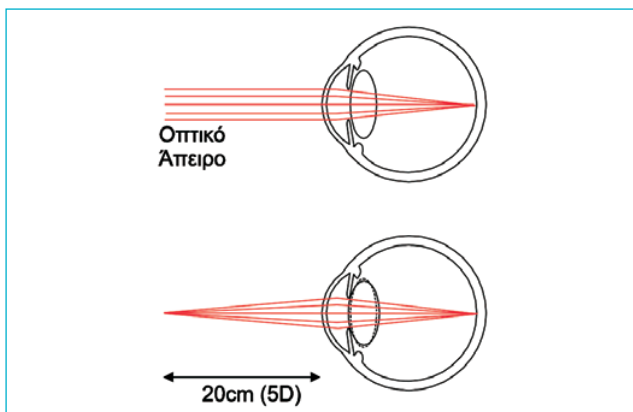


Χαρακτηριστικά προσαρμοστικής ικανότητας του φακού

1. Εισαγωγή

Όταν παρατηρούμε ένα μακρινό αντικείμενο, το είδωλό του στον αμφιβληστροειδή είναι καλά εστιασμένο, εφόσον είμαστε εμμέτρως ή διορθωμένοι με γυαλιά ή φακούς επαφής, στην περίπτωση ύπαρξης διαθλαστικού σφάλματος. Για να εστιάσουμε σε ένα κοντινό αντικείμενο είναι απαραίτητη η αύξηση της διαθλαστικής ισχύος του οφθαλμού, γνωστή ως προσαρμογή, για τη διατήρηση της ευκρίνειας του ειδώλου (Σχήμα 1). Η αφεστίαση (θόλωση) αποτελεί το κύριο ερέθισμα για την ενεργοποίηση του μηχανισμού της προσαρμογής, η οποία θα προκαλέσει τη σύσπασση του ακτινωτού μυός και την αύξηση της ισχύος του κρυσταλλοειδούς φακού, με έναν μηχανισμό που έχει περιγραφεί από τον Helmholtz πριν από 150 χρόνια¹.

Η προσαρμογή δεν είναι ένα αμιγές αντανακλαστικό: μπορεί να υπάρξει ένα ισχυρό εθελοντικό στοιχείο στον έλεγχο της. Αν και είναι γνωστό ότι η ενεργοποίηση της προσαρμογής μπορεί να προκληθεί από μη-οπτικούς παράγοντες, όπως η εγγύτητα τους στόχου^{2,3}, οι αλλαγές στο μέγεθος των ερεθισμάτων που βρίσκονται σε μια σταθερή απόσταση, που συχνά ερμηνεύονται ως αλλαγές στην απόσταση^{4,5} και η διόφθαλμη ανομοιότητα (binocular disparity)^{6,7}, το πρωταρχικό ερέθισμα για την προσαρμογή αποτελεί η θόλωση



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 20cm απαιτείται προσαρμογή 5D (ή απαιτούμενη προσαρμογή, σε D, ισούται με το αντίστροφο της απόστασης, σε m). Ταυτόχρονα απαιτείται σύγκλιση του άξονα του οφθαλμού.



Σωτήριος Πλαϊίνος, MSc, PhD, FBCLA^{1,2}

¹ Εργαστήριο Οπτικής και Όρασης (LOV), Ιατρική Σχολή, Πανεπιστήμιο Κρήτης.

² Contact-Lenses.gr, Ηράκλειο Κρήτης.

του αμφιβληστροειδικού ειδώλου^{8,9}.

Έχει, επίσης, προταθεί ότι οι οπτικές εκτροπές υψηλής τάξης και κυρίως ο ασιγματισμός και η σφαιρική εκτροπή, οι οποίες μειώνουν την ποιότητα του εστιασμένου ειδώλου¹⁰, παρέχουν ισχυρά κατευθυντικά ερεθίσματα για την προσαρμογή^{13,14}. Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι η προσαρμογή είναι σταθερότερη σε πολυχρωματικούς από ότι σε μονοχρωματικούς στόχους¹¹ και ότι η παρουσία της χρωματικής εκτροπής επηρεάζει ευμενώς το εύρος και την ακρίβεια προσαρμογής¹².

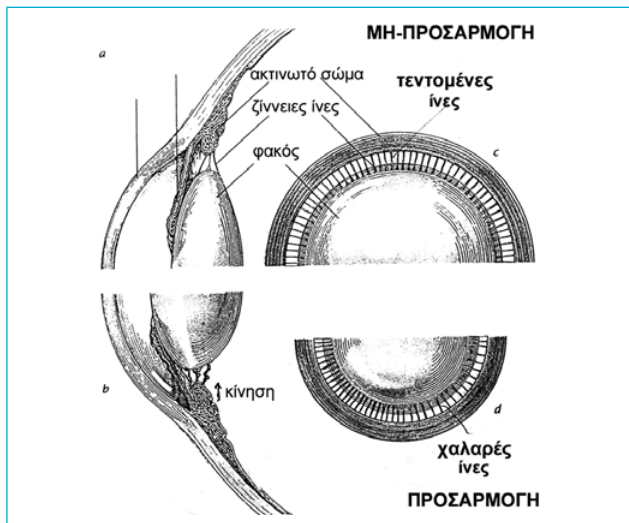
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη και η αξιολόγηση των βασικών χαρακτηριστικών της προσαρμοστικής ικανότητας, όπως το εύρος, η σταθερότητα, η ταχύτητα και η ακρίβειά της, καθώς επίσης και τα οπτικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά των βασικών δομών που την κατευθύνουν. Μία σύνοψη των παραπάνω παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες.

2. Ο μηχανισμός της προσαρμογής

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 ζιγνείου ζώνης, μέσω των συνδέσεών τους στο περιφάκιο, καθώς επίσης και από την ίριδα (πρόσθιο μέρος) και το υαλώδες σώμα (οπίσθιο μέρος). Στην πραγματικότητα το περιφάκιο και οι ίνες της ζιγνείου ζώνης αποτελούν τον σύνδεσμο μεταξύ του κρυσταλλοειδούς φακού και του ακτινωτού μυός. Για τον λόγο αυτό διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη «μετάδοση» της δύναμης που προκαλείται από τη σύσπασση του ακτινωτού μυός για την αλλαγή του «σχήματος» του κρυσταλλοειδούς φακού, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση στην προσαρμογή.

Η γνώση που υπάρχει σήμερα σχετικά με τον μηχανισμό της προσαρμογής στηρίζεται στη θεωρία του Helmholtz (1856). Όταν κοιτάμε μακριά, το ακτινωτό σώμα είναι χαλαρό και η μεγάλη διάμετρος της ακτινωτής απόφυσης διατηρεί τις ίνες

της ζιννείου ζώνης τεταμένες (Σχήμα 2). Αν και δεν έχει διευκρινισθεί με ποιον τρόπο η σύσπαση του ακτινωτού μυός επηρεάζει την πίεση που ασκούν οι ίνες στον φακό, είναι γνωστό ότι αυτές οι ίνες επισυνάπτονται στον ισημερινό, στο πρόσθιο και στο οπίσθιο μέρος του περιφακίου. Το αποτέλεσμα των δυνάμεων τάυσης που ασκούν οι ίνες στο ελαστικό περιφάκιο, το οποίο αποτελεί το «καλούπι» του φακού, είναι η μείωση της καμπυλότητας των επιφανειών, της διαμέτρου (απόσταση μεταξύ των δύο ισημερινών) και του πάχους του φακού (σε σύγκριση με την in vitro φυσιολογική μορφή του).



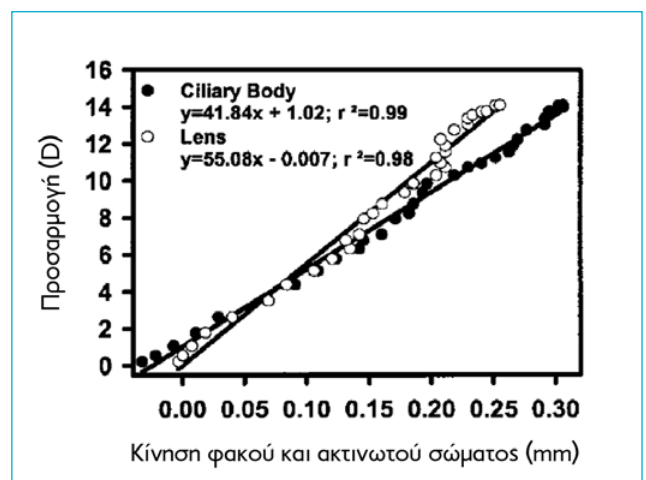
Σχήμα 2. Μηχανισμός της προσαρμογής. Όταν κοιτάμε ένα μακρινό αντικείμενο, ο ακτινωτός μυς έχει τη μέγιστη διάμετρο και κρατά τις ίνες της ζιννείου ζώνης τεταμένες (c). Αυτές, με τη σειρά τους, ασκούν δυνάμεις τάυσης που «επιπεδώνουν» τις επιφάνειες του φακού (a). Κατά την προσαρμογή, ο ακτινωτός μυς συσπάται (η διάμετρος του ακτινωτού σώματος μειώνεται) (d). Όταν ο μυς συσπάται, οι ίνες χαλαρώνουν, με αποτέλεσμα ο φακός να ανακτήσει πιο «σφαιρική» μορφή και να αυξάνεται η διοπτρική δύναμή του (b). Παράλληλα, η πρόσθια επιφάνεια μετακινείται προς τον κερατοειδή, ενώ η οπίσθια επιφάνεια παραμένει σχεδόν στην ίδια θέση.

Κατά την προσαρμογή ο ακτινωτός μυς συσπάται, μειώνοντας τη διάμετρο της ακτινωτής απόφυσης (κατά περίπου 1,6mm), 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 μορφή τους, 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, αφ' ότου παύει η προσαρμοστική προσπάθεια, η τάση των ινών της ζιννείου ζώνης στον ισημερινό του φακού αυξάνεται και πάλι.

Ο Helmholtz είχε δώσει και έναν ρόλο στην ίριδα στον

μηχανισμό της προσαρμογής, πιστεύοντας ότι είναι υπεύθυνη σε έναν βαθμό στην αλλαγή της καμπυλότητας της πρόσθιας επιφάνειας του φακού. Αργότερα, ο Fincham¹⁵ 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 στον μηχανισμό της προσαρμογής δεν έχει απορριφθεί πλήρως, μιας 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%¹⁶. Επίσης, ο Fincham έδωσε ιδιαίτερη σημασία στο περιφάκιο, τονίζοντας ότι οι ελαστικές ιδιότητές του είναι υπεύθυνες για την αλλαγή της καμπυλότητας, ενώ 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 από τον Schachar¹⁷, η οποία ανέφερε ότι η περιοχή του ισημερινού του φακού μετακινείται προς τον σκληρό (και η διάμετρος του φακού αυξάνεται) κατά τη διάρκεια της προσαρμογής. Ως εκ τούτου, 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 ζιννείου ζώνης, που προκαλεί «επιπέδωση» της περιφέρειας του φακού και αύξηση της καμπυλότητας στο κέντρο των επιφανειών του. Πιο πρόσφατες έρευνες, βασισμένες σε in vivo καταγραφές (Σχήμα 3), αμφισβήτησαν τα ερευνητικά αποτελέσματα του



Σχήμα 3. Κίνηση του φακού και του ακτινωτού σώματος που παρατηρείται σε ένα εξάχρονο πιθήκο κατά την προσαρμογή (η οποία επιτεύχθηκε με τη χρήση «παρασυμπαθητικο-μιμητικών» φαρμάκων). Είναι προφανές ότι ο ισημερινός του φακού και το ακτινωτό σώμα μετακινούνται κατά την ίδια κατεύθυνση (μακριά από τον σκληρό χιτώνα), ενώ υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ του ποσού μετακίνησης και της προσαρμογής. Οι κινήσεις καταγράφηκαν με τη μέθοδο της βιντεο-γωνιοσκοπίας (από Glasser and Kaufman, 1999¹⁸).

Schachar, αποδεικνύοντας ότι κατά την προσαρμογή τόσο ο φακός, όσο και το ακτινωτό σώμα, μετακινούνται μακριά από τον σκληρό χιτώνα κατά τη διάρκεια της προσαρμογής, ενώ ταυτόχρονα επέρχεται μείωση στη διάμετρο του φακού¹⁸.

2.1 Αλλαγές στη διοπτρική ισχύ του φακού

Η διοπτρική ισχύ του φακού προσδιορίζεται από τις ακτίνες καμπυλότητας της πρόσθιας (r_1) και της οπίσθιας (r_2) επιφάνειας, τον δείκτη διάθλασης (n_l) και το πάχος (t) του φακού από τη γνωστή εξίσωση:

$$F = F_1 + F_2 - t/n F_1 F_2 \quad (1)$$

Όπου F_1 και F_2 η ισχύς της πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας του φακού, αντιστοίχως, 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 υαλώδους σώματος). Όταν η εξίσωση (1) χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει τη μεταβολή στη συνολική ισχύ του φακού κατά την προσαρμογή (που προκύπτει από τις αλλαγές 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 βαθμωτός, 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 στον φλοιό), ενώ επίσης μεταβάλλεται κατά την προσαρμογή¹⁹⁻²¹. Πρόσφατες μελέτες²¹ μοντελοποίησαν και αυτόν τον παράγοντα (GRIN model - FGRIN) για τον ακριβή υπολογισμό των αλλαγών στη συνολική ισχύ του φακού κατά την προσαρμογή.

3. Εύρος προσαρμογής

Η μέγιστη προσαρμογή (σε D) που μπορεί ένας οφθαλμός να επιτύχει ονομάζεται εύρος προσαρμογής. Για έναν εμμέτρωπα το εύρος εκτείνεται θεωρητικά από το «οπτικό άπειρο» μέχρι την πιο κοντινή απόσταση που μπορεί να διακρίνει με ευκρίνεια ένα γράμμα (π.χ., αν το κοντινό σημείο είναι στα 25cm, 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 ματιού. 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 έναν 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 αλλαγή της διοπτρικής ισχύος του φακού, λόγω του βάθους-πεδίου/εστίασης, το οποίο αυξάνεται με τη μύση της κόρης, ενώ επηρεάζεται από το μέγεθος, την αντίθεση και τη φωτεινότητα των γραμμάτων, καθώς επίσης από τον αστιγματισμό και τις οφθαλμικές εκτροπές υψηλής τάξης του ασθενούς. Στην πραγματικότητα, άτομα ηλικίας μεγαλύτερης των 50-55 ετών δεν προσαρμόζουν καθόλου, αλλά μπορούν να διακρίνουν αντικείμενα σε απόσταση μέχρι περίπου 65cm με 1 μέτρο (που αντιστοιχεί σε εύρος προσαρμογής 1,0 με 1,5D), λόγω του αυξημένου βάθους πεδίου/εστίασης.

Είναι επομένως ευνόητο ότι για την ακριβή αξιολόγηση του εύρους προσαρμογής (και γενικά της προσαρμοστικής ικανότητας) είναι απαραίτητη η χρήση αντικειμενικών μεθόδων, με δυνατότητα καταγραφής της αλλαγής ισχύος του φακού, ιδιαίτερα λόγω του γεγονότος ότι ένα μεγάλο κομμάτι της έρευνας στην οφθαλμολογία αφορά στην αποκατάσταση της προσαρμογής και στην αντιμετώπιση της πρεσβυωπίας. Αντικειμενικές μετρήσεις επιτυγχάνονται με τη χρήση ενός υπέρυθρου οπτομέτρου (και άλλων ειδικά κατασκευασμένων διαθλασίμετρων/εκτροπόμετρων), ενώ η χρήση απεικονιστικών μεθόδων (συστήματα σάρωσης με υπέρηχους - μαγνητική τομογραφία) μπορεί να βοηθήσει στην καταγραφή αλλαγών στα βιομετρικά και οπτικά χαρακτηριστικά του οφθαλμού που συμμετέχουν στον μηχανισμό της προσαρμογής.

4. Τριάδα της κοντινής όρασης

Είναι προφανές ότι κατά τη διόφθαλμη παρατήρηση κοντινών αντικειμένων απαιτείται η ταυτόχρονη αλλαγή στην προσήλωση, όσο και στη σύγκλιση των αξόνων των δύο οφθαλμών. Γι' αυτό δεν αποτελεί έκπληξη η διαπίστωση ότι οι μηχανισμοί της προσαρμογής και της σύγκλισης, αλλά και ο μηχανισμός που ελέγχει τη διάμετρο της κόρης του οφθαλμού, αλληλοσυνδέονται και διαμορφώνουν την «τριάδα της κοντινής όρασης» (near triad). Ως αποτέλεσμα, κατά την αλλαγή της προσήλωσης σε ένα κοντινό αντικείμενο, η προσαρμογή και η σύγκλιση αυξάνονται, ενώ η διάμετρος της κόρης μειώνεται (μύση). Μάλιστα έχει υπολογιστεί ότι ο αναλογία μύσης της κόρης ανά διοπτρία προσαρμογής είναι περίπου 0,18mm/D, αν και παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ ατόμων²²⁻²⁴.

Οι παραπάνω μηχανισμοί ελέγχονται από ανώτερα φλοιώδη κέντρα και κυρίως την παρασυμπαθητική οδό. Το οπτικό νεύρο αποτελεί το κεντρομόλο μέρος της διαβίβασης των «οπτικών πληροφοριών», απαραίτητων για την προσαρμογή, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η επεξεργασία τους στην προ-φλοιώδη οπτική οδό, αλλά και σε ανώτερα φλοιώδη επίπεδα. Η σύσπαση του ακτινωτού μυός επέρχεται από τη δραστηριότητα των παρασυμπαθητικών ινών, με προέλευση τους πυρήνες Edinger-Westphal, που βρίσκονται στον μεσεγκέφαλο. Η συμπαθητική νεύρωση διαδραματίζει μικρότερο

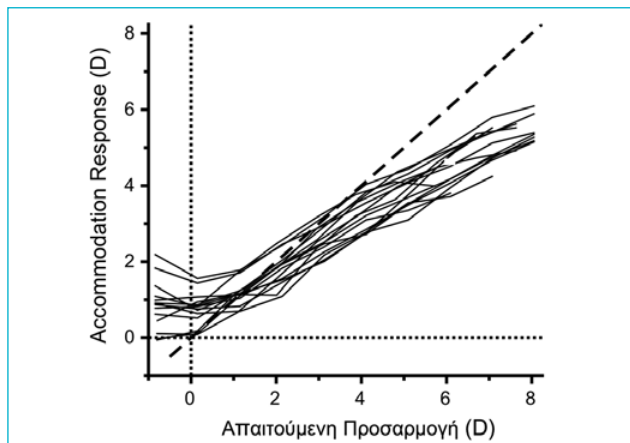
ρόλο στις γρήγορες (steady-state) αλλαγές που απαιτούνται κατά την προσαρμογή, αλλά μπορεί να επηρεάσει τις πιο μακροπρόθεσμες τονικές αλλαγές, οι οποίες συνδέονται με την παρατεταμένη κοντινή εργασία (γνωστές και ως «σπασμός» της προσαρμογής).

5. Ακρίβεια προσαρμοστικής ικανότητας

Η ακρίβεια της προσαρμογής περιγράφεται από την καμπύλη συσχετισμού της προσαρμογής (την αλλαγή της διαθλαστικής κατάστασης του οφθαλμού), με την απαιτούμενη προσαρμογή (Σχήμα 4). Όπως είναι εμφανές, η αντιστοιχία δεν είναι ένα προς ένα, αλλά διαπιστώνεται μία υπερ-προσαρμογή (accommodative lead) για τα μακρινά ερεθίσματα και μία υπο-προσαρμογή (accommodative lag) για τα κοντινά ερεθίσματα.

Η υπο-προσαρμογή αυξάνεται όσο το ερέθισμα πλησιάζει τον οφθαλμό. Η κεντρική περιοχή της καμπύλης απόκρισης/απαιτούμενης προσαρμογής είναι σχεδόν γραμμική, ενώ η κλίση της είναι μικρότερη από τη μονάδα και μεταβάλλεται με τον φωτισμό²⁵ (βλ. παρακάτω), την ηλικία²⁶, τη διάμετρο της κόρης (μικρές κόρες «οδηγούν» σε μεγαλύτερη υπο-προσαρμογή και υπερ-προσαρμογή, λόγω το αυξημένου βάθους εστίασης)²⁷ και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ερεθίσματος (π.χ. μέγεθος, αντίθεση, φωτεινότητα, χρωματικότητα - βλ. ανασκόπηση Charman, 1995²⁸).

Στο σημείο που η καμπύλη απόκρισης προσαρμογής/απαιτού-

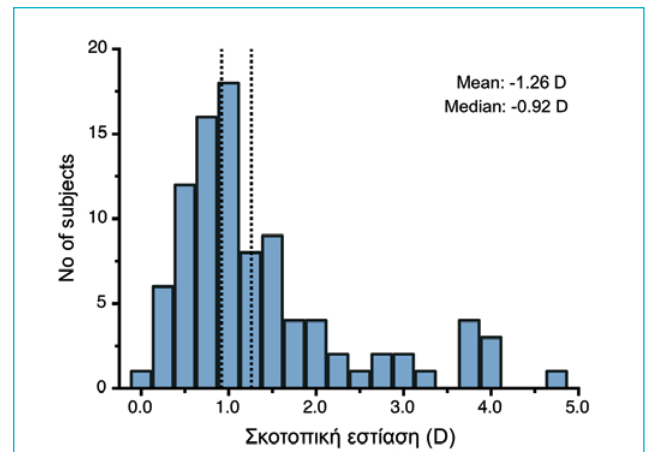


Σχήμα 4. Τυπικές καμπύλες συσχετισμού της προσαρμογής (accommodation response), με την απαιτούμενη προσαρμογή. Είναι προφανές ότι η αντιστοιχία δεν είναι ένα προς ένα (η αντιστοιχία 1:1 περιγράφεται από τη διακεκομμένη γραμμή). Πιο συγκεκριμένα, ο οφθαλμός προσαρμόζει περισσότερο από ό,τι χρειάζεται για μακρινά (υπερ-προσαρμογή) και λιγότερο για κοντινά αντικείμενα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον έναν οφθαλμό ατόμων ηλικίας 24-33 ετών, με τη χρήση ενός Badal οπτομέτρου (για την προβολή ενός γράμματος σε διαφορετικές αποστάσεις) που ενσωματώθηκε σε μια συσκευή ανίχνευσης μετώπου κύματος (COAS, Wavefront Sciences) (από Plainis et al., 2005). Να σημειωθεί ότι τα «σφάλματα» στην προσαρμογή είναι μικρότερα κατά τη διόφθαλμη όραση.

μενης 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 (resting point of accommodation), διότι έχει παρατηρηθεί ότι σε αυτή την απόσταση εστιάζει ο οφθαλμός απουσία επαρκούς οπτικού ερεθίσματος (π.χ. στο απόλυτο σκοτάδι ή σε κενό πεδίο). Επίσης, 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 5), ο μέσος φυσιολογικός οφθαλμός σε κατάσταση «ηρεμίας» γίνεται ελαφρά πιο μυωπικός, κατά περίπου 1,00 - 1,50D, δηλαδή «προσαρμόζει» σε μια απόσταση περίπου 70 - 100cm^{29,30}. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι σε συνθήκες απόλυτου σκοταδιού (απουσία ερεθίσματος), ο οφθαλμός αποκτά μυωπική διάθλαση και επομένως παρουσιάζει δυσκολία να εστιάσει ευκρινώς έναν μακρινό στόχο.

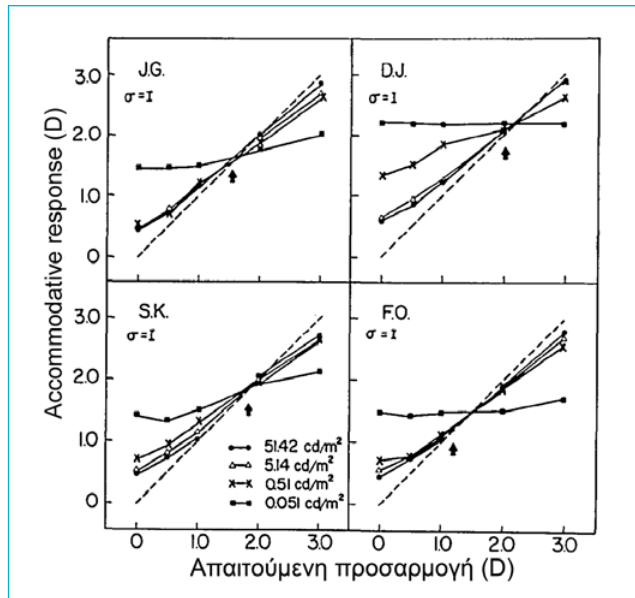
Αυτό το φαινόμενο έχει χαρακτηριστεί παλιότερα ως σκοτοπική εστίαση ή νυκτερινή μυωπία. Στην πραγματικότητα, όμως, κατά τις νυκτερινές συνθήκες δεν επικρατεί απόλυτο σκοτάδι, αλλά «μεσοπικός» φωτισμός, λόγω της παρουσίας περιβαλλοντικού φωτισμού (οδικός φωτισμός, φώτα των αυτοκινήτων, φως από φεγγάρι/αστέρια). Ως αποτέλεσμα, το μέγεθος της νυκτερινής μυωπίας δεν ξεπερνά 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.



Σχήμα 5. Εύρος σκοτοπικής εστίασης σε 48 εξεταζόμενους (96 οφθαλμοί) νεαρής ηλικίας. Η μέση τιμή είναι περίπου -1,25D. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με υπέρυθρο διαθλασίμετρο (Canon R1) σε απόλυτο σκοτάδι.

Επίσης, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η προσαρμογή συνιστά ένα χαρακτηριστικό που «κατευθύνεται» από τα κωνία³¹. Ως εκ τούτου 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). Επίσης, αναμένεται να επηρεαστεί σε οφθαλμικές παθήσεις που επηρεάζουν τα κωνία (π.χ. δυστροφίες κωνίων, νόσος Stargardt).

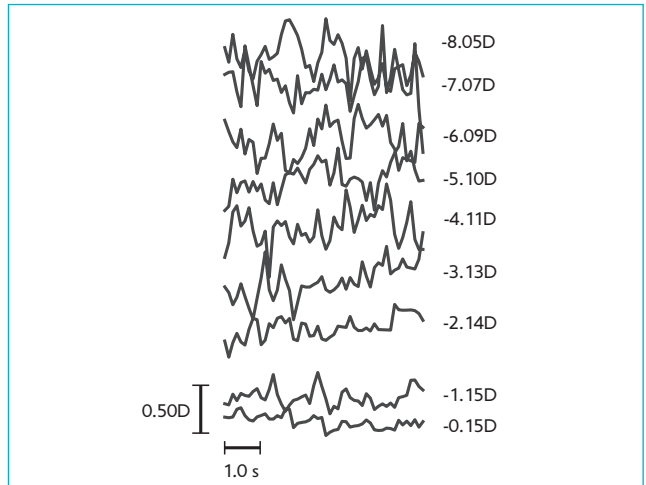


Σχήμα 6. Επίδραση των αλλαγών της φωτεινότητας των ερεθισμάτων (σε cd/m²) στην καμπύλη συσχετισμού προσαρμογής/απαιτούμενης προσαρμογής για 4 ασθενείς. Τα βέλη σημειώνουν την τιμή της σκοτοπικής εστίασης (διάθλαση στο απόλυτο σκοτάδι), η οποία συμπίπτει με το σημείο τονικής προσαρμογής. Είναι εμφανές ότι σε χαμηλές μεσοπικές συνθήκες (0,05cd/m²) δεν υπάρχει μεταβολή της προσαρμογής, αν και αλλάζει η απόσταση των ερεθισμάτων (από Johnson, 1976²⁵).

6. Σταθερότητα της προσαρμοστικής ικανότητας

Κατά την παρατήρηση ενός αντικειμένου σε μια σταθερή απόσταση η συνολική ισχύς του οφθαλμού δεν είναι απολύτως σταθερή. Αντ' αυτού, παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις, που έχουν εύρος που κυμαίνεται μεταξύ 0, 10 και 0,40D, αναλόγως με τα επίπεδα προσαρμογής (Σχήμα 7). Το εύρος των διακυμάνσεων διαφέρει μεταξύ των εξεταζόμενων³² και αυξάνεται όταν το επίπεδο φωτισμού μειώνεται από φωτοπικά σε μεσοπικά επίπεδα³³. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται στην αστάθεια του μηχανισμού της προσαρμογής, δηλαδή στα μηχανικά χαρακτηριστικά του κρυσταλλοειδούς φακού, στη δομή του ακτινωτού μυός και των ινών της ζιννείου ζώνης και στον καρδιακό σφυγμό^{10,34,35}.

Πιστεύεται ότι αυτές οι μικρές αλλαγές προκαλούν παροδικές μεταβολές στην αντίθεση του ειδώλου και με αυτόν τον τρόπο συνεισφέρουν στη βελτιστοποίηση της ποιότητας της εικόνας που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή³⁶⁻³⁸. Ως αποτέλεσμα, μεγαλύτερου εύρους διακυμάνσεις απαιτούνται όταν τα σφάλματα προσαρμογής είναι μεγάλα (κάτι που συμβαίνει σε υψηλά επίπεδα απαιτούμενης προσαρμογής), με σκοπό να εστιάσουν, έστω και παροδικά, το αφεστιασμένο είδωλο στον αμφιβληστροειδή^{23,39}.



Σχήμα 7. Διοπτρικές διακυμάνσεις προσαρμογής για ένα χρονικό διάστημα 6 δευτερολέπτων για διαφορετικά επίπεδα απαιτούμενης προσαρμογής (από το οπτικό άπειρο μέχρι 7.63D). Για μακρινά ερεθίσματα οι διακυμάνσεις παρουσιάζουν το μικρότερο εύρος, το οποίο αυξάνεται όσο ο στόχος πλησιάζει τον οφθαλμό (από Plainis et al., 2005).

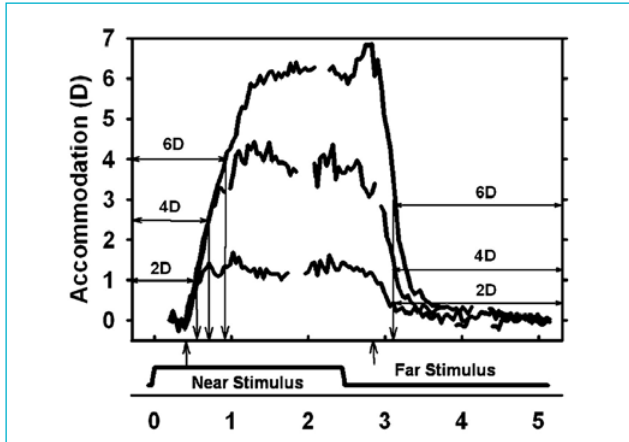
7. Χρόνοι αντίδρασης και απόκρισης

Χρόνος αντίδρασης είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την εμφάνιση του ερεθίσματος μέχρι την έναρξη της απόκρισης της προσαρμογής. Ως χρόνος απόκρισης ορίζεται ο χρόνος που μεσολαβεί από την έναρξη μέχρι τη σταθεροποίηση της απόκρισης (Σχήμα 8). Για ένα ερέθισμα που αλλάζει απότομα απόσταση προσαρμογής (από μακριά σε κοντά), ο χρόνος αντίδρασης είναι περίπου 0,4 δευτερόλεπτα και εξαρτάται από την ηλικία του εξεταζόμενου και όχι από τα χαρακτηριστικά του ερεθίσματος.

Ο χρόνος απόκρισης παραμένει σταθερός και κατά την αποπροσαρμογή (μετακίνηση στόχου από κοντά σε μακριά), αλλά μπορεί να μειωθεί σε περιπτώσεις όπου το ερέθισμα είναι προβλέψιμο, καταδεικνύοντας την παρουσία ενός «μηχανισμού πρόβλεψης» στο σύστημα ελέγχου προσαρμογής⁹. Η καθυστέρηση των 400msec οφείλεται στον χρόνο που απαιτείται για να φθάσει το ερέθισμα, μέσω της οπτικής οδού, στα κέντρα του εγκεφάλου, που είναι υπεύθυνα για την επεξεργασία του οπτικού σήματος και από τον λανθάνοντα χρόνο που μεσολαβεί μέχρι να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός της προσαρμογής (σύσπαση ακτινωτού σώματος, χαλάρωση των ινών της ζιννείου ζώνης και αλλαγές στον φακό).

Ο χρόνος αντίδρασης αντιθέτως εξαρτάται από την απαιτούμενη αλλαγή στην προσαρμογή απόκρισης. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 8, 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 αποπροσαρμογής 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 απο-προσαρμογής. Να τονιστεί ότι κατά τη δίοφθαλμη προσαρμογή ο συνολικός χρόνος είναι σημαντικά μικρότερος.



Σχήμα 8. «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 ερέθισμα 6D). Ο χρόνος αντίδρασης (χρονικό διάστημα μέχρι να αρχίσει η απόκριση) παραμένει σταθερός σε όλες τις περιπτώσεις (περίπου 400msec). Αξιοσημείωτη η παρατήρηση ότι ο χρόνος απόκρισης κατά την απο-προσαρμογή είναι μικρότερος (από Kasthurirangan et al., 2003⁴⁰).

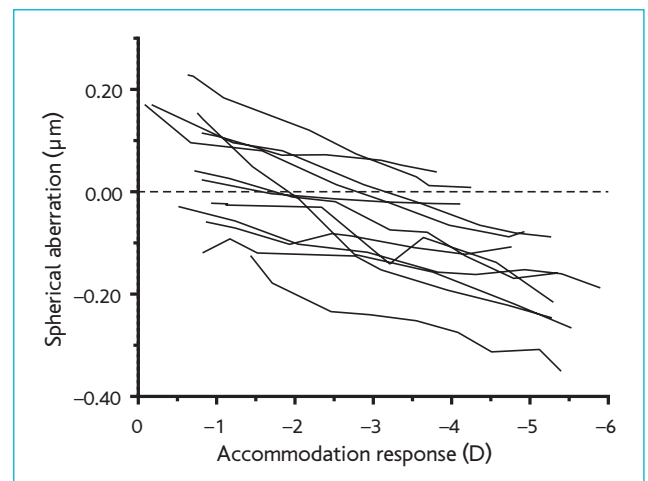
8. Ποιότητα αμφιβληστροειδικής εικόνας κατά την προσαρμογή

Είναι γνωστό ότι ο οφθαλμός, εκτός από τα απλά διαθλαστικά σφάλματα (μυωπία, υπερμετρωπία, αστιγματισμός), όπως κάθε οπτικό σύστημα, παρουσιάζει μια σειρά από εκτροπές υψηλής τάξης (π.χ. σφαιρική εκτροπή, κόμα)¹⁰. 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 αυτών των εκτροπών^{10,41}.

Για παράδειγμα, η παρουσία θετικής σφαιρικής εκτροπής

υποδηλώνει ότι οι ακτίνες φωτός που διαδίδονται από την περιφέρεια της κόρης υπόκεινται σε ισχυρότερη διάθλαση, από τις κεντρικές (παραξονικές) ακτίνες. Ως εκ τούτου, 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 (Σχήμα 9) ότι σε όλες τις περιπτώσεις η σφαιρική εκτροπή κινείται σε πιο αρνητικές τιμές κατά την προσαρμογή⁴²⁻⁴⁴. Ανάλογες μεταβολές συμβαίνουν και για άλλες εκτροπές υψηλής τάξης (π.χ. οριζόντιο και κατακόρυφο κόμα). Πιστεύεται ότι αυτές οφείλονται σε αλλαγές στο σχήμα και στη θέση του κρυσταλλοειδούς φακού κατά την προσαρμογή^{45,46}.



Σχήμα 9. Μεταβολές στη σφαιρική εκτροπή για 13 οφθαλμούς σε σχέση με την προσαρμογή. Κάθε σημείο αποτελεί τον μέσο όρο 50 μετρήσεων και οι μπάρες $\pm 1SD$ (τυπική απόκλιση).

Ο μηχανισμός της προσαρμογής επιτρέπει στους νεαρούς οφθαλμούς τη μεταβολή της εστίασης από μακρινά σε κοντινά αντικείμενα, με σκοπό η εικόνα στον αμφιβληστροειδή να παραμένει ευκρινής για ένα εύρος αποστάσεων. Παρ' όλη τη χρησιμότητά της, η ικανότητα προσαρμογής είναι σπάνια ακριβής (υπο-προσαρμογή/υπερ-προσαρμογή), ενώ παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις στο εύρος της. ■

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Helmholtz HV. Handbuch der Physiologischen Optik. Vol. Volume 1, 1856.
- Rosenfield M, Ciuffreda KJ, Hung GK. The Linearity of Proximally Induced Accommodation and Vergence. Investigative Ophthalmology & Visual Science 1991;32(11):2985-91.
- Hung GK, Ciuffreda KJ, Rosenfield M. Proximal contribution to a linear static model of accommodation and vergence. Ophthalmic and Physiological Optics 1996;16(1):31-41.
- McLin LN, Jr., Schor CM, Kruger PB. Changing size (looming) as a stimulus to accommodation and vergence. Vision Res 1988;28(8):883-98.
- Koh LH, Charman WN. Accommodative responses to anisocommodative targets. Ophthalmic and Physiological Optics 1998;18(3):254-62.
- Jaschinski W. Fixation disparity and accommodation for stimuli closer and more distant than oculomotor tonic positions. Vision

- Research 2001;41(7):923-33.
7. Tsukamoto M, Nakajima T, Nishino J, et al. The binocular accommodative response in uncorrected ametropia. *Optometry and Vision Science* 2001;78(10):763-8.
 8. Toates FM. Accommodation Function of Human Eye. *Physiological Reviews* 1972;52(4):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 Research* 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(3):450-5.
 12. Stone D, Mathews S, Kruger PB. Accommodation and Chromatic Aberration - Effect of Spatial- Frequency. *Ophthalmic and Physiological Optics* 1993;13(3):244-52.
 13. Campbell FW, Westheimer G. Factors influencing accommodation responses of the human eye. *J Opt Soc Am* 1959;49(6):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(5):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(4):299-309, <http://journalofvision.org/4/4/6/>, doi:10.1167/4.4.6.
 17. Schachar RA. Cause and treatment of presbyopia with a method for increasing the amplitude of accommodation. *Ann Ophthalmol* 1992;24(12):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(11):1991-2015.
 19. Atchison DA, Smith G. *Optics of the human eye*. Oxford: Butterworth-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 Science* 1997;74(2):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(2):138-42.
 26. Charman WN, Heron G. On the linearity of accommodation dynamics. *Vision Research* 2000;40(15):2057-66.
 27. Ward PA, Charman WN. Effect of Pupil Size On Steady-State Accommodation. *Vision Research* 1985;25(9):1317-26.
 28. Charman WN. Optics of the eye. In: Bass M, Van Stryland E, Williams D, Wolfe W, eds. *Handbook of Optics*, 2nd edition 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(10):1121-8.
 30. McBrien NA, Millodo M. Differences in Adaptation of Tonic Accommodation With Refractive State. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 1988;29(3):460-9.
 31. Campbell FW. The minimum quantity of light required to elicit the accommodation reflex in man. *J Physiol* 1954;123(2):357-66.
 32. Stark LR, Atchison DA. Pupil size, mean accommodation response and the fluctuations of accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics* 1997;17(4):316-23.
 33. Charman WN, Heron G. Fluctuations in Accommodation - a Review. *Ophthalmic and Physiological Optics* 1988;8(2):153-64.
 34. Collins M, Davis B, Wood J. Microfluctuations of steady-state accommodation and the cardiopulmonary system. *Vision Res* 1995;35(17):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(4):52.
 36. Alpern M. Variability of accommodation during steady fixation at various levels of illuminance. *J Opt Soc Am* 1958;48(3):193-7.
 37. Charman WN, Tucker J. Dependence of accommodation response on the spatial frequency spectrum of the observed object. *Vision Res* 1977;17(1):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(2):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(27):2945-56.
 41. Thibos LN, Hong X, Bradley A, Applegate RA. Accuracy and precision of objective refraction from wavefront aberrations. *J Vis* 2004;4(4):329-51, <http://journalofvision.org/4/4/1/>, doi:10.1167/4.4.1.
 42. Ivanoff A. About the spherical aberration of the eye. *J Opt Soc Am* 1956;46(10):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 Research* 1995;35(3):313-23.
 44. Cheng H, Barnett JK, Vilupuru AS, et al. A population study on changes in wave aberrations with accommodation. *Journal of Vision* 2004;4:272-80, <http://journalofvision.org/4/4/3/>, doi:10.1167/4.4.3.
 45. Drexler W, Baumgartner A, Findl O, et al. Biometric investigation of changes in the anterior eye segment during accommodation. *Vision Res* 1997;37(19):2789-800.
 46. Roorda A, Glasser A. Wave aberrations of the isolated crystalline lens. *J Vis* 2004;4(4):250-61, <http://journalofvision.org/4/4/9/>, doi:10.1167/4.4.9.