

## Χαρακτηριστικά προσαρμοστικής ικανότητας του φακού

Σ. ΠΛΑΪΝΗΣ, Ι. ΠΑΛΛΗΚΑΡΗΣ

Βαρδινογιάννιο Εργαστήριο Μεταμοσχεύσεων & Μικροχειρουργικής του Οφθαλμού (ΒΕΜΜΟ), Τμήμα Οφθαλμολογίας

*Η προσαρμογή αναφέρεται στην ικανότητα του κρυσταλλοειδούς φακού να αλληλάζει σχήμα με σκοπό τη βέλτιστη εστίαση αντικειμένων σε κοντινές αποστάσεις. Αν και ο μηχανισμός της προσαρμογής έχει περιγραφεί με μεγάλη ακρίβεια εδώ και 150 χρόνια, ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του, όπως, για παράδειγμα, η ακρίβεια, η σταθερότητα και η ποιότητα του ειδώλου κατά την προσαρμογή, δεν έχουν πλήρως αποσαφηνισθεί. Αυτό το άρθρο περιγράφει τα μοντέλα προσαρμογής που έχουν προταθεί ενώ πραγματοποιεί μια ανασκόπηση των χαρακτηριστικών της με έμφαση στις αλληλαγές που προκύπτουν στην ποιότητα της αμφιβληστροειδικής εικόνας.*

**Λέξεις ευρετηρίασης:** Προσαρμογή, ποιότητα αμφιβληστροειδικού ειδώλου, ακρίβεια προσαρμογής, σταθερότητα προσαρμογής

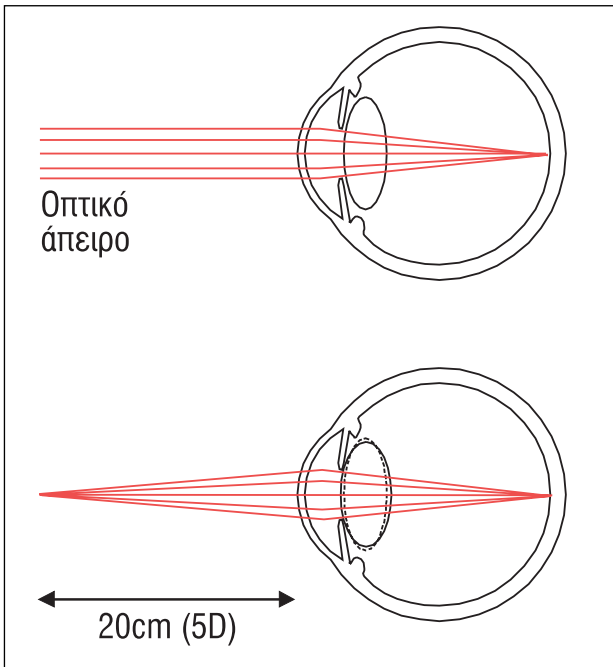
ΟΦΘΑΛΜΟΛΟΓΙΚΑ ΧΡΟΝΙΚΑ 2: 205-18, 2005

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

**Ό**ταν παρατηρούμε ένα μακρινό αντικείμενο, το αμφιβληστροειδικό είδωλό του στόχου είναι καλώς εστιασμένο. Όταν αποφασίσουμε να εστιάσουμε σε ένα κοντινό αντικείμενο είναι απαραίτητη η αύξηση της διαθλαστικής ισχύος του οφθαλμού για τη διατήρηση ευκρινούς ειδώλου (Σχήμα 1). Αυτό αποτελεί και το κύριο ερέθισμα για την ενεργοποίηση του μηχανισμού της προσαρμογής, ο οποίος "παράγει" τα απαραίτητα σήματα που θα προκαλέσουν τη σύσπαση του ακτινώτου μυός και την αύξηση της ισχύος του κρυσταλλοειδούς φακού με ένα μηχανισμό που έχει περιγραφεί από τον Helmholtz πριν από 150 χρόνια.<sup>1</sup>

Η προσαρμογή δεν είναι ένα αμιγώς αντανακλαστικό: μπορεί να υπάρξει ένα ισχυρό εθελοντικό στοιχείο στον έλεγχό του. Ο προσδιορισμός των ερεθισμάτων που "οδηγούν" την προσαρμογή έχει αποτελέσει μία από τις πρωταρχικές περιοχές έρευνας. Αν και είναι γνωστό ότι η ενεργοποίηση της προσαρμογής μπορεί να προκληθεί από μη-οπτικούς παράγοντες, όπως η εγγύτητα του στόχου,<sup>2, 3</sup> οι αλληλαγές στο μέγεθος των ερεθισμάτων που βρίσκονται σε μια σταθερή απόσταση, που συχνά ερμηνεύονται ως αλληλαγές στην απόσταση<sup>4,5</sup> και η διο-

Εστάλη προς δημοσίευση: Μάρτιος 2005



**Σχήμα 1.** (Πάνω) Παρατήρηση ενός μακρινού αντικειμένου (που θεωρητικά βρίσκεται στο άπειρο, στην οπτομετρία οποιοδήποτε σημείο σε απόσταση  $>6m$ ). Για έναν εμμετρικό οφθαλμό το είδωλο είναι καλά εστιασμένο στον αμφιβληστροειδή. (Κάτω) Για την παρατήρηση ενός αντικειμένου στα 20 cm απαιτείται προσαρμογή 5D (η απαιτούμενη προσαρμογή, σε D, ισούται με το αντίστροφο της απόστασης, σε m). Ταυτόχρονα, απαιτείται σύγκλιση του άξονα του οφθαλμού.

φθαλμική διαφορά<sup>6,7</sup>, το πρωταρχικό ερέθισμα για την προσαρμογή αποτελεί η θόλωση του αμφιβληστροειδικού ειδώλου<sup>8,9</sup>.

Έχει επίσης προταθεί ότι οι οπτικές εκτροπές υψηλής τάξης (π.χ. σφαιρική εκτροπή), οι οποίες μειώνουν την ποιότητα του εστιασμένου ειδώλου,<sup>10</sup> παρέχουν ισχυρά κατευθυντικά ερεθίσματα για την προσαρμογή. Για παράδειγμα έχει αποδειχθεί ότι η προσαρμογή είναι σταθερότερη σε πολυχρωματικούς από ό,τι σε μονοχρωματικούς στόχους<sup>11</sup> και ότι η παρουσία της χρωματικής εκτροπής επηρεάζει ευμενώς το εύρος και την ακρίβεια προσαρμογής<sup>12</sup>. Επιπλέον, υπάρχουν ενδείξεις ότι οι ασυμμετρικές μονοχρωματικές εκτροπές, όπως ο αστιγματισμός και το κώμα, προσδίδουν σημαντικές αλληλαγές στο μηχανισμό της προσαρμογής<sup>13,14</sup>.

Επομένως, ενδιαφέρον αποτελεί η μελέτη και α-

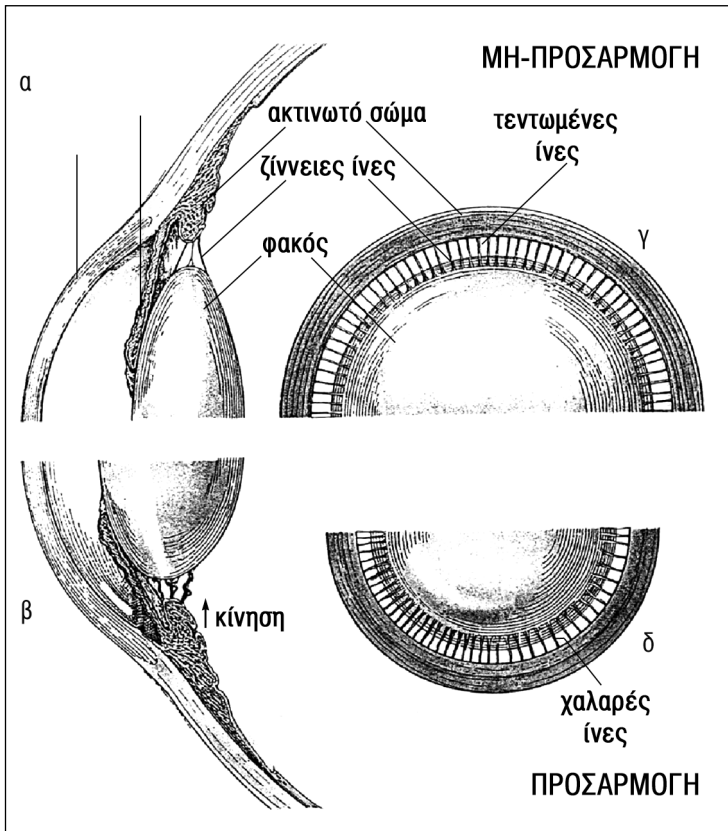
ξιολόγηση βασικών χαρακτηριστικών της προσαρμοστικής ικανότητας, όπως το εύρος, η σταθερότητα, η ταχύτητα και η ακρίβειά της, καθώς επίσης και τα οπτικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά των βασικών δομών που την κατευθύνουν. Μια σύνοψη των παραπάνω παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες. Οι ηλικιακές μεταβολές της προσαρμογής (πρεσβυωπία) θα παρουσιαστούν σε άλλο άρθρο.

## 2. Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ

Είναι γνωστό ότι η ελαστική και ινώδης δομή του φακού περικλείεται μέσα στο ελαστικό περιφάκιο. Η θέση του φακού στο οπτικό σύστημα του οφθαλμού εξασφαλίζεται από την υποστήριξη που παρέχουν στον ισημερινό οι ίνες της ζιννεϊού ζώνης μέσω των συνδέσεών τους στο περιφάκιο καθώς επίσης και από την ίριδα (στο πρόσθιο μέρος) και το υαλώδες σώμα (στο οπίσθιο μέρος). Στην πραγματικότητα το περιφάκιο και οι ίνες της ζιννεϊού ζώνης αποτελούν το σύνδεσμο μεταξύ του φακού και του ακτινωτού μυός και για αυτό παίζουν σημαντικό ρόλο στη "μετάδοση" της δύναμης που προκαλείται από τη σύσπαση του ακτινωτού μυός για την αλληλαγή του "σχήματος" του φακού, απαραίτητη προϋπόθεση στην προσαρμογή.

Η γνώση που υπάρχει σήμερα σχετικά με το μηχανισμό προσαρμογής στηρίζεται στη θεωρία του Helmholtz (1856). Όταν κοιτάμε μακριά, το ακτινωτό σώμα είναι χαλαρωμένο και η μεγάλη διάμετρος της ακτινωτής απόφυσης διατηρεί τις ίνες της ζιννεϊού ζώνης τεταμένες (Σχήμα 2). Αν και δεν έχει διευκρινισθεί με ποιο τρόπο η συστολή του ακτινωτού μυός επηρεάζει την πίεση που ασκούν οι ίνες στο φακό, είναι γνωστό ότι αυτές οι ίνες επισυνάπτονται στον ισημερινό, στο πρόσθιο και στο οπίσθιο μέρος του περιφακίου. Το αποτέλεσμα των δυνάμεων τάνυσης που ασκούν οι ίνες στο ελαστικό περιφάκιο, το οποίο αποτελεί το "καλιούπι" του φακού, είναι η μείωση στην καμπυλότητα των επιφανειών, τη διάμετρο (απόσταση μεταξύ των δύο ισημερινών) και το πάχος του φακού (σε σύγκριση με την *in vitro* φυσιολογική μορφή του).

Κατά την προσαρμογή ο ακτινωτός μυς συσπά-



**Σχήμα 2.** Μηχανισμός της προσαρμογής. Όταν κοιτάμε ένα μακρινό αντικείμενο, ο ακτινωτός μυς έχει τη μέγιστη διάμετρο και κρατάει τις ίνες της ζιννείου ζώνης τεντωμένες (γ). Αυτές με τη σειρά τους ασκούν δυνάμεις τάνυσης που "επιπεδώνουν" τις επιφάνειες του φακού (α). Κατά την προσαρμογή, ο ακτινωτός μυς συσπάται (η διάμετρος του ακτινωτού σώματος μειώνεται) (δ). Όταν ο μυς συσπάται, οι ίνες χαλαρώνουν με αποτέλεσμα ο φακός να ανακάμει πιο "σφαιρική" μορφή και να αυξάνεται η διοπτρική του ισχύς (β). Παράλληλα, η πρόσθια επιφάνεια μετακινείται προς τον κερατοειδή, ενώ η οπίσθια επιφάνεια παραμένει σχεδόν στην ίδια θέση.

μπυλότητας της πρόσθιας επιφάνειας του φακού. Αργότερα ο Fincham<sup>15</sup> αμφισβήτησε την παραπάνω θεωρία αποδεικνύοντας ότι η προσαρμογή είναι φυσιολογική στις περιπτώσεις ασθενών στους οποίους απουσιάζει η ίριδα (ανιριδία). Βέβαια, η ιδέα της εμπλοκής της ίριδας στο μηχανισμό της προσαρμογής δεν έχει απορριφθεί πλήρως μια και πιστεύεται ότι υπάρχει η πιθανότητα να έλκει το ακτινωτό

σώμα προς τα μέσα, ενώ πρόσφατα βρέθηκε ότι πίθηκοι στους οποίους έγινε ιριδεκτομή παρουσίαζαν μειωμένη προσαρμογή κατά 40%<sup>16</sup>. Επίσης ο Fincham, έδωσε ιδιαίτερη σημασία στο περιφάκιο, τονίζοντας ότι οι ελαστικές του ιδιότητες είναι υπεύθυνες για την αλλαγή της καμπυλότητας, και η σχετική ακινησία που παρατηρείται στην οπίσθια επιφάνεια οφείλεται στο γεγονός ότι το πάχος του περιφακίου στον οπίσθιο πόλο είναι μειωμένο.

Βέβαια, ανάμεσα στις πολυάριθμες, "συμπληρωματικές" στη θεωρία του Helmholtz, προτάσεις, που κατατέθηκαν τα τελευταία χρόνια και αφορούσαν κάποιες δευτερεύουσες τροποποιήσεις, ξεπήδησε και μια ριζοσπαστική άποψη,<sup>17</sup> η οποία βασίστηκε σε in vivo παρατηρήσεις που οδηγούσαν στο συμπέρασμα ότι η περιοχή του ισημερινού του φακού μετακινείται προς το σκληρό (και η διάμετρος του φακού αυξάνεται) κατά τη διάρκεια της προσαρμογής. Ως αποτέλεσμα αναπτύχθηκε μια και-

ται, μειώνοντας τη διάμετρο της ακτινωτής απόφυσης (κατά περίπου 1,6 χιλ.), με αποτέλεσμα να υποχωρεί η πίεση στις ίνες της ζιννείου ζώνης, οι οποίες χαλαρώνουν (Σχήμα 2). Έτσι, το ελαστικό περιφάκιο και ο φακός ανακτούν την πιο κυρτή φυσιολογική τους μορφή, δηλαδή, αυξάνεται η κυρτότητα της πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας, αυξάνεται το πάχος του φακού ενώ η πρόσθια επιφάνεια μετατοπίζεται προς τα εμπρός, πλησιάζοντας τον κερατοειδή (η οπίσθια επιφάνεια παραμένει σχεδόν στην ίδια θέση). Το συνολικό αποτέλεσμα είναι η αύξηση της διοπτρικής ισχύος του φακού, απαραίτητη για την εστίαση κοντινών αντικειμένων. Όταν ο ακτινωτός μυς χαλαρώνει αφότου παύει η προσαρμοστική προσπάθεια, η ένταση των ινών της ζιννείου ζώνης στον ισημερινό του φακού αυξάνεται και πάλι.

Ο Helmholtz είχε δώσει κι ένα ρόλο στην ίριδα στο μηχανισμό της προσαρμογής, πιστεύοντας ότι είναι υπεύθυνη σε ένα βαθμό στην αλλαγή της κα-

νούργια θεωρία σύμφωνα με την οποία η σύσπαση του ακτινωτού σώματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση (και όχι τη μείωση, σύμφωνα με την περιγραφή του Helmholtz) της τάσης των ινών της ζιγνεϊού ζώνης που προκαλεί "επιπέδωση" της περιφέρειας του φακού και αύξηση της καμπυλότητας στο κέντρο των επιφανειών του. Πιο πρόσφατες έρευνες όμως (Σχήμα 3) αμφισβήτησαν τα ερευνητικά αποτελέσματα του Schachar, αποδεικνύοντας ότι κατά την προσαρμογή τόσο ο φακός όσο και το ακτινωτό σώμα μετακινούνται μακριά από το σκληρό χιτώνα κατά τη διάρκεια της προσαρμογής, ενώ ταυτόχρονα επέρχεται μείωση στη διάμετρο του φακού<sup>18</sup>.

**2.1. Αλληλαγές στη διοπτρική ισχύ του φακού**

Η διοπτρική ισχύς του φακού προσδιορίζεται από τις ακτίνες καμπυλότητας της πρόσθιας,  $r_1$ , και της οπίσθιας,  $r_2$ , επιφάνειας, το δείκτη διάθλασης,  $n_L$ , και το πάχος,  $t$ , του φακού από την παρακάτω εξίσωση:

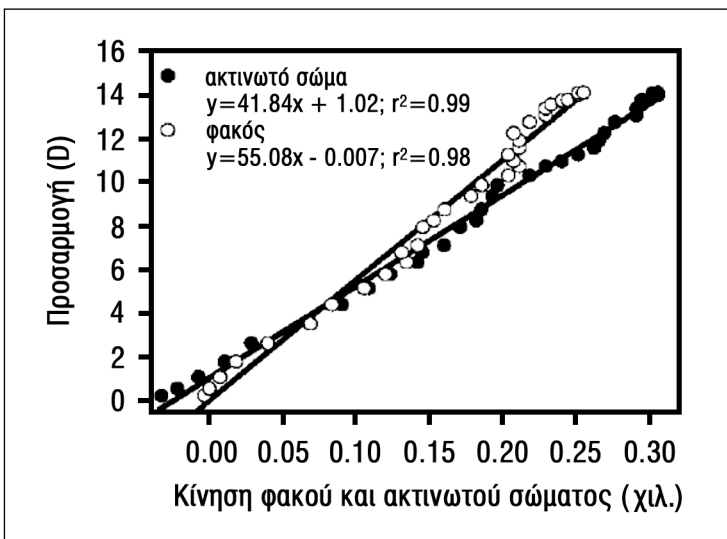
$$F = F_1 + F_2 - t/n F_1 F_2 \tag{1}$$

Όπου  $F_1$  και  $F_2$  η ισχύς της πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας του φακού, αντίστοιχα, οι οποίες υπολογίζονται από  $F_1 = n_L - 1,336 / r_1$ ,  $F_2 = 1,336 - n_L / r_2$

(1,333 είναι ο δείκτης διάθλασης του υδατοειδούς υγρού και υαλιώδους σώματος). Όταν η εξίσωση (1) χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει τη μεταβολή στη συνολική ισχύ του φακού κατά την προσαρμογή (που προκύπτει από τις αλληλαγές στις ακτίνες καμπυλότητας και το πάχος του φακού) ο υπολογισμός δεν είναι απολύτως ακριβής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο δείκτης διάθλασης του φακού ( $n_L$ ) είναι κλιμακωτός, δηλαδή παρουσιάζει μια βαθμιαία κατανομή τόσο κατά μήκος της διαμέτρου όσο και του αξονικού πάχους (π.χ., σύμφωνα με το απλοϊκό μοντέλο του Gullstrand, ελαττώνεται από 1,406 στον πυρήνα σε 1,386 στο φθιοίό), ενώ επίσης μεταβάλλεται με την προσαρμογή<sup>19-21</sup>. Πρόσφατες μελέτες<sup>21</sup> μοντελοποίησαν και αυτόν τον παράγοντα (GRIN model - FGRIN) για τον ακριβή υπολογισμό των αλληλαγών στη συνολική ισχύ του φακού κατά την προσαρμογή.

**3. ΕΥΡΟΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ**

Η μέγιστη προσαρμογή (σε D) που μπορεί να επιτύχει ένας οφθαλμός ονομάζεται εύρος προσαρμογής. Για έναν εμμέτρωπα, το εύρος εκτείνεται θεωρητικά από το "οπτικό άπειρο" μέχρι την πιο κοντινή απόσταση που μπορεί να διακρίνει καθαρά έ-



**Σχήμα 3.** Κίνηση του φακού και του ακτινωτού σώματος που παρατηρείται σε ένα 6χρονο πύθκο κατά την προσαρμογή (η οποία επιτεύχθηκε με τη χρήση "παρασυμπαθητικομιμητικών" φαρμάκων). Είναι προφανές ότι ο ισημερινός του φακού και το ακτινωτό σώμα μετακινούνται κατά την ίδια κατεύθυνση (μακριά από το σκληρό χιτώνα), ενώ υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ του ποσού μετακίνησης και της προσαρμογής. Η κινήσεις καταγράφηκαν με τη μέθοδο της βιντεο-γωνιοσκοπίας (από Glasser and Campbell, 1999<sup>18</sup>).

να γράμμα (π.χ., αν το κοντινό σημείο είναι στα 25 cm, το εύρος προσαρμογής είναι 4D). Τα όρια μεταξύ των οποίων εκτείνεται η προσαρμογή ονομάζονται απώτερο και εγγύς σημείο προσαρμογής και καθορίζονται από τη διάθλαση του οφθαλμού. Για έναν μύωπα το απώτερο σημείο δεν είναι στο οπτικό άπειρο, ενώ το εγγύς σημείο μετατοπίζεται πλησιέστερα στον οφθαλμό: το εύρος προσαρμογής όμως δεν επηρεάζεται.

Η αξιολόγηση του εύρους προσαρμογής πραγματοποιείται στην κλινική ρουτίνα υποκειμενικά, με τη βοήθεια ενός ειδικά-κατασκευασμένου χάρακα (γνωστό ως RAF rule), πάνω στον οποίο είναι προσαρμοσμένο τυπωμένο κείμενο. Ο ασθενής αναφέρει το εύρος απόστασης που μπορεί να διαβάσει το κείμενο, με αποτέλεσμα να καταγράφεται η διαφορά (σε D) μεταξύ του απώτερου και του εγγύς σημείου προσαρμογής. Το εύρος προσαρμογής αρχίζει να μειώνεται σταθερά από τις αρχές της εφηβικής ηλικίας με ένα ρυθμό περίπου 0,4 D/χρόνο, για να σταθεροποιηθεί σε μια τιμή γύρω στη 1D στην ηλικία των 50 ετών. Πρέπει όμως να σημειωθεί, ότι το εύρος προσαρμογής που υπολογίζεται με τον παραπάνω υποκειμενικό τρόπο υπερεκτιμά την πραγματική αλληλαγή της διοπτρικής ισχύος του φακού, λόγω του βάθους εστίασης (το οποίο αυξάνεται με τη μύση της κόρης), ενώ επηρεάζεται από το μέγεθος, το κοντράστ και τη φωτεινότητα των γραμμάτων, καθώς επίσης τον αστιγματισμό και τις οφθαλμικές εκτροπές υψηλής τάξης του ασθενή. Στην πραγματικότητα, άτομα ηλικίας μεγαλύτερης των 50 ετών δεν προσαρμόζουν καθόλου, αλλά μπορούν να διακρίνουν αντικείμενα σε απόσταση περίπου μέχρι 1 μέτρο (1D), λόγω του αυξημένου βάθους πεδίου εστίασης, που προκύπτει από τη μικρή σε διάμετρο κόρη τους.

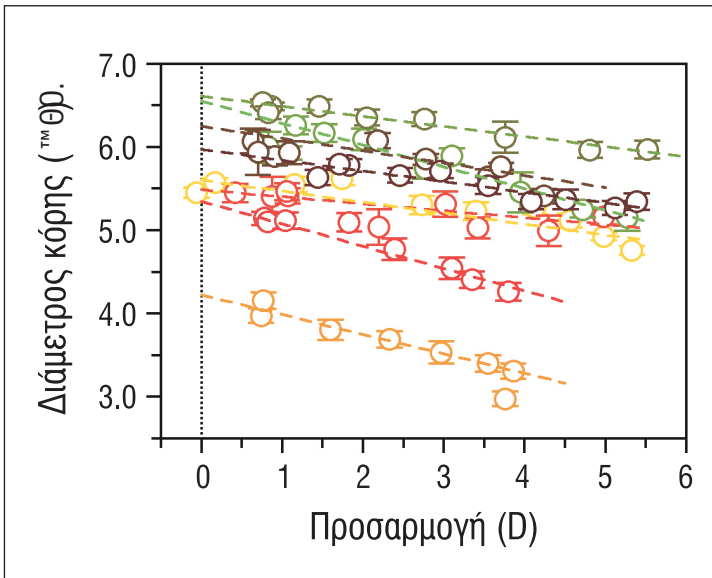
Είναι, επομένως, ευνόητο ότι για την ακριβή αξιολόγηση του εύρους προσαρμογής (και γενικά της προσαρμοστικής ικανότητας) είναι απαραίτητη η χρήση αντικειμενικών μεθόδων. Αυτό μάλιστα γίνεται όλο και περισσότερο σημαντικό μια και ένα μεγάλο μέρος της οφθαλμολογικής έρευνας έχει επικεντρώσει το ενδιαφέρον του σε χειρουργικές διαδικασίες αποκατάστασης της προσαρμογής (στην πραγματικότητα, συζητάμε για αποκατάσταση ενός

μικρού ποσού προσαρμογής). Αντικειμενικές μετρήσεις επιτυγχάνονται με τη χρήση του υπέρυθρου οπτόμετρου (και άλλων ειδικά κατασκευασμένων διαθλασίμετρων) ενώ η χρήση απεικονιστικών μεθόδων (συστήματα σάρωσης με υπέρηχους - μαγνητική τομογραφία) μπορεί να βοηθήσει στην καταγραφή αλληλαγών στα βιομετρικά και οπτικά χαρακτηριστικά του οφθαλμού που συμμετέχουν στο μηχανισμό της προσαρμογής.

#### 4. ΤΡΙΑΔΑ ΤΗΣ ΚΟΝΤΙΝΗΣ ΟΡΑΣΗΣ

Είναι προφανές ότι κατά τη διόφθαλμη όραση, τα κοντινά αντικείμενα απαιτούν ταυτόχρονη αλληλαγή στην προσήλωση όσο και στη σύγκλιση των αξόνων των δύο οφθαλμών. Για αυτό δεν αποτελεί έκπληξη η διαπίστωση ότι οι μηχανισμοί της προσαρμογής και της σύγκλισης, αλλά επίσης και ο μηχανισμός που ελέγχει τη διάμετρο της κόρης του οφθαλμού, αλληλοσυνδέονται και διαμορφώνουν την "τριάδα της κοντινής όρασης". Ως αποτέλεσμα, κατά την αλληλαγή της προσήλωσης σε ένα κοντινό αντικείμενο, η προσαρμογή και η σύγκλιση αυξάνονται ενώ η διάμετρος της κόρης μειώνεται (μύση). Μάλιστα έχει υπολογιστεί ότι ο αναλογισμός μύσης της κόρης ανά διοπτρία προσαρμογής είναι περίπου 0,18 χιλ./D (Σχήμα 4), αν και παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ ατόμων<sup>22-24</sup>. Πρέπει να σημειωθεί ότι η γραμμική σχέση που παρατηρείται στο σχήμα 4 παύει να ισχύει σε υψηλά επίπεδα απαιτούμενης προσαρμογής (πάνω από τα όρια του εξεταζόμενου), λόγω του γεγονότος ότι η μύση της κόρης (και η σύγκλιση) συνεχίζουν να λαμβάνουν χώρα αλλά δεν είναι εφικτή περαιτέρω προσαρμογή.

Οι παραπάνω μηχανισμοί ελέγχονται από ανώτερα φλοιώδη κέντρα και κυρίως την παρασυμπαθητική οδό. Το κεντρομόλο μέρος της διαβίβασης των "οπτικών πληροφοριών" απαραίτητων για την προσαρμογή (δηλαδή την ύπαρξη θοηλού ειδώλου) αποτελεί το οπτικό νεύρο μέσω του οποίου πραγματοποιείται η επεξεργασία τους στην προ-φλοιώδη οπτική οδό αλλά και σε ανώτερα φλοιώδη επίπεδα. Η συστολή του ακτινωτού μυός επέρχεται από τη



**Σχήμα 4.** Μεταβολή της διαμέτρου της κόρης για διαφορετικά επίπεδα προσαρμογής. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε οκτώ εξεταζομένους. Κάθε σημείο αποτελεί τη μέση τιμή 50 μετρήσεων (από Plainis et al., 2005)<sup>25</sup>.

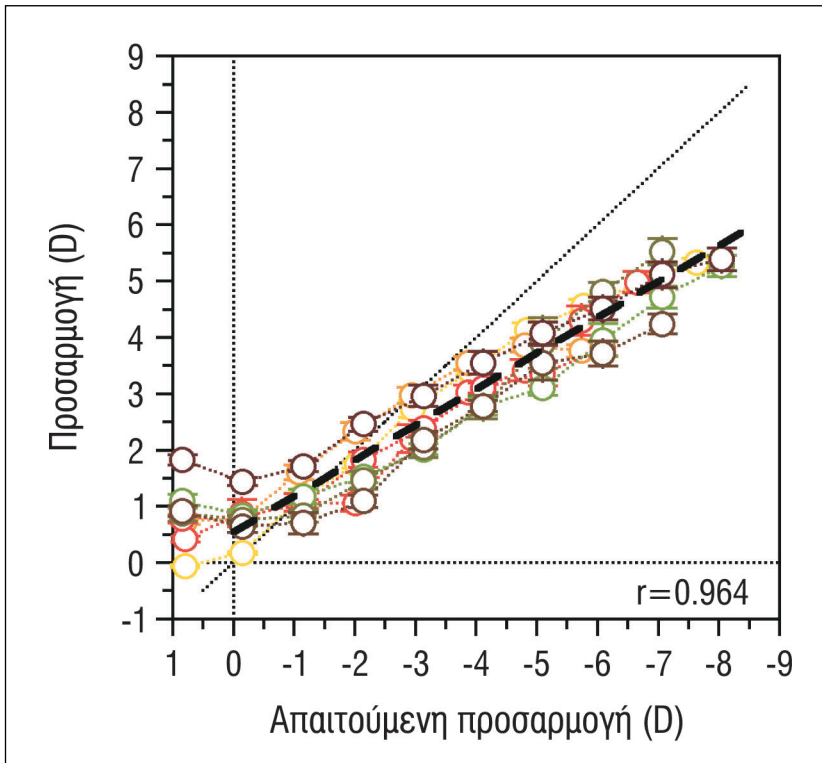
δραστηριότητα των παρασυμπαθητικών ινών με προέλευση τους πυρήνες Edinger-Westphal, που βρίσκονται στο μεσεγκέφαλο. Η συμπαθητική νεύρωση διαδραματίζει μικρότερο ρόλο στις γρήγορες αλληλαγές που απαιτούνται κατά την προσαρμογή, αλλά μπορεί να επηρεάσει τις πιο μακροπρόθεσμες τονικές αλληλαγές που συνδέονται με την παρατεταμένη κοντινή εργασία (γνωστές και ως "σπασμός" της προσαρμογής).

## 5. ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

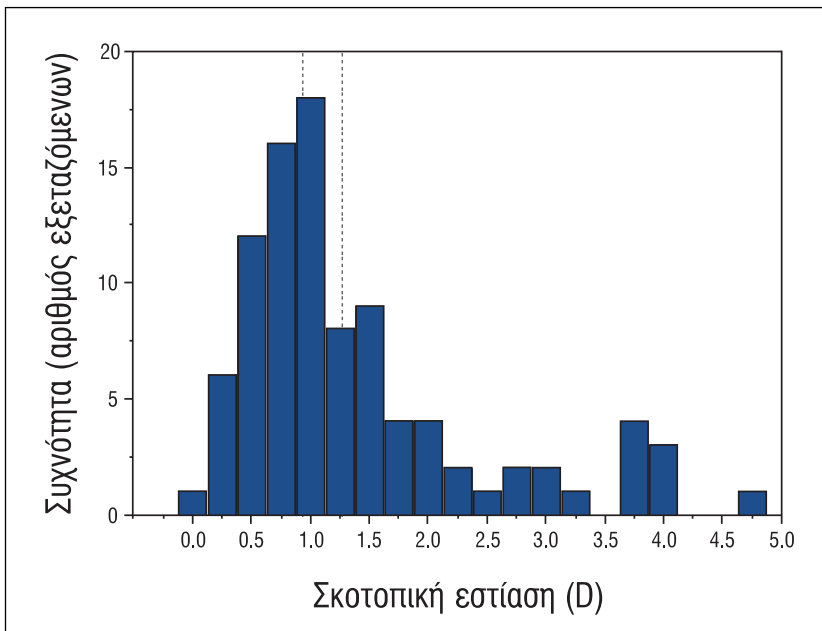
Η ακρίβεια της προσαρμογής περιγράφεται από την καμπύλη συσχετισμού της προσαρμογής (την αλληλαγή της διαθλαστικής κατάστασης του οφθαλμού) με την απαιτούμενη προσαρμογή (Σχήμα 5). Όπως είναι εμφανές, η αντιστοιχία δεν είναι ένα προς ένα, αλλά διαπιστώνεται μια υπερ-προσαρμογή για τα μακρινά ερεθίσματα (π.χ. ένα γράμμα "E"), και μια υπο-προσαρμογή για τα κοντινά ερεθίσματα. Η υπο-προσαρμογή αυξάνεται όσο το ερέθισμα πλησιάζει στο εγγύς σημείο της προσαρμογής. Η κεντρική περιοχή της καμπύλης απόκρισης/ερεθίσματος είναι σχεδόν γραμμική, ενώ η κλίση της είναι λιγότερο από τη μονάδα. Η κλίση της καμπύλης

μεταβάλλεται με το φωτισμό<sup>25</sup> (βλ. παρακάτω), την ηλικία,<sup>26</sup> τη διάμετρο της κόρης (μικρές κόρες "οδηγούν" σε μεγαλύτερη υπο-προσαρμογή και υπερ-προσαρμογή, λόγω το αυξημένου βάθους εστίασης)<sup>27</sup> και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ερεθίσματος (π.χ. μέγεθος, κοντράστ, φωτεινότητα, χρωματικότητα, βλ. για ανασκόπηση Charman, 1995<sup>28</sup>). Οι επιπτώσεις αυτών των "σφαλμάτων" εστίασης στην ποιότητα της εικόνας αναλύονται σε επόμενη ενότητα.

Είναι κατανοητό ότι στο σημείο που η καμπύλη απόκρισης προσαρμογής / απαιτούμενης προσαρμογής συναντά την ευθεία 1:1 η προσαρμογή του οφθαλμού είναι ίση με την απαιτούμενη προσαρμογή. Αυτό το σημείο έχει περιγραφεί ως σημείο ηρεμίας της προσαρμογής επειδή έχει παρατηρηθεί ότι σε αυτή την απόσταση εστιάζει ο οφθαλμός απουσία επαρκούς οπτικού ερεθίσματος (π.χ. στο απόλυτο σκοτάδι, σε κενό πεδίο). Επίσης έχει διασταυρωθεί ότι αυτό το σημείο ανταποκρίνεται στο σημείο τονικής προσαρμογής, εκεί που υπάρχει ισορροπία μεταξύ παρασυμπαθητικού και συμπαθητικού συστήματος. Αν και υπάρχει μεγάλη κατανομή του τονικού σημείου προσαρμογής (Σχήμα 6), ο μέσος φυσιολογικός οφθαλμός σε κατάσταση "ηρεμίας" γίνεται ελαφρά πιο μυωπικός, κατά περίπου 1.0-1.5



**Σχήμα 5.** Τυπικές καμπύλες συσχετισμού της προσαρμογής με την απαιτούμενη προσαρμογή. Είναι προφανές ότι η αντιστοιχία δεν είναι ένα προς ένα (η αντιστοιχία 1:1 περιγράφεται από τη διακεκομμένη γραμμή). Πιο συγκεκριμένα, ο οφθαλμός προσαρμόζει περισσότερο από ό,τι χρειάζεται για μακρινά (υπερ-προσαρμογή) και λιγότερο για κοντινά αντικείμενα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον ένα οφθαλμό ατόμων ηλικίας 24-33 ετών, με τη χρήση ενός Badal οπτόμετρου (για την προβολή ενός γράμματος σε διαφορετικές αποστάσεις) που ενσωματώθηκε σε μια συσκευή ανίχνευσης μετώπου κύματος (COAS, Wavefront Sciences) (από Plainis et al., 2005<sup>23</sup>). Να τονιστεί ότι τα "σφάλματα" στην προσαρμογή είναι μικρότερα κατά τη διόφθαλμη όραση.



**Σχήμα 6.** Συχνότητα σκοποπικής εστίασης σε 48 εξεταζόμενους (96 οφθαλμοί) νεαρής ηλικίας. Η μέση τιμή είναι περίπου -1,15D. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με υπέρυθρο διαθλασίμετρο (Canon R1) σε απόλυτο σκοτάδι.

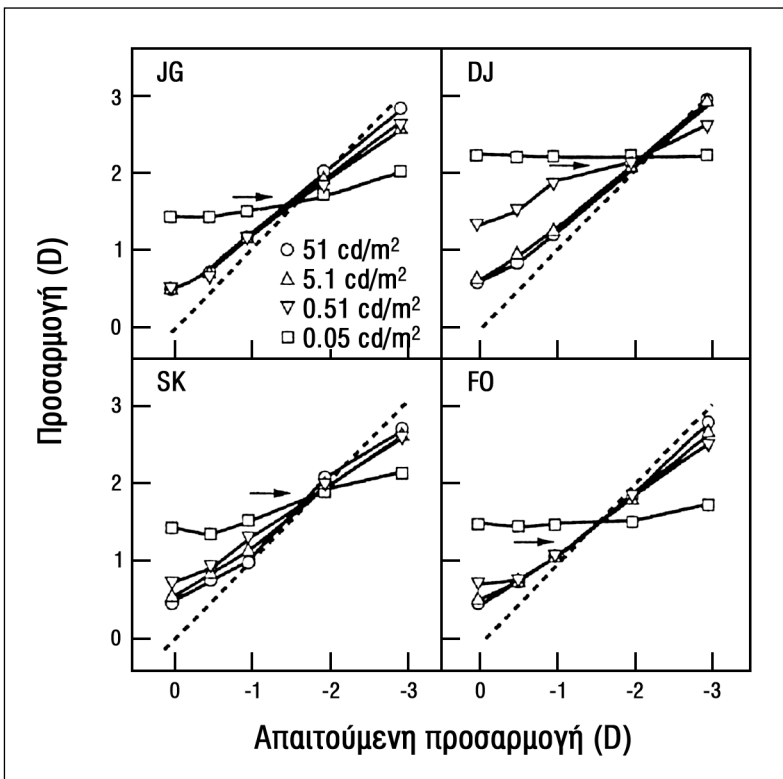
D, δηλαδή "προσαρμόζει" σε μια απόσταση περίπου 70 -100 εκ.<sup>29, 30</sup>. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι σε συνθήκες απόλυτου σκοταδίου (απουσία ερεθίσματος) ο οφθαλμός αποκτά μυωπική διάθλαση κι επομένως έχει δυσκολία να εστιάσει ευκρινώς έναν μακρινό στόχο. Αυτό το φαινόμενο έχει χαρακτηριστεί παλιότερα ως σκοτοπική εστίαση ή νυκτερινή μυωπία. Στην πραγματικότητα, όμως, κατά τις νυκτερινές συνθήκες δεν επικρατεί απόλυτο σκοτάδι, αλλήλ "μεσοπικός" φωτισμός λόγω συνήθως της παρουσίας περιβαλλοντικού φωτισμού (οδικός φωτισμός, φώτα των αυτοκινήτων, φως από φεγγάρι/αστέρια). Ως αποτέλεσμα το μέγεθος της νυκτερινής μυωπίας δεν ξεπερνάει τις 0,25D. Είναι πιθανόν, βέβαια, ορισμένα άτομα με υψηλές τιμές σκοτοπικής εστίασης να παρουσιάζουν κάποιο πρόβλημα, και αυτοί αποτελούν τους κατάλληλους υποψήφιους για περαιτέρω έρευνα.

Επίσης είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η προσαρμογή είναι ένα χαρακτηριστικό που "οδηγείται"

από τα κωνία<sup>31</sup>. Ως αποτέλεσμα, εμφανίζει τη μέγιστη "απόδοση" σε φωτεινές συνθήκες, μειώνεται στον αμυδρό φωτισμό (μεσοπικός φωτισμός), ενώ είναι σχεδόν ανενεργή σε σκοτοπικές συνθήκες όταν τα ραβδία είναι οι κυρίαρχοι φωτοϋποδοχείς (Σχήμα 7).

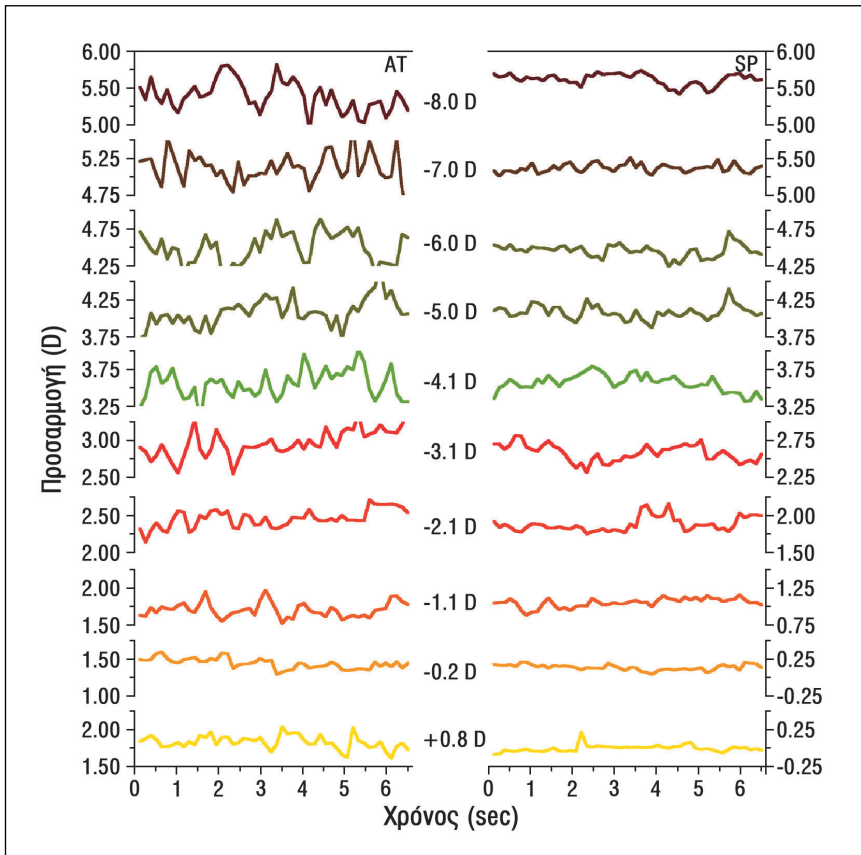
### 6. ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

Κατά παρατήρηση ενός αντικειμένου σε μια σταθερή απόσταση η δύναμη του οφθαλμού δεν είναι απολύτως σταθερή. Αντ' αυτού παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις, που έχουν εύρος που κυμαίνεται μεταξύ 0,10 και 0,40 D, ανάλογα με τα επίπεδα προσαρμογής (Σχήμα 8). Το πλάτος των διακυμάνσεων διαφέρει επίσης μεταξύ των εξεταζομένων<sup>32</sup>. Επίσης, οι διακυμάνσεις μεγαλώνουν όταν το επίπεδο φωτισμού μειώνεται από φωτοπικά σε μεσοπικά επίπεδα<sup>33</sup>. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται στην αστάθεια του μηχανισμού ανάδρασης, δηλαδή στα μηχανικά χαρακτηριστικά του κρυσταλλοειδούς φακού, τη δομή του ακτινωτού μυός και των ινών της ζιννεϊού ζώνης και στον καρδιακό σφυγμό<sup>10,34,35</sup>. Πιστεύεται ότι αυτές οι μικρές αλλαγές προκαλούν παροδικές μεταβολές στο contrast του ειδώλου και με



**Σχήμα 7.** Επίδραση των αλλαγών της φωτεινότητας των ερεθισμάτων (σε  $cd/m^2$ ) στην καμπύλη συσχετισμού προσαρμογής/ απαιτούμενης προσαρμογής για 4 ασθενείς. Τα βέλη σημειώνουν την τιμή της σκοτοπικής εστίασης (διάθλαση στο απόλυτο σκοτάδι), η οποία συμπίπτει με το σημείο τονικής προσαρμογής. Είναι εμφανές ότι σε χαμηλές μεσοπικές συνθήκες ( $0,05 cd/m^2$ ) δεν υπάρχει μεταβολή της προσαρμογής αν και αλλιάζει η απόσταση των ερεθισμάτων (από Johnson, 1976<sup>25</sup>).





**Σχήμα 8.** Διοπτρικές διακυμάνσεις προσαρμογής για ένα χρονικό διάστημα 6 δευτερολέπτων για διαφορετικά επίπεδα απαιτούμενης προσαρμογής (από το οπτικό άπειρο μέχρι 7,63 D) για δύο εξεταζομένους. Για μακρινά ερεθίσματα οι διακυμάνσεις παρουσιάζουν το μικρότερο εύρος, το οποίο αυξάνεται όσο ο στόχος πλησιάζει τον οφθαλμό. Παρατηρήστε επίσης τη διαφορά στο εύρος των διακυμάνσεων μεταξύ των δύο εξεταζομένων (από Plainis et al., 2005<sup>23</sup>).

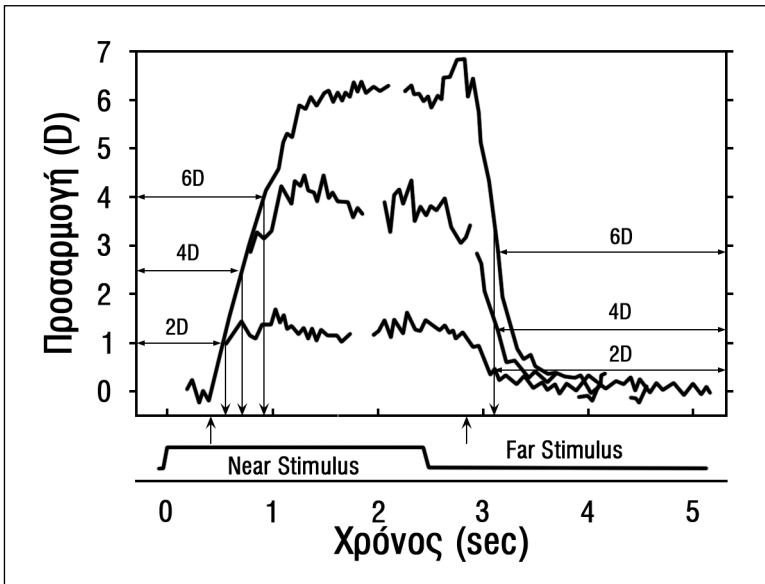
σταθερή τιμή, π.χ. στο 75% της τελικής απόκρισης) (Σχήμα 9<sup>40</sup>). Για ένα ερέθισμα που αλληιάζει απότομα απόσταση προσαρμογής (από μακριά σε κοντά) ο χρόνος αντίδρασης είναι περίπου 0,4 δευτερόλεπτα, εξαρτάται από την ηλικία

αυτών τον τρόπο συνεισφέρουν στη βελτιστοποίηση της ποιότητας της εικόνας που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή<sup>36-38</sup>. Ως αποτέλεσμα, διακυμάνσεις μεγαλύτερου πλάτους απαιτούνται όταν τα σφάλματα προσαρμογής είναι μεγάλα (κάτι που συμβαίνει σε υψηλά επίπεδα απαιτούμενης προσαρμογής), με σκοπό να εστιάσουν, έστω και παροδικά, το μη-καλά εστιασμένο είδωλο, στον αμφιβληστροειδή<sup>23,39</sup>.

## 7. ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Χρόνος αντίδρασης είναι το χρονικό διάστημα που μεσοθαβεί από την εμφάνιση του ερεθίσματος μέχρι την έναρξη της απόκρισης της προσαρμογής. Ως χρόνος απόκρισης ορίζεται ο χρόνος που μεσοθαβεί από την έναρξη μέχρι τη σταθεροποίηση της απόκρισης (ή μέχρι η απόκριση να φτάσει σε μια

του εξεταζομένου αλλιά όχι από τα χαρακτηριστικά του ερεθίσματος (στόχου). Ο χρόνος απόκρισης παραμένει σταθερός και κατά την απο-προσαρμογή (μετατόπιση στόχου από κοντά σε μακριά), αλλιά μπορεί να μειωθεί σε περιπτώσεις όπου το ερέθισμα είναι προβλέψιμο, καταδεικνύοντας την παρουσία ενός "μηχανισμού πρόβλεψης" στο σύστημα ελέγχου προσαρμογής<sup>9</sup>. Η καθυστέρηση των 400 msec οφείλεται στο χρόνο που απαιτείται για να φτάσει το ερέθισμα (μέσω των συνάψεων των διαφόρων κυττάρων στην οπτική οδό) στα κέντρα του εγκεφάλου που είναι υπεύθυνα για την επεξεργασία του οπτικού σήματος, και επίσης από τον λανθάνοντα χρόνο που μεσοθαβεί μέχρι να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός της προσαρμογής (σύσπαση ακτινωτού σώματος, χαλάρωση των ινών της ζιννέιου ζώνης και αλληλαγές στο φακό). Ο χρόνος αντίδρασης αντιθέτως εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του στόχου όσο επίσης και από την α-



**Σχήμα 9.** "Δυναμικές" αποκρίσεις προσαρμογής για ερεθίσματα 2D, 4D και 6D απαιτούμενης προσαρμογής. Οι διακυμάνσεις στις αποκρίσεις είναι εμφανείς και σε αυτή την περίπτωση. Χαρακτηριστική είναι η αύξηση του χρόνου απόκρισης με την απαιτούμενη προσαρμογή (η μεγαλύτερη καθυστέρηση παρατηρείται για το ερεθίσμα 6D). Ο χρόνος αντίδρασης (χρονικό διάστημα μέχρι να αρχίσει η απόκριση) παραμένει σταθερός σε όλες τις περιπτώσεις (περίπου 400 msec). Αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση ότι ο χρόνος απόκρισης κατά την αποπροσαρμογή είναι μικρότερος (από Kasthurirangan et al., 2003<sup>40</sup>).

παιτούμενη αλλαγή στην προσαρμογή απόκρισης. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 9, αυξάνεται γενικά σχεδόν εκθετικά με το ποσό της απαιτούμενης προσαρμογής και κυμαίνεται από 0,2 μέχρι περίπου 1 δευτερόλεπτο. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο χρόνος απόκρισης για μεγάλα επίπεδα απο-προσαρμογής είναι γρηγορότερος από αυτόν της προσαρμογής. Αυτό οφείλεται σε διαφορές στα χρονικά χαρακτηριστικά των νευρικών ινών που είναι υπεύθυνες για την "ενεργοποίηση" της προσαρμογής και της αποπροσαρμογής. Να τονιστεί ότι κατά τη διόφθαλμη προσαρμογή ο συνολικός χρόνος είναι σημαντικά μικρότερος.

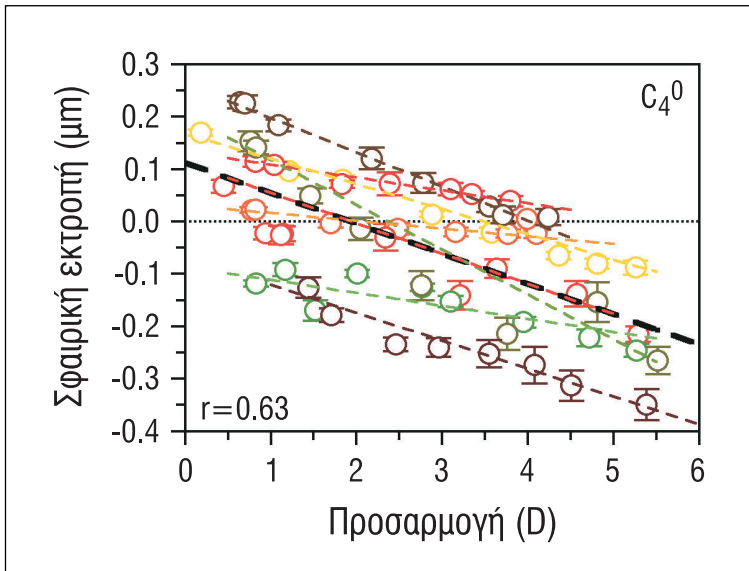
### 8. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΜΦΙΒΛΗΣΤΡΟΕΙΔΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ

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, ακόμα και καμπυλότητα πεδίου)<sup>10</sup>. Ως αποτέλεσμα, ακόμα και στην περίπτωση όπου η πιθανή αμετρωπία έχει διορθωθεί (με οφθαλμικούς φακούς, φακούς επα-

φής 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 περιθλάσης<sup>10,41</sup>. Για παράδειγμα, η παρουσία θετικής σφαιρικής εκτροπής (που αποτελεί την πιο μελετημένη εκτροπή) υποδηλώνει ότι οι ακτίνες που διαδίδονται από την περιφέρεια της κόρης υπόκεινται σε ισχυρότερη διάθλαση, από τις κεντρικές (παραξονικές) ακτίνες. Ως αποτέλεσμα, όταν η διάμετρος της κόρης μεγαλώνει, η διάθλαση του οφθαλμού γίνεται πιο μυωπική. Το αντίστροφο ισχύει όταν η τιμή της σφαιρικής εκτροπής είναι αρνητική.

Η σφαιρική εκτροπή αποτελεί την εκτροπή υψηλής τάξης που μεταβάλλεται χαρακτηριστικά με την προσαρμογή. Είναι αξιοσημείωτο σε όλες τις περιπτώσεις η σφαιρική εκτροπή κινείται σε πιο αρνητικές τιμές κατά την προσαρμογή<sup>42-44</sup>. Αυτό φανερώνεται στο σχήμα 10, όπου παρουσιάζεται. Ανάλογες μεταβολές συμβαίνουν και για άλλες εκτροπές υψηλής τάξης (π.χ. οριζόντιο και κατακόρυφο κώμα). Πιστεύεται ότι αυτές οφείλονται σε αλληλαγές στο σχήμα και τη θέση του φακού κατά την προσαρμογή<sup>45, 46</sup>.

Στο σχήμα 11 γίνεται μια προσπάθεια εξομοίω-

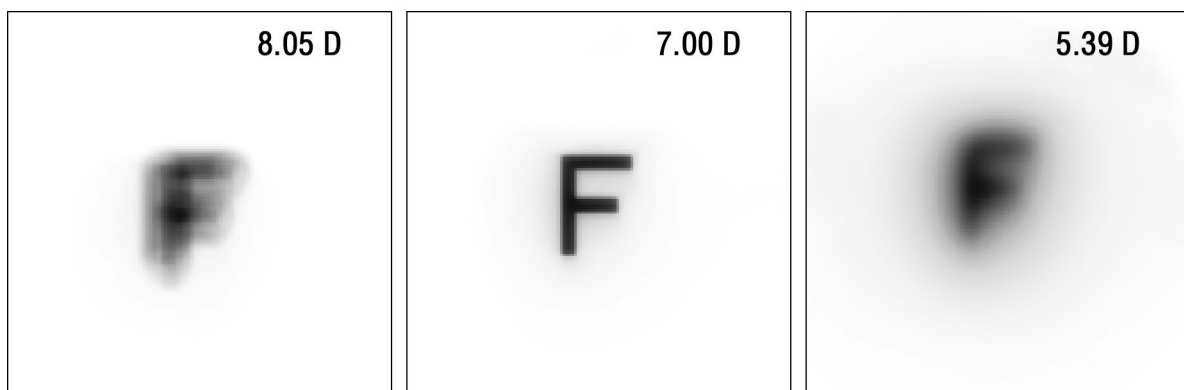


**Σχήμα 10.** Μεταβολές στη σφαιρική εκτροπή για επτά οφθαλμούς σε σχέση με την προσαρμογή. Κάθε σημείο αποτελεί τον μέσο όρο 50 μετρήσεων και οι μπάρες  $\pm 1SD$  (τυπική απόκλιση).

σης της ποιότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου για απαιτούμενη προσαρμογή ίση με 8,05 D. Η ποιότητα του ειδώλου εκτιμήθηκε με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού και αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση οπτικών συστημάτων, όπως η Συνάρτηση Μεταφοράς Διαμόρφωσης. Από τα γραφήματα συμπεραίνουμε ότι η "ιδανική" αντιστοιχία μεταξύ προσαρμογής και απαιτούμενης προσαρμογής δεν οδηγεί στη βέλτιστη ποιότητα ειδώλου, όπως θα ήταν το αναμενόμενο, και αυτό ο-

υψηλότερα επίπεδα υπο-προσαρμογής (η προσαρμογή είναι ίση με 5.39 D), με αποτέλεσμα η πραγματική αμφιβληστροειδική εικόνα να είναι αρκετά "θολή".

Η πρόοδος που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην ανάλυση μετώπου κύματος των οφθαλμικών εκτροπών με τη χρήση εξελιγμένων οργάνων, θα βοηθήσει στην καλύτερη συσχέτιση της ποιότητας εικόνας με τα χαρακτηριστικά του μηχαν-



**Σχήμα 11.** Προσομοιώσεις της εικόνας που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή: (αριστερά) 1:1 αντιστοιχία, (κέντρο) βέλτιστη εικόνα, (δεξιά) πραγματική απόκριση όταν η απαιτούμενη προσαρμογή είναι 8,05 D.

νισμού της προσαρμογής που θα οδηγήσουν στην εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

### Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε τους Χαρίλαο Γκίνη και Άρη Παλληκάρη που βοήθησαν στην αξιολόγηση της ποιότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού και υπολογιστικού αλγόριθμου. Ο Σωτήρης Πλαΐνης αποτέλεσε υπότροφος του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (2003-2004) για την εκπλήρωση μεταδιδακτορικής έρευνας με θέμα "Μεταβολές στην ποιότητα της εικόνας που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή λόγω της προσαρμογής του οφθαλμού".

## SUMMARY

### Accommodative function of the human eye

S. PLAINIS, MSc, PhD, I. PALLIKARIS, MD, PhD

*Vardinoyiannion Eye Institute of Crete (VEIC), Department of Ophthalmology, School of Medicine University of Crete*

*The accommodative response refers to an increase in the power of the crystalline lens that is sufficient to maintain a clear image when looking at a nearby object. Although the accommodation mechanism has been widely explained for more than 150 years some aspects of its physiological function have not been clarified. This manuscript reviews the proposed theories regarding the function of the accommodative control system, concentrating on the evaluation of its steady-state errors in focus and their possible effect on retinal image quality.*

**Key words:** accommodation, steady-state errors in focus, accommodation dynamics, retinal image quality, ocular aberrations.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Helmholtz HV. Handbuch der Physiologischen Optik. Vol. Volume 1, 1856.
2. Rosenfield M, Ciuffreda KJ, Hung GK. The linearity of proximally induced accommodation and vergence. Investigative Ophthalmology & Visual Science 1991; 32: 2985-91.
3. Hung GK, Ciuffreda KJ, Rosenfield M. Proximal contribution to a linear static model of accommodation and vergence. Ophthalmic and Physiol Optics 1996; 16: 31-41.
4. McLin LN, Jr., Schor CM, Kruger PB. Changing size (looming) as a stimulus to accommodation and vergence. Vision Res 1988;28:883-98.
5. Koh LH, Charman WN. Accommodative responses to anisoaccommodative targets. Ophthalmic and Physiol Optics 1998;18:254-62.
6. Jaschinski W. Fixation disparity and accommodation for stimuli closer and more distant than oculomotor tonic positions. Vision Res 2001;41:923-33.
7. Tsukamoto M, Nakajima T, Nishino J, et al. The bino-

- cular accommodative response in uncorrected ametropia. *Optometry and Vision Science* 2001;78: 763-8.
8. Toates FM. Accommodation Function of Human Eye. *Physiol Reviews* 1972;52:828-63.
  9. Campbell FW, Westheimer G. Dynamics of accommodation responses of the human eye. *J Physiol* 1960; 151:285-95.
  10. Charman WN. The retinal image in the human eye. *Progress in Retinal and Eye Res* 1983;2:1-50.
  11. Aggarwala KR, Kruger ES, Mathews S, Kruger PB. Spectral bandwidth and ocular accommodation. *Journal of the Optical Society of America A. Optics, Image Science, and Vision* 1995;12:450-5.
  12. Stone D, Mathews S, Kruger PB. Accommodation and chromatic aberration - Effect of spatial- frequency. *Ophthalmic and Physiol Optics* 1993;13:244-52.
  13. Campbell FW, Westheimer G. Factors influencing accommodation responses of the human eye. *J Opt Soc Am* 1959;49: 568-71.
  14. Wilson BJ, Decker KE, Roorda A. Monochromatic aberrations provide an odd-error cue to focus direction. *Journal of the Optical Society of America A. Optics, Image Science, and Vision* 2002;19:833-9.
  15. Fincham EF. The changes in the form of the crystalline lens in accommodation. *Transactions of the Optical Society of America* 1925;26:239-69.
  16. Vilupuru AS, Roorda A, Glasser A. Spatially variant changes in lens power during ocular accommodation in a rhesus monkey eye. *J Vis* 2004;4:299-309.
  17. Schachar RA. Cause and treatment of presbyopia with a method for increasing the amplitude of accommodation. *Ann Ophthalmol* 1992;24:445-7, 52.
  18. Glasser A, Campbell MC. Biometric, optical and physical changes in the isolated human crystalline lens with age in relation to presbyopia. *Vision Res* 1999;39: 1991-2015.
  19. Atchison DA, Smith G. *Optics of the Human Eye*. Oxford: Butterwoth -Heinemann, 2000.
  20. Gullstrand A. How I found the mechanism of intracapsular accommodation. Nobel lecture 1911:11 December.
  21. Garner LF, Smith G. Changes in equivalent and gradient refractive index of the crystalline lens with accommodation. *Optometry and Vision Sci* 1997; 74:114-9.
  22. Alpern M, Mason GL, Jardinico RE. Vergence and accommodation. V. Pupil size changes associated with changes in accommodative vergence. *Am J Ophthalmol* 1961;52:762-7.
  23. Plainis S, Ginis H, Pallikaris A. The effect of ocular aberrations on steady-state errors of accommodative response. *Journal of Vision* 2005;(in press).
  24. Schaeffel F, Wilhelm H, Zrenner E. Inter-individual variability in the dynamics of natural accommodation in humans: relation to age and refractive errors. *J Physiol* 1993;461:301-20.
  25. Johnson CA. Effects of luminance and stimulus distance on accommodation and visual resolution. *Journal of the Optical Society of America* 1976;66:138-42.
  26. Charman WN, Heron G. On the linearity of accommodation dynamics. *Vision Res* 2000;40:2057-66.
  27. Ward PA, Charman WN. Effect of pupil size on steady-state accommodation. *Vision Res* 1985; 25: 1317-26.
  28. Charman WN. Optics of the eye. In: Bass M, Van Stryland E, Williams D, Wolfe W, eds. *Handbook of Optics*, 2nd ed. New York: Mc Graw Hill, 1995; v. 1.
  29. Leibowitz HW, Owens DA. Night myopia and the intermediate dark focus of accommodation. *J Opt Soc Am* 1975;65:1121-8.
  30. McBrien NA, Millodo M. Differences in adaptation of tonic accommodation with refractive state. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 1988;29:460-9.
  31. Campbell FW. The minimum quantity of light required to elicit the accommodation reflex in man. *J Physiol* 1954;123:357-66.
  32. Stark LR, Atchison DA. Pupil size, mean accommodation response and the fluctuations of accommodation. *Ophthalmic and Physiol Optics* 1997;17: 316-23.
  33. Charman WN, Heron G. Fluctuations in accommodation - a review. *Ophthalmic and Physiol Optics* 1988;8:153-64.
  34. Collins M, Davis B, Wood J. Microfluctuations of steady-state accommodation and the cardiopulmonary system. *Vision Res* 1995;35:2491-502.
  35. Van Der Heijde GL, Dubbelman M. The change of the equivalent refractive index of the crystalline lens during accommodation. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 2001;42:52.
  36. Alpern M. Variability of accommodation during steady fixation at various levels of illuminance. *J Opt Soc Am* 1958;48:193-7.
  37. Charman WN, Tucker J. Dependence of accommodation response on the spatial frequency spectrum of the observed object. *Vision Res* 1977;17:129-39.
  38. Mieke C, Denieul P. Mean response and oscillations of accommodation for various stimulus vergences in relation to accommodation feedback control. *Ophthalmic Physiol Opt* 1988;8:165-71.

39. Charman WN. Accommodation and the through-focus changes of the retinal image. In: Franzin O, Richter H, Stark L, eds. Accommodation and vergence mechanism. Basel: Birkhauser, Verlag, 2000.
40. Kasthurirangan S, Vilupuru AS, Glasser A. Amplitude dependent accommodative dynamics in humans. Vision Res 2003;43:2945-56.
41. Thibos LN, Hong X, Bradley A, Applegate RA. Accuracy and precision of objective refraction from wavefront aberrations. J Vis 2004;4:329-51.
42. Ivanoff A. About the spherical aberration of the eye. J Opt Soc Am 1956;46:901-3.
43. Atchison DA, Collins MJ, Wildsoet CF, et al. Measurement of monochromatic ocular aberrations of human eyes as a function of accommodation by the Howland aberroscope technique. Vision Res 1995; 35:313-23.
44. Cheng H, Barnett JK, Vilupuru AS, et al. A population study on changes in wave aberrations with accommodation. J Vis 2004;4:272-80.
45. Drexler W, Baumgartner A, Findl O, et al. Biometric investigation of changes in the anterior eye segment during accommodation. Vision Res 1997;37: 2789-800.
46. Roorda A, Glasser A. Wave aberrations of the isolated crystalline lens. J Vis 2004;4:250-61.

Στη βιβλιοθήκη του Royal College of Ophthalmologists στο Λονδίνο υπάρχει μια σειρά σπανίων Οφθαλμολογικών Βιβλίων μεταξύ των οποίων και το βιβλίο του R.Bannister "Breviary of the eyes" (1622) όπου μεταξύ των άλλων ο R.Bannister ο οποίος αυτοσυστήνεται στον πρόλογο ως ειδικός χειρουργός , ως οφθαλμίατρος και ως ιατρός που ασκεί την "physicke"(sic!), σημειώνει τη "σκληρία του βοήθου στο γλαύκωμα". Είναι η πρώτη μνεία στη βιβλιογραφία του σημαντικού αυτού κλινικού σημείου στην ιστορία του γλαυκώματος.

Υπάρχει επίσης και η πρώτη έκδοση του 4τομου βιβλίου του Sir William Mackenzie "A Practical Treatise on the Diseases of the Eye" (1830) όπου για πρώτη φορά μνημονεύεται η αύξηση της ενδοφθάλμιου πίεσεως ως χαρακτηριστικό κλινικό σημείο του γλαυκώματος.

**Εκ της συλλογής Γ. Παλημέρη**