

# Διακριτική ικανότητα του οφθαλμού - Οπτική οξύτητα

## 1. Εισαγωγή – Ψυχοφυσική της Όρασης (Visual Psychophysics)

Η αίσθηση της όρασης αποτελεί ένα αμάλγαμα μιας ομάδας διαφορετικών ικανοτήτων, που λειτουργούν αυτόνομα και ενσωματώνονται σε μια ενοποιημένη αντίληψη του χώρου και των αντικειμένων. Ως αποτέλεσμα, η συνολική μας αντίληψη διαμορφώνεται μέσω επεξεργασίας του οπτικού σήματος σε διάφορα στάδια της οπτικής οδού, γεγονός που καθιστά δύσκολη την άμεση αξιολόγησή της. Η αξιολόγηση της οπτικής συμπεριφοράς επιτυγχάνεται μέσω τριών κλασσικών προσεγγίσεων, που αφορούν πειράματα στον τομέα της **ανατομίας**, της **νευροφυσιολογίας** και της **ψυχοφυσικής** της όρασης. Μελέτη των ανατομικών χαρακτηριστικών των νευρώνων και των διαφόρων δομών του οπτικού συστήματος είναι απαραίτητη στην κατανόηση της ροής των οπτικών «πληροφοριών». Οι νευροφυσιολογικές δοκιμασίες αφορούν την μελέτη της επεξεργασίας των οπτικών πληροφοριών σε διάφορα νευρωνικά στάδια της οπτικής οδού. Τέλος, ψυχοφυσικά πειράματα αφορούν την διερεύνηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του οπτικού συστήματος (πχ τον τρόπο κατά τον οποίο χιλιάδες νευρώνες συνεργάζονται για την καταγραφή του χρώματος, του σχήματος, των λεπτομερειών των εικόνων) μέσω της σύγκρισης των φυσικών παραμέτρων των ερεθισμάτων (π.χ. χρώμα, φωτεινότητα) με την αντιλαμβανόμενη απόκριση, δηλαδή με αυτό που ο εξεταζόμενος αντιλαμβάνεται και αναφέρει. Με την παράλληλη μελέτη των παραπάνω δεδομένων καθιστάται δυνατός ο συσχετισμός της δραστηριότητας και της αποκρίσεως των νευρώνων με την οπτική μας αντίληψη.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για την πραγματοποίηση έρευνας στην ψυχοφυσική της όρασης. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη μη-επεμβατικών ψυχοφυσικών δοκιμασιών βοηθά στην άρτια και ακριβή αξιολόγηση διαφόρων χαρακτηριστικών της όρασης, με σκοπό την δημιουργία διαφορικών διαγνώσεων των ασθενειών ή την καλύτερη παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων θεραπευτικών μεθόδων. Ψυχοφυσικά δεδομένα χρησιμοποιούνται από αρμόδιους φορείς για την βελτίωση π.χ. των χαρακτηριστικών των αυτοκινητόδρομων (σήματα τροχαίας, περιβαλλοντικός φωτισμός) ανάλογα με την οπτική αντίληψη, καθώς επίσης και την σχεδίαση, ανάπτυξη και διεξαγωγή εξειδικευμένων δοκιμασιών αξιολόγησης της οπτικής συμπεριφοράς (για οδηγούς, πιλότους κτλπ). Παράλληλα, η συνεχής βελτίωση της ποιότητας των οθονών (τηλεόραση) προέρχεται από την βαθμονόμηση των οπτικών χαρακτηριστικών της (π.χ. φωτεινότητα, χρωματικότητα, κόντραστ) ανάλογα με την οπτική μας αντίληψη.

## 2. Διακριτική ικανότητα του οφθαλμού

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία της ανθρώπινης όρασης είναι η δημιουργία ενός ευκρινούς ειδώλου στον αμφιβληστροειδή. Ως **χωρική διακριτική ικανότητα** (spatial resolution) ορίζεται η μικρότερη χωρική λεπτομέρεια (π.χ. γράμμα) που μπορεί να ανιχνευθεί (ικανότητα ανίχνευσης - detection), αναγνωριστεί (ικανότητα αναγνώρισης - recognition) ή διακριθεί (ικανότητα διάκρισης - choice).

Το μέγεθος των ειδώλων που σχηματίζονται στον αμφιβληστροειδή εξαρτάται όχι μόνο από το μέγεθος των αντικειμένων (π.χ. των συμβόλων στα οπτότυπα) αλλά και από την απόστασή τους από τον οφθαλμό, αφού το σχετικό μέγεθος ενός αντικειμένου αυξάνεται όσο αυτό μας πλησιάζει. Επομένως για τον υπολογισμό της διακριτικής ικανότητας είναι απαραίτητη η χρήση ενός σταθερού μεγέθους. Τέτοιο αποτελεί η οπτική γωνία (visual angle), η οποία εκφράζεται ως η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του αντικειμένου/ειδώλου και των κομβικών σημείων του φακού (angular subtense) (βλ. Σχ. 1).

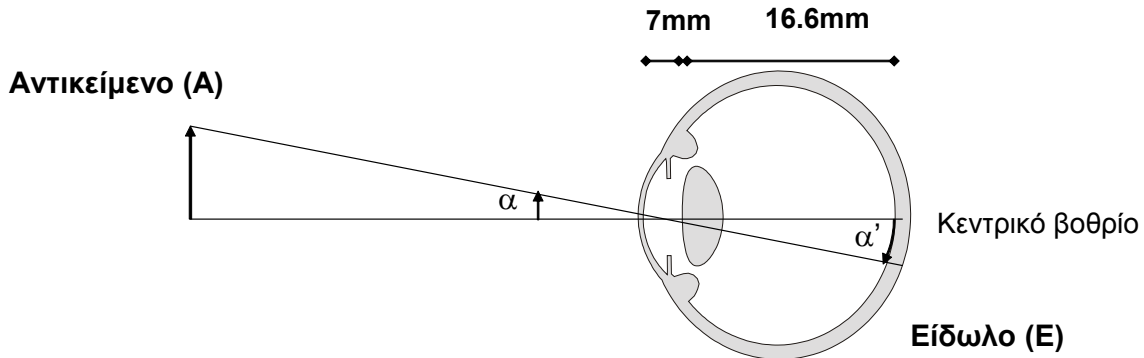
Η συσχέτιση της οπτικής γωνίας ( $\alpha$ ) με το πραγματικό μέγεθος του αντικειμένου ( $A$ ) και του ειδώλου ( $A'$ ) προσδιορίζεται ως εξής:

$\epsilon\phi\alpha = A /$  απόσταση κομβικού σημείου από αντικείμενο

$\epsilon\phi\alpha = A' /$  απόσταση κομβικού σημείου από είδωλο (στο «απλό» μοντέλου οφθαλμού ίση με 16.6mm)

Επομένως για οπτική γωνία 1 μοίρας έχουμε:

$\epsilon\phi 1 = A' / 16.6\text{mm} \Rightarrow A' = 0.290 \text{ mm}$ , **δηλαδή 1° αντιστοιχεί σε 0.290 mm (~ 300μm) (1)**



Σχήμα 1: Οπτική γωνία ( $\alpha$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του αντικειμένου/ειδώλου και των κομβικών σημείων του φακού. Αντικείμενα με την ίδια οπτική γωνία έχουν το ίδιο μέγεθος στον αμφ/δή. Ως μονάδα μέτρησης χρησιμοποιείται η μοίρα ( $^{\circ}$ ) με υποδιαιρέσεις τα λεπτά και τα δευτερόλεπτα του τόξου ( $1\text{deg} = 60' \text{ arc} = 3600'' \text{ arc}$ ).

### 3. Περιοριστικοί παράγοντες της διακριτικής ικανότητας του οφθαλμού

Είναι γνωστό ότι ο ορισμός της **οπτικής ανάλυσης** χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τους αστρονόμους για να καθορίσει αν το φωτεινό είδωλο των τηλεσκοπικών οργάνων προερχόταν από ένα ή περισσότερους γειτονικούς αστέρες. Ως αποτέλεσμα της παρατήρησης ότι η διάμετρος του τηλεσκοπικού ειδώλου μιας φωτεινής πηγής συσχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα με το «άνοιγμα» του τηλεσκοπίου (βλ. φαινόμενο περίθλασης) οδήγησε στην κατασκευή τηλεσκοπίων μεγάλων διαστάσεων (με μικρότερη περίθλαση και επομένως καλύτερη ανάλυση).

Ανάλογα, η ποιότητα της εικόνας που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή εξαρτάται από το μέγεθος της κόρης του οφθαλμού, Η **διακριτική ικανότητα** καθορίζεται από την ποιότητα του ειδώλου που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή, αλλά επίσης εξαρτάται από ανατομικούς και φυσιολογικούς παραγοντες, όπως για παράδειγμα την πυκνότητα και το μέγεθος των φωτουπόδοχών στο κεντρικό βοθρίο ( $1^{\circ}$ ) του αμφιβληστροειδή, τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των γαγγλιακών κυττάρων της οπτικής οδού και την νευρωνική επεξεργασία σε ανώτερα στάδια της οπτικής οδούς (η οποία κυρίως ευθύνεται για την «αποκωδικοποίηση» των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των εικόνων, π.χ. φωτεινότητα, χρωματικότητα, περίγραμμα, προσανατολισμός). Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την διακριτική ικανότητα το οφθαλμού αποτελούν η χρωματική εκτροπή, οι οφθαλμικές κινήσεις και η σταθερότητα και ακρίβεια της προσαρμοστικής ικανότητας του φακού.

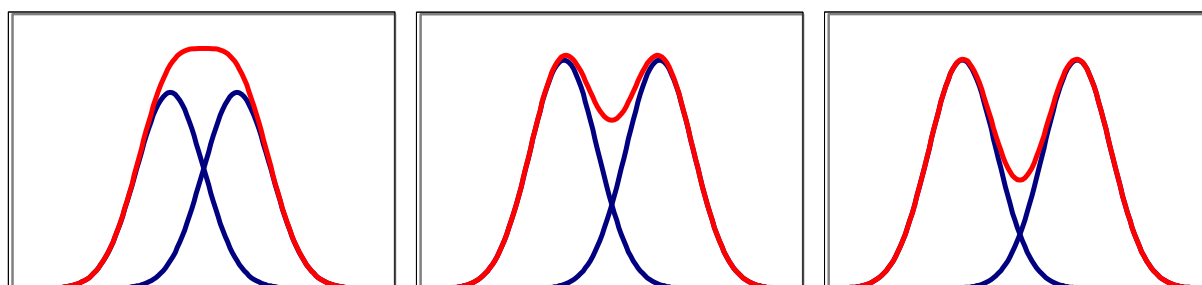
#### 3.1 Περίθλαση

Σύμφωνα με την κυματική θεωρία, ακόμα και στην περίπτωση που το οπτικό σύστημα δεν παρουσιάζει καμία ατέλεια, το είδωλο μιας μονοχρωματικής σημειακής πηγής δεν είναι ένα απλό σημείο αλλά κατανέμεται σε μια «κυκλική» επιφάνεια λόγω της περίθλασης του φωτός στα όρια της κόρης. Αυτή η επιφάνεια παρουσιάζει μια κεντρικό «δακτύλιο» μέγιστης φωτεινότητας η οποία περιβάλλεται από αμυδρότερους δακτυλίους. Περίπου το 84% της φωτεινής ενέργειας περιέχεται σε μια περιοχή που ονομάζεται δίσκος του Airy (Airy disc). Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του Airy disc τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του αμφιβληστροειδικού ειδώλου. Η οπτική γωνία του Airy disc που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος του φωτός και  $\Delta$  η διάμετρος της κόρης):

$$\alpha = 2.44 \lambda / \Delta \text{ ακτίνια (rad)}$$

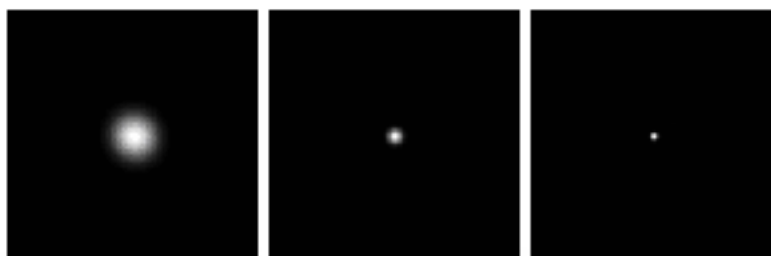
Για να μπορέσουμε να διακρίνουμε τα αμφιβληστροειδικά είδωλα δύο παρακείμενων φωτεινών σημειακών πηγών θα πρέπει αυτές να διαχωρίζονται από μια ελάχιστη απόσταση. Αν οι παρακείμενες σημειακές πηγές είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη τότε αλληλο-επικαλύπτονται οι δίσκοι του Airy, με αποτέλεσμα να σχηματίζεται μία κηλίδα στον αμφιβληστροειδή μεγαλύτερης φωτεινότητας (βλ. Σχ 2α). Σύμφωνα με το απλό και θεωρητικό κριτήριο που αναπτύχθηκε όταν η θεωρία της περίθλασης έγινε κατανοητή, **το κριτήριο του Rayleigh** (Rayleigh, 1879), για την αντίληψη δύο παρακείμενων σημειακών πηγών ως ξεχωριστές, **είναι απαραίτητο οι δίσκοι του Airy να διαχωρίζονται από απόσταση ίση με το μισό της «διαμέτρου» τους** (δηλαδή η μέγιστη φωτεινότητα του ενός να συμπίπτει με την ελάχιστη φωτεινότητα του άλλου, βλ. Σχ 2β). Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο παρακείμενων σημείων είναι μεγαλύτερη της  $\Theta_{\min}$  οι δύο φωτεινές πηγές είναι εύκολα διακριτές ως δύο ξεχωριστά σημεία (βλ. Σχ 2γ). Επομένως, η ελάχιστη γωνία ευκρίνειας,  $\Theta_{\min}$ , η οποία καθορίζει την διακριτική ικανότητα με βάση το νόμο της περίθλασης, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Theta_{\min} = 1.22 \lambda / \Delta \text{ ακτίνια} = 4.19 \times 10^{-3} \lambda / \Delta \text{ arcmin}$$



Σχήμα 2: Διακριτική ικανότητα, όπως ορίζεται από την περίθλαση. α) οι δίσκοι του Airy των δύο ειδώλων (μπλε καμπύλες) είναι τόσο κοντά μεταξύ τους (αλληλο-επικαλύπτονται), με αποτέλεσμα οι δύο φωτεινές σημειακές πηγές να μην είναι διακριτές, αλλά να σχηματίζουν ένα είδωλο (μία κηλίδα) μεγαλύτερης φωτεινότητας (κόκκινη καμπύλη), β) οι δίσκοι διαχωρίζονται από μια απόσταση ίση με το μισό της διαμέτρου τους (ελάχιστη γωνία ευκρίνειας - Rayleigh criterion), όριο διάκρισης των δύο σημειακών πηγών. γ) η απόσταση μεταξύ των δύο δίσκων του Airy είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη γωνία ευκρίνειας.

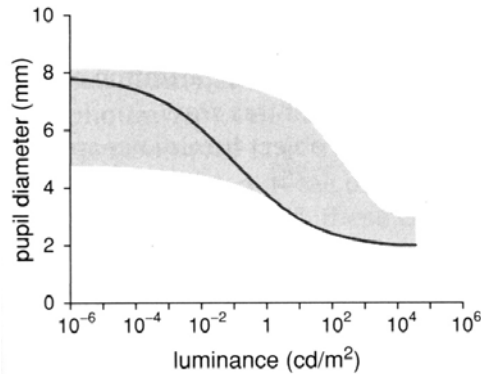
Είναι προφανές (βλ. Σχ. 3), ότι απουσία άλλων περιοριστικών παραγόντων (π.χ. οπτικές εκτροπές) όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της κόρης, τόσο μικρότερη είναι η οπτική γωνία κι επομένως τόσο ευκρινέστερο είναι το αμφιβληστροειδικό είδωλο ενός τυπικού φυσιολογικού οφθαλμού. Για μήκος κύματος 555 nm (όπου παρουσιάζεται η μέγιστη ευαισθησία του οφθαλμού σε φωτοοπτικές συνθήκες) και διάμετρο κόρης 4 mm η  $\Theta_{\min}$  ισούται περίπου με **0.58 arcmin** ενώ για 6 mm η  $\Theta_{\min}$  ισούται με **0.39 arcmin** (βλ. Σχ. 7). Η τελευταία αντιστοιχεί σε οπτική οξύτητα (κατά Snellen, βλ. παρακάτω) ίση με 50/10.



Σχήμα 3: Συνάρτηση διασποράς σημείου (PSF) για διαφορετικές διαμέτρους της κόρης του οφθαλμού (από αριστερά προς δεξιά: 1, 3 και 6 mm) λόγω του φαινομένου της περίθλασης ( $\lambda=550\text{nm}$ ). Η συνάρτηση διασποράς σημείου εκφράζει την κατανομή της σχηματιζόμενης στον αμφιβληστροειδή φωτεινής κηλίδας όταν παρατηρείται μία σημειακή πηγή.

Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι η διάμετρος της κόρης εξαρτάται από τα επίπεδα

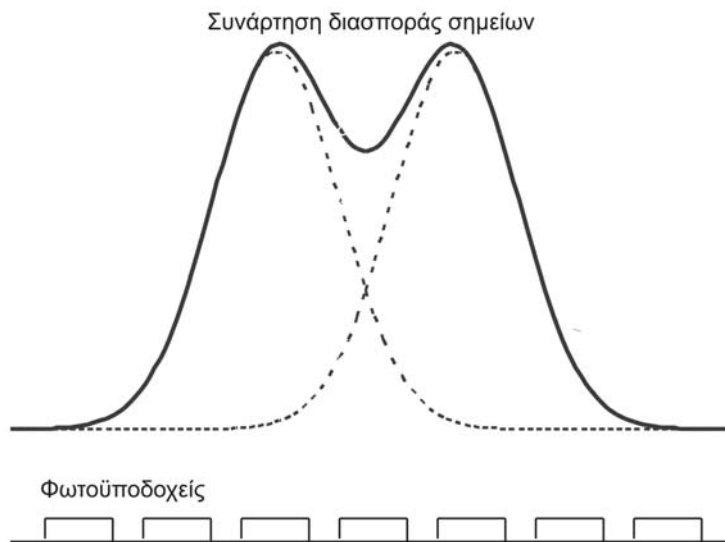
περιβαλλοντικού φωτισμού και μόνο σε χαμηλές συνθήκες φωτισμού είναι μεγαλύτερη από 5mm (βλ. Σχ. 4). Σε ιδανικές αστρονομικές συνθήκες ο Dawes (1867) υπολόγισε ότι η ελάχιστη γωνία ευκρίνειας είναι μικρότερη από το κριτήριο του Rayleigh ( $\Theta_{\min}=1.00 \lambda/\Delta$ ). Τέλος, πιστεύεται (Charman, 1974) ότι το κριτήριο του Rayleigh είναι κάπως συντηρητικό και στην πραγματικότητα η ελάχιστη γωνία ευκρίνειας που ορίζεται από την περίθλαση είναι μικρότερη.



Σχήμα 4: Μέση διάμετρο κόρης σε σχέση με την φωτεινότητα. Η γκρι περιοχή παρουσιάζει την διακύμανση στην διάμετρο της κόρης μεταξύ 12 εξεταζόμενων (από Wyszecki and Stiles, 1982).

### 3.2 Όρια κωνίων

Η μέγιστη οπτική οξύτητα παρουσιάζεται στο κεντρικό βοθρίο του αμφιβληστροειδή, περιοχή όπου τα κωνία, οι φωτοϋποδοχείς που εξασφαλίζουν την υψηλή διακριτική ικανότητα του οφθαλμού, παρουσιάζουν το μικρότερο μέγεθος, κι επομένως τη μέγιστη πυκνότητα. Σε φωτοπικές συνθήκες φωτισμού, στο κέντρο του αμφιβληστροειδή κάθε κωνίο μεταδίδει τις πληροφορίες σε μόνο ένα γαγγλιακό κύτταρο, με αποτέλεσμα η χωρική κατανομή (η πυκνότητα) του μωσαϊκού των φωτοϋποδοχέων να καθορίζει τα όρια ευκρίνειας της νευρωνικής επεξεργασίας. Αυτό συνεπάγεται ότι, όσο υψηλή και να είναι η ευκρίνεια του οπτικού μας συστήματος, η τελική διακριτική ικανότητα του οφθαλμού περιορίζεται από την μέση απόσταση μεταξύ των κωνίων του κεντρικού βοθρίου. Βεβαίως, γίνεται αντιληπτό ότι όταν δύο παρακείμενες σημειακές φωτεινές πηγές εστιάζονται σε δύο παρακείμενα κωνία σχηματίζουν ένα είδωλο. Επομένως, η διάκριση των δύο ειδώλων ως δύο ξεχωριστά σημεία γίνεται εφικτή μόνο στην περίπτωση ύπαρξης ενός «ανερέθιστου» κωνίου ανάμεσα στα δύο κωνία που ερεθίζονται από φως (γνωστό ως όριο Nyquist) (βλ. Σχήμα 5).

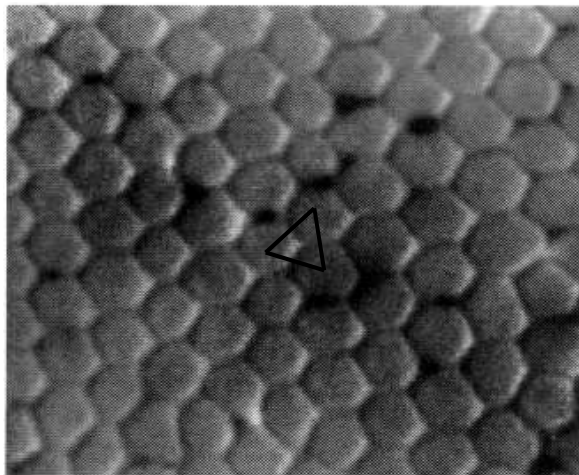


Σχήμα 5: Παράθεση των δύο παραγόντων που καθορίζουν τα όρια της διακριτικής ικανότητας του οφθαλμού. (πάνω) το αμφιβληστροειδικό είδωλο να παρουσιάζει συνάρτηση διασποράς σημείων με 2 μέγιστα και ένα τοπικό ελάχιστο (σύμφωνα με το κριτήριο του Rayleigh). (κάτω) η διάταξη υποδοχέων με τέτοιο τρόπο, ώστε ανάμεσα στα δύο κωνία όπου εστιάζονται οι σημειακές πηγές να υπάρχει ένα «ανερέθιστο» κωνίο.

Το μωσαϊκό των φωτοϋποδοχέων φωτογραφήθηκε για πρώτη φορά σε μοσχεύματα πριν περίπου 15 χρόνια in vitro (Hirsch and Curcio, 1989; Curcio et al., 1990), ενώ σήμερα με τα συστήματα Προσαρμοστικών Οπτικών (ΠΟ) δίνεται η δυνατότητα φωτογράφισης στον ζωντανό οφθαλμό (αν και τα συστήματα ΠΟ δεν παρουσιάζουν ακόμη τέτοια ευκρίνεια, ώστε να απεικονίσουν το μωσαϊκό των κωνίων στην κεντρική περιοχή του αμφιβληστροειδή). Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω μελετών υπολογίστηκε ότι το διάστημα μεταξύ των κέντρων δύο παρακείμενων κωνίων (συνυπολογίζοντας την διάμεση απόστασή τους) στον μέσο οφθαλμό είναι περίπου  $\delta=2.5 \mu\text{m}$ . Αυτή σύμφωνα με την σχέση (1) αντιστοιχεί σε οπτική γωνία  $\Theta$  ίση με  $2.5/300=0.00833^\circ$  (**0.50 arcmin**).

Λόγω της τριγωνικής δικτυωτής (lattice) διάταξης των κωνίων (βλ. Σχ.6), η μεταξύ τους απόσταση καθορίζεται από το ύψος του τριγώνου και επομένως η ελάχιστη γωνία ευκρίνειας αντιστοιχεί σε  $(\sqrt{3}/2)*\Theta$ . Αν συμπεριλάβουμε στους υπολογισμούς και το γεγονός ότι είναι απαραίτητος ο ερεθισμός τριών παρακείμενων κωνίων (όριο Nyquist) η τελική τιμή της ελάχιστης γωνίας ευκρίνειας,  $\Theta_{\text{min}}$ , ίση  $2*(\sqrt{3}/2)*\Theta$  (Snyder and Miller, 1977; Hirsch and Curcio, 1989; Thibos, 2000). Αυτή αντιστοιχεί σε  $(2)*(\sqrt{3}/2)*0.00833$ , δηλαδή περίπου 0.86 arcmin (51.6 arcsec).

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να γίνει αντιστοιχία της χωρικής ανάλυσης με την ελάχιστη γωνία ευκρίνειας. Η χωρική ανάλυση εκφράζεται σε κύκλους ανά μοίρα (c/deg) και 30 c/deg αντιστοιχούν σε γράμμα 10/10 και διακριτική ικανότητα 2 arcmin.



Σχήμα 6: Εικόνα από μόσχευμα αμφιβληστροειδή που απεικονίζει την τριγωνική διάταξη των κωνίων στην κεντρική περιοχή της ωχράς. Αν και η απόσταση ( $\delta$ ) μεταξύ δύο παρακείμενων κωνίων είναι κατά μέσο όρο  $2.5\mu\text{m}$ , λόγω της διάταξής τους η απόσταση εκφράζεται καλύτερα από το «ύψος» ενός ισόπλευρου τριγώνου,  $\delta$  ίσο με  $\sqrt{3}/2$  (πυθαγόρειο θεώρημα).

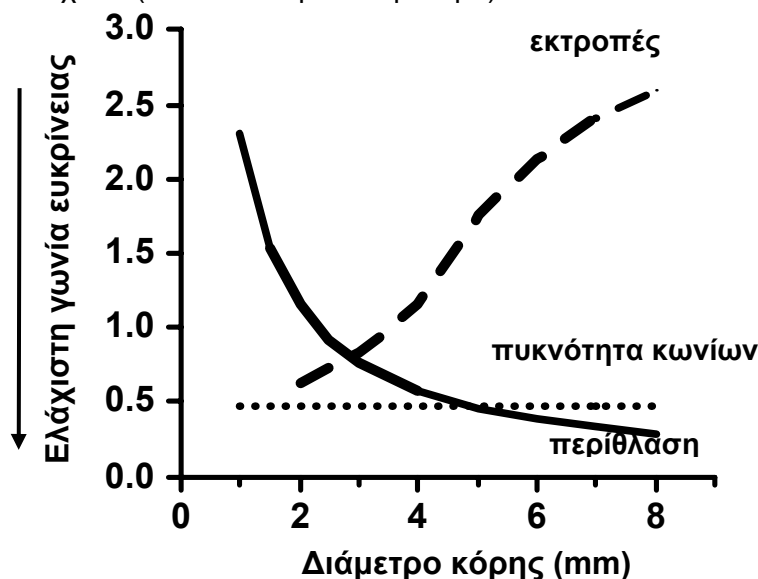
Ένα στοιχείο που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η μεγάλη διακύμανση που παρατηρείται στην πυκνότητα των φωτοϋποδοχέων μεταξύ φυσιολογικών ατόμων της ίδιας ηλικίας (βλ. Σημειώσεις «Νευροφυσιολογία της Όρασης»). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζεται σημαντική διακύμανση και στην θεωρητικά μέγιστη ευκρίνεια του οφθαλμού. Με βάση την πυκνότητα των κωνίων και σύμφωνα με την ανατομική μελέτη της Curcio και των συνεργατών της (Curcio et al., 1990), η μέγιστη διακριτική ικανότητα (grating acuity) στο μέσο οφθαλμό είναι περίπου **69.3 c/deg (21.3/10)**, ενώ κυμαίνεται μεταξύ 46 c/deg (17.5/10) και 83 c/deg (28.6/10). Οι παραπάνω μετρήσεις έρχονται σε συμφωνία με ψυχοφυσικές μελέτες (Williams, 1985, 1988), οι οποίες παρακάμπτοντας τις οπτικές επιφάνειες του οφθαλμού (χρησιμοποιώντας κροσσούς συμβολής), υπολόγισαν τα όρια της διακριτικής ικανότητας από τους φωτοϋποδοχείς περίπου στα **50-60 c/deg (20/10)**. Οι μικρές σακκαδικές κινήσεις των οφθαλμών, οι οποίες μετατοπίζουν συνεχώς το είδωλο πάνω σε αρκετούς φωτοϋποδοχείς, είναι πιθανόν να συμβάλλουν στην αύξηση των παραπάνω ορίων.

### 3.3 Οφθαλμικές εκτροπές υψηλής τάξης

Είναι γνωστό ότι ο οφθαλμός εκτός από τα απλά διαθλαστικά σφάλματα (μυωπία, υπερμετρωπία, αστιγματισμός), όπως κάθε οπτικό σύστημα παρουσιάζει μια σειρά από μονοχρωματικές εκτροπές υψηλής τάξης (π.χ. σφαιρική εκτροπή, κόμα και καμπυλότητα πεδίου) (Charman, 1991). Ως αποτέλεσμα, ακόμα και στην περίπτωση όπου η πιθανή αμετρωπία έχει διορθωθεί (με οφθαλμικούς φακούς, φακούς επαφής ή διαθλαστική χειρουργική), το είδωλο που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή, δεν είναι απόλυτα ευκρινές, αλλά παρουσιάζει κάποια θόλωση λόγω της ύπαρξης χρωματικών και μονοχρωματικών εκτροπών αλλά και της περίθλασης (Charman, 1983; Thibos et al., 2002). Για παράδειγμα, η παρουσία θετικής σφαιρικής εκτροπής υποδηλώνει ότι οι ακτίνες που διαδίδονται από την περιφέρεια της κόρης υπόκεινται σε ισχυρότερη διάθλαση, από τις κεντρικές (παραξονικές) ακτίνες. Ως αποτέλεσμα, η απλή σφαιρο-κυλινδρική διόρθωση, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που η διάμετρος της κόρης είναι μεγάλη, δεν επαρκεί ώστε το είδωλο να εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή με την μέγιστη ευκρίνεια. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι οι οφθαλμικές εκτροπές αυξάνονται αισθητά με την ηλικία (McLellan et al., 2001; Brunette et al., 2003). Η αναλυτική περιγραφή των οφθαλμικών εκτροπών θα πραγματοποιηθεί σε άλλο κεφάλαιο.

Σήμερα είναι εφικτός ο ακριβής και γρήγορος υπολογισμός των εκτροπών του κάθε οφθαλμού από αξιόπιστα όργανα (αισθητήρες ανάλυσης μετώπου κύματος), με πιο γνωστό το Hartmann-Shack (Thibos, 2000; Cheng et al., 2003). Άλλα εμπορικά διαθέσιμα εκτροπόμετρα βασίζονται στην αρχή του Tscherning (Mrochen et al., 2000) και στη μέθοδο Retinal ray-tracing (Pallikaris et al., 2000). Με χρήση αυτών των συσκευών επιτυγχάνεται η καταγραφή της κλίσης του μετώπου κύματος για κάθε σημείο της κόρης και στη συνέχεια, με την βοήθεια ενός υπολογιστικού συστήματος καθίσταται δυνατή η αξιολόγηση των συνολικών εκτροπών του οφθαλμού.

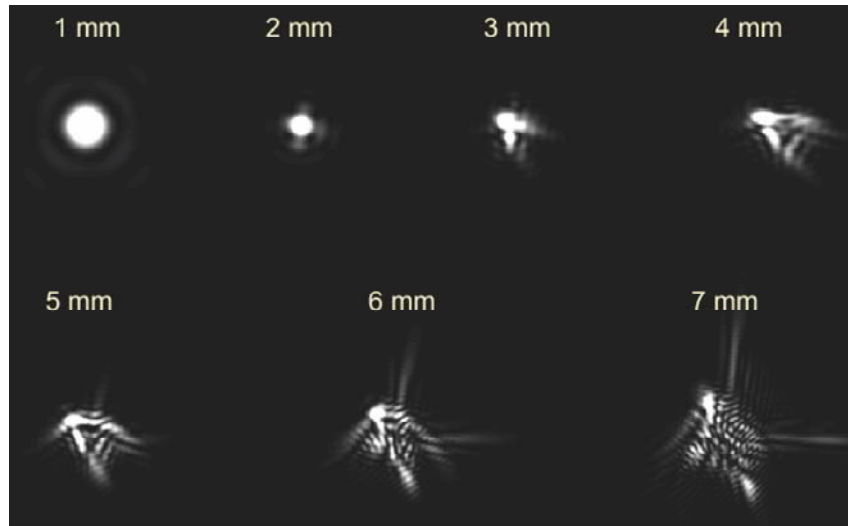
Στο Σχ. 7 παρουσιάζονται συνολικά οι επιπτώσεις των περιοριστικών παραγόντων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, στην ελάχιστη γωνία ευκρίνειας σε συνάρτηση με την διάμετρο της κόρης του οφθαλμού. Η ύπαρξη των εκτροπών υψηλής τάξης, οδηγεί στον περιορισμό της διακριτικής ικανότητας οξύτητας σε χαμηλότερα επίπεδα από αυτά που ορίζονται από την πυκνότητα των φωτοϋποδοχέων (για κόρες διαμέτρου μεγαλύτερης των 4 mm,  $\Theta_{min} > 0.5'$  arc. Το αξιοσημείωτο στατιστικό στοιχείο είναι ότι παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση μεταξύ φυσιολογικών οφθαλμών στο μέγεθος των οφθαλμικών εκτροπών, με αποτέλεσμα να υπάρχει σημαντική διακύμανση στην επίδραση τους στην όραση (Thibos et al., 2002). Επιπλέον, για κόρες μικρής διαμέτρου (<2.0 mm), η οπτική οξύτητα περιορίζεται λόγω του φαινομένου της περίθλασης. Ασφαλώς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ανώτατη διακριτική ικανότητα περιορίζεται από το μωσαϊκό των φωτοϋποδοχέων (~21/10 στο μέσο οφθαλμό).



Σχήμα 7. Οι παράγοντες που περιορίζουν την οπτική οξύτητα του οφθαλμού εκφραζόμενη σε ελάχιστη γωνία ευκρίνειας. Η αύξηση της κόρης έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της διακριτικής ικανότητας λόγω της

μείωσης του ρόλου της περίθλασης, αλλά ταυτόχρονα τη μείωσή της λόγω της αύξησης των μονοχρωματικών εκτροπών. Το βέλτιστο μέγεθος της κόρης είναι περίπου 3 mm. Είναι αξιοσημείωτο ότι η ανώτατη διακριτική ικανότητα περιορίζεται πάντα από την πυκνότητα των κωνίων στο κεντρικό βοθρίο του αμφιβληστροειδή.

Στο Σχ. 8 παρουσιάζεται η συνάρτηση διασποράς σημείου (Point Spread Function) ενός τυπικού φυσιολογικού οφθαλμού, η οποία εκφράζει την κατανομή της σχηματιζόμενης στον αμφιβληστροειδή φωτεινής κηλίδας όταν παρατηρείται μία σημειακή πηγή. Είναι εμφανές ότι η ιδανική διάμετρος της κόρης, όσο αφορά τη συνάρτηση διασποράς σημείου, για το συγκεκριμένο οφθαλμό είναι μεταξύ 2 και 3 mm.



Σχήμα 8. Συνάρτηση διασποράς σημείου (PSF) για διαφορετικές διαμέτρους της κόρης του οφθαλμού. Για μικρές διαμέτρους της κόρης (<2mm) η περίθλαση είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει τη διακριτική ικανότητα του οφθαλμού. Για μεγάλες διαμέτρους της κόρης, (4-7mm) οι εκτροπές είναι αυτές που καθορίζουν τη διακριτική ικανότητα και την ποιότητα της εικόνας.

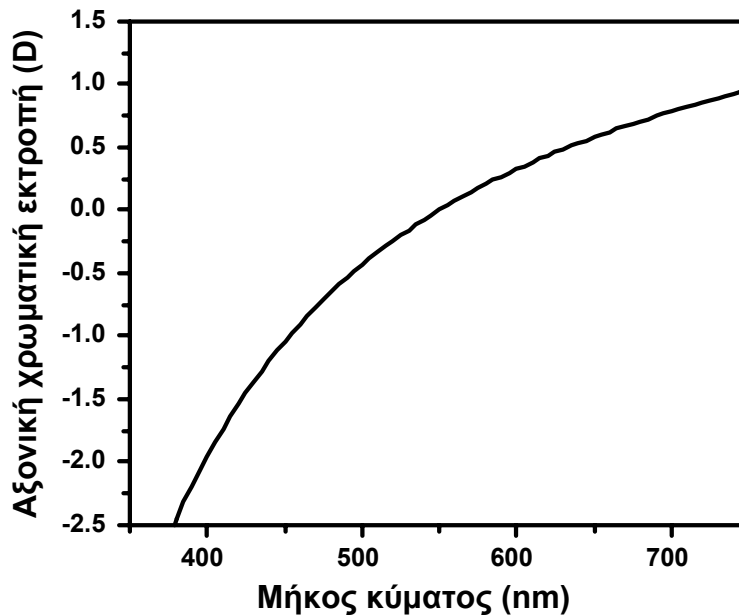
### 3.4. Μικρά σφάλματα εστίασης κατά την προσαρμογή

Ο οφθαλμός έχει την ικανότητα να αυξάνει την διαθλαστική του ισχύ, μέσω της αύξησης της καμπυλότητας των επιφανειών του φακού, ώστε να μπορεί να εστιάσει αντικείμενα που βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις. Αν και το κύριο ερέθισμα για την ενεργοποίηση του μηχανισμού της προσαρμογής είναι η διατήρηση ευκρινούς αμφιβληστροειδικού ειδώλου (Charman, 1983), έχει αποδειχθεί ότι κατά την προσαρμογή παρουσιάζονται τόσο σφάλματα εστίασης (υπο-προσαρμογή για κοντινά αντικείμενα) όσο και μικρές διακυμάνσεις (~ 0.25D) στην απόκριση προσαρμογής (Charman and Heron, 1988) και στις εκτροπές υψηλής τάξης (Hofer et al., 2001), οι οποίες μεταβάλλονται με την προσαρμογή (βλ. σημειώσεις «Προσαρμοστική ικανότητα του φακού»). Είναι πιθανόν αυτές οι διακυμάνσεις να επηρεάζουν την ποιότητα του αμφιβληστροειδικού ειδώλου. Επίσης, οι εκτροπές μεταβάλλονται για τα διάφορα επίπεδα προσαρμογής, με πιο σημαντική την μεταβολή της σφαιρικής εκτροπής από θετική σε αρνητική τιμή (Lopez-Gil et al., 1998; He et al., 2000), κυρίως λόγω της μεταβολής στην καμπυλότητα των επιφανειών του φακού (Atchison et al., 1995). Έχει μάλιστα αποδειχθεί ότι οι μονοχρωματικές εκτροπές βοηθάνε το σύστημα προσαρμογής στον καθορισμό της κατεύθυνσης εστίασης (Wilson et al., 2002).

### 3.5 Αξονική χρωματική εκτροπή

Στην πραγματική λειτουργία της όρασης όπου η ευκρινής παρατήρηση πολυχρωματικών εικόνων είναι το ζητούμενο, η αξονική χρωματική εκτροπή [που οφείλεται στο γεγονός ότι τα χαμηλά-μήκη κύματος (μπλε) διαθλώνται περισσότερο από εκείνα υψηλού-μήκους κύματος (κόκκινα)], θα μειώνει σε κάποιο βαθμό την ευκρίνεια του ειδώλου. Στο Σχ. 9 φαίνεται η αξονική χρωματική εκτροπή του μέσου οφθαλμού, σαν συνάρτηση του μήκους κύματος. Είναι εμφανές ότι το μπλε φως (~400nm) είναι μυωπικό κατά περίπου 2D σε σχέση με τα 550nm (όπου παρουσιάζεται η

μέγιστη ευαισθησία του οφθαλμού). Παρόλο που ο ρόλος της αξονικής χρωματικής εκτροπής στην ποιότητα του αμφιβληστροειδικού ειδώλου δεν έχει πλήρως κατανοηθεί, ο πολυχρωματικός χαρακτήρας των πραγματικών αντικειμένων συνεπάγεται ότι δεν είναι δυνατή κατ' αρχήν η δημιουργία όρασης πλήρως ελεύθερης εκτροπών.



Σχήμα 9. 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. Πειραματικά δεδομένα, τα οποία έχουν συλλεχθεί με διάφορες μεθόδους, συμφωνούν απόλυτα με τον παραπάνω θεωρητικό υπολογισμό.

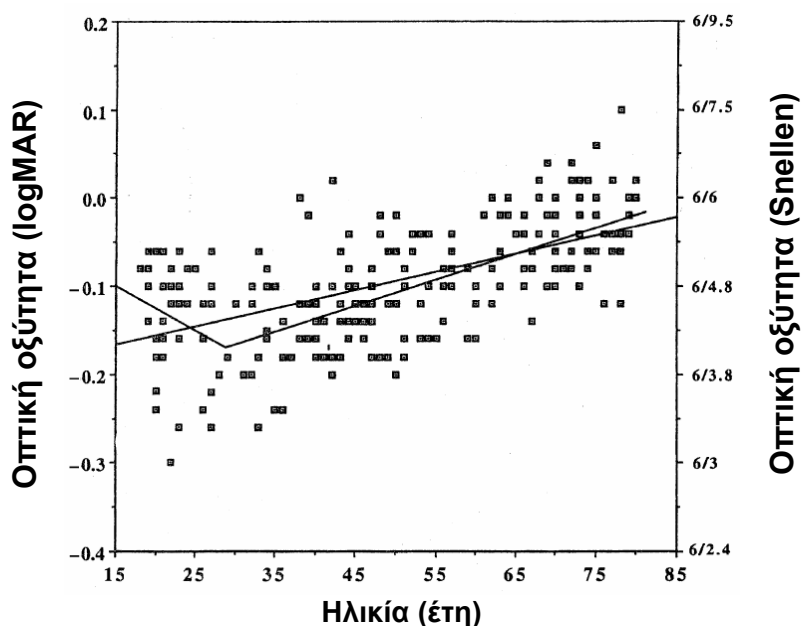
#### 4. Οπτική Οξύτητα

Η οφθαλμολογική εξέταση αποτελείται από μία σειρά ψυχοφυσικών δοκιμασιών (π.χ. οπτική οξύτητα, διάθλαση, έλεγχος στερεοσκοπικής όρασης, έλεγχος έγχρωμης όρασης κλπ). Η οπτική οξύτητα αποτελεί την βασική εξέταση της διακριτικής ικανότητας:

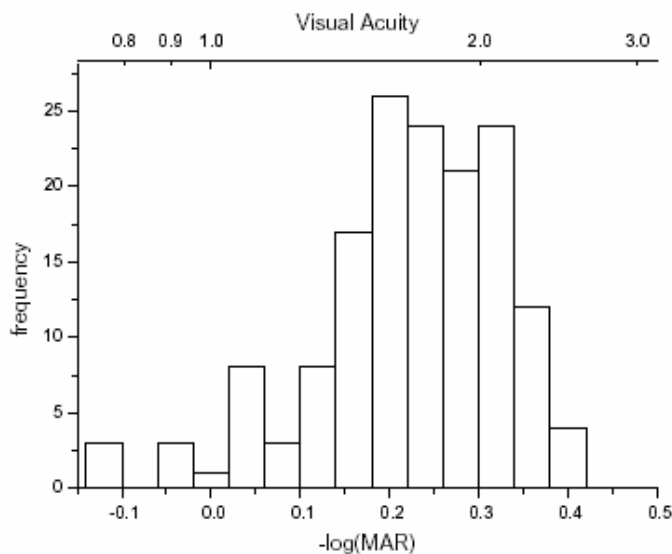
- στην καθημερινή κλινική πράξη για την διάγνωση του διαθλαστικού σφάλματος από οφθαλμίατρος και οπτομέτρες.
- στην βασική έρευνα της παθο-φυσιολογίας του οφθαλμού και την καταγραφή της προόδου και της αποτελεσματικότητας διαφόρων θεραπευτικών μεθόδων.
- στον καθορισμό κριτηρίων επιλογής για μερικά επαγγέλματα (π.χ. οδηγοί, πιλότοι).

Ως **οπτική οξύτητα** ορίζεται η ικανότητα του οφθαλμού να διακρίνει, με την καλύτερη διαθλαστική του διόρθωση (εάν αυτή απαιτείται), δύο σημεία στον χώρο σαν ξεχωριστά. Αν και θεωρείται ότι οπτική οξύτητα (κατά Snellen) ίση με 10/10 (ή 6/6, ή 20/20, βλ. παρακάτω) αποτελεί το μέσο όρο σε υγιείς οφθαλμούς, ουσιαστικά παρατηρείται ότι με σωστή σφαιρο-κυλινδρική διόρθωση (όπου χρειάζεται) οι περισσότεροι φυσιολογικοί οφθαλμοί παρουσιάζουν υψηλότερη ευκρίνεια από 10/10. Μάλιστα, ερευνητικά δεδομένα συμφωνούν με την παραπάνω παρατήρηση, «ανεβάζοντας» την μέση οπτική οξύτητα των υγιών (διορθωμένων) νεαρών οφθαλμών σε 15/10 (Elliott et al., 1995) και μόνο σε ηλικίες μεγαλύτερες των 60 ετών η οπτική οξύτητα μειώνεται σε επίπεδα μικρότερα του 10/10 (βλ. Σχ. 10 και 11).





Σχήμα 10: Μέση μονόφθαλμη οπτική οξύτητα (σε κλίμακα logMAR στα αριστερά και Snellen στα δεξιά, βλ. παρακάτω) σε 223 εξεταζόμενους με υγιείς και φυσιολογικούς οφθαλμούς και την χρήση της κατάλληλης διαθλαστικής διόρθωσης. Είναι χαρακτηριστικό ότι η μέση οπτική οξύτητα σε νεαρούς οφθαλμούς είναι περίπου 6/4 (15/10) ενώ σε ηλικίες > 50 ετών μειώνεται σε 6/6 (10/10).



Σχήμα 11: Συχνότητα οπτικής οξύτητας (σε κλίμακα logMAR κάτω και δεκαδική κλίμακα πάνω, βλ. παρακάτω) σε 77 νεαρούς εξεταζόμενους με υγιείς και φυσιολογικούς οφθαλμούς και την χρήση της κατάλληλης διαθλαστικής διόρθωσης. Είναι χαρακτηριστικό ότι η μέση οπτική οξύτητα είναι μεγαλύτερη από 1.8 (18/10)!! (από Corpens and van de Berg, 2004).

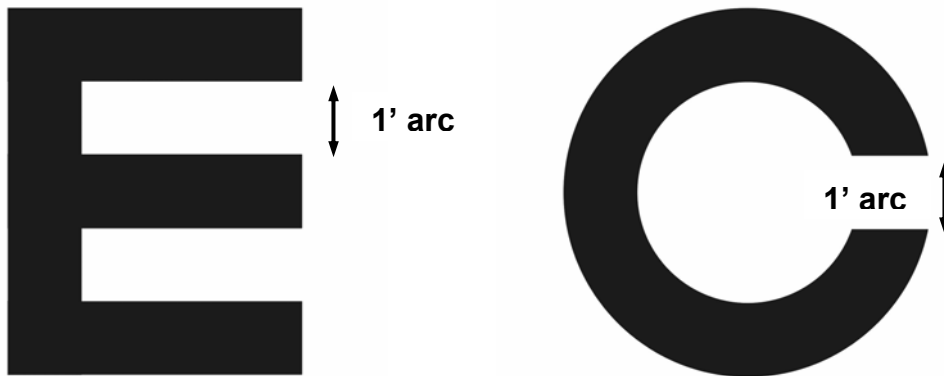
#### 4. Αξιολόγηση οπτικής οξύτητας

Η οπτική οξύτητα (ΟΟ) αξιολογείται στην κλινική πράξη με διάφορους τύπους **οπτοτύπων** που αποτελούνται από σειρές συμβόλων (ή αριθμών ή γραμμάτων) που βαθμιαία ελαττώνονται σε μέγεθος. Το μέγεθος των συμβόλων που χρησιμοποιούνται στα διάφορα οπτότυπα έχει επιλεγεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε 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 (βλ. Σχ. 12). **Η οπτική οξύτητα εκφράζεται με ένα κλάσμα, του οποίου ο αριθμητής είναι η απόσταση του εξεταζόμενου από το**

οπτότυπο (στην περίπτωση του Snellen οπτότυπου η απόσταση ισούται με 6 μέτρα), και παρονομαστής η απόσταση στην οποία το σύμβολο/γράμμα φαίνεται υπό γωνία 5 λεπτών της μοίρας (5 arcmin).

**OO = απόσταση εξέτασης / απόσταση στην οποία το γράμμα φαίνεται υπό γωνία 5 arcmin**

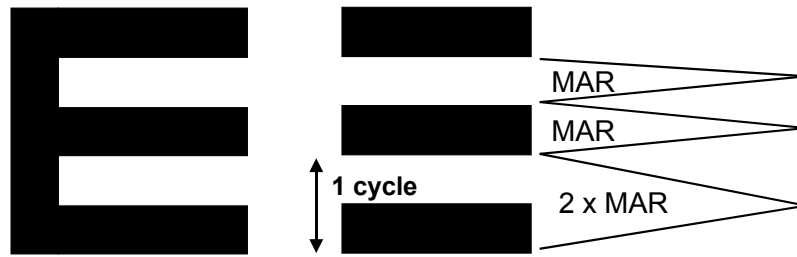
Για παράδειγμα το γράμμα των 10/10 (που θεωρείται ως μέσος όρος φυσιολογικής οπτικής οξύτητας) έχει τέτοιο μέγεθος ώστε από συγκεκριμένη απόσταση εξέτασης να έχει οπτική γωνία ίση με 5 λεπτά της μοίρας, δηλαδή το κάθε σκέλος του φαίνεται υπό γωνία 1 λεπτού της μοίρας (1 arcmin). Η συγκεκριμένη αυτή απόσταση για το μεγαλύτερο σύμβολο του οπτότυπου κατά Snellen (6/60) είναι τα 60 μέτρα, ενώ για το γράμμα 6/6 (10/10) είναι τα 6 μέτρα. Δηλαδή ένα γράμμα 6/60 (το οποίο θεωρείται και όριο «νομικής τύφλωσης»), είναι 10 φορές μεγαλύτερο σε μέγεθος από το γράμμα των 6/6 (η διακριτική του ικανότητα είναι 10 φορές μικρότερη). Τα ενδιάμεσα σύμβολα φαίνονται υπό γωνία 5 arcmin σε ενδιάμεσες αποστάσεις<sup>1</sup>. Στα οπτότυπα που χρησιμοποιούνται στις ΗΠΑ η απόσταση εκφράζεται σε πόδια, ft, δηλαδή οξύτητα 6/6 αντιστοιχεί σε 20/20.



Σχήμα 12. Αρχή κατασκευής των οπτοτύπων. Το γράμμα των 10/10 έχει οπτική γωνία ίση με 5 λεπτά της μοίρας στην απόσταση εξέτασης. Αυτό συνεπάγεται ότι το σκέλος του κάθε γράμματος φαίνεται υπό γωνία 1 λεπτού της μοίρας.

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι αν και και το σκέλος του γράμματος των 10/10 φαίνεται υπό γωνία 1 arcmin, για να γίνει ένα «αντικείμενο» αντιληπτό είναι απαραίτητο να εστιαστεί τουλάχιστον σε δύο παρακείμενα κωνία (βλ. παραπάνω). Όπως φαίνεται και από το Σχ. 13 μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το γράμμα E αποτελείται από 3 γραμμές και 2 διάκενα. Επομένως, η διακριτική ικανότητα του γράμματος ορίζεται από τον συνδυασμό μιας μαύρης γραμμής και ενός διάκενου του γράμματος E που αποτελούν 1 κύκλο ενός πλέγματος με φωτεινότητα που εναλλάσσεται με τετραγωνική διαμόρφωση και αντιστοιχούν σε 2 arcmin. Αν μάλιστα θέλουμε να συσχετίσουμε αυτό το σημείο με την χωρική συχνότητα (σε κύκλους ανά μοίρα, c/deg), μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μία μαύρη γραμμή και ένα διάκενο (που αντιστοιχούν σε 2 arcmin=2/60 deg) σχηματίζουν ένα κύκλο, κάτι που συνεπάγεται ότι το **γράμμα των 10/10 αντιστοιχεί σε 30 c/deg** (και το γράμμα των 20/10 σε 60 c/deg).

<sup>1</sup> Εάν ο εξεταζόμενος δεν μπορεί να διακρίνει το μεγαλύτερο σύμβολο του οπτότυπου από τα 6m τότε τοποθετούμε τον πίνακα στα 3 m (το γράμμα των 1/10 ισοδυναμεί με οπτική οξύτητα 1/20) ή και στο 1.5m (το γράμμα των 1/10 ισοδυναμεί με οπτική οξύτητα 1/40). Σε περιπτώσεις περαιτέρω ελαττωμένης όρασης ζητάμε από τον εξεταζόμενο να μετρήσει τα δάχτυλά μας σε απόσταση 1m και στην τελευταία περίπτωση τον ρωτούμε αν διακρίνει κινήσεις δαχτύλων ή αντίληψη του φωτός.



Σχήμα 13. Το γράμμα E των 10/10 μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από μαύρες γραμμές (ράβδους) και διάκενα, που σχηματίζουν ένα πλέγμα (grating). Για να γίνει το γράμμα αντιληπτό είναι απαραίτητος ο συνδυασμός μιας γραμμής και ενός διάκενου που αντιστοιχούν σε  $2 \text{ arcmin}$  (και κατ' επέκταση σε χωρική συχνότητα  $30 \text{ c/deg}$ ).

Σύμφωνα με το αρχικό οπτότυπο του Snellen, η αύξηση του μεγέθους των γραμμάτων γίνεται με γεωμετρική πρόοδο, πιο συγκεκριμένα κάθε σειρά γραμμάτων διαφέρει από την προηγούμενη κατά περίπου  $\sqrt{2}$ , δηλαδή το μέγεθος των γραμμάτων διπλασιάζεται κάθε δύο σειρές (π.χ. 6/6, 6/9, 6/12, 6/18, 6/24, 6/26, 6/48, 6/60). Με την πάροδο του χρόνου, με βάση το οπτότυπο του Snellen, κατασκευάστηκαν και άλλα παρόμοια οπτότυπα τα οποία όμως δεν τηρούν τη γεωμετρική πρόοδο αφού μερικές σειρές γραμμάτων έχουν αφαιρεθεί, ενώ άλλες έχουν προστεθεί (π.χ. 6/7.5). Έτσι σήμερα στην αγορά υπάρχει μια πληθώρα οπτότυπων τύπου Snellen που διαφέρουν μεταξύ τους τόσο στον αριθμό των σειρών που περιέχουν, όσο και στον αριθμό και στις γραμματοσειρές των συμβόλων που χρησιμοποιούν και στην απόσταση μεταξύ τους. Επίσης, συχνή είναι και η χρήση του γράμματος E το οποίο είναι στραμμένο σε διάφορες κατευθύνσεις. Ως αποτέλεσμα είναι πολύ πιθανόν η μέτρηση της οπτικής οξύτητας να διαφέρει μεταξύ διαφορετικών οπτότυπων.

#### 4.1 Άλλα οπτότυπα

Τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται οπτότυπα με δεκαδική (decimal) κλίμακα (το πηλίκο της παράστασης Snellen). Η πιο σημαντική διαφορά με το Snellen είναι ότι οι σειρές από 0.1 (6/60) έως 1.0 (6/6) διαφέρουν μεταξύ τους κατά 0.1, δεν παρουσιάζεται δηλαδή γεωμετρική πρόοδο (βλ. τον πίνακα μετατροπών στο τέλος του κειμένου).

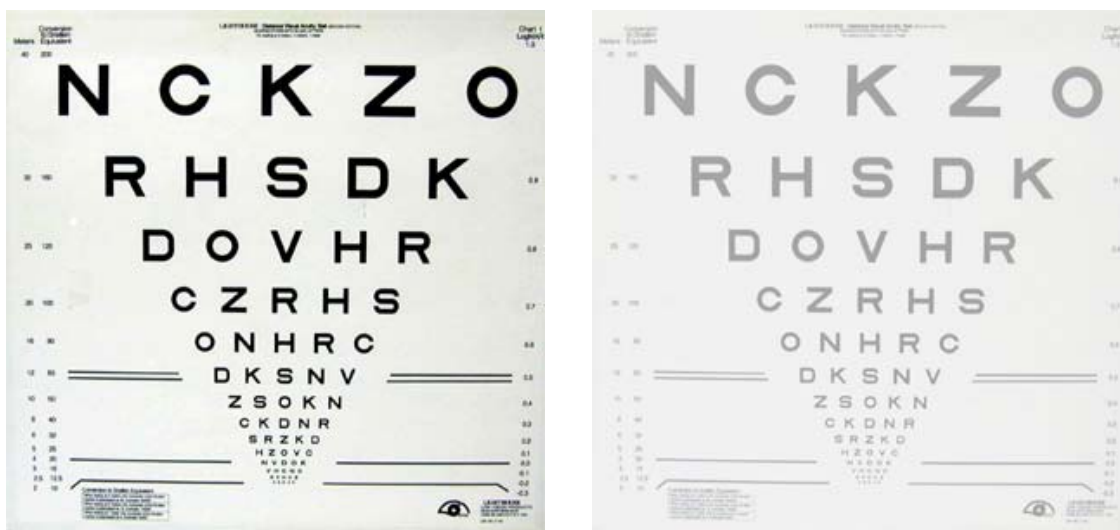
Πιο πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί και άλλα τροποποιημένα οπτότυπα όπως το Bailey-Lovie (1976) το οποίο στηρίζεται στην παράσταση logMAR (στο λογάριθμο της ελάχιστης γωνίας ευκρίνειας – γνωστό και ως οπτότυπο EDCRS). Όλα τα οπτότυπα αυτού του τύπου όχι μόνο παρουσιάζουν σταθερό αριθμό γραμμάτων (5) ανά σειρά (κάτι που δεν συμβαίνει με το Snellen), αλλά επίσης και ο λόγος μεταξύ των σειρών είναι σταθερός, ίσος με  $0.1 \log$ , δηλαδή 1.2589 (επομένως η «βαρύτητα» του κάθε γράμματος είναι 0.02, βλ. Σχ. 14). Η εξίσωση με την οποία είναι δυνατός ο υπολογισμός της οπτικής οξύτητας με μετατροπή από logMAR σε δεκαδική (decimal) παράσταση (και αντίστροφα) είναι η παρακάτω:

$$\text{decimal} = \text{antilog}(-\log\text{MAR}) = 10^{-\log\text{MAR}}$$

$$\log\text{MAR} = -\log(\text{decimal acuity})$$

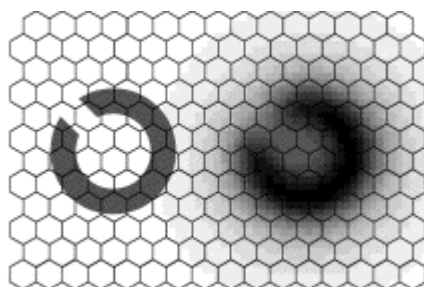
Από τις παραπάνω εξισώσεις συμπεραίνεται ότι αρνητικές τιμές στην παράσταση logMAR αντιστοιχούν σε 00 στη δεκαδική παράσταση  $> 1$  (υψηλή οπτική οξύτητα). Η γεωμετρική πρόοδος στις σειρές του οπτότυπου logMAR έχει επιλεχτεί γιατί το οπτικό μας σύστημα λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο. Από την στιγμή που η αξιολόγηση της οπτικής οξύτητας βασίζεται στον υπολογισμό ενός κλάσματος (την ελάχιστη γωνία ευκρίνειας), για την εξαγωγή ασφαλών στατιστικών συμπερασμάτων ο γεωμετρικός μέσος όρος πρέπει να υπολογιστεί. Οπτική οξύτητα ίση με 0 στην κλίμακα logMAR αντιστοιχεί σε 6/6 (10/10) της κλίμακας Snellen, ενώ 1 αντιστοιχεί σε 6/60 (1/10) (10 φορές χειρότερο ή μία λογαριθμική μονάδα διαφορά από το 6/6). Επομένως, ο ακριβής μέσος όρος είναι ο γεωμετρικός, δηλαδή 0.5 logMAR (που αντιστοιχεί 0.316 στην δεκαδική κλίμακα και 6/19 στην κλίμακα Snellen) και όχι ο αριθμητικός. Επομένως, ο υπολογισμός μέσων όρων, τυπικών αποκλίσεων και άλλων στατιστικών δεδομένων για μετρήσεις οπτικής οξύτητας σε δεκαδική κλίμακα οδηγεί σε ανακριβή συμπεράσματα. Αυτό πρόσφατο έγινε αντιληπτό και από την

οφθαλμολογική κοινότητα για αυτό σε αρκετά επιστημονικά έντυπα προαπαιτούν την χρήση logMAR οπτότυπων.



Σχήμα 14: Οπτότυπα Bailey-Lovie, που στηρίζονται στην κλίμακα logMAR, με τα οποία καθίσταται δυνατή η μέτρηση οπτικής της οξύτητας για δύο διαφορετικές αντιθέσεις φωτεινότητας (contrast) των γραμμάτων, 90% (αριστερά) και 10% (δεξιά).

Η αντίθεση φωτεινότητας (contrast) των συμβόλων που χρησιμοποιούνται σε πρότυπα οπτότυπα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 90%. Είναι προφανές ότι τέτοιες υψηλές τιμές contrast σπάνια συναντώνται σε συνθήκες λειτουργικής όρασης (κατά την οδήγηση, πλοήγηση κλπ.). Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι το contrast του εστιασμένου ειδώλου είναι αρκετά μειωμένο σε σχέση με το αντικείμενο (βλ. Σχ. 15), όπως αποδεικνύεται και από υπολογισμούς της συνάρτησης διασποράς διαμόρφωσης (Point Spread Function). Αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης εκτροπών και της σκέδασης του φωτός στις διαθλαστικές επιφάνειες του οφθαλμού. Μάλιστα, η μείωση του contrast του αμφιβληστροειδικού ειδώλου είναι σημαντικά αυξημένη σε παθολογικές περιπτώσεις (π.χ. καταράκτη, έκκεντρη διαθλαστική επέμβαση).



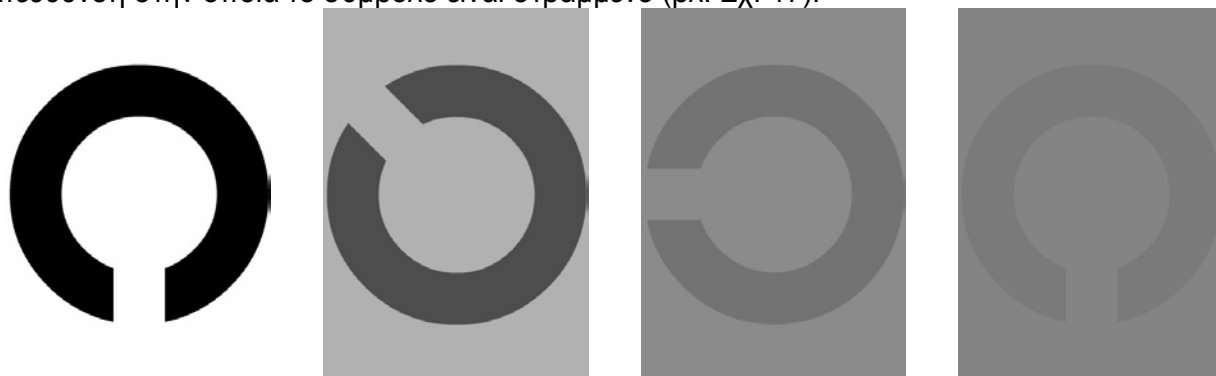
Σχήμα 15: Το «ιδανικό» αμφιβληστροειδικό είδωλο του ενός συμβόλου Landolt-C (αριστερά), και όπως εστιάζεται στο μωσαικό των φωτοϋποδοχέων στην «πραγματικότητα» (με μειωμένο contrast) λόγω της σκέδασης και της παρουσίας εκτροπών στις διαθλαστικές επιφάνειες του οφθαλμού (δεξιά).

Επομένως, η αξιολόγηση της οπτικής οξύτητας για σύμβολα χαμηλού contrast είναι σημαντική και είναι δυνατόν να οδηγήσει στην καλύτερη διάγνωση παθολογικών καταστάσεων. Αυτό οδήγησε στη ανάπτυξη ορισμένων οπτότυπων στα οποία χρησιμοποιούνται και σύμβολα με μικρότερο contrast (π.χ. το Bailey Lovie 40% και 10%, βλ. Σχ. 12). Τέτοιο οπτότυπο είναι το Pelli-Robson (Σχ. 16) στο οποίο αποτελείται από σύμβολα ίδιου μεγέθους που ελαττώνονται σταδιακά σε contrast (δηλαδή αξιολογεί την ευαισθησία στο contrast και όχι τη διακριτική ικανότητα του οφθαλμού).



Σχήμα 16: Το οπτότυπο Pelli-Robson.

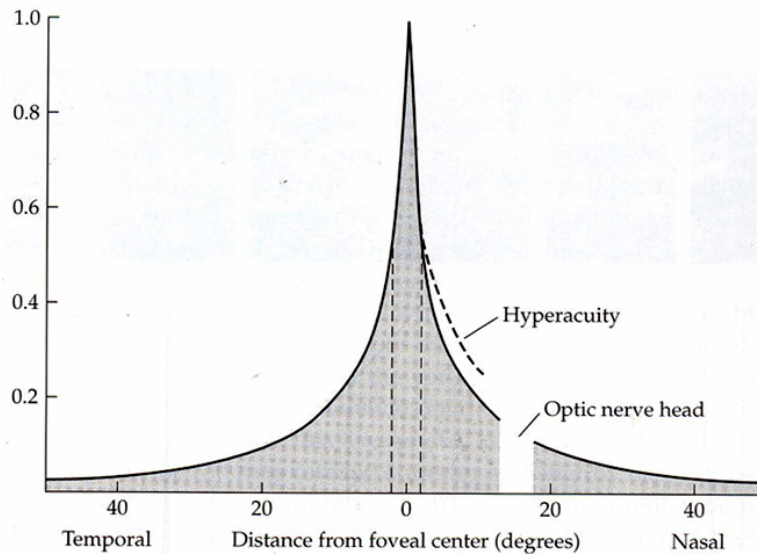
Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα προγράμματα, που εκτελούνται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και προβάλλονται σε οθόνη, για την υλοποίηση των δοκιμασιών της οπτικής οξύτητας και της ευαισθησίας αντιθέσεων. Η ευαισθησία (sensitivity) και ο βαθμός αρτιότητας (specificity) αυτών των δοκιμασιών εξαρτάται τόσο από την ικανότητα του λογισμικού (π.χ. μέθοδος αναζήτησης ουδούς) να προσδιορίσει με ακρίβεια τις αντίστοιχες ουδούς για κάθε ερέθισμα, όσο 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 με τον εξεταζόμενο να πρέπει να αναγνωρίσει την κατεύθυνση στην οποία το σύμβολο είναι στραμμένο (βλ. Σχ. 17).



Σχήμα 17: Το Landolt-C σε 4 διαφορετικά contrast.

## 5. Οπτική οξύτητα – περιφερειακή όραση

Η οπτική οξύτητα μειώνεται απότομα στην περιφέρεια του αμφιβληστροειδή (σε 5/10 στην 1° και σε 1/10 στις 20° (βλ. Σχ. 18). Αυτό συμβαίνει κυρίως: πρώτον, επειδή η πυκνότητα των κωνίων, τα οποία είναι υπεύθυνα για την όραση υψηλής ευκρίνειας, παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της στο κεντρικό βοθρίο της ωχράς κηλίδας και μειώνεται απότομα έξω από αυτό (βλ. σημειώσεις «Νευροφυσιολογία της όρασης»), και δεύτερον γιατί το οπτικό σύστημα του οφθαλμού παρουσιάζει αυξημένες εκτροπές στην περιφέρεια. Συνεπάγεται ότι για να αναγνωριστούν αντικείμενα στην περιφέρεια του οπτικού μας πεδίου θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερο μέγεθος (ή/και υψηλότερο contrast). Το οπτότυπο στο Σχ. 19 εξομειώνει την αύξηση του μεγέθους των γραμμάτων στην περιφέρεια, που απαιτείται ώστε να παρουσιάζουν την ίδια αναγνωριστικότητα με αυτά που προβάλλονται στο κέντρο.



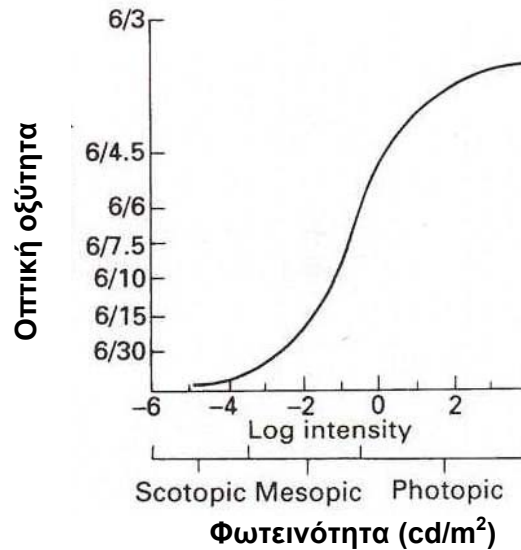
Σχήμα 18: Οπτική οξύτητα στο κέντρο και στην περιφέρεια του αμφιβληστροειδή. Η οπτική οξύτητα είναι ασθενώς υψηλότερη στην ρινική περιφέρεια του αμφιβληστροειδή (κροταφικό οπτικό πεδίο).



Σχήμα 19: Οπτότυπο το οποίο προσομοιώνει την απαιτούμενη αύξηση του μεγέθους των γραμμάτων στην περιφέρεια του οπτικού μας πεδίου ώστε να έχουν την ίδια αναγνωρισιμότητα με αυτά στο κέντρο (σημείωση: η εικόνα δεν έχει καλή ευκρίνεια).

## 6. Οπτική οξύτητα – νυχτερινή όραση

Η συμπεριφορά της όρασης ανάλογα με το επίπεδο φωτεινότητας χωρίζεται σε 3 κατηγορίες: Σε φωτοπική, μεσοπική και σκοτοπική. Η **φωτοπική** όραση χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε υψηλά επίπεδα φωτεινότητας ( $> 3 \text{ cd/m}^2$ ) όταν μόνο τα κωνία λειτουργούν (τα ραβδία υπόκεινται σε κορεσμό στο πολύ φως), και μας παρέχει την ικανότητα να βλέπουμε χρώματα και να διακρίνουμε τις λεπτομέρειες των εικόνων (οπτική οξύτητα  $> 10/10$ , βλ. Σχ. 18). Η **σκοτοπική** όραση (επίπεδα φωτεινότητας  $< 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ , μικρότερη από τη φωτεινότητα του φεγγαριού) ευνοεί τη λειτουργία μόνο των ραβδίων, κι επομένως έχει περιορισμένη ευκρίνεια (οπτική οξύτητα  $< 1/10$ , βλ. Σχ. 20) και παρέχει την ικανότητα διάκρισης μόνον ασπρό-μαυρων εικόνων. Γενικά, όλες οι οπτικές δραστηριότητες χειροτερεύουν στο σκοτάδι εκτός από την ανίχνευση ασθενών ερεθισμάτων. Στα ενδιάμεσα επίπεδα φωτεινότητας (ημίφως - από  $10^{-3}$  μέχρι  $3 \text{ cd/m}^2$ ) λειτουργεί η **μεσοπική** όραση κατά την οποία οι δύο φωτοϋποδοχείς λειτουργούν ταυτόχρονα.



Σχήμα 20: Επίδραση της φωτεινότητας στην οπτική οξύτητα. Σε μεσοπικές συνθήκες φωτισμού η οπτική οξύτητα μειώνεται στα 6/15 (~0.4).

**Πίνακας μετατροπών οπτικής οξύτητας**

Line Number	Visual Angle (min)	Spatial Frequency (Cyc/deg)	LogMAR	Distance				Near					
				% Central Visual Efficiency	Snellen Equivalent			% Central Visual Efficiency	Inches (14/)	Centimeters (35/)	Revised Jaeger Standard	American Point-Type	"M" Notation
					Feet 20/	Meter 6/	Decimal						
-3	0.50	60.00	0.30	100	10	3.0	2.00	100	7.0	17.5	-	-	0.20
-2	0.63	48.00	0.20	100	12.5	3.8	1.60	100	8.8	21.9	-	-	0.25
-1	0.80	37.50	0.10	100	16	4.8	1.25	100	11.2	28.0	-	-	0.32
0	1.00	30.00	0.00	100	20	6.0	1.00	100	14.0	35.0	1	3	0.40
1	1.25	24.00	-0.10	95	25	7.5	0.80	100	17.5	43.8	2	4	0.50
-	1.50	20.00	-0.18	91	30	9.0	0.67	95	21.0	52.5	3	5	0.60
2	1.60	18.75	-0.20	90	32	9.6	0.63	94	22.4	56.0	4	6	0.64
3	2.00	15.00	-0.30	85	40	12.0	0.50	90	28.0	70.0	5	7	0.80
4	2.50	12.00	-0.40	75	50	15.0	0.40	50	35.0	87.5	6	8	1.0
-	3.00	10.00	-0.48	67	60	18.0	0.33	42	42.0	105.0	7	9	1.2
5	3.15	9.52	-0.50	65	63	18.9	0.32	40	44.1	110.3	8	10	1.3
-	3.50	8.57	-0.54	63	70	21.0	0.29	32	49.0	122.5	-	-	1.4
6	4.00	7.50	-0.60	60	80	24.0	0.25	20	56.0	140.0	9	11	1.6
7	5.00	6.00	-0.70	50	100	30.0	0.20	15	70.0	175.0	10	12	2.0
-	5.70	5.26	-0.76	44	114	34.2	0.18	12	79.8	199.5	11	13	2.3
8	6.25	4.80	-0.80	40	125	37.5	0.16	10	87.5	218.8	12	14	2.5
-	7.50	4.00	-0.88	32	150	45.0	0.13	6	105.0	262.5	-	-	3.0
9	8.00	3.75	-0.90	30	160	48.0	0.13	5	112.0	280.0	13	21	3.2
10	10.00	3.00	-1.00	20	200	60.0	0.10	2	140.0	350.0	14	23	4.0
11	12.50	2.40	-1.10	17	250	75.0	0.08	0	175.0	437.5	-	-	5.0
-	15.00	2.00	-1.18	16	300	90.0	0.07	0	210.0	525.0	-	-	6.0
12	16.00	1.88	-1.20	15	320	96.0	0.06	0	224.0	560.0	-	-	6.4
13	20.00	1.50	-1.30	10	400	120.0	0.05	0	280.0	700.0	-	-	8.0
16	40.00	0.75	-1.60	5	800	240.0	0.03	0	560.0	1400.0	-	-	16.0
20	100.00	0.30	-2.00	0	2000'	600.0	0.01	0	1400.0	3500.0	-	-	40.0
30	1000.00	0.03	-3.00	0	20000'	6000.0	0.001	0	14000.0	35000.0	-	-	400.0