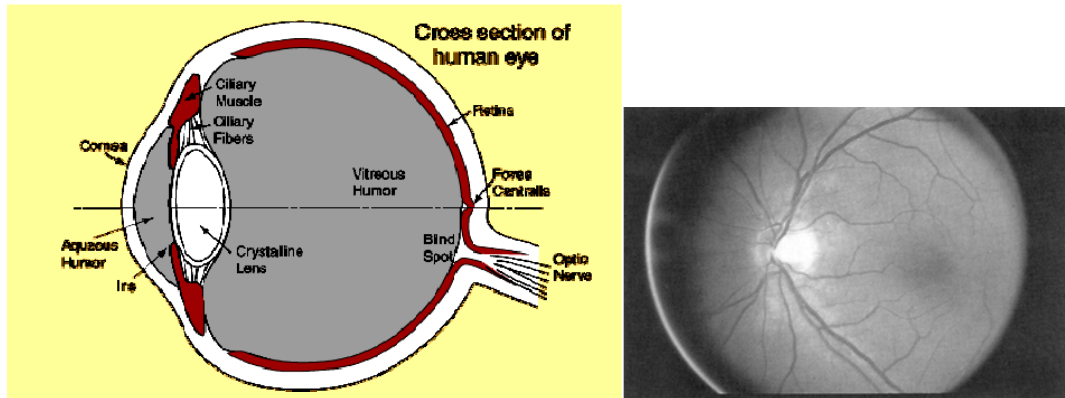


Φως, οφθαλμοί και όραση



Σοφία Κόττου

Επίκουρη Καθηγήτρια

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής

Ιατρική Σχολή Πανεπιστημίου Αθηνών

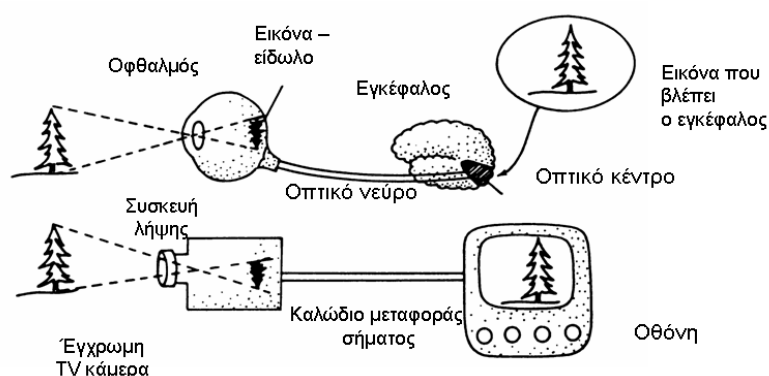
Οκτώβριος 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή.....	3
1.1 Δομή του Οφθαλμού.....	3
1.2 Εστίαση του φωτός.....	5
1.3 Απορρόφηση του φωτός	6
1.4 Πραγματικό και φανταστικό είδωλο	9
1.4.1 Προσαρμογή του οφθαλμού	11
1.5 Ανιχνευτική ικανότητα του οφθαλμού	12
1.6 Διόφθαλμη, στερεοσκοπική όραση.....	12
1.7 Προσαρμογή στη φωτεινότητα	13
1.8 Όρια Οπτικής Οξύτητας.....	15
1.8.1 Περίθλαση και διαστάσεις των φωτοϋποδοχέων	15
1.8.2 Σφαιρική και χρωματική εκτροπή.....	17
1.9 Η ελαττωματική όραση	18
1.10 Διορθωτικοί φακοί.....	21
1.11 Μόνιμη διόθρωση.....	22
1.12 Είδη οπτικής δυσλειτουργίας.....	23
1.13 Οπτική αντίληψη.....	25
Βιβλιογραφία.....	27

Εισαγωγή

Οι οφθαλμοί δέχονται το φως από τα αντικείμενα του περιβάλλοντος και το εστιάζουν στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα του αμφιβληστροειδή μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό σήμα, που «ταξιδεύει» με το οπτικό νεύρο και καταλήγει στον «οπτικό» φλοιό του εγκεφάλου. Ο εγκέφαλος επεξεργάζεται την πληροφορία και ο άνθρωπος «αντιλαμβάνεται» την εικόνα.



Καθένα από τα τέσσερα αυτά στάδια της διαδικασίας της όρασης είναι σημαντικό και εμπεριέχει ενδιαφέροντα στοιχεία φυσικής. Το πρώτο στάδιο είναι μέρος της οπτικής, το δεύτερο της κβαντομηχανικής (απορρόφηση φωτός), το τρίτο είναι μεταφορά ηλεκτρικών φορτίων και δυναμικού. Φυσικές διεργασίες περιέχονται και στο τέταρτο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι συνιστώσες (φυσικής και φυσιολογίας) κυρίως του πρώτου σταδίου.

1.1 Δομή του Οφθαλμού

Το φως προσπίπτει αρχικά στον κερατοειδή χιτώνα, διασχίζει το υδατοειδές υγρό, την κόρη (άνοιγμα) της ίριδας, το φακό και το υαλοειδές υγρό, πριν καταλήξει στα κύτταρα του αμφιβληστροειδή (τα κωνία και τα ραβδία).

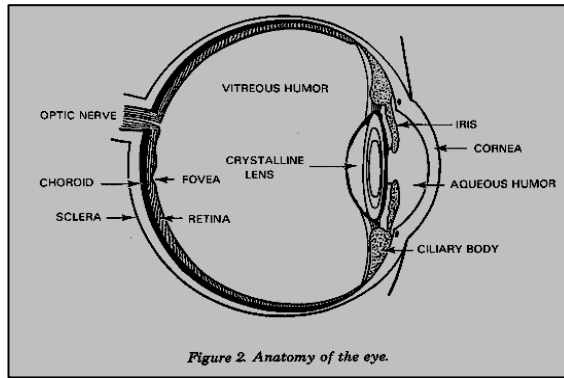
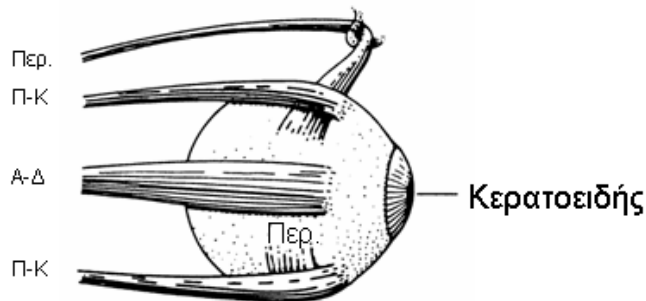


Figure 2. Anatomy of the eye.

Την περιστροφική κίνηση του βολβού ελέγχουν τρία ζεύγη μυών. Κάθε ζεύγος είναι υπεύθυνο για την περιστροφή σε διαφορετικό επίπεδο στο χώρο, κάθετο στα υπόλοιπα δυο.



Ο κερατοειδής συντίθεται από 50 στρώματα ινών κολλαγόνου. Είναι διαφανής στο ορατό επειδή η κατασκευή του είναι ομοιογενής και χωρίς αιμοφόρα αγγεία, παρά μόνο στην περιφέρεια. Καλύπτεται εξωτερικά με στρώμα από δάκρυ (πάχους 7-10 μm), το οποίο τον μαλακώνει, «σβήνει» μικροατέλειες και τον εφοδιάζει με οξυγόνο.

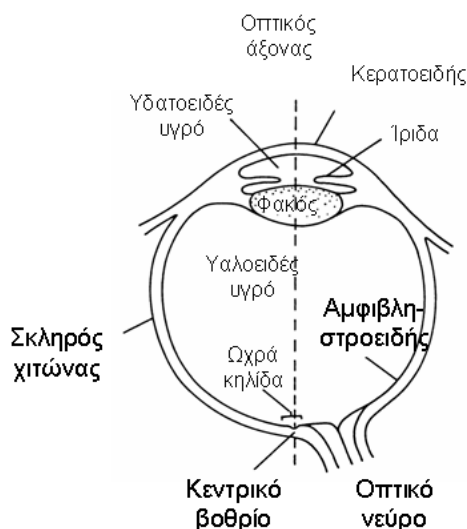
Η ακτίνα καμπυλότητας του κερατοειδή είναι (στην κεντρική περιοχή) περίπου 7,8 mm και διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο κατά $\pm 0,4$ mm.

Το υδατοειδές υγρό γεμίζει το χώρο μεταξύ κερατοειδή και φακού. Περιέχει πλάσμα αίματος με λίγες πρωτεΐνες.

Η ίρις έχει στο κέντρο της ένα άνοιγμα: την κόρη, η διάμετρος της οποίας κυμαίνεται από 1,5 μέχρι 10,0 mm και ελέγχεται από ζεύγος μαλακών μυών: τον σφικτήρα (δακτυλοειδής) (που την περιβάλλει και είναι υπεύθυνος για τον περιορισμό του ανοίγματος) και τον διαστολέα (σαν λεπτός δίσκος) (που είναι υπεύθυνος για τη διάνοιξη της κόρης).

Ο φακός του οφθαλμού στέκεται ακριβώς πίσω από την κόρη και η σύστασή του είναι 66% νερό και 33% πρωτεΐνες. Έχει πάχος περίπου 4 mm

και διάμετρο 9 mm. Μεγαλώνει καθόλη τη διάρκεια της ζωής προσθέτοντας νέους φλοιούς, ώστε να έχει τη μορφή «κρεμμυδιού». Σε μεγάλη ηλικία αποκτά κιτρινωπή απόχρωση και χάνει τη διαφάνειά του, δημιουργώντας τον καταρράκτη.

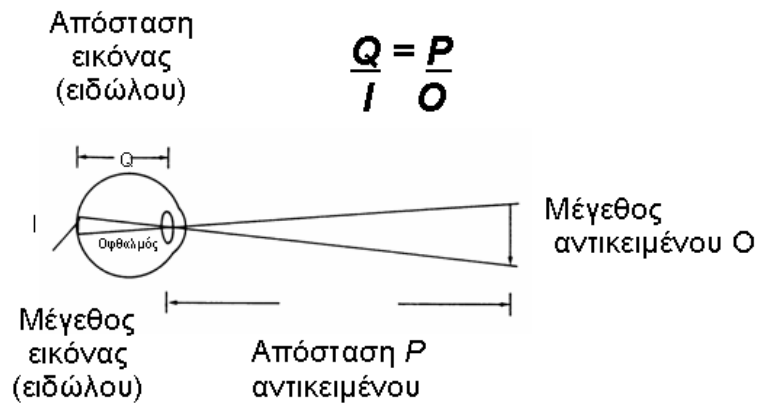


Το υαλοειδές υγρό αποτελείται από 99% νερό και 1% κολλαγόνο και ένα οξύ που του δίνει υφή ζελατινώδη. Καλύπτει τα 5 από τα 7-8 cm³ του όγκου του οφθαλμού.

Το υδατοειδές υγρό παράγεται συνεχώς (1% του όγκου του ανά λεπτό) και αποχετεύεται προς το νωτιαίο μυελό. Ο συνολικός όγκος του υδατοειδούς υγρού καθορίζει την εσωτερική πίεση του οφθαλμού που κυμαίνεται από 10 μέχρι 20 mmHg. Αν π.χ. λόγω τραυματισμού, εμποδιστεί η αποχέτευση του υδατοειδούς υγρού, η εσωτερική πίεση αυξάνει, κατάσταση που μπορεί να οδηγήσει σε γλαύκωμα ή τύφλωση (όταν τα αιμοφόρα αγγεία του αμφιβληστροειδή κλείσουν εξαιτίας της μεγάλης πίεσης), αν δεν υπάρξει άμεση χειρουργική επέμβαση εκτόνωσης.

1.2 Εστίαση του φωτός

Επηρεάζεται από το δείκτη διάθλασης (και την καμπυλότητα των διαχωριστικών επιφανειών) όλων των υλικών που διαπερνά το φως, από την είσοδό του στον οφθαλμό μέχρι το τέλος της διαδρομής του στον αμφιβληστροειδή.



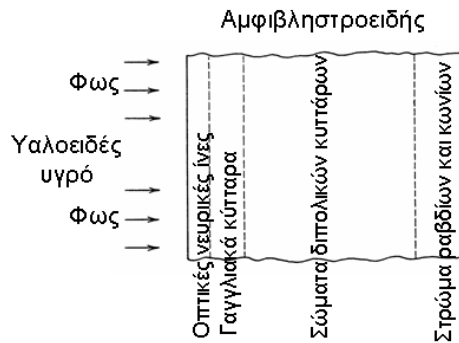
Οι κύριοι υπεύθυνοι όμως για την εστίαση είναι ο κερατοειδής (για τα 2/3) και ο φακός (για το υπόλοιπο 1/3).

Ο κερατοειδής έχει σταθερό σχήμα (και «οπτική συμπεριφορά»), όμως ο φακός προσαρμόζει την καμπυλότητά του ανάλογα με τις απαιτήσεις. Ο δείκτης διάθλασης του κερατοειδή είναι περίπου 1,377, του υδατοειδούς υγρού 1,337 και του φακού εξαρτάται από τις συντεταγμένες: στο κέντρο 1,40 με 1,41, στην περιφέρεια προς τους «πόλους» 1,385 με 1,39 και στην περιφέρεια προς τον «ισημερινό» 1,375. Υπάρχει και μια μεμβράνη-κάψουλα που περικλείει το φακό και έχει δείκτη διάθλασης περίπου 1,36.

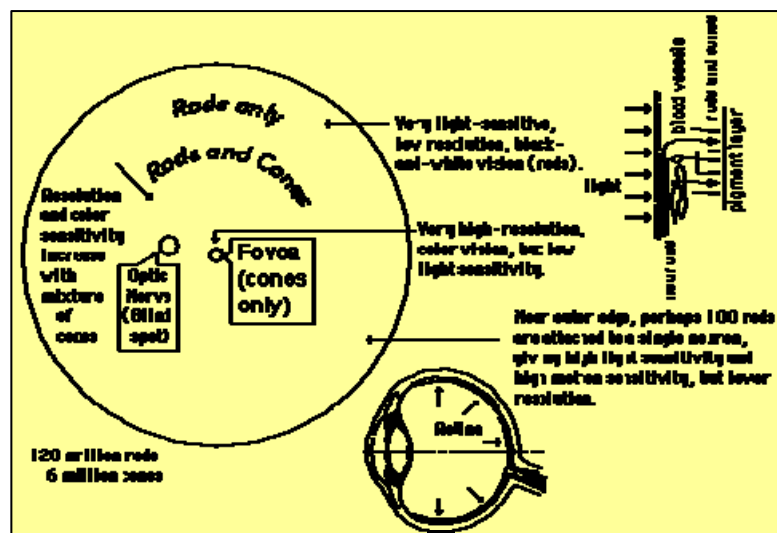
Οπτικά στοιχεία οφθαλμού	Δείκτης Διάθλασης
Κερατοειδής	1,34
Υδατοειδές υγρό	1,33
Εξωτερικός φλοιός φακού	1,38
Εσωτερικό φακού	1,41
Υαλοειδές υγρό	1,34

1.3 Απορρόφηση του φωτός

Περίπου το 50% του ορατού φωτός (400-700 nm) που θα εισέλθει στον οφθαλμό θα φθάσει στον αμφιβληστροειδή άμεσα.

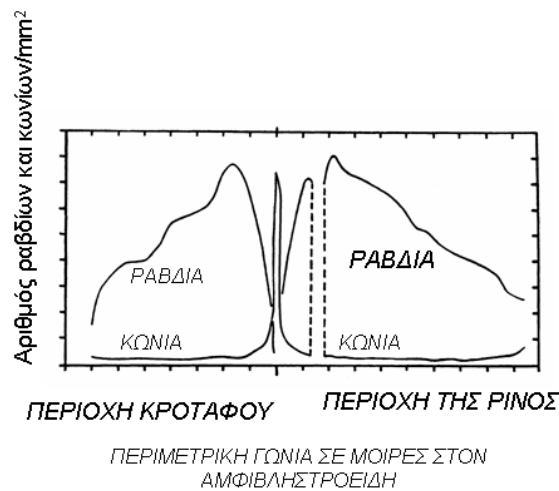


Όμως τα κύτταρα φωτοϋποδοχείς βρίσκονται πίσω από ένα στρώμα με γάγγλια και νευρώνες, το οποίο είναι λεπτότερο στην κεντρική περιοχή του αμφιβληστροειδή, την ωχρά κηλίδα, όπου και η όραση είναι ευκρινέστερη. Κοντά στην ωχρά κηλίδα υπάρχει το τυφλό σημείο χωρίς φωτοϋποδοχείς, καθώς από αυτό ξεκινά (προς τα πίσω) το οπτικό νεύρο. Το τυφλό σημείο δεν γίνεται αισθητό, επειδή οι δύο οφθαλμοί αλληλοσυμπληρώνονται: όταν ένα φωτεινό αντικείμενο στέλνει ακτίνα φωτός που πέφτει πάνω στο τυφλό σημείο του ενός οφθαλμού, στέλνει ταυτόχρονα ακτίνα φωτός και στον δεύτερο οφθαλμό, που (λόγω θέσης και γεωμετρίας) δεν βρίσκει το δικό του τυφλό σημείο.

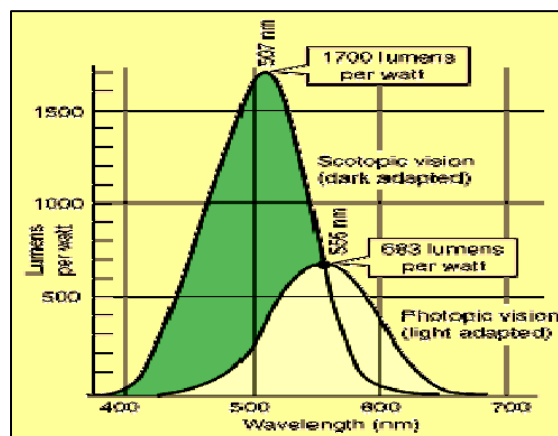


Ο αμφιβληστροειδής περιέχει περίπου 120 εκατομμύρια ραβδία. Τα ραβδία έχουν μεγάλη ευαισθησία, μικρή διακριτική ικανότητα και κυριαρχούν στην περιφερειακή ζώνη του αμφιβληστροειδή. Τα ραβδία απορροφούν έντονα σε μήκος κύματος περίπου 500 nm, αλλά η όραση με μόνο τα ραβδία δίνει αποχρώσεις του γκριζου. Τα ραβδία είναι υπεύθυνα για την όραση όταν

επικρατεί λίγο φως και κάθε νευρική ίνα είναι συνδεδεμένη με ομάδα ραβδίων (μπορεί και εκατοντάδες).



Αντίστοιχα ο αμφιβληστροειδής περιέχει περίπου 6,5 εκατομμύρια κωνία, που έχουν μικρή ευαισθησία (1000 φορές μικρότερη από όση τα ραβδιά), μεγάλη διακριτική ικανότητα και κυριαρχούν στην κεντρική περιοχή του. Τα κωνία είναι τριών ειδών, το κάθε είδος με τη δική του «θέση ευαισθησίας»: τα κωνία μικρού μήκους κύματος (445 nm, περιοχή κυανού), μέσου μήκους κύματος (535 nm, περιοχή πράσινου) και μεγάλου μήκους κύματος (570 nm, περιοχή ερυθρού). Τα κωνία είναι υπεύθυνα για την έγχρωμη όραση και την όραση κατά τη διάρκεια της ημέρας (έντονο φως).



Η συνολική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού (ραβδίων και κωνίων) ταιριάζει με το φάσμα του ηλιακού φωτός που διαπερνά τη γήινη ατμόσφαιρα.

Η απορρόφηση του φωτός από τα ραβδία και τα κωνία περιγράφεται με τη βοήθεια της κβαντομηχανικής, η οποία καθορίζει ότι ένα φωτόνιο απορροφάται από τη χρωστική ροδοψίνη, μόνο όταν η ενέργεια του φωτονίου αντιστοιχεί σε διαφορά ενέργειας των διακριτών ενεργειακών επιπέδων του φωτοευαίσθητου μορίου.

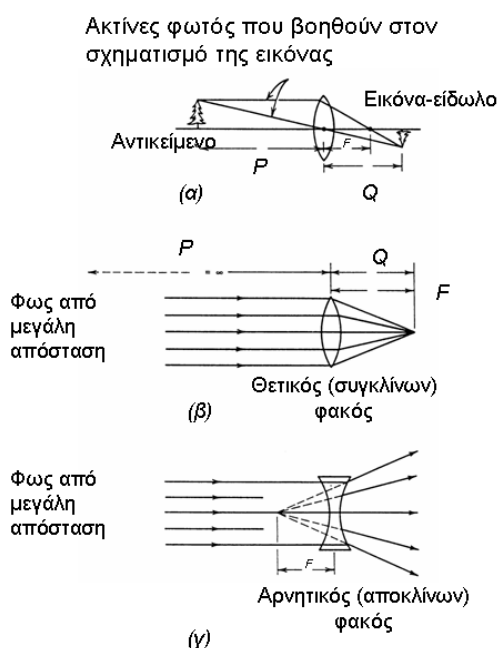
Η ροδοψίνη αποτελείται από ένα (χημικό) τμήμα που είναι υπεύθυνο για το χρώμα της και την πρωτεΐνη οψίνη. Το χημικό τμήμα (ένα παράγωγο της βιταμίνης A) απορροφά φωτόνιο αλλάζοντας τη διάταξή του στο χώρο, ενεργοποιώντας μία σειρά από διαδικασίες διαφορετικές για καθένα από τα ραβδία και τα (τρία) κωνία (βραβείο Nobel Φυσιολογίας – Ιατρικής, 1967).

1.4 Πραγματικό και φανταστικό είδωλο

Ένας αμφίκυρτος (συγκλίνων) φακός δημιουργεί πραγματικό ή φανταστικό είδωλο φωτεινού αντικειμένου ανάλογα με την απόσταση μεταξύ τους. Αν f ή F η εστιακή απόσταση του φακού, d_1 ή P η απόσταση του αντικειμένου από το φακό και d_2 ή Q η απόσταση του ειδώλου από το φακό, θα ισχύει:

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f}$$

Όταν $d_1 > f$, το είδωλο θα είναι πραγματικό (από την άλλη μεριά του φακού και αντεστραμένο).



Όταν $d_1 < f$, το είδωλο θα είναι φανταστικό (από την ίδια μεριά του φακού και σχηματιζόμενο από προεκτάσεις των πραγματικών ακτίνων).

Όταν $d_1 = f$, το είδωλο θα σχηματιστεί σε άπειρη απόσταση.

Όταν $d_1 = \infty$, το είδωλο θα σχηματιστεί στη εστιακή απόσταση του φακού.

Σε έναν αμφίκοιλο (αποκλίνοντα) φακό ισχύουν τα ίδια, θεωρείται όμως ότι έχει αρνητική εστιακή απόσταση και σχηματίζει, πάντοτε, φανταστικό είδωλο.

Ο λόγος των μεγεθών I (του ειδώλου) προς O (του αντικειμένου) καλείται μεγέθυνση M και ισχύει:

$$M = \frac{I}{O} = \frac{d_2}{d_1}$$

Ο κερατοειδής χιτώνας και ο φακός του οφθαλμού υπακούουν στους παραπάνω «νόμους» και ο ρόλος τους είναι να σχηματίσουν το πραγματικό είδωλο κάθε φωτεινού αντικειμένου του περιβάλλοντος πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.

Όταν αυτό δεν είναι εφικτό χρησιμοποιούνται διορθωτικοί φακοί (γυαλιά ή φακοί επαφής), συγκλίνοντες (για να φέρουν το είδωλο πιο μπροστά) ή αποκλίνοντες (για να φέρουν το είδωλο πιο πίσω).

Ως ισχύς του φακού θεωρείται το μέγεθος $1/f$ και μετράται σε διοπτρίες ($1 D = 1 m^{-1}$).

Με βάση δεδομένα από ένα μαθηματικό μοντέλο του οφθαλμού (σύσταση και δείκτες διαθλάσεως) υπολογίζεται η ισχύς P του οφθαλμού ως:

$$P_{οφθ} = P_{κερ} + P_{φακ.} = 42,24 D + 22,10 D = 64,34 D$$

και η αντίστοιχη εστιακή απόσταση:

$$f_{οφθ} = \frac{n_{οφθ}}{P_{οφθ}} = \frac{1,336}{64,34 D} = 0,0208 m = 20,8 mm$$

Η απόσταση κερατοειδή - αμφιβληστροειδή είναι 24,20 mm και η απόσταση κερατοειδή – πίσω επιφάνειας φακού είναι 7,6 mm.

Δεχόμενοι πως η $f_{\phi\theta}$ «ξεκινά» ως μήκος, από τη μέση απόσταση των 7,6 mm, δηλαδή στα 3,8 mm πίσω από τον κερατοειδή, θα έχουμε τις εισερχόμενες ακτίνες να εστιάζονται στα $20,8 + 3,8 = 24,6$ mm, δηλαδή πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.

1.4.1 Προσαρμογή του οφθαλμού

Ο οφθαλμός μπορεί να προσαρμόζει την εστιακή του απόσταση ανάλογα με την απόσταση του αντικειμένου από τον οφθαλμό.

Οι ίνες του ακτινωτού συνδέσμου συγκρατούν το φακό στη θέση του πίσω από την κόρη της ίριδας. Όταν οι λείες μυϊκές ίνες του ακτινωτού σώματος συστέλλονται, ο ακτινωτός σύνδεσμος χαλαρώνει και η τάση στην κάψα (εύκαμπτο κάλυμμα) του φακού μειώνεται, αφήνοντας κυρτές τις επιφάνειες του φακού (εστίαση κοντινών αντικειμένων). Αντίθετα, όταν ο ακτινωτός μυς βρίσκεται σε ηρεμία (αφηρημένο βλέμμα), ο ακτινωτός σύνδεσμος τεντώνει αυξάνοντας την τάση στην κάψα του φακού και επιπεδώνοντας τις επιφάνειές του (εστίαση μακρινών αντικειμένων).

Το αντικείμενο που βρίσκεται στη μέγιστη δυνατή απόσταση για καθαρή εστίαση στον αμφιβληστροειδή, λέγεται πως βρίσκεται στο «απώτερο σημείο» (θεωρητικά το άπειρο). Το αντικείμενο που βρίσκεται στην ελάχιστη δυνατή απόσταση (περίπου 25 cm) για καθαρό είδωλο, βρίσκεται στο «εγγύτερο σημείο».

Για το απώτερο σημείο ισχύει:

$$\frac{1}{f_{\alpha\pi}} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{17\text{mm}}$$

και $P_{\alpha\pi} = \frac{1}{f_{\alpha\pi}} = 58,8D$ (με $n_{\alpha\epsilon\rho\alpha} = 1$)

Για το εγγύτερο σημείο, ισχύει:

$$\frac{1}{f_{\epsilon\gamma\gamma}} = \frac{1}{250\text{mm}} + \frac{1}{17\text{mm}}$$

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

Δηλαδή η μέγιστη απαιτούμενη προσαρμογή μετράται ως $(62,8 - 58,8)D = 4D$.

Στην ηλικία των 8 χρόνων η μέση προσαρμογή είναι της τάξης των 14 D. Στην ηλικία των 35 χρόνων, μειώνεται στις 7 D και μετά τα 45 η (φυσική) προσαρμογή δεν είναι πλέον αρκετή, φθάνοντας τις 1,3 D στην ηλικία των 55 χρόνων. Πρόκειται για την (πάθηση) πρεσβυωπία που αντιμετωπίζεται με τη χρήση βοηθητικών διορθωτικών γυαλιών.

1.5 Ανιχνευτική ικανότητα του οφθαλμού

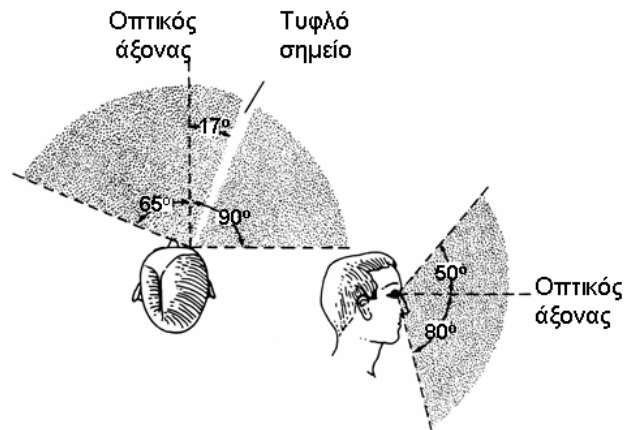
Μόνο το 50% των (εισερχομένων στον οφθαλμό) φωτονίων του ορατού οφθαλμού (400 - 700 nm) φθάνουν μέχρι τον αμφιβληστροειδή χιτώνα και σχηματίζουν είδωλα. Το υπόλοιπο ποσοστό χάνεται από ανακλάσεις στις ενδιάμεσες διαχωριστικές επιφάνειες (κυρίως τις 2 του κερατοειδή – ως λεπτού μηνίσκου – και τις 2 του φακού) και από απορρόφηση (μικρή για το ορατό) ή διάχυση στα υλικά που διαπερνά.

Η διάχυση είναι ο κύριος παράγοντας μείωσης της έντασης του εισερχομένου ορατού φωτός και οφείλεται στην ανομοιογένεια των συστατικών του οφθαλμού, που «μεταφράζεται» σε δεκάδες διαφορετικούς δείκτες διάθλασης.

Επειδή δε, η σκέδαση είναι «τύπου Rayleigh» που (το αποτέλεσμά της) είναι ανάλογος της συχνότητας του φωτός στην τέταρτη δύναμη, το κυανό σκεδάζεται περισσότερο (όπως και στην ερμηνεία του χρώματος του ουρανού) και παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό απώλειας.

1.6 Διόφθαλμη, στερεοσκοπική όραση

Το πεδίο οπτικής αντίληψης κάθε οφθαλμού έχει ελλειψοειδή μορφή ύψους περίπου 130-150° και πλάτος 150-210°, ενώ το πεδίο από τη συνεργασία των δύο οφθαλμών έχει πιο κυκλική μορφή διαμέτρου περίπου 130°.



Τόσο ευρύ πεδίο με ελάχιστη παραμόρφωση οφείλεται στις καμπύλες επιφάνειες εισόδου του φωτός, αλλά και – κυρίως - του αμφιβληστροειδή όπου σχηματίζεται το είδωλο. Επί πλέον, οι μύες του οφθαλμού μπορούν να περιστρέψουν το οπτικό του πεδίο (τον κύριο άξονα) κατά 90° περίπου.

Ο εγκέφαλος επιτελεί τη «σύντηξη» των δύο ειδώλων (στους 2 οφθαλμούς) κάθε εξωτερικού αντικειμένου και δημιουργείται η τελική εικόνα. Σε αυτή τη σύντηξη συν-εισέρχεται και η αίσθηση του βάθους (τρίτη διάσταση) ως αποτέλεσμα επεξεργασίας των ίδιων δεδομένων, «διαβασμένων» ταυτόχρονα υπό δυο, λίγο διαφορετικών (θέση της κορυφής τους στο χώρο) μεταξύ τους, γωνιών (κάθε γωνία – άποψη, έχει κορυφή τον «δικό» της οφθαλμό).

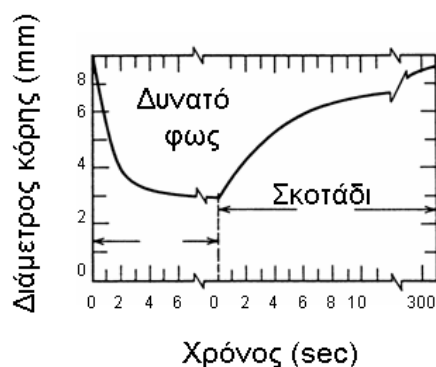
Αποτέλεσμα της διόφθαλμης όρασης είναι και η αίσθηση πως, όταν κινούμαστε, τα κοντινά αντικείμενα φαίνεται να κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με τα πιο μακρινά, όπως επίσης και η αίσθηση ότι δύο παράλληλες γραμμές (π.χ. καλώδια ηλεκτρικού ρεύματος ή οι ακμές ενός πολυόροφου κτιρίου) φαίνονται να συγκλίνουν ανάλογα με την απόσταση από τον παρατηρητή.

1.7 Προσαρμογή στη φωτεινότητα

Επιπλέον από τη σωστή εστίαση, για την καλή όραση απαιτείται και κατάλληλη φωτεινότητα. Ανεξάρτητα από τη λαμπρότητα του αντικειμένου στον αμφιβληστροειδή (φωτοευαίσθητα κύτταρα) πρέπει να φτάσει αρκετό φως για να σχηματιστεί το είδωλο, όχι όμως περισσότερο φως από όσο

«αντέχει» ο οφθαλμός. Π.χ. το φωτογραφικό φιλμ έχει ένα συγκεκριμένο εύρος απόκρισης στις προσπίπτουσες φωτεινές ακτίνες: αν οι ακτίνες είναι πολύ μικρής έντασης, το φιλμ δεν τις ανιχνεύει, ενώ αν είναι πολύ μεγάλης έντασης, το φιλμ παθαίνει «κορεσμό», δηλαδή γίνεται όλο άσπρο (μαύρο το αρνητικό του). Στη φωτογραφική μηχανή η προσαρμογή στη φωτεινότητα γίνεται με ρύθμιση του διαφράγματος, ρύθμιση του χρόνου έκθεσης, χρήση του φλας.

Στον οφθαλμό η προσαρμογή στη φωτεινότητα γίνεται με συνειδητό (π.χ. άναμα του φωτός στο δωμάτιο, χρήση γυαλιών ηλίου), ή ασυνείδητο τρόπο (διάμετρος της κόρης, ανανέωση της χρωστικής στα κωνία).



Ο αριθμός των ακτίνων (ή αυστηρότερα των φωτονίων) που εισέρχονται στον οφθαλμό είναι ανάλογος του τετραγώνου της διαμέτρου της κόρης. Δηλαδή κλείσιμο της κόρης από μέγιστης διαμέτρου (8 mm) (εξαρτάται από την ηλικία: 10 mm σε νήπιο 1 χρόνου, 3 mm στον ενήλικα 50 ετών και 1 mm στον υπερήλικα 80 ετών) στην ελάχιστη (2 mm), «μεταφράζεται» σε περιορισμό του εισερχόμενου φωτός κατά 16 φορές και της φωτεινότητας (luminance) κατά 10^6 περίπου.

Τα ραβδία είναι «πρωταγωνιστές» στη νυχτερινή (σκοτοπική) όραση και τα κωνία στο φως της ημέρας (φωτοπική). Ο κύριος παράγοντας της τόσο ευρείας απόκρισης του οφθαλμού σε διαφορετικά επίπεδα φωτεινότητας δεν είναι τόσο η ρύθμιση της διαμέτρου της κόρης, όσο ο συνδυασμός των μηχανισμών της λεύκανσης της ροδοψίνης (ακολουθούμενη από τη διαδικασία αποκατάστασης) και των μεταβολών στη «δικτύωση» των κυττάρων του αμφιβληστροειδή.

Ο εγκέφαλος, ως κεντρικός ρυθμιστής, φέρνει όλους τους μηχανισμούς σε επικοινωνία, ώστε να συνεργάζονται για βέλτιστο αποτέλεσμα.

1.8 Όρια Οπτικής Οξύτητας

Ορισμένοι βασικοί παράγοντες θέτουν όριο στην οπτική οξύτητα, ακόμη και σε αυτούς που έχουν την καλύτερη όραση.

Κάτω από άριστες συνθήκες η οπτική οξύτητα περιορίζεται από (α) το φαινόμενο της περίθλασης και (β) από το γεγονός ότι ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται αφενός από τη σύσταση του υλικού, αφετέρου από το μήκος κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας.

Το φαινόμενο της περίθλασης κάνει αισθητή την παρουσία του όταν η διάμετρος της κόρης του οφθαλμού γίνει μικρότερη από 3 mm περίπου. Σε μεγαλύτερη διάμετρο της κόρης η οπτική οξύτητα περιορίζεται μόνο από τη «συμπεριφορά» του δείκτη διάθλασης (σφαιρική και χρωματική εκτροπή).

Σε κάθε περίπτωση, περιοριστικός παράγοντας είναι οι μη αμελητέες διαστάσεις των φωτοευαίσθητων κυττάρων του αμφιβληστροειδή, όπως συμβαίνει και στην ψηφιακή καταγραφή με τα μη αμελητέων διαστάσεων pixels - δομικά στοιχεία της εικόνας. Επιπλέον περιοριστικός παράγοντας είναι και το γεγονός πως οι «έξοδοι» πολλών γειτονικών κυττάρων του αμφιβληστροειδή συνδέονται με έναν κοινό νευρώνα του οπτικού νεύρου.

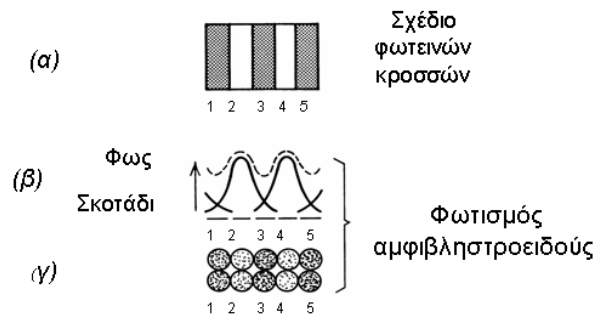
1.8.1 Περίθλαση και διαστάσεις των φωτοϋποδοχέων

Είναι γνωστό από την κυματική ότι όταν ένα κύμα, μήκους κύματος λ , προσπέσει σε άνοιγμα (πετάσματος) πλάτους D , θα εξακολουθήσει την πορεία του σκεδαζόμενο μέσα σε μια στερεά γωνία που έχει κορυφή το κεντρικό σημείο του ανοίγματος.

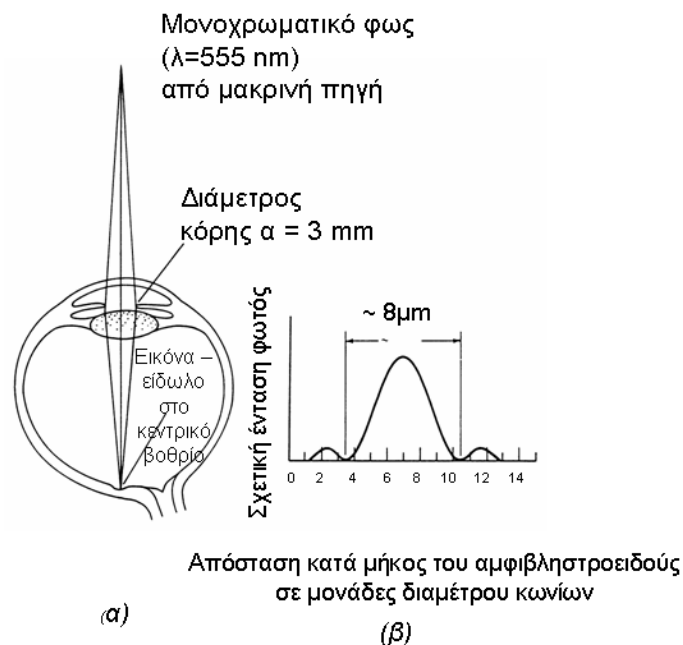
Το μέγεθος της στερεάς γωνίας είναι αντιστρόφως ανάλογο του D .

Αν το κύμα είναι φωτεινή ακτινοβολία και αν τοποθετηθεί μία οθόνη σε κάποια απόσταση μετά το άνοιγμα, θα σχηματισθεί πάνω στην οθόνη ένα ημιτονοειδές σχέδιο της έντασης του φωτός, με βαθμιαία ελάττωση του μέγιστου από το κέντρο προς την περιφέρεια.

Αν το άνοιγμα είναι σχισμή, το σχέδιο στην οθόνη θα είναι παράλληλες ευθείες - ζώνες, εναλλάξ φωτεινές - σκοτεινές, με τις φωτεινές βαθμιαία πιο αχνές όσο μεγαλώνει η απόστασή τους από την κεντρική (συμμετρικά από τις δύο πλευρές της).



Αν το άνοιγμα είναι σπή (όπως η κόρη του οφθαλμού), το σχέδιο θα είναι ομόκεντροι κύκλοι – κυκλικές ζώνες, εναλλάξ φωτεινές – σκοτεινές.



Με διάμετρο κόρης 3 mm, η διάμετρος του κεντρικού φωτεινού δίσκου (από σημειακή φωτεινή πηγή) θα είναι 8 μm (αντιπροσωπευτικό $\lambda = 555 \text{ nm}$). Η μέση διάμετρος των κωνίων είναι περίπου 1,5 μm, επομένως ο φωτεινός δίσκος (είδωλο της σημειακής πηγής) θα καλύπτει πολλά κωνία. Για να διακρίνει ο (υγιής) οφθαλμός δύο σημειακές πηγές ως ξεχωριστές, θα πρέπει να απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον 25 δεύτερα της μοίρας, δηλαδή 1,5 με 2,0 mm σε απόσταση 10 m από τον οφθαλμό.

Αυτά ισχύουν μόνο για το κεντρικό οπτικό πεδίο ανοίγματος 1° , που αντιστοιχεί στο κεντρικό βοθρίο του αμφιβληστροειδή, όπου η όραση επιτελείται με τη μεγαλύτερη ευαισθησία. Οπτικό πεδίο 1° σημαίνει εύρος 20

cm στην απόσταση των 10 m. Γύρω από το κεντρικό βοθρίο η οπτική οξύτητα μειώνεται από 5 έως 10 φορές, όσο η όραση γίνεται «περιφερικότερη», για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι ότι οι φωτοϋποδοχείς εκτός βοθρίου είναι καλυμμένοι από στρώμα άλλων κυττάρων και ο δεύτερος λόγος είναι ότι περισσότεροι φωτοϋποδοχείς είναι συνδεδεμένοι στην ίδια ίνα του οπτικού νεύρου.

Αν η πηγή έχει αρκετή ένταση (για παράδειγμα ένα φωτεινό αστέρι), το επόμενο φωτεινό δακτυλίδι της περίθλασης μπορεί να δραστηριοποιήσει περισσότερα κωνία. Φωτεινές σημειακές πηγές μεγάλης έντασης θα φανούν μεγαλύτερες από ασθενέστερες σημειακές πηγές. Οι πρώτοι αστρονόμοι δεν γνώριζαν αυτό το φαινόμενο όταν προσδιόριζαν το μέγεθος των αστεριών. Στην αστρονομία, ο όρος «μέγεθος» έχει πλέον αντικατασταθεί με τον όρο «ένταση».

1.8.2 Σφαιρική και χρωματική εκτροπή

Είναι εμφανείς κυρίως στο φακό του οφθαλμού, όπως και στους φακούς γενικότερα.

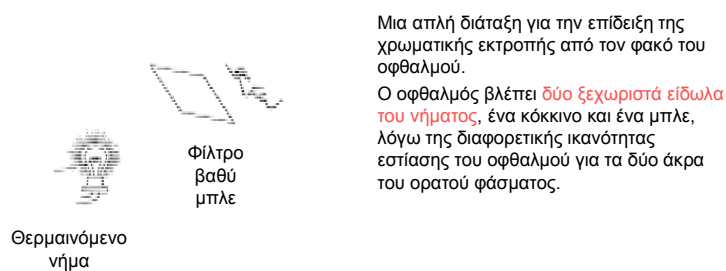
Η σφαιρική εκτροπή οφείλεται στη γεωμετρία του φακού, με αποτέλεσμα οι «κεντρικές» φωτεινές ακτίνες (γύρω από τον οπτικό άξονα) να εστιάζονται σε πιο μακρινό σημείο σε σχέση με τις «περιφερικότερες» ακτίνες. Επίσης, ακτίνες προσπίπτουσες στον οφθαλμό υπό κλίση (ως προς τον κύριο άξονα) εστιάζονται σε διαφορετική απόσταση από την αντίστοιχη των παράλληλων με τον άξονα ακτίνων.

Η σφαιρική εκτροπή περιορίζεται με μικρότερη διάμετρο της κόρης, η οποία όμως, όπως προαναφέρθηκε, όταν ξεπεράσει το όριο των 3 mm οδηγεί σε μείωση της οπτικής οξύτητας λόγω περίθλασης.

Η καλύτερη οπτική οξύτητα για έναν εμμετρικό οφθαλμό παρατηρείται όταν η κόρη έχει διάμετρο μεταξύ 3 και 4 mm (το φυσιολογικό της μέγεθος σε συνθήκες καλού φωτισμού).

Τα μακρινά αντικείμενα εστιάζονται στον αμφιβληστροειδή με μικρότερη σφαιρική εκτροπή, εφόσον «απασχολούν» την κεντρικότερη περιοχή του φακού.

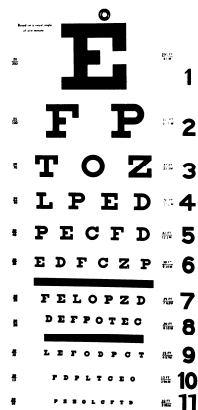
Η χρωματική εκτροπή οφείλεται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας. Τα μικρότερα μήκη κύματος (κυανό) εστιάζονται σε μικρότερη απόσταση σε σχέση με τα μεγαλύτερα (ερυθρό), παρουσιάζοντας μία διαφορά ως 2 D (διοπτρίες) στην οπτική ισχύ του φακού του οφθαλμού. Το αποτέλεσμα είναι να φαίνεται καθαρό (εστιασμένο) ένα αντικείμενο με κυανή απόχρωση, την ίδια στιγμή που σε ερυθρή απόχρωση φαίνεται θολό (μη εστιασμένο).



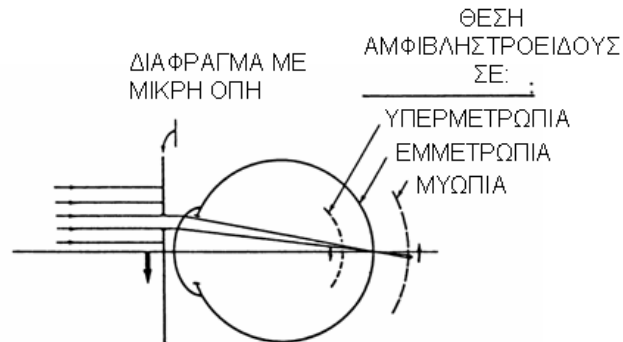
104

1.9 Η ελαττωματική όραση

Η οπτική οξύτητα ελέγχεται με ειδικό πίνακα (χάρτης Snellen) τοποθετημένο σε απόσταση 6 m υπό καλό φωτισμό (τουλάχιστον 500 lux) που περιέχει μαύρους χαρακτήρες (ανάκλαση 4%) σε άσπρο υπόβαθρο (ανάκλαση 84%). Οξύτητα 6/6 έχει κάθε οφθαλμός που μπορεί να διακρίνει μέχρι την όγδοη γραμμή.



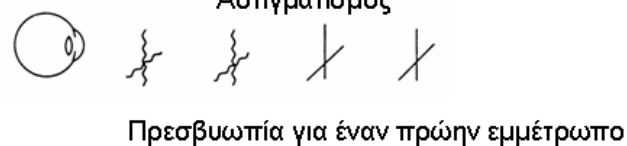
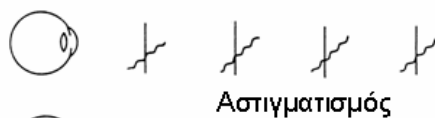
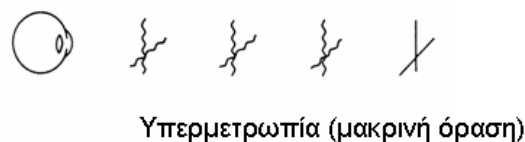
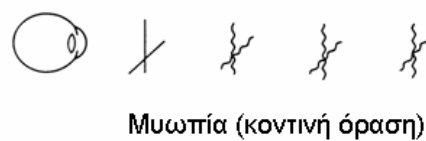
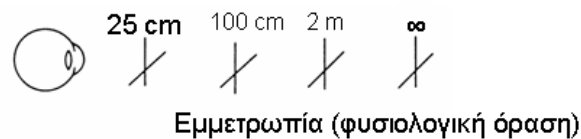
Ανάλογος έλεγχος γίνεται με τον πίνακα Jaeger (σε απόσταση φυσιολογικής ανάγνωσης) για όσους δεν βλέπουν καλά τα κοντινά αντικείμενα.



Όσοι έχουν όραση με οξύτητα 1 (συνήθως αναφέρεται ως οξύτητα 10) ή κοντά στο 1 (δηλαδή να χρειάζονται διόρθωση μικρότερη της 0.5 ή 1.0 D) λέγονται εμμέτρωπες.

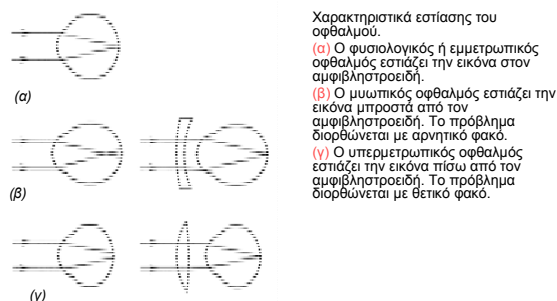
Σε αυτούς το απώτερο σημείο είναι στο άπειρο και το εγγύτερο στα 25 cm, με ικανότητα προσαρμογής τουλάχιστον 4 D.

Οι υπόλοιποι είναι αμέτρωπες και χρειάζονται διορθωτικούς φακούς για να βλέπουν καθαρά.



Μύωπες είναι όσοι δεν βλέπουν καθαρά τα μακρινά αντικείμενα, τα οποία εστιάζονται πριν τον (και όχι πάνω στον) αμφιβληστροειδή. Η όρασή τους βελτιώνεται με την παρεμβολή αρνητικού φακού. Αν η ικανότητα προσαρμογής του μυωπικού οφθαλμού είναι τουλάχιστον 4 D, ο μύωπας θα βλέπει καθαρά, με τα ίδια γυαλιά και τα κοντινά αντικείμενα (που τα βλέπει και χωρίς διορθωτικό φακό).

Μυωπικός είναι ο οφθαλμός που είτε είναι πιο επιμήκης από το φυσιολογικό (η πιο συχνή αιτία), είτε έχει κερατοειδή με μεγαλύτερη του φυσιολογικού καμπυλότητα.

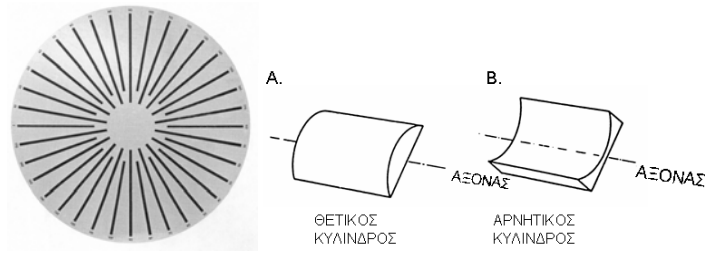


91

Υπερμέτρωπες είναι όσοι δεν βλέπουν καθαρά τα κοντινά αντικείμενα, τα οποία θα εστιάζονται μετά (πίσω από) τον αμφιβληστροειδή. Η όρασή τους βελτιώνεται με την παρεμβολή θετικού φακού. Αν η ικανότητα προσαρμογής του υπερμέτρωπα είναι τουλάχιστον 4 D, ο οφθαλμός του θα βλέπει με τα ίδια γυαλιά και τα μακρινά αντικείμενα (που τα βλέπει και χωρίς διορθωτικό φακό).

Υπερμετρωπικός είναι ο οφθαλμός που είτε είναι λιγότερο επιμήκης από το φυσιολογικό (η πιο συχνή αιτία), είτε έχει κερατοειδή με μικρότερη του φυσιολογικού καμπυλότητα (πιο πεπλατυσμένος - επίπεδος).

Ο οφθαλμός με αστιγματισμό εστιάζει διαφορετικά στο κατακόρυφο σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Ο αστιγματισμός είναι αποτέλεσμα περιστροφικής ασυμμετρίας κυρίως της καμπυλότητας του κερατοειδή. Αστιγματισμός μπορεί να συμβεί και από τραύμα, χειρουργική επέμβαση ή κάποια πάθηση. Ο απλός αστιγματισμός διορθώνεται με σφαιρο-κυλινδρικό φακό.



Η έλλειψη φωτο-χρωστικής σε ένα από τα τρία είδη κωνίων (φωτοευαίσθητα κύτταρα μαζί με τα ραβδία) οδηγεί στην αχρωματοψία που συναντάται στο 10% του ανδρικού και 1% του γυναικείου πληθυσμού.

Η αχρωματοψία συνήθως αφορά τα μικρά ή μεσαία ή μεγάλα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας. Σπανιότερα καλύπτει μεγαλύτερες περιοχές ή και όλα τα χρώματα (πλήρης αχρωματοψία, διάκριση μόνο αποχρώσεων του γκριζου).

1.10 Διορθωτικοί φακοί

Μπορεί να είναι τα κοινά γυαλιά, οι μαλακοί φακοί επαφής ή οι σκληροί (αλλά διαπερατοί από τον αέρα) φακοί επαφής και η χρήση τους έχει στόχο τη διόρθωση της όρασης, δηλαδή το απώτερο σημείο να βρίσκεται στο άπειρο (εστιακή απόσταση περίπου 17,0 mm) και το εγγύτερο στα 25 cm (εστιακή απόσταση περίπου 15,9 mm).

Οι γυάλινοι φακοί των κοινών γυαλιών έχουν συνήθως υλικό με δείκτη διάθλασης 1,523, αλλά χρησιμοποιείται και υλικό με $\delta.\delta. > 1,70$ για τις περιπτώσεις που απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς (θα απαιτούσε μεγάλο πάχος και βάρος του φακού).

Στα κοινά γυαλιά, για λόγους ασφαλείας (σπάσιμο) και βάρους, χρησιμοποιούνται συχνά πλαστικοί φακοί, π.χ. με $\delta.\delta.$ 1,498 ή 1,586 (ο δεύτερος είναι μαλακός, αλλά προκαλεί χρωματική εκτροπή).

Οι μαλακοί και εύκαμπτοι φακοί επαφής προσαρμόζονται στο σχήμα του κερατοειδή, ενώ οι σκληροί έχουν το δικό τους σχήμα - καμπυλότητα.

Η εσωτερική επιφάνεια των μαλακών φακών γίνεται ένα σώμα με την εξωτερική επιφάνεια του κερατοειδή, με αποτέλεσμα το αρχικό σχήμα του κερατοειδή και το πάχος του προστιθέμενου φακού να καθορίζουν τη νέα ακτίνα καμπυλότητας και συνεπώς τη διορθωμένη εστιακή απόσταση.

Ο οφθαλμός ανέχεται μαλακούς φακούς επαφής διαμέτρου 13,0 ως 14,5 mm, δηλαδή μεγαλύτερους από τον κερατοειδή, για πιο σωστή τοποθέτηση και μεγαλύτερη ευστάθεια.

Το πάχος στην κεντρική περιοχή του μαλακού φακού αρχίζει από 0,03 mm, τόσο λεπτό ώστε είναι διαπερατό από το οξυγόνο που είναι απαραίτητο να τροφοδοτεί τον κερατοειδή.

Ο σκληρός φακός επαφής είναι πιο δυσάρεστος στον οφθαλμό, αλλά απαραίτητος σε ορισμένες περιπτώσεις με ανομοιογένειες, όπως και ο υψηλού βαθμού αστιγματισμός. Ο σκληρός φακός δεν είναι διαπερατός από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Ο κερατοειδής οξυγονώνεται μέσω της λεπτού στρώματος δακρύων που παρεισφύει καθώς ο φακός επαφής κινείται ελαφρά με το ανοιγόκλειμα του βλέφαρου.

Συνιστάται η συχνή διακοπή της χρήσης του σκληρού φακού επαφής και η ξεκούραση του οφθαλμού, επειδή η οξυγόνωση δεν είναι εύκολη και ο κερατοειδής ερεθίζεται. Οι νέες σύνθεσης σκληροί φακοί επαφής, που αφήνουν το οξυγόνο να τους διαπεράσει, μπορούν να φορεθούν 10 με 12 ώρες, επειδή επιτρέπουν βελτιωμένη οξυγόνωση του κερατοειδή ως και 10 φορές.

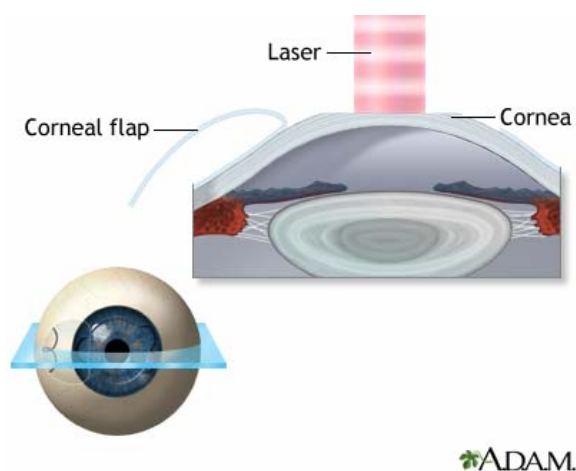
Οι φακοί επαφής συγκρατούνται στη θέση τους (ενάντια στη δύναμη βαρύτητας) κυρίως με δυνάμεις επιφανειακής τάσης μεταξύ του φακού και του λεπτού στρώματος δακρύων στην επιφάνεια του οφθαλμού. Οι φακοί επαφής επίσης δεν γλιστρούν εύκολα από την κεντρική τους θέση, επειδή αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής.

1.11 Μόνιμη διόθρωση

Μόνιμη διόρθωση της οπτικής ισχύος μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεταβολή της ακτίνας καμπυλότητας της επιφάνειας του κερατοειδή. Υπάρχουν δύο τρόποι: ο πρώτος είναι με νυστέρι με το οποίο γίνονται τέσσερις ή οκτώ ακτινωτές σχισμές (ακτινωτή κερατοτομία) για την επιπέδωση του κερατοειδή και τη διόρθωση μυωπίας.

Ο δεύτερος είναι με excimer Laser που σμιλεύει τον κερατοειδή είτε απευθείας, είτε αφού πρώτα ανασηκωθεί ο λεπτός εξωτερικός φλοιός του κερατοειδή. Με το Laser μπορεί να «φαγωθεί» (με εξάτμιση) η κορυφή του

κερατοειδή για διόρθωση μυωπίας ή «σκάβεται» περιφερειακά για αύξηση της καμπυλότητας και διόρθωση της υπερμετρωπίας.



1.12 Είδη οπτικής δυσλειτουργίας

Αναφέρθηκε ήδη το πρόβλημα της κακής εστίασης. Υπάρχουν βέβαια και άλλα προβλήματα στη λειτουργία του οφθαλμού, όπως (α) η ατελής διέλευση της φωτεινής ακτινοβολίας μέσα από τα «συστατικά» του, (β) βλάβη στον αμφιβληστροειδή και (γ) βλάβη στο οπτικό νεύρο.

(α) Κάποια ουλή στον κερατοειδή (από χτύπημα ή ασθένεια) ή θόλωση στο φακό από καταρράκτη αυξάνουν τη σκέδαση και απορρόφηση του εισερχόμενου φωτός και μειώνουν την ποιότητα της τελικής εικόνας.

Λύση, για την περίπτωση του κερατοειδή, αποτελεί η μεταμόσχευση και για την περίπτωση του καταρράκτη η αφαίρεση το φακού και η αντικατάστασή του με πλαστικό.

(β) Υπάρχουν τέσσερις κύριες κατηγορίες βλάβης στον αμφιβληστροειδή:

(i) από διαβητική αμφιβληστροειδίτιδα

κατά την οποία τα τριχοειδή αγγεία του αμφιβληστροειδή πολλαπλασιάζονται και παρουσιάζουν διαρροές προς το υαλοειδές υγρό, μειώνοντας τη διαφάνειά του. Επαναλαμβανόμενες επεμβάσεις με Laser Ar θέτουν υπό έλεγχο το πρόβλημα «καίγοντας τα περιττά τριχοειδή».

(ii) εκφύλιση ωχράς κηλίδας

Η κεντρική περιοχή του αμφιβληστροειδή, με διάμετρο περίπου 5 mm, λέγεται ωχρά κηλίδα και περιέχει το κεντρικό βοθρίο με τη βέλτιστη διακριτική ικανότητα. Η εκφύλιση της ωχράς κηλίδας συμβαίνει συχνά στις μεγάλες ηλικίες. Πρόκειται για ατροφία των κωνίων και δημιουργία νέων τριχοειδών, όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Αντιμετωπίζεται επίσης με Laser.

(iii) αποκόλληση του αμφιβληστροειδή

συμβαίνει κάτω από ορισμένες συνθήκες. Το αποκολλημένο μέρος του χιτώνα χάνει την επαφή του με το επιθήλιο και τις χρωστικές και ή δυσλειτουργεί ή δεν λειτουργεί καθόλου. Επιπλέον έχει τάση επέκτασης. Επέμβαση με κατάλληλο Laser δημιουργεί συγκολλήσεις στη βάση της αποκολλημένης περιοχής και σταθεροποιεί την κατάσταση.

(iv) από μελαγχρωστική αμφιβληστροειδίτιδα

Είναι κληρονομική ασθένεια που προσβάλλει κατ'αρχήν τα ραβδία (νυχτερινή όραση) και σε δεύτερο στάδιο τα κωνία, οδηγώντας σε τύφλωση.

(γ) Βλάβη στο οπτικό νεύρο μπορεί να συμβεί με την αύξηση της πίεσης του υδατοειδούς υγρού. Τα αιμοφόρα αγγεία που τρέφουν τον αμφιβληστροειδή και η βάση του οπτικού νεύρου πιέζονται επικίνδυνα και οδηγούν σε εκφυλισμό του νεύρου, δηλαδή τύφλωση. Ο συντελεστής του κινδύνου αυξάνεται εκθετικά με την εσωτερική πίεση στον οφθαλμό.

Πρόβλημα προκαλείται και από την ένταση του εισερχόμενου φωτός που μπορεί να επηρεάσει προσωρινά ή μόνιμα την όραση. Η φωτοκερατίτιδα είναι επώδυνη, αλλά συνήθως προσωρινή φλεγμονή του κερατοειδή και προκαλείται από υπεριώδες φως. Είναι γνωστή ως ασθένεια του ηλεκτροσυγκολλητή και ασθένεια του χιονιού.

Καταρράκτης επίσης προκαλείται από χρόνια έκθεση του φακού στο υπεριώδες.

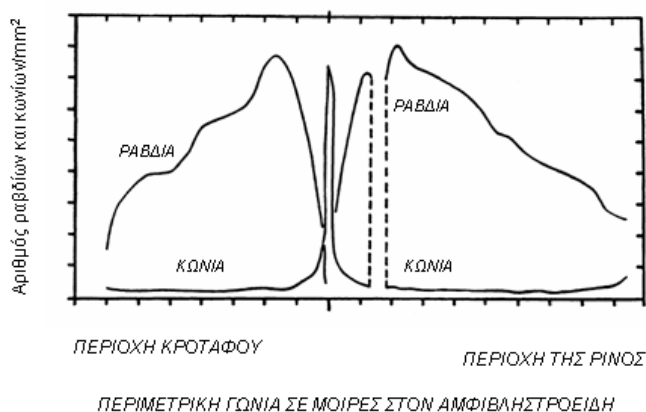
Αν προσπέσουν ηλιακές ακτίνες ή ακτίνες Laser απευθείας στον αμφιβληστροειδή, έστω και για μικρό χρονικό διάστημα, θα προκαλέσουν φωτο-αμφιβληστροειδίτιδα και θερμικά τραύματα (ανάλογα με το μήκος κύματος: 400-500 nm για τη φλεγμονή, 400 με 1400 nm για τα τραύματα). Laser στο εγγύς υπέρυθρο (800-3000 nm) μπορεί να καταστρέψει το φακό.

Εργάτες επεξεργασίας γυαλιού και ατσαλιού είχαν πρόβλημα στα μάτια εξαιτίας της παρατεταμένης έκθεσής τους σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μήκους κύματος 1300 nm ως 1 mm και μεγάλης έντασης.

1.13 Οπτική αντίληψη

Την οπτική αντίληψη επηρεάζουν πολλοί παράγοντες:

(α) Η κατανομή των κωνίων και ραβδίων στην επιφάνεια του αμφιβληστροειδή (πυκνότερα το κωνία στο κέντρο και πυκνότερα τα ραβδία στην περιφέρεια), όπως και ο τρόπος σύνδεσής τους με τις ίνες του οπτικού νεύρου.

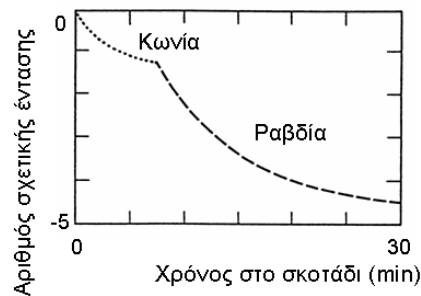


(β) Η φωτεινότητα του σχηματιζόμενου ειδώλου δεν είναι απλά ανάλογη της έντασης του εισερχόμενου φωτός, αλλά εξαρτάται από το φωτισμό του αντικειμένου σε συνδυασμό με την ανακλαστικότητα του, ανά μήκος κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας, όπως επίσης και από τον συντελεστή απορρόφησης του φωτοϋποδοχέα.

(γ) Το χρώμα του σχηματιζόμενου ειδώλου εξαρτάται από την ευαισθησία των φωτοϋποδοχέων, η οποία είναι συνάρτηση του μήκους κύματος και διαφορετική των ραβδίων από την αντίστοιχη των κωνίων. Τα ραβδία είναι πιο ευαίσθητα (ανταποκρίνονται σε χαμηλότερο «σήμα») κυρίως για τα μήκη κύματος 400-550 nm. Τα κωνία έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία (συγκριτικά) στη ζώνη 550 έως 700 nm και παρουσιάζουν το μέγιστο της απόλυτης ευαισθησίας τους στα 550 nm περίπου.

(δ) Η προσαρμογή στο σκοτάδι είναι ταχύτερη για τα κωνία (στα πρώτα 10 λεπτά), αλλά παρουσιάζουν ψηλό κατώφλι ανίχνευσης. Τα ραβδία

προσαρμόζονται με αργό ρυθμό, χρειάζονται 30 λεπτά, αλλά παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερο κατώφλι φωτισμού για να ανιχνεύσουν κάποιο αντικείμενο.



Ο χρόνος προσαρμογής στο σκοτάδι καθορίζεται από το ρυθμό αναγέννησης της ροδοψίνης και αλλαγής της «καλωδίωσης» των κυττάρων με το οπτικό νεύρο.

(ε) Ο χρόνος απόκρισης των φωτοϋποδοχέων είναι η παράμετρος που σχετίζεται με το χαμηλότερο ρυθμό «αναβοσβησίματος» μίας φωτεινής πηγής που γίνεται αντιληπτός ως συνεχής εκπομπή. 60 «κύκλοι» ανά δευτερόλεπτο (60 Hz) είναι μια γενικά παραδεκτή τιμή, που «καλύπτει» ακόμη και φως μεγάλης έντασης. Στο κεντρικό βοθρίο ισχύει η τιμή των 50 Hz, αλλά μειώνεται ακόμη και στα 10 Hz στα περιφερειακά κύτταρα.

Βιβλιογραφία

1. Hobbie RK. Intermediate Physics for Medicine and Biology, 3rd ed. (Springer – Verlag, NY) 1997
2. Ruch TC and Patton HD eds. Physiology and Biophysics, 19th ed. (WB Saunders Company, Philadelphia) 1965
3. Cameron JR, Skofronick JG, Grant RM. Φυσική του Ανθρώπινου Σώματος (Παρισιάνος ΑΕ, Αθήνα) 1999
4. Herman IP. Physics of the Human Body (Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg) 2007