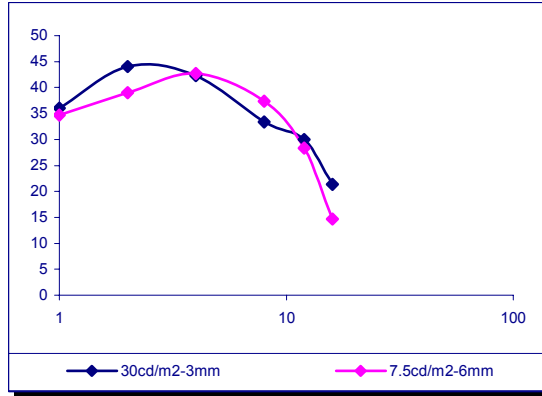
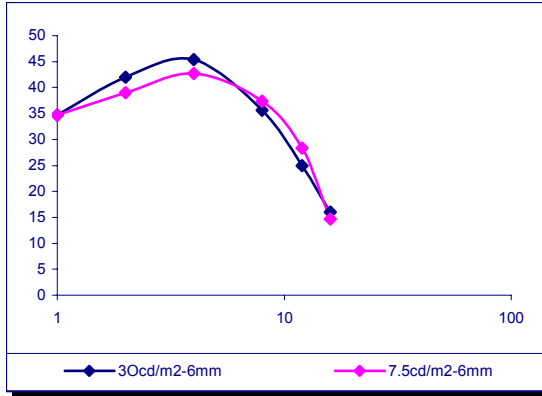


3 months

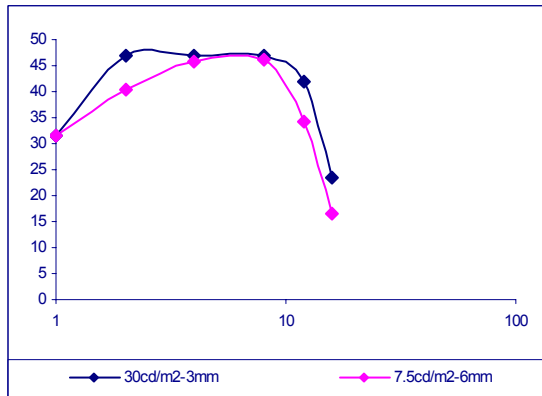
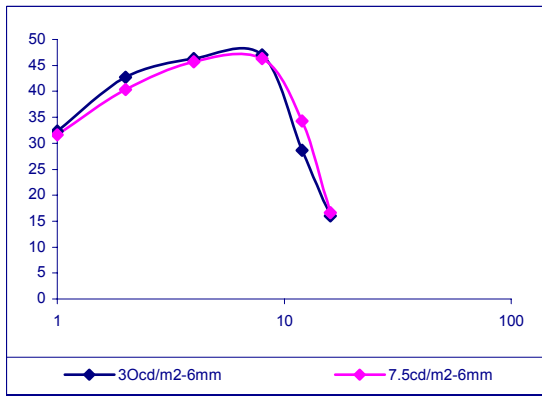
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: EA

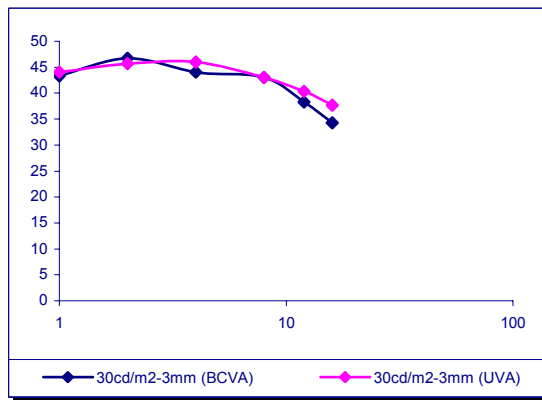
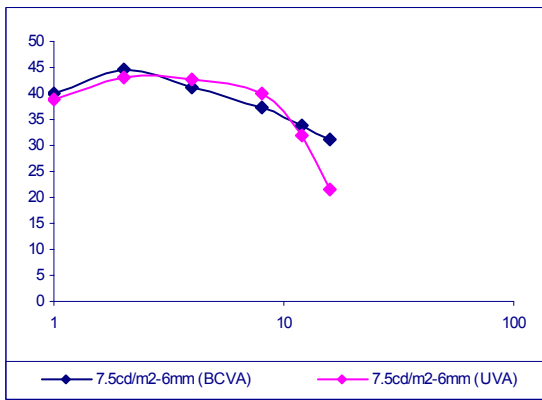
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

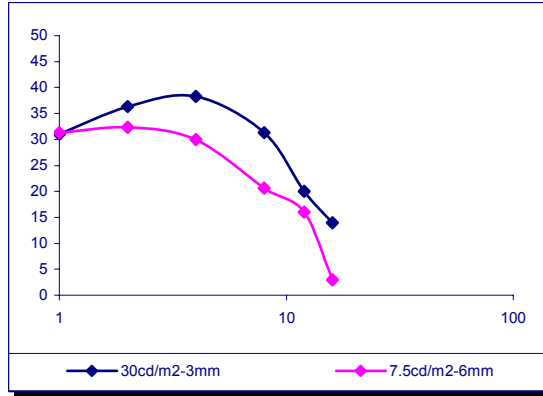
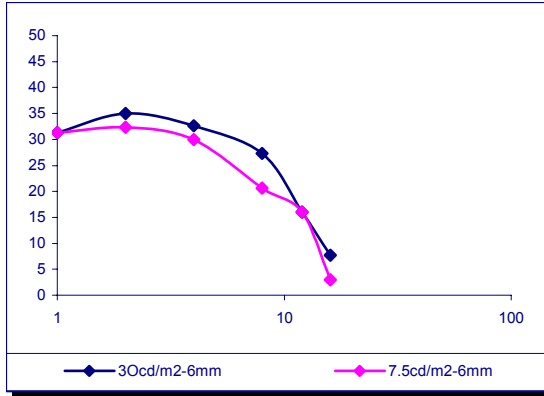


3 months

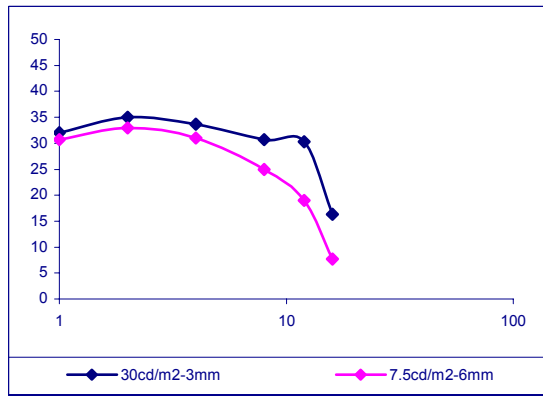
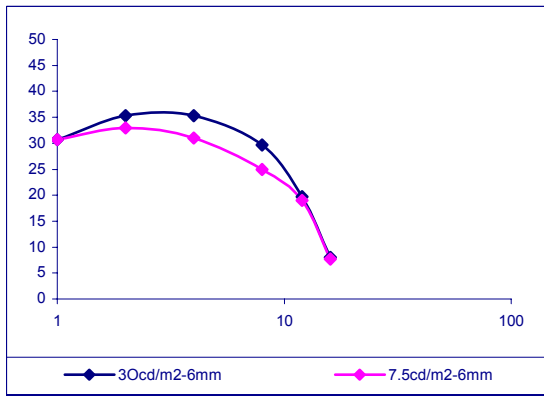
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: EP

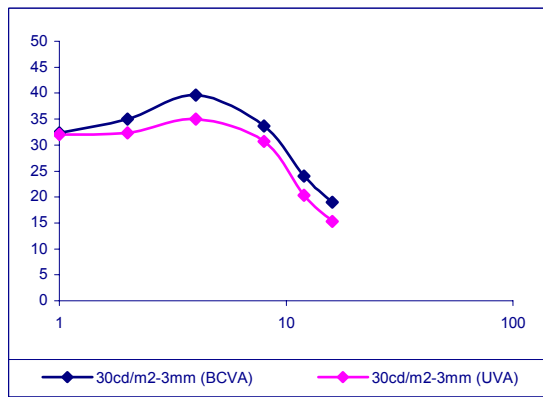
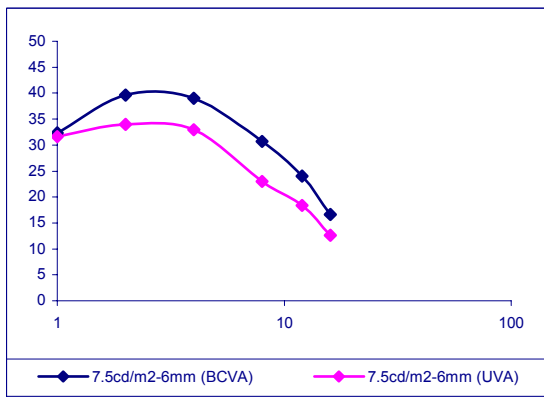
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

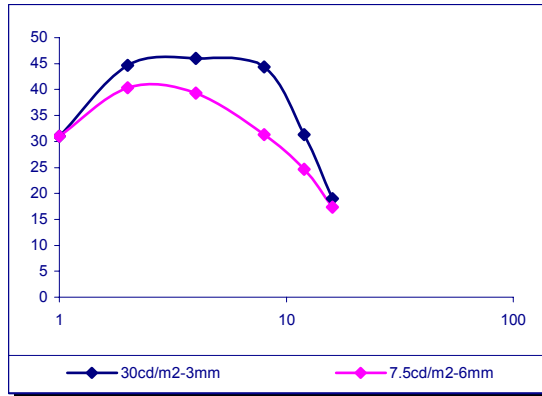
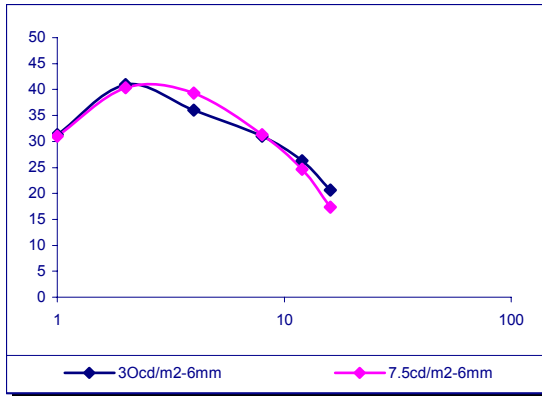


3 months

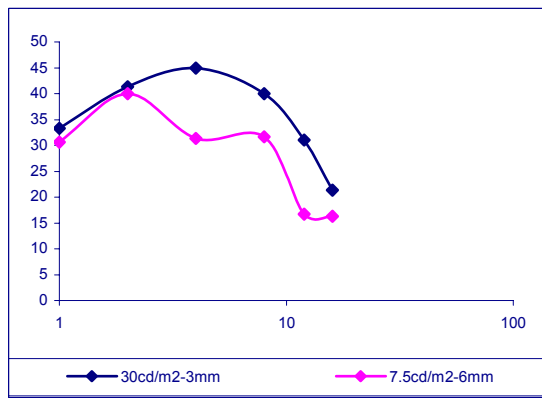
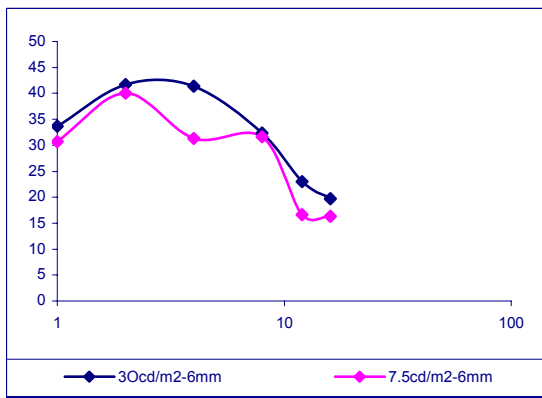
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: EP.

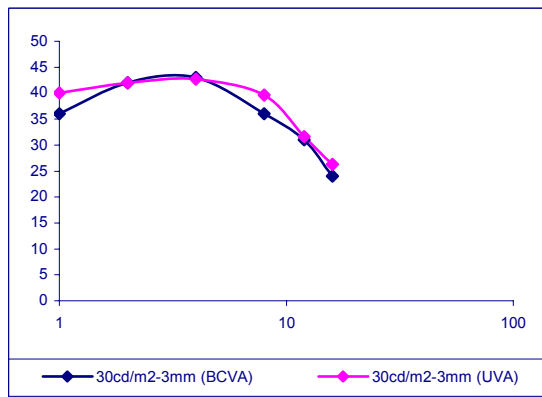
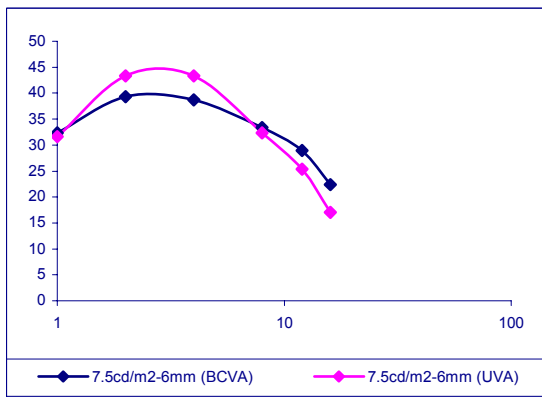
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

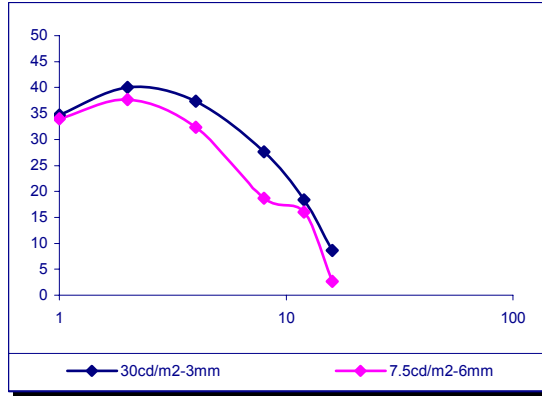
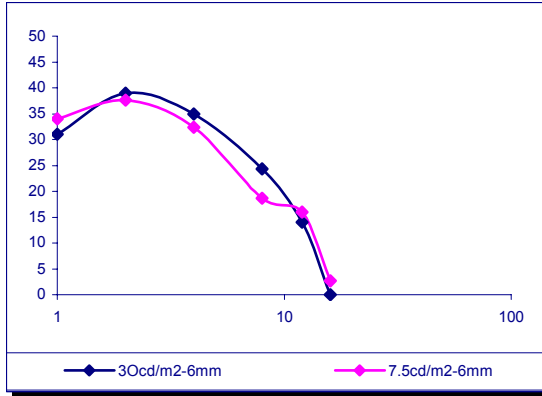


3 months

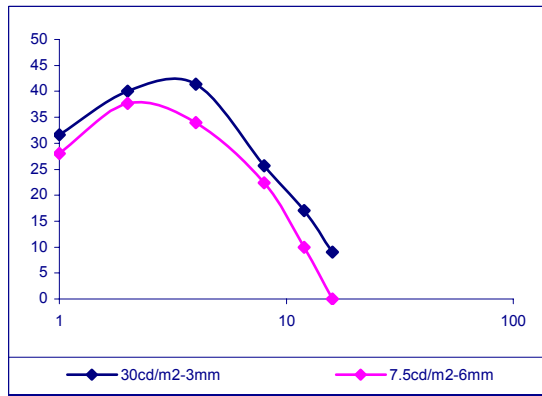
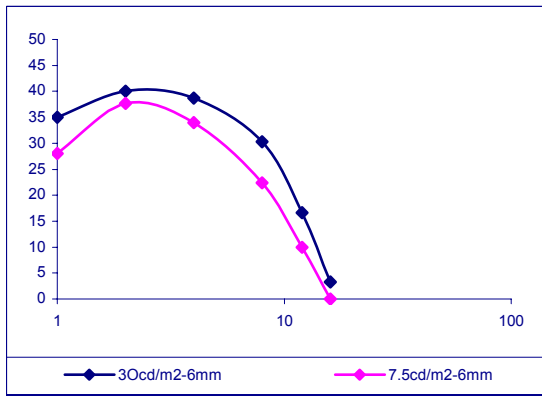
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: FT

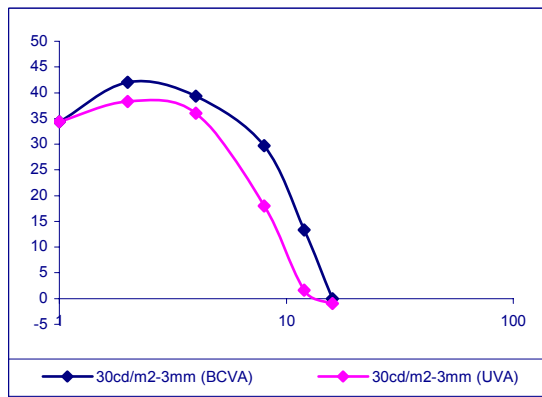
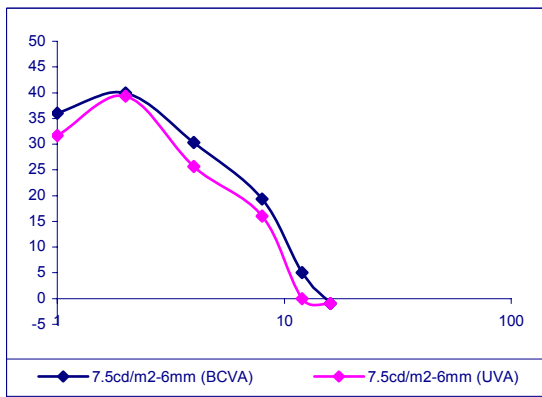
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

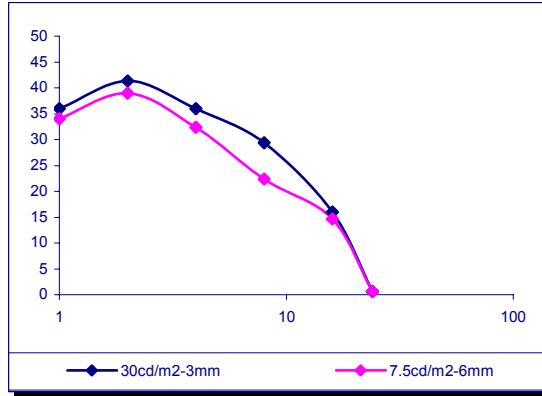
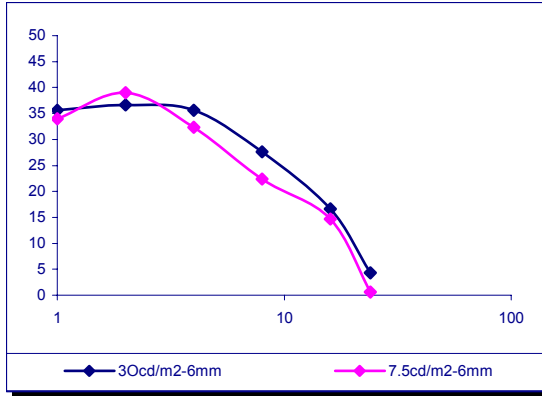


3 months

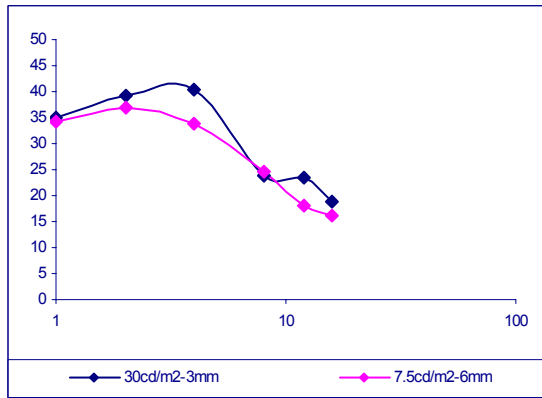
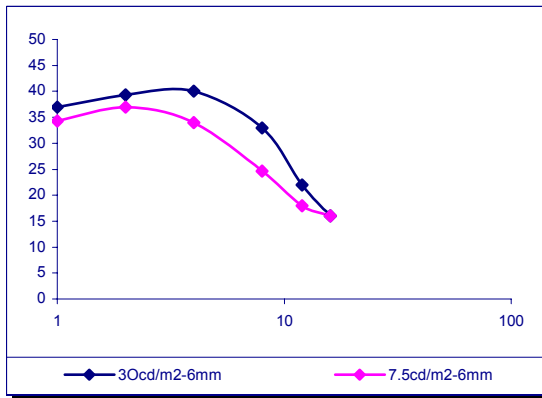
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: MK.

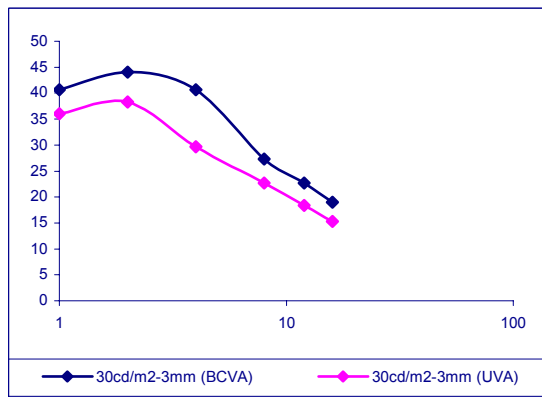
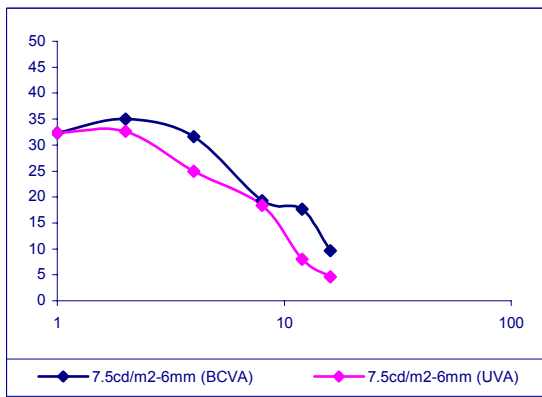
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

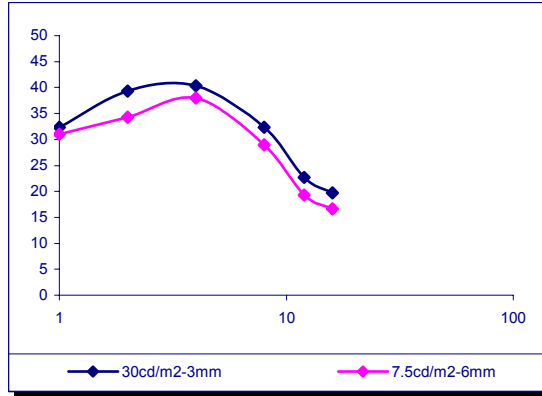
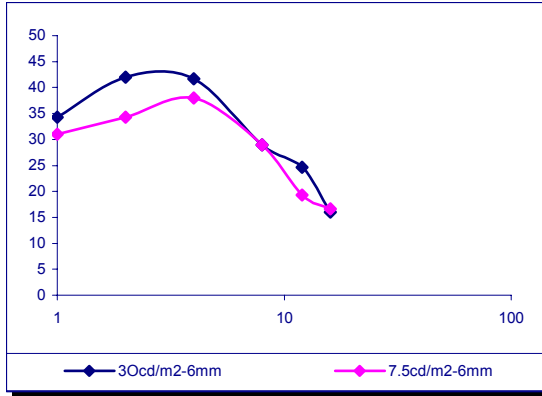


3 months

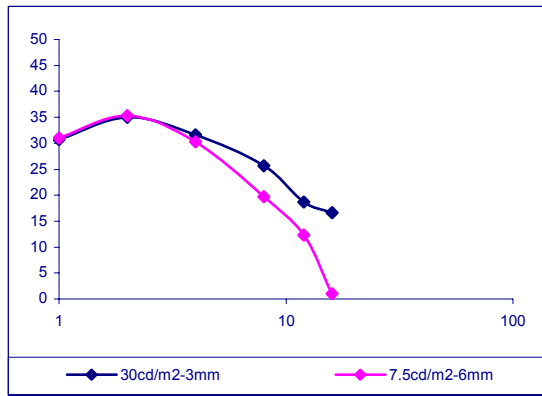
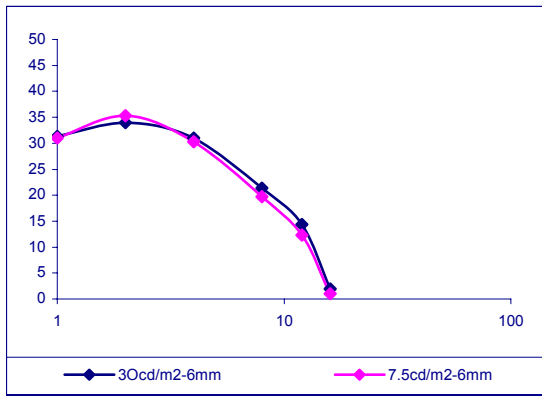
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: GP

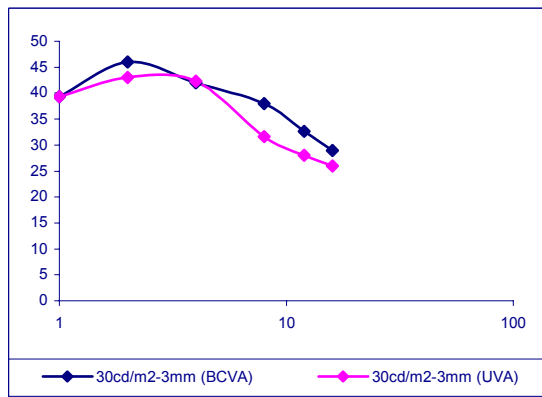
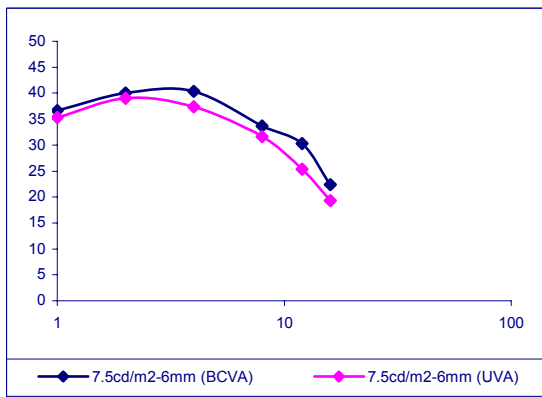
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

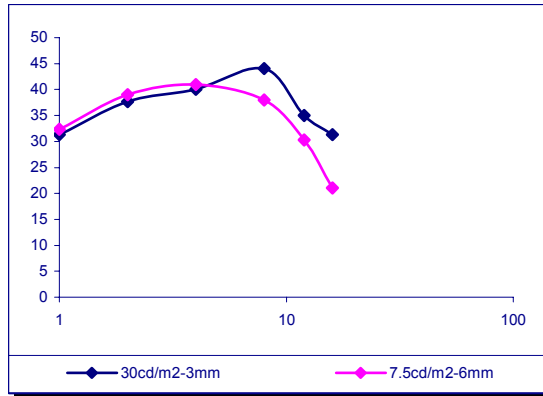
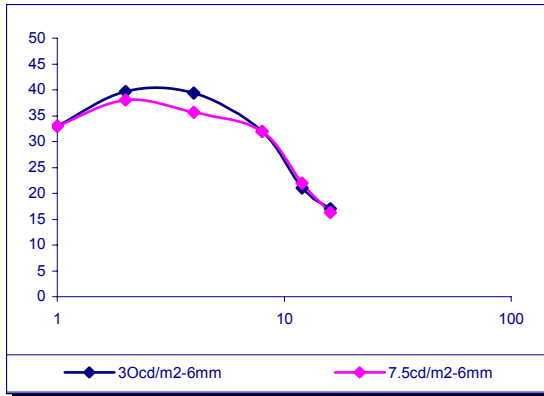


3 months

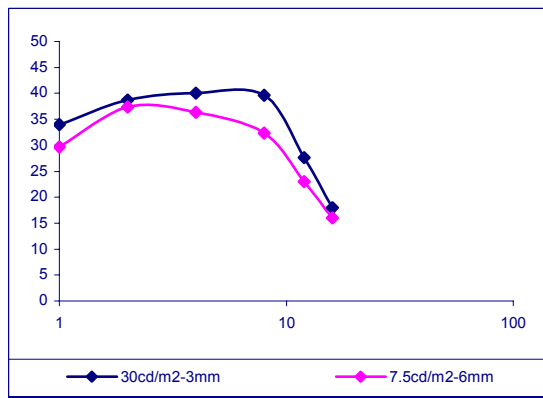
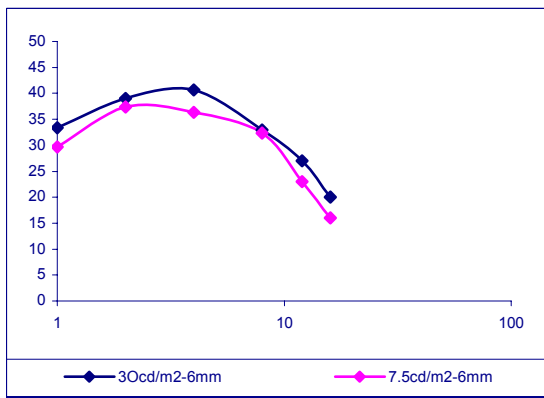
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: SP

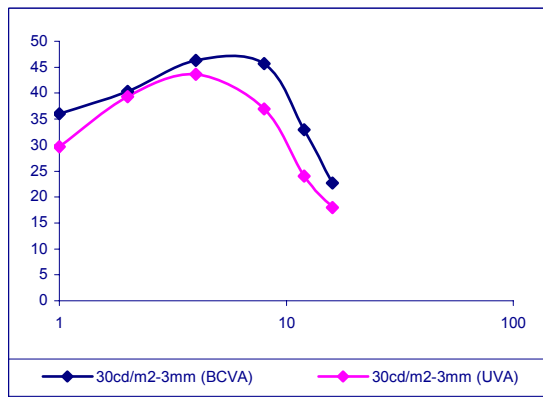
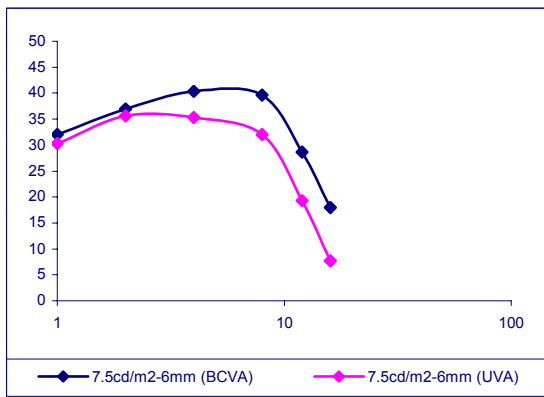
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

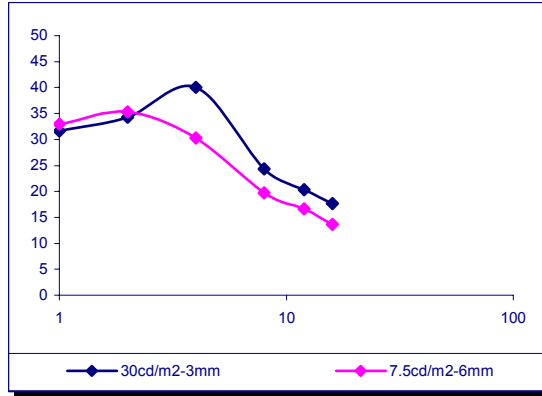
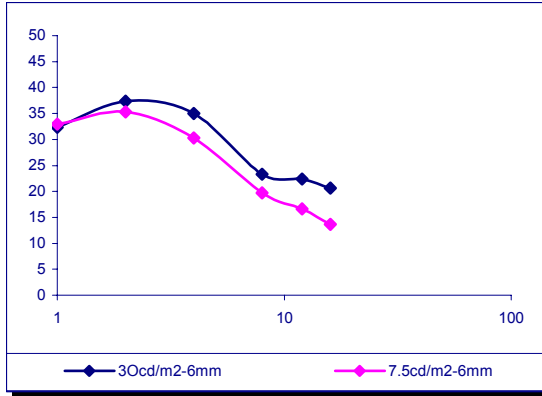


3 months

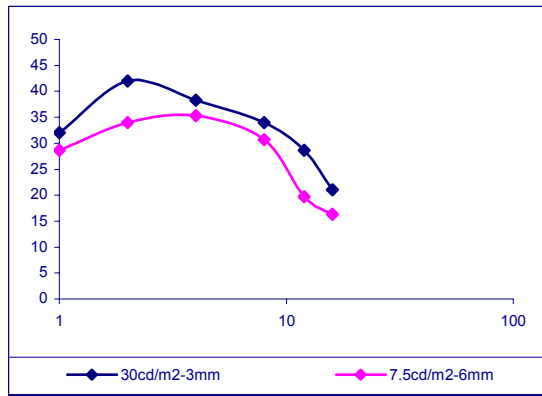
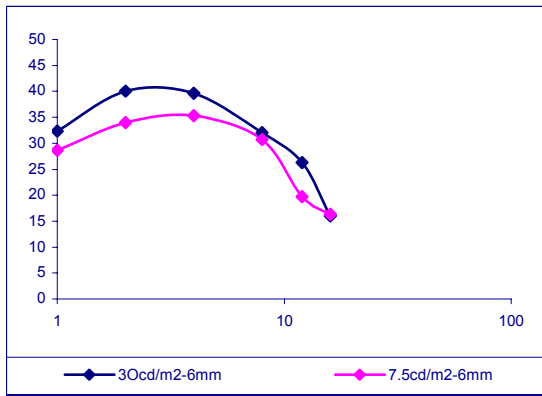
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: SM.

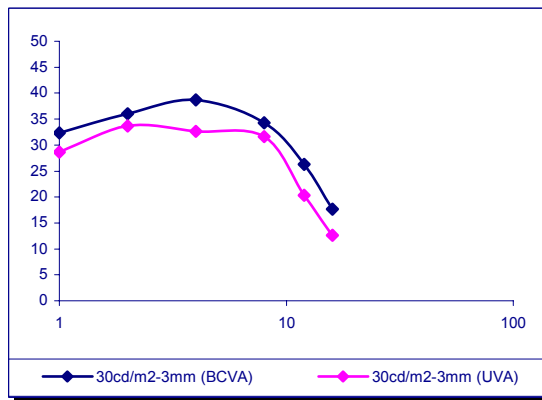
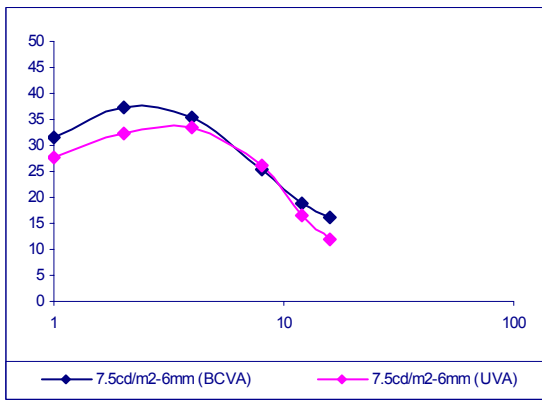
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

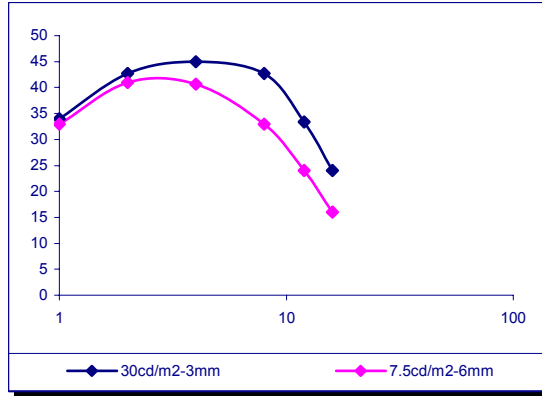
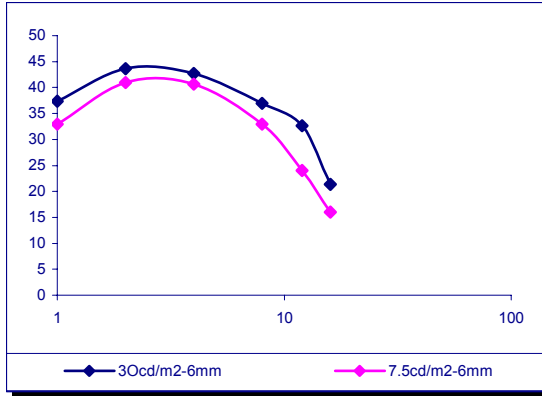


3 months

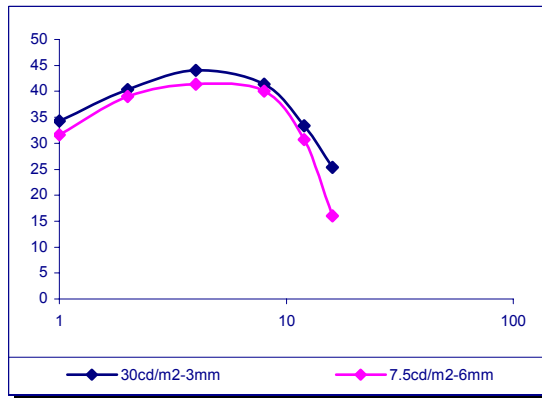
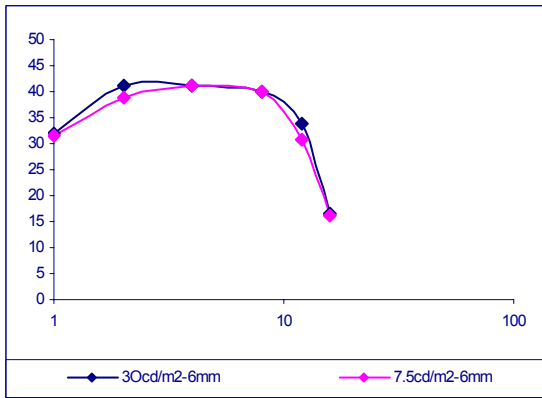
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: EP..

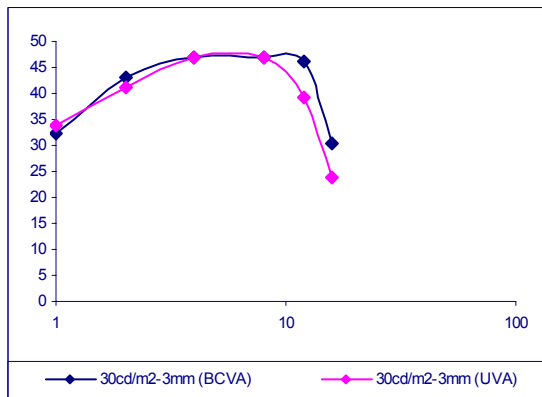
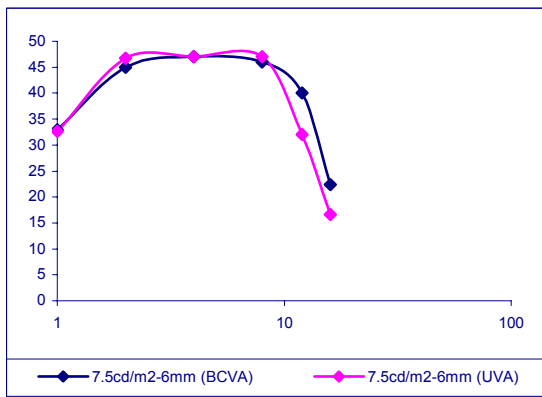
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

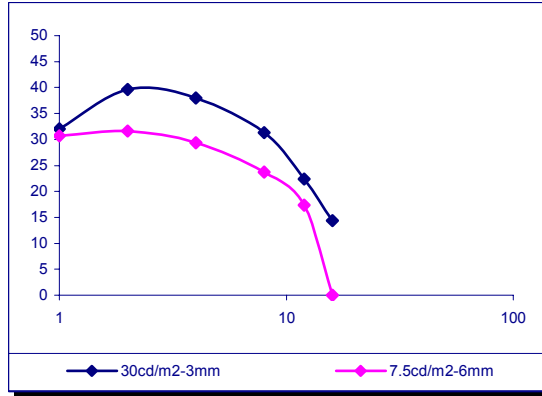
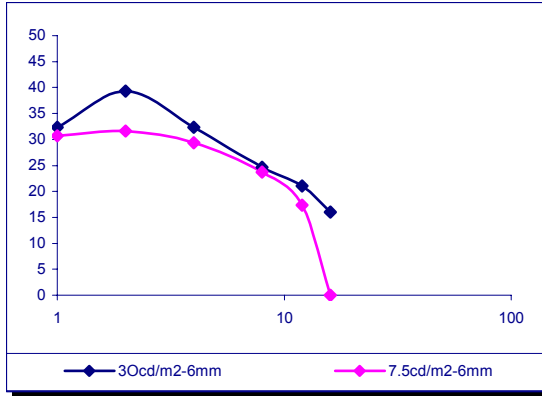


3 months

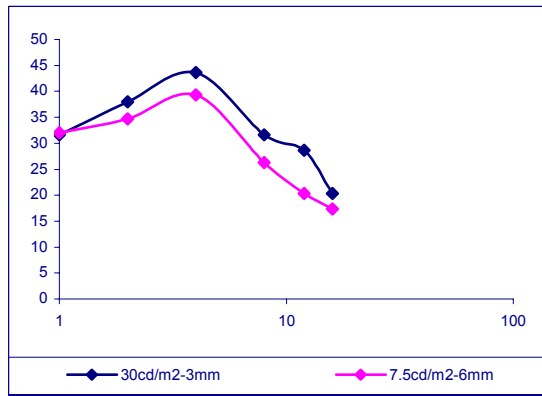
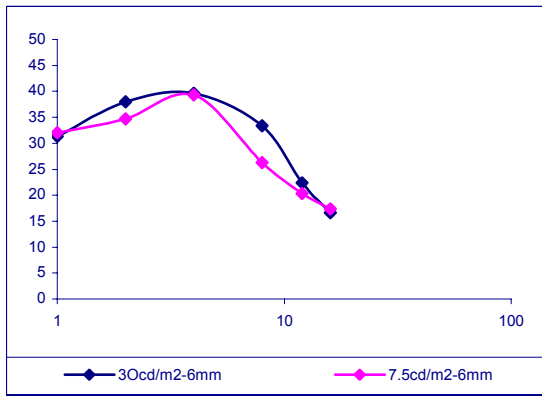
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: MK

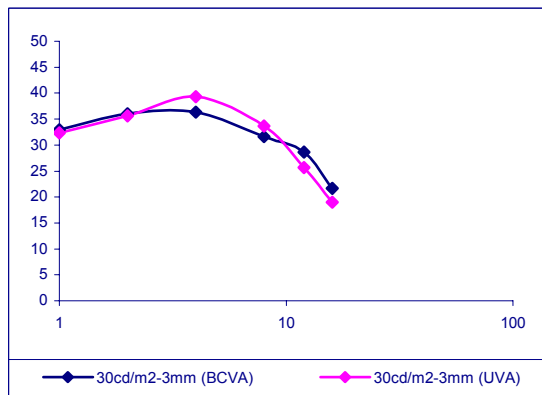
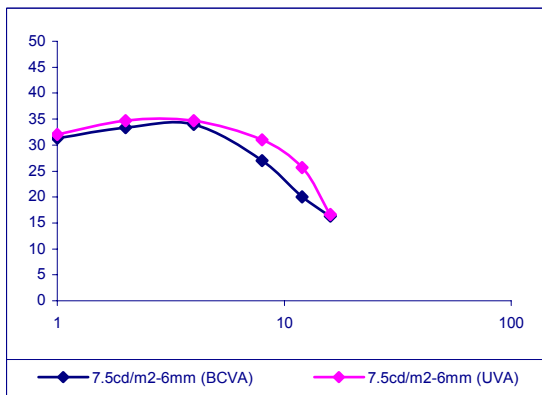
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

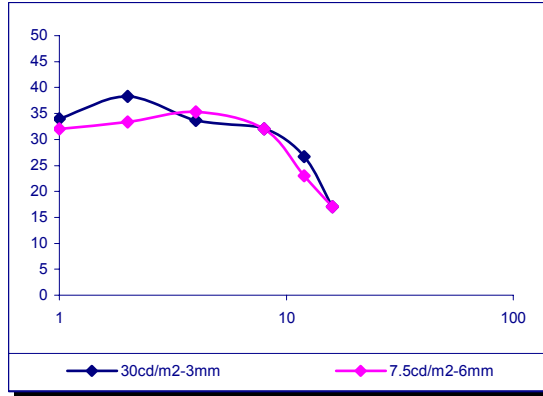
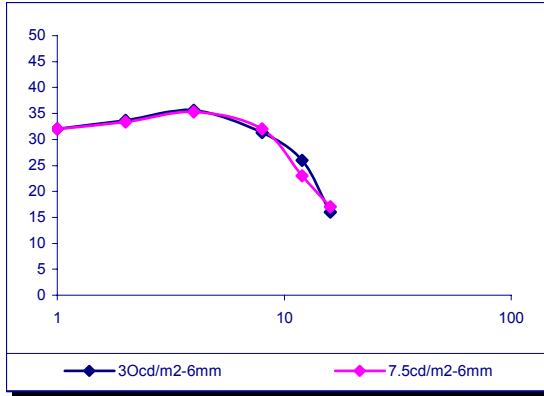


3 months

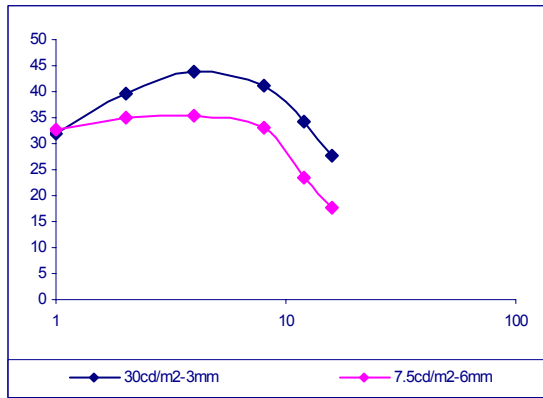
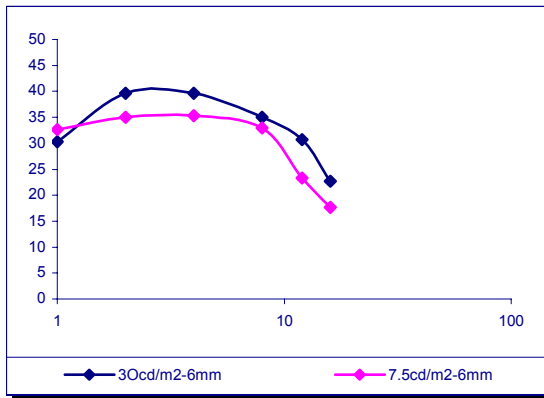
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: ME

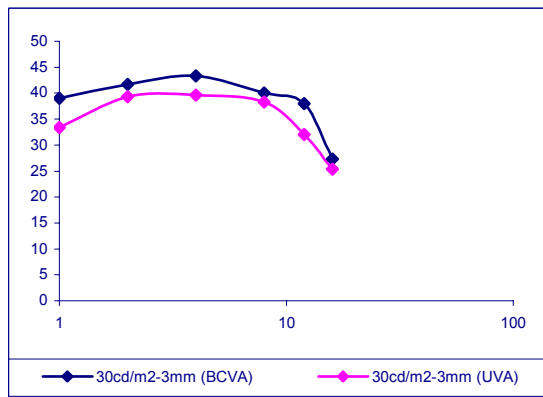
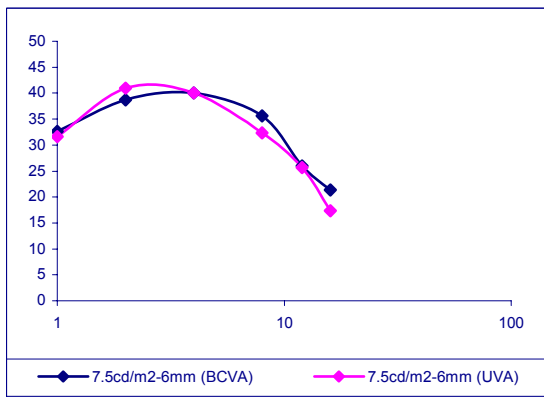
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

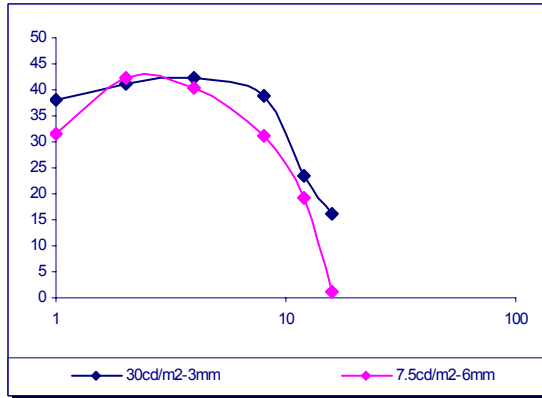
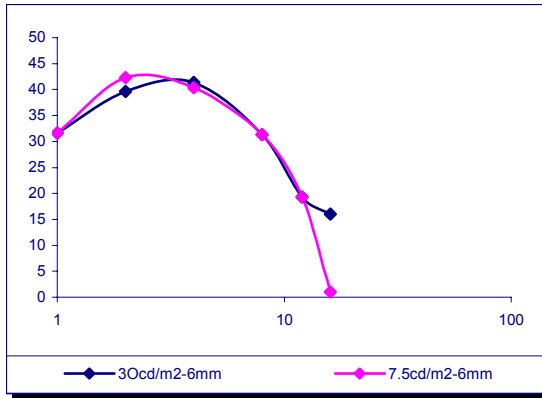


3 months

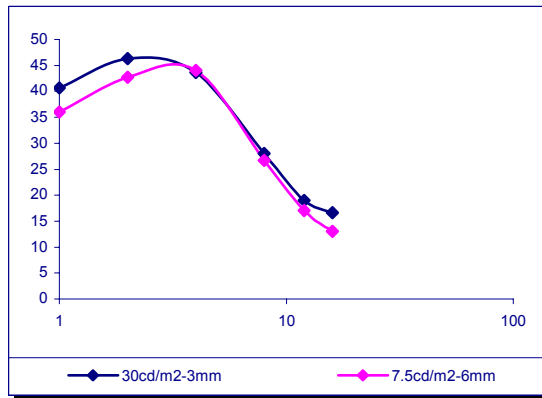
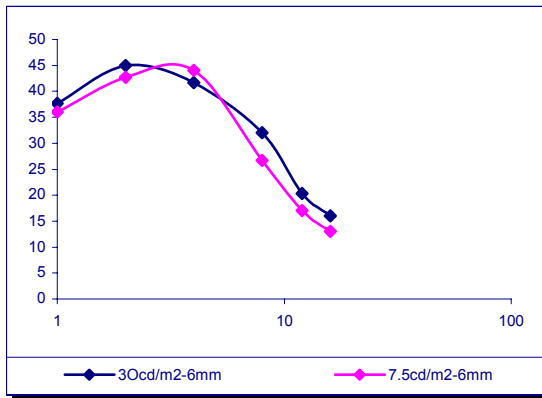
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: SN

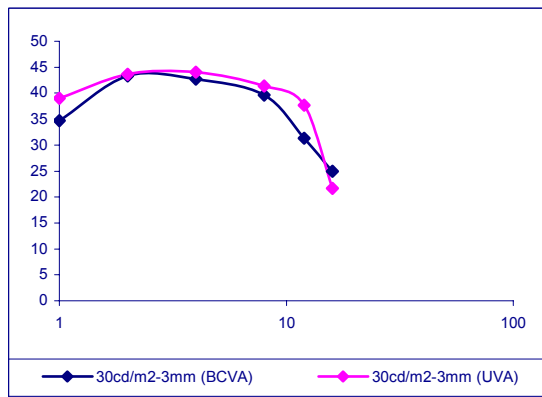
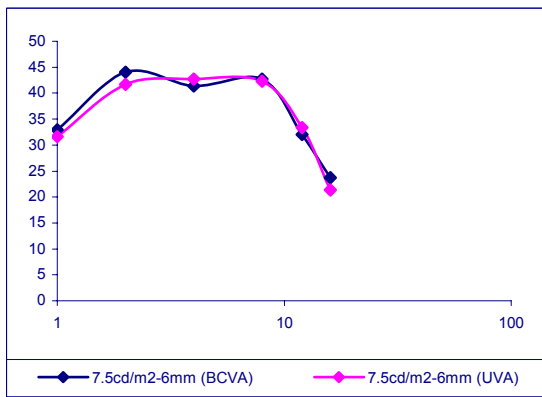
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

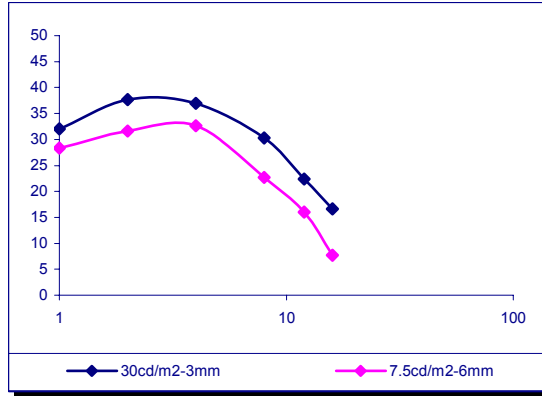
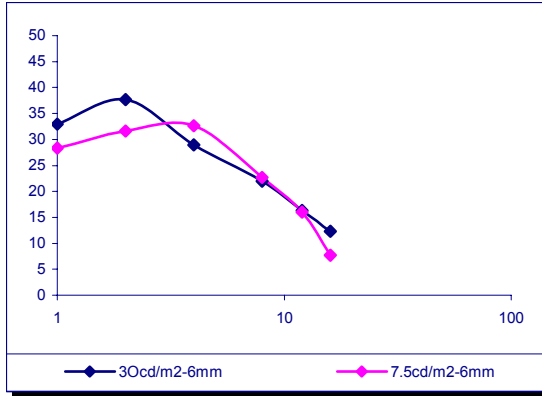


3 months

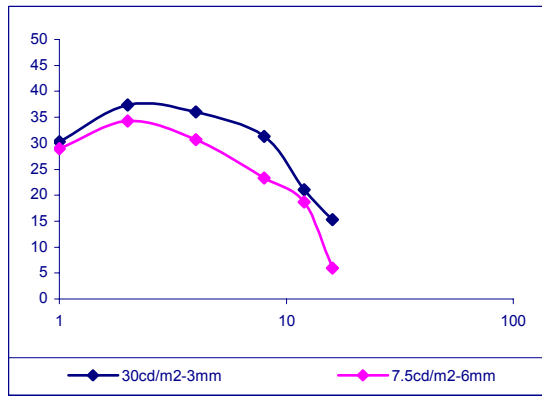
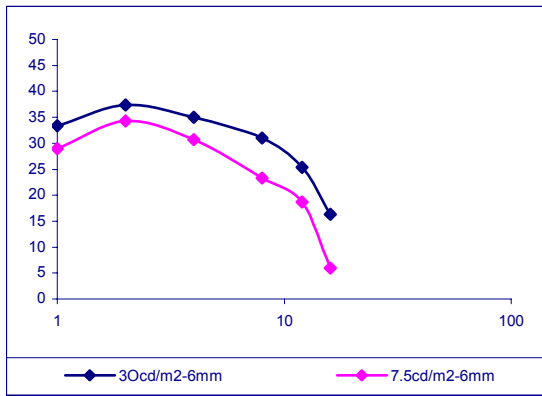
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: IA

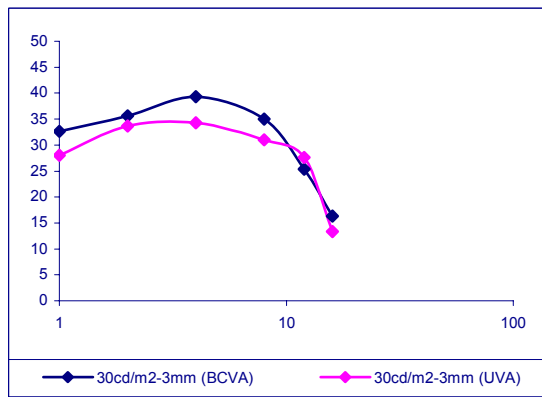
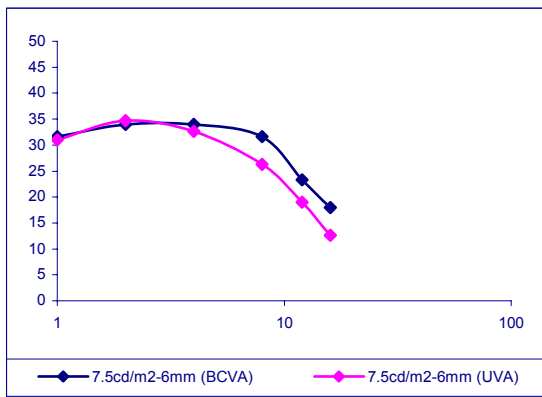
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

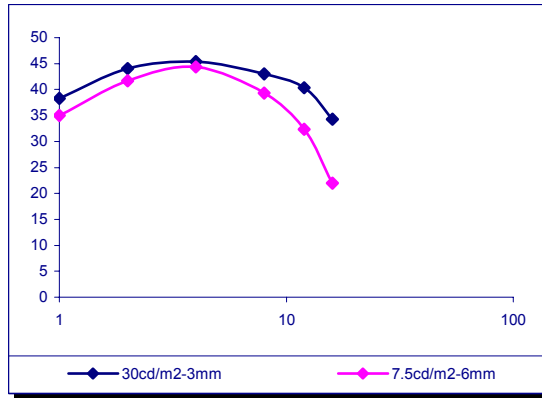
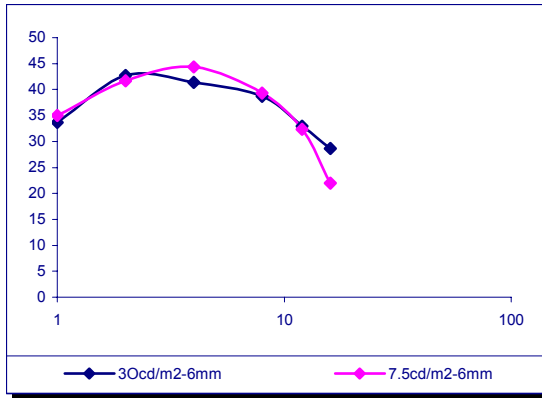


3 months

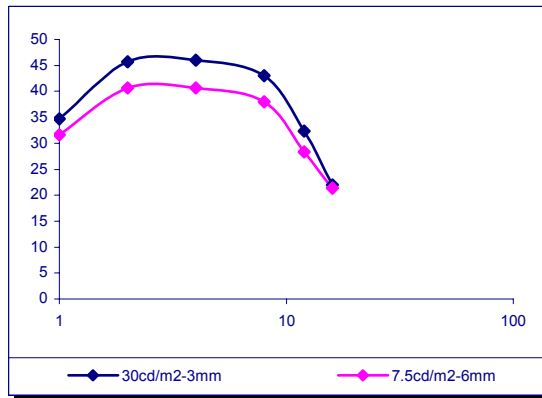
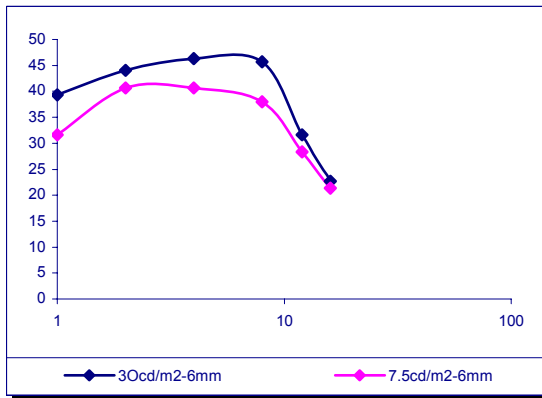
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: SO

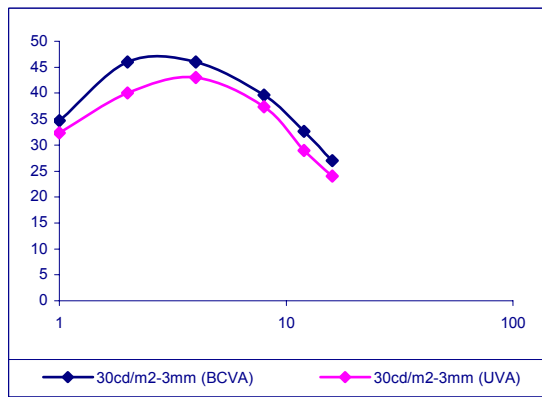
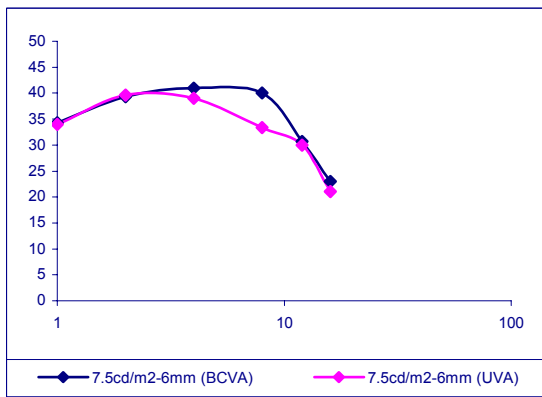
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

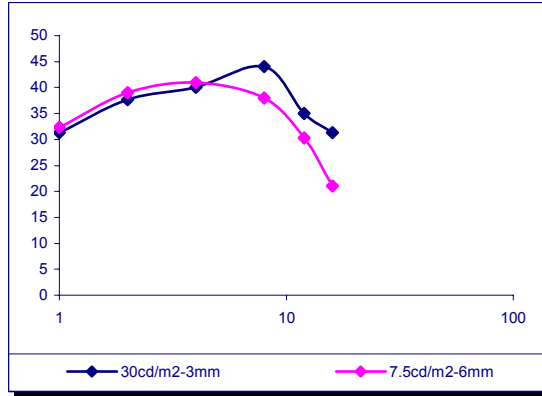
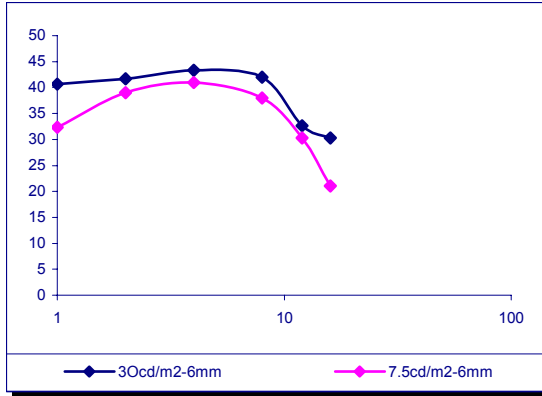


3 months

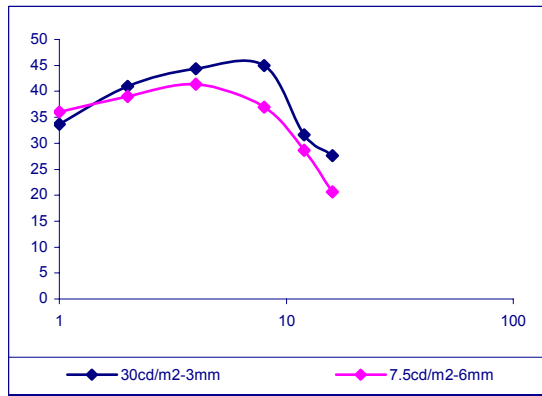
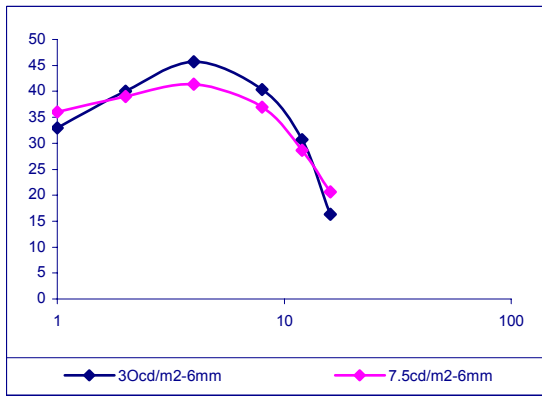
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: EK

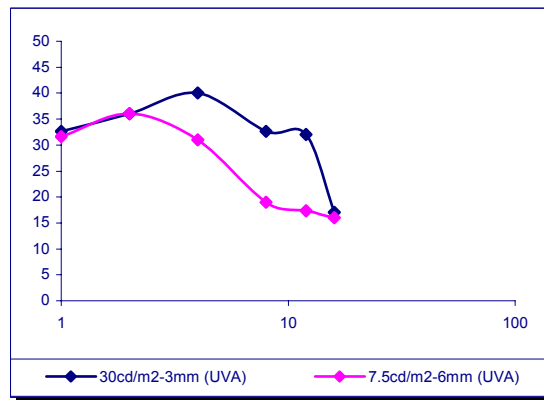
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

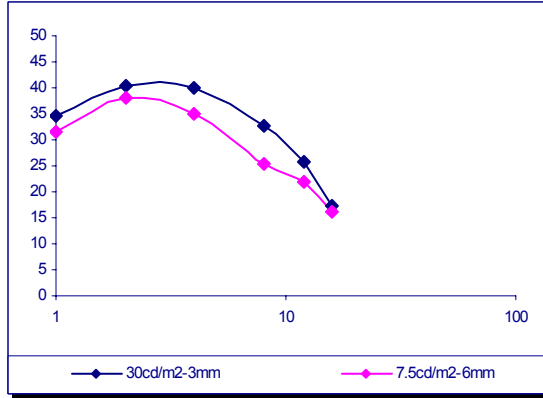
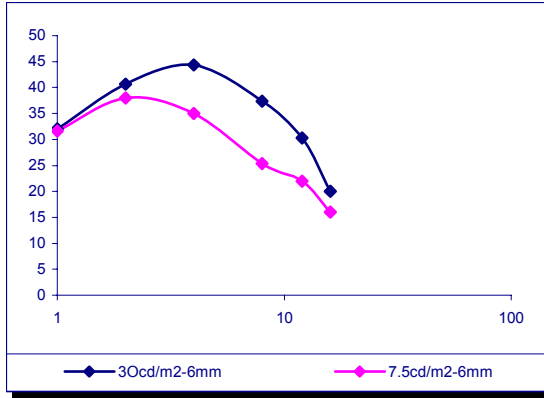


3 months

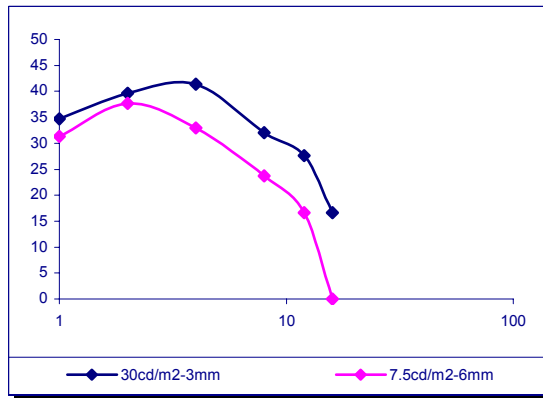
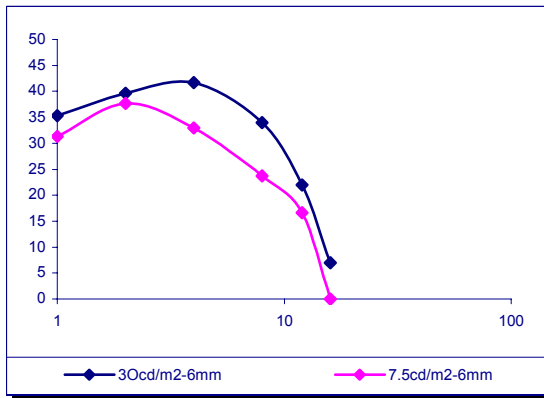
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: FD

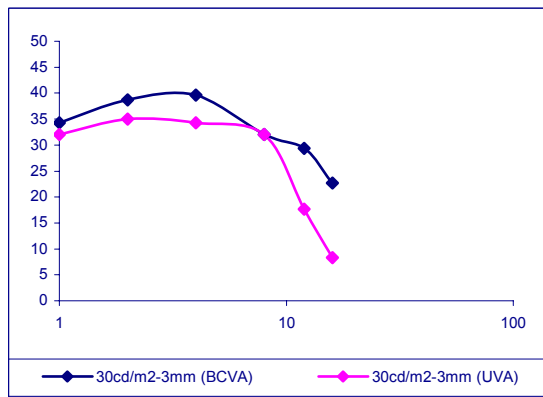
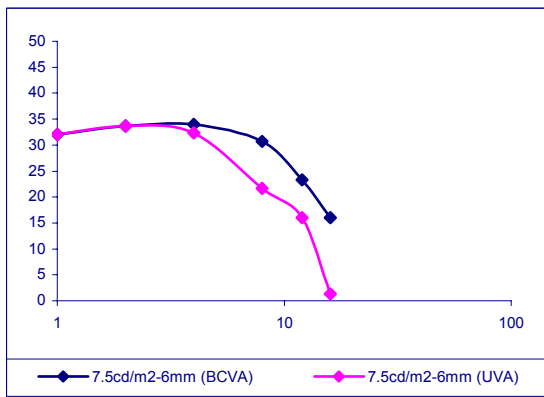
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

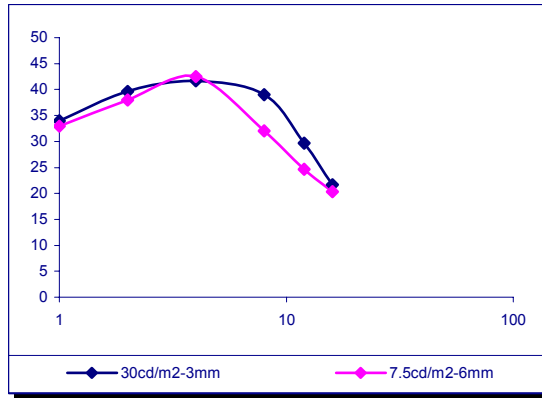
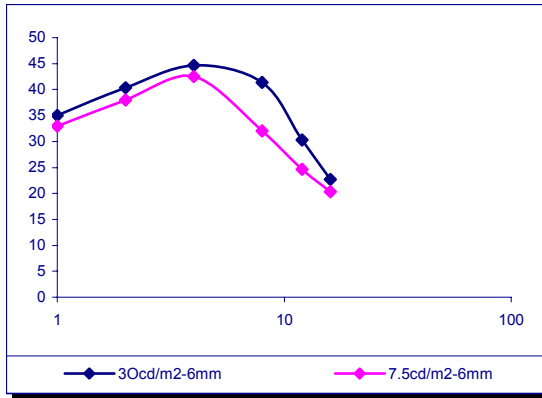


3 months

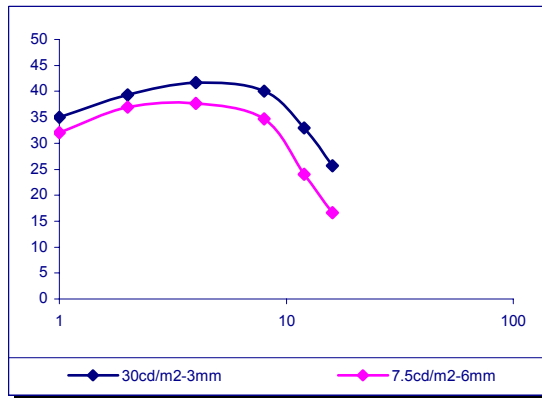
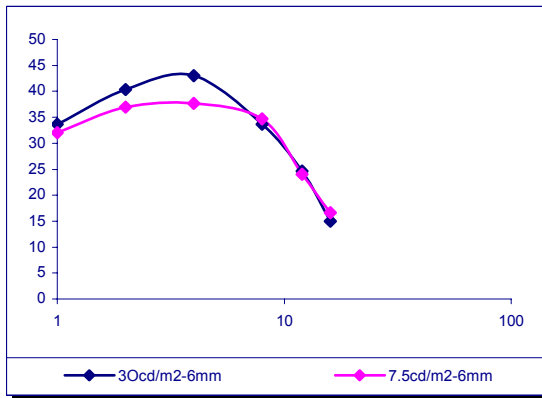
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: BK

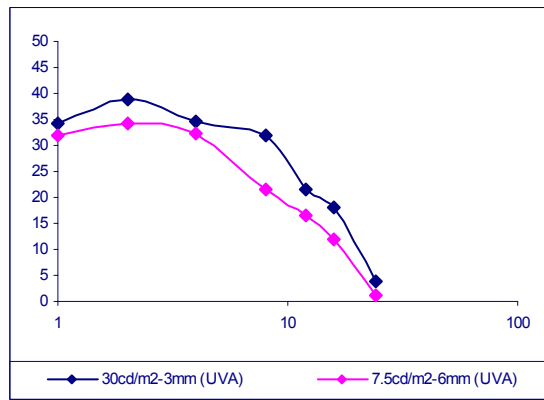
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

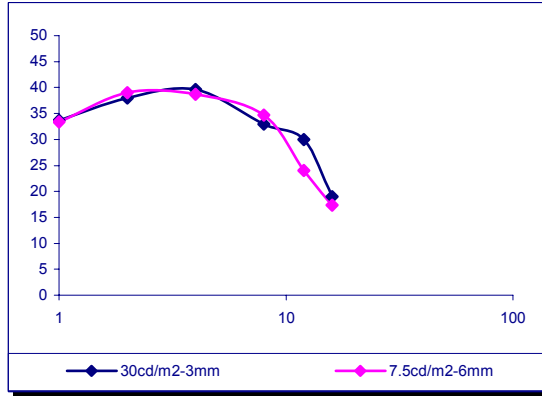
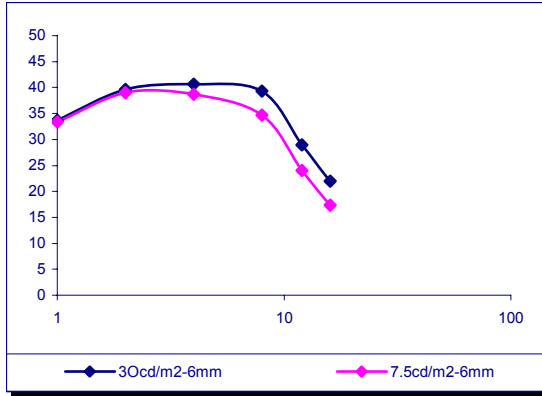


3 months

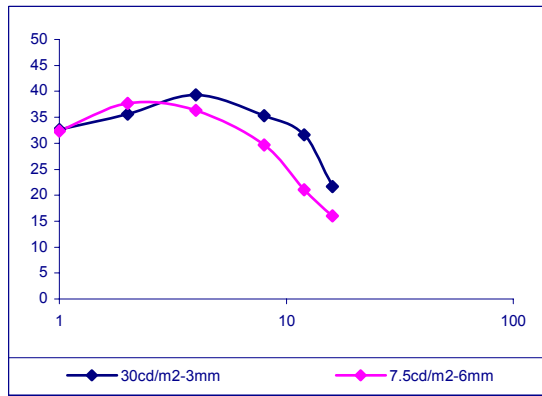
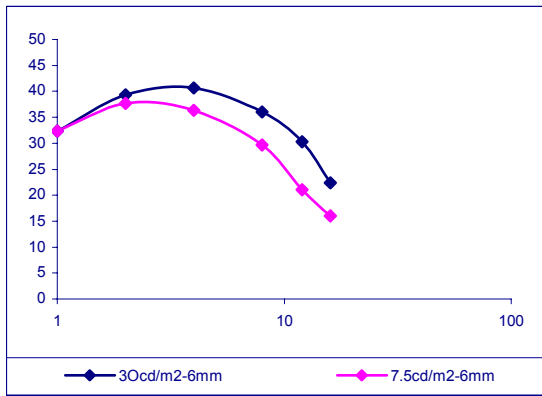
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: DDB

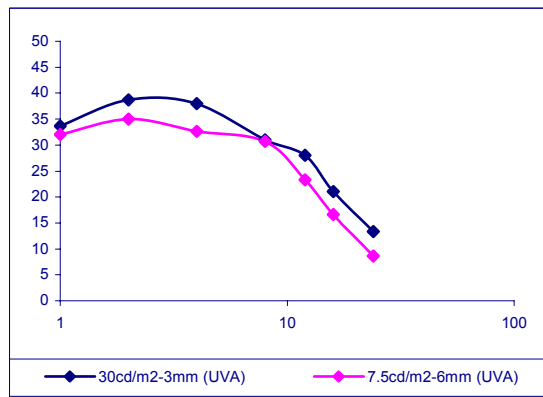
Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

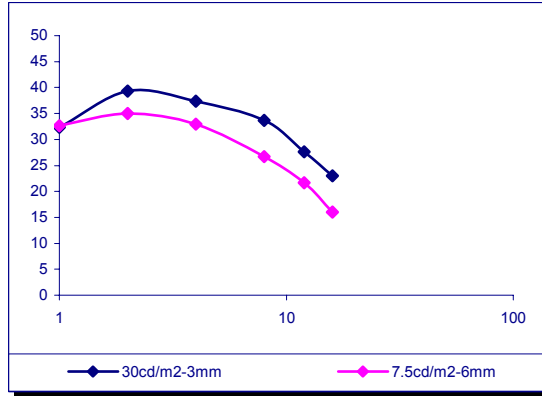
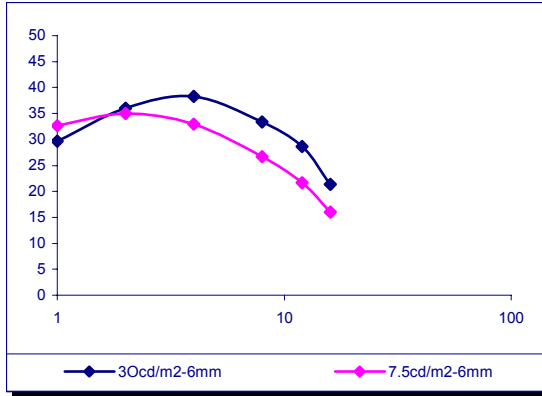


3 months

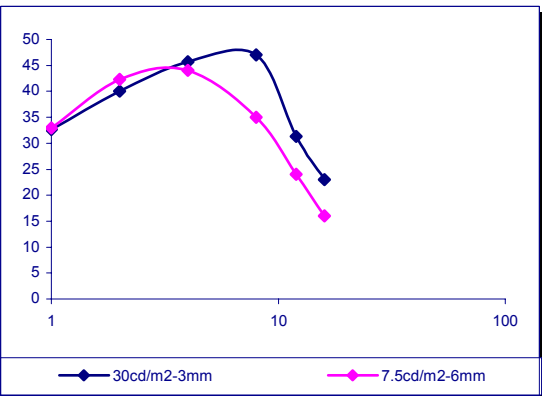
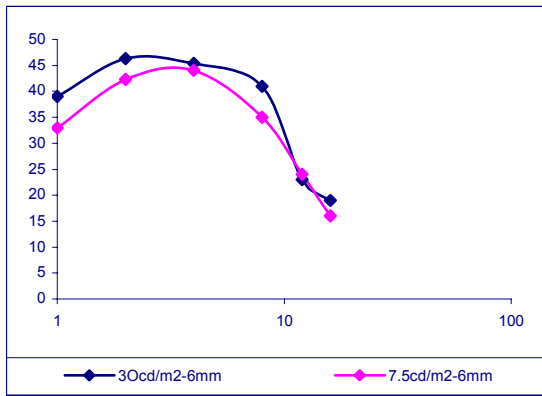
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: DDB

Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op

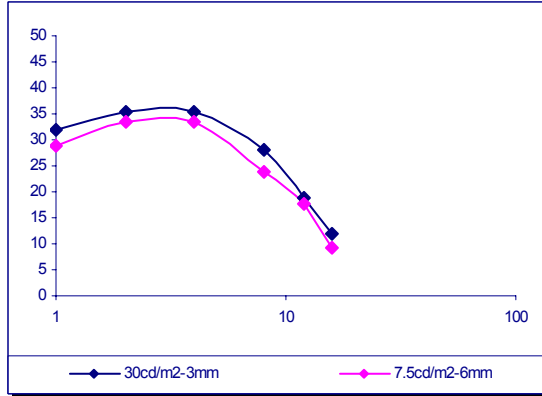
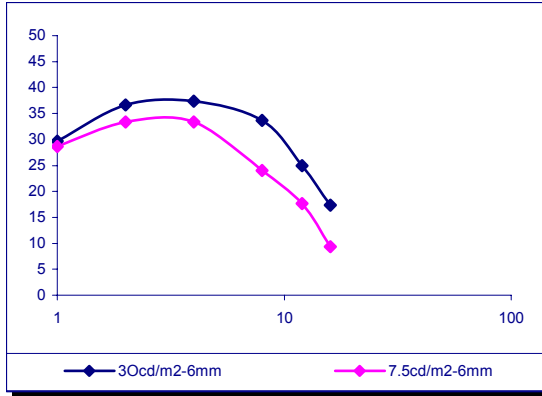


1 month

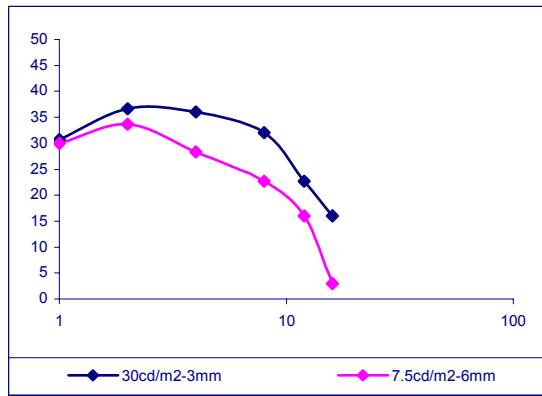
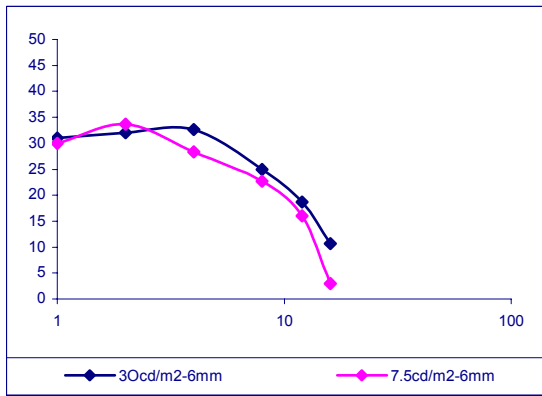
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: MM

Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op

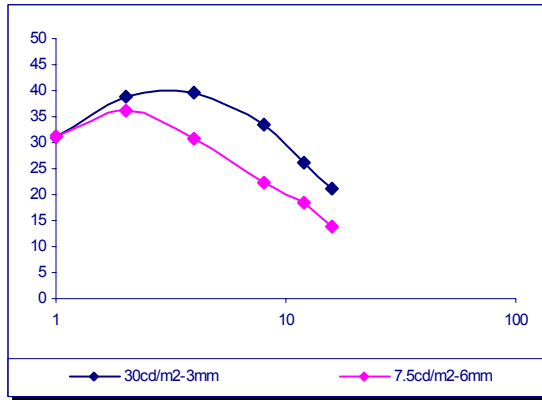
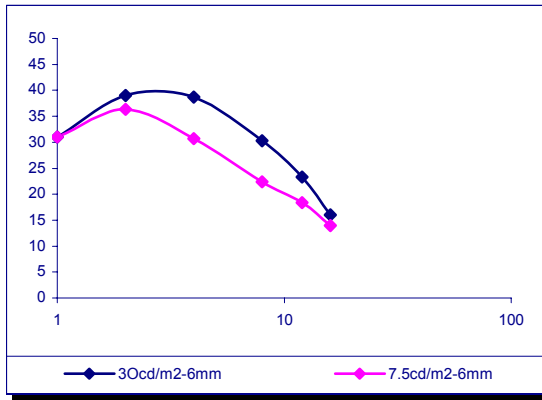


1 month

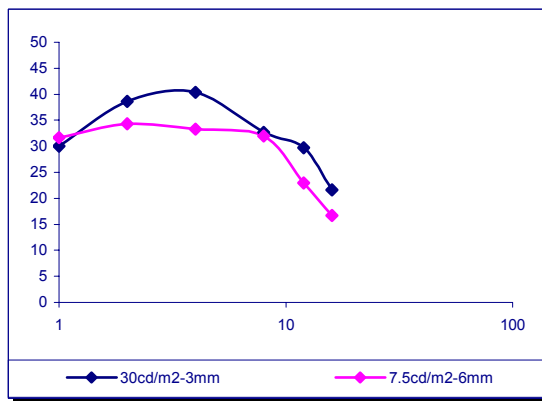
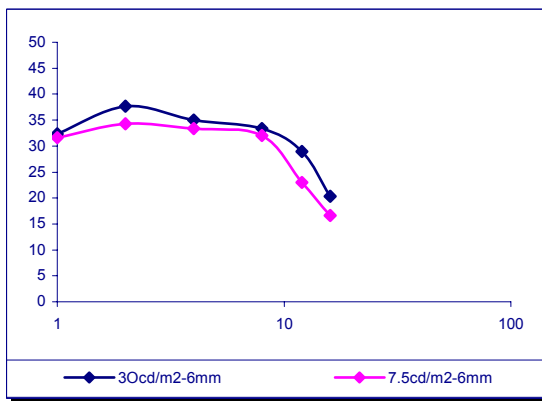
Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: SM

Ευαισθησία αντίθεσης (dB)



Pre-op



1 month

Χωρική Συχνότητα (c/deg)

Subject: GP.



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΔΕΚ



ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ
ΣΥΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



Η ΠΑΙΔΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ
Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Εκπαίδευσης και Αρχικής
Επαγγελματικής Κατάρτισης

