

Πρωτόκολλο Διδακτορικής Διατριβής

Στέλλα Γεωργιάδου

Θέμα:

Ανάλυση Γεωμετρικών Παραμέτρων Κερατοειδικής Επιφάνειας με Πολλαπλές Απεικονιστικές Οπτικές Διατάξεις. Συγκριτική Μελέτη Μεταξύ Διατάξεων και Κατανομή Γεωμετρικών Παραμέτρων σε Σχολικό Πληθυσμό Δευτεροβάθμιας και Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης.

Analysis of Corneal Surface Geometric Parameters with Multiple Optical Imaging Devices: Comparative Study between Devices and Distribution of Geometrical Parameters in Secondary and University-level School Population.

Εισαγωγή

Η απεικόνιση του κερατοειδή με οπτικές διατάξεις αποτελεί ουσιαστικό και θεμελιώδες τμήμα τόσο της οπτομετρικής εξέτασης, όσο και της κλινικής καθημερινότητας σε οποιοδήποτε σύγχρονο οφθαλμολογικό κέντρο, είτε για το σκοπό της διάγνωσης της οπτικής λειτουργίας του κερατοειδή, όσο και για το σκοπό του σχεδιασμού μιας ενδεχόμενης διαθλαστικής επέμβασης (laser, καταρράκτης), καθώς και την επακόλουθη παρακολούθηση και εκτίμηση της μετεγχειρητικής εξέλιξης.

Επιπλέον, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την κλινική πράξη στην οφθαλμολογία, η βελτίωση της ευαισθησίας των απεικονιστικών μεθόδων για την ταυτοποίηση των ασθενών με αρχικό στάδιο εκδήλωσης κερατόκωνου, η εκδήλωση του οποίου συνηθώς συμβαίνει σε ηλικίες 15 – 25 ετών. Ο κερατόκωνος περιγράφεται ως μιας εκφυλιστική, μη φλεγμονώδης διαταραχή του κερατοειδούς η οποία χαρακτηρίζεται από εκτασία, λέπτυνση και αυξημένη καμπυλότητα του κερατοειδούς^{19,20,21}, που προκαλεί ανώμαλο αστιγματισμό, συνδέεται με απώλεια της οπτικής οξύτητας και αποτελεί την κύρια αιτία μεταμοσχεύσεων κερατοειδούς.²²

Η τεχνολογία, και σε αυτόν τον τομέα, έχει να προσφέρει πάρα πολλά καινοτόμα στοιχεία. Περίπου 20 χρόνια τώρα, από τα μέσα της δεκαετίας 1990, η Οπτομετρία και η Οφθαλμολογία βρίσκονται μπροστά σε μια διαρκή επανάσταση. Συνέβησαν, σχεδόν ταυτόχρονα, τόσο η εισαγωγή της οπτικής απεικόνισης του κερατοειδή στα κλινικά διαγνωστικά, όσο και η χρήση των laser στη διόρθωση των διαθλαστικών σφαλμάτων. Αν και έχει παρέλθει σημαντικό χρονικό διάστημα, η εξέλιξη των συστημάτων αυτών είναι συνεχής, προσφέροντας διαρκώς στην κλινική πράξη.

Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να μελετήσει ενδελεχώς και να συγκρίνει τέσσερις διαφορετικές και 'καινοτόμες' τεχνολογίες της απεικόνισης του κερατοειδή χιτώνα του οφθαλμού.

Με αυτή τη συγκριτική μελέτη θα προσπαθήσουμε:

A) Μελετώντας τις παραμέτρους που παρέχει κάθε μία, να καταλήξουμε σε συμπεράσματα σχετικά με τις γεωμετρικές παραμέτρους του κερατοειδούς, έτσι όπως μετρώνται από τα τέσσερα αυτά συστήματα.

B) Να ενισχύσουμε την έρευνα σχετικά με τον επιπολασμό του κερατόκωνου στις συγκεκριμένες ηλικιακές ομάδες στον ελληνικό πληθυσμό.

Γ) Να δημιουργήσουμε normative data, αναφορικά με τους κερατοκωνικούς δείκτες, στην ηλικιακή ομάδα 15-25 ετών

Υλικά και Μέθοδος

Απεικονιστικές Διατάξεις που θα Μελετηθούν:

1. Τομογραφική Απεικόνιση με τεχνική Scheimpflug imaging
2. Τομογραφική Απεικόνιση με τεχνική Optical Coherence Tomography (OCT)
3. Τοπογραφική Απεικόνιση πρόσθιας επιφάνειας κερατοειδούς με τεχνική Placido
4. Τοπογραφική Απεικόνιση με τεχνική προβολής κωδικοποιημένων σημείων εκπομπής LED

Οι απεικονιστικές μετρήσεις θα πραγματοποιηθούν στο οφθαλμολογικό και ερευνητικό ινστιτούτο Laservision.gr, στην οδό Τσόχα 15-17, Αθήνα

Πληθυσμός που θα συμμετέχει για τις μετρήσεις θα είναι ηλικίας 15-25 ετών με τυχαία επιλογή:

1. Μαθητές Γυμνασίου – Λυκείου
2. Φοιτητές

Η μελέτη θα διεξαχθεί στο διάστημα μεταξύ Οκτωβρίου 2019 και Ιουνίου 2021. Όλοι οι συμμετέχοντες θα ενημερωθούν για το σκοπό της μελέτης και θα υπογράψουν το αντίστοιχο έντυπο συγκατάθεσης. Μετά την κωδικοποίηση των δεδομένων, η στατιστική ανάλυση θα πραγματοποιηθεί με το στατιστικό πακέτο SPSS Statistics version 21.0. Θα πραγματοποιηθεί έλεγχος για την κανονική κατανομή των μεταβλητών μέσω του Kolmogorov-Smirnov test. Σε μεταβλητές που παρουσιάζουν κανονική κατανομή θα εφαρμοστεί ANOVA test και επί στατιστικής σημαντικότητας θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Tukey και Bonferroni/Dunn, ενώ επί μη κανονικής κατανομής η μέθοδος Mann-Whitney U test. Για τη διερεύνηση της συσχέτισης των μεταβλητών μεταξύ των δύο οφθαλμών θα χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson και Spearman για

μεταβλητές με κανονική και μη κατανομή αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα θεωρούνται στατιστικά σημαντικά όταν η τιμή του p -value < 0.05.

1. Απεικόνιση με Scheimpflug imaging

Η τομογραφική απεικόνιση με **Scheimpflug imaging** βασίζεται σε απεικόνιση (σχεδόν) ολόκληρου του προσθίου ημιμορίου με βάση την εξής γεωμετρική τεχνική: Ο προσανατολισμός του επιπέδου της εστίασης από ένα οπτικό σύστημα (όπως μια φωτογραφική μηχανή) και το επίπεδο του φακού δεν είναι παράλληλο προς το επίπεδο της εικόνας. Συνήθως εφαρμόζεται σε μια πανοραμική κάμερα. Η αρχή έχει το όνομα του αυστριακού στρατιωτικού Theodor Scheimpflug, που το χρησιμοποίησε στην αεροφωτογραφία.

Η πιο διαδεδομένη διάταξη που εφαρμόσε αυτήν την τεχνική στον οφθαλμό είναι η συσκευή Pentacam (Oculus Optikgeräte GmbH, Wetzlar, Germany).¹ Η διάταξη αυτή, που χρησιμοποιείται ευρέως στην κλινική πράξη πάνω από 10 έτη πλέον, έχει αναπροσαρμόσει τα standards στην απεικόνιση του οφθαλμού. Η συσκευή Pentacam βασίζεται σε μια περιστρεφόμενη Scheimpflug κάμερα (χρησιμοποιεί μπλε φως στα 475 nm) που λαμβάνει 25 ή 50 'οπτικές τομές' του κερατοειδή. Οι τομές αυτές δεν είναι άλλο από φωτογραφίες με πολύ καλή εστίαση (βάθος πεδίου) από τον κερατοειδή μέχρι και τον κρυσταλλοειδή φακό. Σε κάθε μία από αυτές αναγνωρίζεται η πρόσθια και η οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδή, καθώς και άλλα ανατομικά στοιχεία, όπως η ίριδα και η πρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού.

Όλες οι τομογραφίες που λαμβάνονται περνούν από το απώτερο σημείο του κερατοειδή (apex). Αυτό θεωρείται και το 'κέντρο' της λήψης. Η επικέντρωση σε αυτό το σημείο γίνεται με καθοδήγηση από τη διάταξη, και μόνο μετά την επίτευξη της σωστής επικέντρωσης ξεκινά η λήψη των τομογραφικών απεικονίσεων.

Η επεξεργασία όλων των στοιχείων αυτών επιτρέπει την τρισδιάστατη αναπαράσταση των επιφανειών του κερατοειδή και του προσθίου θαλάμου, καθώς και εξειδικευμένους δισδιάστατους χάρτες με συγκεκριμένες πληροφορίες κωδικοποιημένες σε χρωματική κλίμακα διαβάθμισης. Η επεξεργασία δίνει χάρτες (που καλύπτουν 9 mm διαμετρικά) όπως τοπογραφίας, κερατομετρίας, αξονικής και εφαιπτομενικής καμπυλομετρίας, βάθος προσθίου θαλάμου, κλπ.

Σε αυτούς τους χάρτες, εκτός από την παχυμετρία, μπορούν να παρουσιαστεί μια μεγάλη ποικιλία πληροφοριών για τον κερατοειδή (ξεχωριστά για την πρόσθια και την οπίσθια επιφάνεια)² και τον πρόσθιο θάλαμο με ειδική διαγνωστική αξία, όπως χάρτες ανύψωσης (elevation) που αποδίδουν τη διαφορά του σχήματος του κερατοειδή από διάφορα πρότυπα σφαιρικής καμπυλότητας,³ χάρτες αξονικής και εφαιπτομενικής καμπυλότητας, και αρκετοί ποιοτικοί και ποσοτικοί δείκτες της ομοιομορφίας της καμπυλότητας του κερατοειδή, που δίνουν πληροφορίες για το στάδιο του κερατόκωνου, καθώς και για τη μετεγχειρητική αξιολόγηση διαθλαστικής χειρουργικής.⁴

Οι συσκευές που βασίζονται στην τεχνολογία Scheimpflug μπορούν να υπολογίσουν με ακρίβεια το σημείο και την καμπυλότητα της κορυφής του κερατοειδή (από συνυπολογισμό όλων των δεδομένων κατά την περιστροφή της κάμερας), ενώ σε συνδυασμό με τους υψομετρικούς χάρτες μπορούν να υπολογίσουν ακριβέστατα τη διαθλαστική ισχύ σε όλη

την έκταση του κερατοειδή. Αυτό συμβαίνει γιατί, με ακριβή τοπογραφία, μπορεί να υπολογιστεί η κλίση με την οποία προσπίπτει μια ακτίνα φωτός στον κερατοειδή, και έτσι να υπολογιστεί η ακριβής διαθλαστική ισχύς χρησιμοποιώντας πλέον το νόμο του Snell και όχι τη σχέση που συνδέει την ακτίνα καμπυλότητας με την ισχύ της επιφάνειας, η οποία ισχύει μόνο προσεγγιστικά.

Ως μειονέκτημα της τεχνολογίας Scheimpflug θεωρείται ότι απαιτείται περιστροφή του οπτικού συστήματος για την καταγραφή των διαδοχικών μεσημβρινών τομών. Κίνηση του ματιού κατά τη διάρκεια της καταγραφής ίσως να επηρεάσει την ακρίβεια των μετρήσεων. Επίσης, είναι ενδεχόμενο να επηρεαστούν οι τιμές από μικρές αδιαφάνειες/συμπυκνώσεις ιστού του κερατοειδή, μιας και το λογισμικό υποθέτει σταθερή τιμή του δείκτη διάθλασης μέσα στον κερατοειδή.

2.Τεχνολογία OCT

Η **τεχνολογία OCT** βασίζεται στη μερική συμβολομετρία. Ένα ανακλώμενο κύμα συμβάλλει ενισχυτικά με ένα 'αναφορικό' αν η διαφορά του οπτικού δρόμου μεταξύ τους είναι μικρότερη από το μήκος συμφωνίας. Χρησιμοποιώντας οπτική πηγή με μεγάλο φασματικό εύρος (super-luminescent source), και άρα μικρό, σχετικά, μήκος συμφωνίας εξασφαλίζεται ότι οι διαφορές οπτικού δρόμου που ανιχνεύονται είναι μικρές. Η διακριτική ικανότητα ενός τέτοιου συστήματος είναι αντίστοιχη αυτής της παραμέτρου, και είναι, με τα σημερινά δεδομένα, της τάξης του 5 μm

Το OCT εφαρμόστηκε από πολύ νωρίς στην απεικόνιση του προσθίου θαλάμου,⁵ πριν γίνει ιδιαίτερα 'δημοφιλές' στην απεικόνιση του βυθού του οφθαλμού. Πρωτοπόρα συσκευή OCT με εφαρμογή στον πρόσθιο θάλαμο θεωρείται το Visante (Carl Zeiss Meditec). Το Visante ήταν η πρώτη συσκευή βασισμένη στην τεχνολογία OCT που παρείχε δισδιάστατους παχυμετρικούς χάρτες του κερατοειδή.

Οι χάρτες αυτοί είναι αποτέλεσμα εσωτερικού υπολογισμού (interpolation) από δεδομένα παχυμετρίας που προκύπτουν από ένα μεγάλο αριθμό (τουλάχιστον 8) ανεξάρτητων μεσημβρινών 'τομών' (A-scans) που όλες διαπερνούν το κέντρο του κερατοειδή. Το μειονέκτημα εδώ είναι ότι μεσολαβεί χρονικό διάστημα μεταξύ λήψης διαφορετικών τομών (μεγαλύτερο στα συστήματα που βασίζονται στην τεχνική time domain OCT), και έτσι είναι πιθανό να επηρεαστούν από μικρές κινήσεις του οφθαλμού.

Σήμερα υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από συσκευές OCT για την απεικόνιση του προσθίου θαλάμου, οι οποίες πλέον εφαρμόζουν την τεχνική του Fourier domain signal processing OCT, για αυξημένη διακριτική ικανότητα και ταχύτητα λήψης δεδομένων. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνεται το Maestro (Topcon, Tokyo, Japan), το Casia SS-1000 (Tomey, Nagoya, Japan), το Spectralis (Heidelberg Engineering GmbH, Heidelberg, Germany) και το RtVue-100 (Optovue, Fremont, CA).

Πάχος Επιθηλίου

Όπως και το συνολικό πάχος του κερατοειδή, έτσι και το πάχος του επιθηλίου δεν είναι σταθερό σε όλη του την έκταση. Το επιθήλιο έχει την τάση να 'επικαλύπτει' τοπικές ανωμαλίες του στρώματος. Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι η μελέτη του πάχους του επιθηλίου αναδεικνύεται ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα, καθώς μπορεί να αποτελέσει ένδειξη για πρώιμο κερατόκωνο.⁶ Πρωτοπόρα συσκευή με δυνατότητα απεικόνισης του επιθηλίου

με μορφή δισδιάστατου χάρτη παχυμετρίας ήταν το Ar-temis, που χρησιμοποιεί υπερήχους υψηλής συχνότητας.⁷

Σήμερα στην κλινική πράξη εφαρμόζεται και στην απεικόνιση του επιθηλίου το OCT προσθίου θαλάμου. Πρωτοπόρα συσκευή σε αυτόν τον τομέα είναι το RVue-100 (Optovue)⁸ που επιτρέπει την αυτόματη αναγνώριση των στρωμάτων (από το λογισμικό) του κερατοειδή με ακρίβεια καλύτερη από 3 μm, και με λήψη δεδομένων (8 A-scans) σε χρόνο λιγότερο από 1 s.

Η έλευση αυτής της νέας δυνατότητας (Νοέμβριος 2012) στην κλινική πράξη έχει επιτρέψει μια μινι-επανάσταση στην διαφορική διάγνωση παθήσεων στον κερατοειδή, ακριβώς επειδή μέχρι τώρα κάθε απεικόνιση συμπεριελάμβανε αναγκαστικά και το επιθήλιο, το οποίο είναι πιθανό να 'συγκάλυπτε' ανωμαλίες στο υποκείμενο στρώμα. Έτσι, για παράδειγμα, μπορεί να είναι γενικά παχύ, ως αποτέλεσμα βιοτεκτονικής αστάθειας σε έναν κερατόκωνο, αλλά να είναι κατά πολύ λεπτότερο από τα 'συνήθη' 50 μm, ακριβώς στο λεπτότερο και πιο προεξέχων σημείο του κερατοειδή, στο οποίο αντιστοιχεί ο κώνος

Η χαρτογράφηση του επιθηλίου μπορεί να δώσει ενδεικτικές προειδοποιήσεις για πιθανή ύπαρξη ξηροφθαλμίας,⁹ να βοηθήσει στην παρακολούθηση μετεγχειρητικής αποκατάστασης μετά από μεταμόσχευση κερατοειδή,¹⁰ ή επεμβάσεις καταρράκτη¹¹ ή LASIK. Στον κερατοκωνικό οφθαλμό, το επιθήλιο είναι γενικά πιο παχύ, αλλά λεπτότερο σε σημεία που το υποκείμενο στρώμα είναι υπερυψωμένο.¹²

Καμπυλότητα Κερατοειδή

Η οπτική ισχύς του κερατοειδή είναι άμεσα εξαρτώμενη από την τιμή της ακτίνας καμπυλότητας της εξωτερικής του επιφάνειας, αλλά και σε μικρότερο βαθμό, της εσωτερικής. Επιπλέον, η ακτίνα καμπυλότητας έχει πολύ μεγάλη σημασία στην εφαρμογή φακών επαφής, όσο και στον έλεγχο πιθανών μεταβολών λόγω της χρήσης φακών επαφής. Γι' αυτούς τους λόγους, η μέτρηση της ακτίνας καμπυλότητας του κερατοειδή έχει ιδιαίτερη σημασία στην οφθαλμολογία, την οπτομετρία, και γενικότερα, στην οπτική του οφθαλμού.

Ο υπολογισμός της πραγματικής οπτικής ισχύος του κερατοειδή πρέπει λοιπόν να περιλαμβάνει τις μετρήσεις δύο καμπυλοτήτων, της εξωτερικής και της εσωτερικής κερατοειδικής επιφάνειας (και, ακόμα πιο αυστηρά, και του κερατοειδικού πάχους, που, γνωρίζουμε ότι δεν είναι σταθερό).

3. Τοπογραφία Κερατοειδή τύπου Placido

Η τεχνολογία αυτή αποτελεί από την αρχή της δεκαετίας του '90, την πρώτη προσπάθεια απεικόνισης της κερατοειδικής επιφάνειας και ανάλυσής της με βοήθεια λογισμικού. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στις ανακλαστικές ιδιότητες της πρόσθιας κερατοειδικής επιφάνειας. Ο τοπογράφος κερατοειδή (corneal topographer ή photokeratoscoper ή videokeratographer) είναι, στην ουσία, ένα πολύ πιο λεπτομερές και ικανό κερατόμετρο. Όπως και στα κερατόμετρα, ο τοπογράφος χρησιμοποιεί τις ανακλάσεις των ειδώλων από τη δακρυϊκή στοιβάδα της επιφάνειας του κερατοειδή για να υπολογίσει την ακτίνα καμπυλότητας και, στη συνέχεια δευτερευόντως (με βάση το νόμο του Snell) τη διαθλαστική του ισχύ. Τα είδωλα δεν είναι πλέον δύο 'στόχοι' που πρέπει να έρθουν σε επαφή, αλλά μια σειρά από ομόκεντροι δακτύλιοι (mires, από το λατινικό mirari, to look at) Placido. Το όνομά τους οφείλεται στον Πορτογάλο Οφθαλμίατρο António Plácido da Costa,

που πρώτος χρησιμοποίησε έναν δίσκο με εναλλασσόμενους μαύρους και λευκούς δακτυλίους για να μελετήσει το σχήμα του κερατοειδή.

Το μεγάλο του πλεονέκτημα, σε σχέση με το κερατόμετρο, είναι ότι λαμβάνει ταυτόχρονα μετρήσεις από μια κατά πολύ μεγαλύτερη κερατοειδική επιφάνεια για μια πιο λεπτομερή και πλήρη εικόνα. Ο τοπογράφος, δηλαδή, μπορεί να δώσει έναν χάρτη καμπυλοτήτων που καλύπτουν όλη την περιοχή του κερατοειδή, εκτός των περιοχών που καλύπτονται από τα βλέφαρα, και να επιτρέψει έτσι την καταγραφή των τιμών της καμπυλότητας σε δύο διαστάσεις.

Τα συστήματα τοπογραφίας κερατοειδή¹³ μπορούν να υπολογίσουν όχι μόνο τις καμπυλότητες, αλλά και τον αστιγματισμό σε διάφορες ζώνες, την ασφαιρικότητα σε κάθε μεσημβρινό, και τη συμμετρία (ή την ασυμμετρία) του και πολλούς άλλους δείκτες.

Πρωτοπόρες συσκευές ήταν η TMS -1, ηPKS-100 (Nidek, Japan)¹⁴ και η CMS-1 (Corneal Modeling System, Computed Anatomy, Inc. NY). Σήμερα υπάρχουν πολλές σύγχρονες τοπογραφικές συσκευές, όπως η CM02 (CSO), Keratograph 5 (Oculus), MM1 Magellan Mapper Corneal Topographer (Nidek, Fremont, CA), Atlas 9000 (Carl Zeiss Meditec) κλπ.

Ο Stephen D. Klyce ήταν αυτός που ανέπτυξε τις μαθηματικές μεθόδους της σύγχρονης τοπογραφίας κερατοειδή (corneal topography) με βασικό ότι πρόβλεψε ότι το κέντρο καμπυλότητας κάθε περιοχής μπορεί να βρίσκεται ακόμα και εκτός του οπτικού άξονα. Στη συνέχεια, μαζί με τον Leo J. Maguire,¹⁵ πρότεινε την απεικόνιση των καμπυλοτήτων του κερατοειδή με διαγράμματα ισοϋψών υιοθετώντας τους έγχρωμους χάρτες με κωδικοποιημένη χρωματική κλίμακα, με τρόπο ανάλογο της τοπογραφίας εδάφους.

Παρά το ότι η Placido disk τοπογραφία αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, έχει ορισμένα μειονεκτήματα:

Το λογισμικό υποθέτει ότι όλα τα είδωλα των ανακλάσεων των δακτυλίων Placido βρίσκονται σε ένα επίπεδο, αυτό του αισθητήρα του τοπογράφου. Όμως ο κερατοειδής δεν είναι επίπεδος αλλά καμπύλος, και έτσι τα διάφορα σημεία του αντιστοιχούν σε διάφορες αξονικές θέσεις και τα αντίστοιχα είδωλα αντιστοιχούν σε διαφορετικές αποστάσεις, και επιπλέον δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Άρα, κάποια είδωλα δακτυλίων απεικονίζονται στον αισθητήρα ελαφρώς αφεστιασμένα και το λογισμικό δεν μπορεί να τα καταγράψει με ακρίβεια για να τα επεξεργαστεί.

Το λογισμικό βασίζεται στην υπόθεση κατά το ανασχεδιασμό της κερατοειδικής επιφάνειας ότι η κορυφή του κερατοειδή (apex) και το μετωπικό σημείο του (vertex) ταυτίζονται με τον οπτικό άξονα του οργάνου (που ευθυγραμμίζεται με τον άξονα προσήλωσης, και προσεγγίζει τη γραμμή θέασης). Ενώ αυτό είναι μια καλή προσέγγιση σε φυσιολογικούς κερατοειδείς, δεν ισχύει σε ιδιαίτερα ασύμμετρους κερατοειδείς.

Μερικά ακόμα, πιο ...μαθηματικά μειονεκτήματα της Placido disk τοπογραφίας είναι τα εξής: Ο τοπογράφος δεν μπορεί να υπολογίσει άμεσα το σχήμα του κερατοειδή, αλλά υπολογίζει μόνο τις καμπυλοτήτες του, βασιζόμενος στη μεγέθυνση των ανακλώμενων δακτυλίων και τη σύγκρισή της με ένα γνωστό σχήμα (συ-νήθως οι τοπογράφοι βαθμονομούνται με μια σφαίρα ακτίνας καμπυλότητας 7.8 mm -όσο η μέση ακτίνα καμπυλότητας του εμμετρικού κερατοειδή). Στη συνέχεια υπολογίζεται το σχήμα του κερατοειδή από σύγκριση των καμπυλοτήτων που μετρήθηκαν με μια επιφάνεια βέλτιστης εφαρμογής (best fit surface).

Αυτός ο τρόπος υπολογισμού έχει ορισμένα μειονεκτήματα. Είναι ανεπαρκής σε ασύμμετρους κερατοειδείς (π.χ. κερατόκωνος), και επειδή βασίζεται σε μια σειρά από υποθέσεις, πολλές φορές δεν μπορεί να διαχωρίσει αν ένα, π.χ. σημείο με ιδιαίτερα μεγάλες καμπυλότητες είναι ανύψωση ή εμβάθυνση. Έτσι το λογισμικό είναι πιθανό να αστοχήσει στον ακριβή σχεδιασμό της επιφάνειας.¹⁶ Οι συσκευές βασισμένες στις τεχνολογίες Scheimpflug imaging ή OCT, από την άλλη μεριά, κάνουν απ' ευθείας μέτρηση των υψομετρικών δεδομένων και είναι έτσι απαλλαγμένες από τέτοια σφάλματα.

Η Placido disk τοπογραφία, καθώς βασίζεται στην ανάκλαση ομόκεντρων δακτυλίων για να μετρήσει την καμπυλότητα του κερατοειδή, δεν μπορεί να δώσει πραγματική μέτρηση καμπυλότητας στο κέντρο, αλλά μόνο υπολογισμένη (interpolated) από τα υπόλοιπα δεδομένα. Αυτό συμβαίνει, γιατί οι μετρήσεις γίνονται στα όρια των δακτυλίων, και στο γεωμετρικό κέντρο του κερατοειδή που δεν υπάρχει δακτύλιος, γιατί υπάρχει η κάμερα καταγραφής εκεί, δεν υπάρχει μέτρηση. Έτσι ο υπολογισμός της καμπυλότητας στο κεντρικό σημείο μπορεί να μην είναι πάντα σωστός. Το ίδιο συμβαίνει και για τον υπολογισμό (interpolated) καμπυλοτήτων σε «νεκρές» περιοχές που δεν υπάρχει μέτρηση (πχ ξηρό οφθαλμό, κάλυψη από βλέφαρα)

Επίσης λόγω της αντανάκλασης των ειδώλων των ομόκεντρων κύκλων στη δακρυϊκή στοιβάδα, η ακρίβεια της μέτρησης επηρεάζεται από την ποιότητα των δακρύων

Τέλος, επειδή η διάταξη των δακτυλίων είναι ομόκεντρα και προφανώς συμμετρική περιστροφικά, είναι πιθανόν να μην μπορούν να αναγνωριστούν παραμορφώσεις που 'κινούνται' μόνο εφαπτομενικά, κατά μήκος δηλαδή των ανακλώμενων δακτυλίων, παρά μόνο ακτινικά, κάθετα στους δακτυλίους (skew ray error).¹⁷

4. Εναλλακτική Τοπογραφία Προβολής Πλέγματος Σημείων

Στην προσπάθεια να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα της τοπογραφίας Placido, έχουν προταθεί εναλλακτικοί τοπογράφοι.¹⁸ Ένας από τους πιο σύγχρονους τέτοιους τοπογράφους βασίζεται σε ανάκλαση ενός συγκεκριμένου πλέγματος κατάλληλα διατεταγμένων σημειακών πηγών (σχήμα 10-66γ), που είναι αρκετά πυκνά διατεταγμένοι, αλλά ταυτόχρονα χρωματικά κωδικοποιημένοι. Πρόκειται για τον τοπογράφο Cassini (i-Optics, the Hague, Netherlands).

Αντί για μια σειρά από ομόκεντρους δακτυλίους Placido, το σύστημα προ-βάλλει περίπου 700 σημειακές πηγές από light emitting diodes (LED), που είναι ομαδοποιημένες σε 7 τριγωνικές διατάξεις σε έναν κώνο. Όπως και στην τοπογραφία Placido, και εδώ ο κερατοειδής είναι ένα κάτοπτρο. Η διαφορά είναι ότι αναζητείται όχι η μεγέθυνση ενός ειδώλου, αλλά η γωνία ανάκλασης από συγκεκριμένο σημείο εκπομπής, γίνεται δηλαδή μια ιχνηλάτηση της πορείας των ακτίνων μετά την ανάκλασή τους από τον κερατοειδή. Το σήμα της διάχυτης ανάκλασης από κάθε ένα σημείο ξεχωριστά καταγράφεται και η θέση του αναλύεται σε σχέση με τα άμεσα συσχετισμένα, με βάση μια χρωματική κωδικοποίηση. Από τον υπολογισμό της γωνίας ανάκλασης υπολογίζεται η εφαπτομενική καμπυλότητα του κερατοειδή.

Αποτελέσματα

Η λεπτομερής μελέτη του κερατοειδούς χιτώνα του ανθρώπινου οφθαλμού, με μερικές από τις πιο σύγχρονες τεχνολογίες σε παγκόσμιο επίπεδο

- Θα συμβάλλει στη βελτίωση των παραμέτρων και των δεικτών που χρησιμοποιούνται στην κλινική εφαρμογή και αφορούν τον κερατοειδή
- Με τη μελέτη των τοπογραφικών χαρτών στη συγκεκριμένη ηλικιακή ομάδα τυχαίου ελληνικού πληθυσμού, θα ενισχυθεί η έρευνα που συντελείται για παθήσεις όπως ο κερατόκωνος και αφορά την πρόληψη ώστε να μην εξελιχθεί. Αυτό αποκτά βαρύνουσα σημασία ειδικά για τη χώρα μας όπου η πάθηση αυτή εμφανίζεται σε ιδιαίτερα αυξημένα ποσοστά.

Αναφορές

¹ Rajeev Jain, SPS Grewal. Pentacam: Principle and Clinical Applications. *Journal of Current Glaucoma Practice*. 2009;3(2):20-32.

² Gilani F, Cortese M, Ambrósio RR Jr, Lopes B, Ramos I, Harvey EM, Belin MW. Comprehensive anterior segment normal values generated by rotating Scheimpflug tomography. *J Cataract Refract Surg*. 2013;39(11):1707-12.

³ Swartz T, Marten L, Wang M. Measuring the cornea: the latest developments in corneal topography. *Curr Opin Ophthalmol*. 2007;18(4):325-33.

⁴ Kanellopoulos AJ, Asimellis G. Revisiting keratoconus diagnosis and progression classification based on evaluation of corneal asymmetry indices, derived from Scheimpflug imaging in keratoconic and suspect cases. *Clin Ophthalmol*. 2013;7:1539-48

⁵ Izatt JA, Hee MR, Swanson EA, Lin CP, Huang D, Schuman JS, Puliafito CA, Fujimoto JG. Micrometer-scale resolution imaging of the anterior eye in vivo with optical coherence tomography. *Arch Ophthalmol*. 1994;112(12):1584-9.

⁶ Kanellopoulos AJ, Aslanides IM, Asimellis G. Correlation between overall epithelial thickness in normal corneas, ectatic and ectatic previously treated with CXL corneas. Can overall epithelial thickness become a very early ectasia prognostic factor? *Clin Ophthalmol*. 2012;6:789-800.

⁷ Reinstein DZ, Silverman RH, Coleman DJ. High-frequency ultrasound measurement of the thickness of the corneal epithelium. *Refract Corneal Surg*. 1993;9(5):385-7.

⁸ Li Y, Tan O, Brass R, Weiss JL, Huang D. Corneal epithelial thickness mapping by Fourier-domain optical coherence tomography in normal and keratoconic eyes. *Ophthalmology*. 2012;119(12):2425-33.

⁹ Kanellopoulos AJ, Asimellis G. In vivo 3-dimensional corneal epithelial thickness mapping as an indicator of dry eye: preliminary clinical assessment. *Am J Ophthalmol*. 2014;157(1):63-68.e2

¹⁰ Kanellopoulos AJ, Asimellis G. Anterior-Segment Optical Coherence Tomography Investigation of Corneal Deturgescence and Epithelial Remodeling After DSAEK. *Cornea*. 2014;33(4):340-8.

¹¹ Kanellopoulos AJ, Asimellis G. Transient Epithelial Remodeling Following Cataract Surgery: Three-Dimensional Investigation with Anterior-Segment Optical Coherence Tomography. *J Refract Surg*. 2014;30(5):348-53.

-
- ¹² Kanellopoulos AJ, Asimellis G. Anterior segment optical coherence tomography - assisted topographic corneal epithelial thickness distribution imaging of a keratoconus patient. *Case Rep Ophthalmol* 2013; 4(1):74-8.
- ¹³ Bogan SJ, Waring GO, Ibrahim O, et al. Classification of normal corneal topography based on computer-assisted videokeratography. *Arch Ophthalmol* 108:945–949, 1990
- ¹⁴ Warnicki JW, Rehkopf PG, Curtin DY, Burns SA, Arffa RC, Stuart JC. Corneal topography using computer analyzed rasterstereographic images. *Appl Opt.* 1988;27(6):1135-
- ¹⁵ Maguire LJ, Singer DE, Klyce SD. Graphic presentation of computer-analyzed keratoscope photographs. *Arch Ophthalmol.* 1987;105(2):223-30.
- ¹⁶ Rand RH, Howland HC, Applegate RA. Mathematical model of a Placido disk keratometer and its implications for recovery of corneal topography. *Optom Vis Sci.* 1997;74(11):926-30.
- ¹⁷ Snellenburg JJ, Braaf B, Hermans EA, van der Heijde RG, Sicam VA. Forward ray tracing for image projection prediction and surface reconstruction in the evaluation of corneal topography systems. *Opt Express* 2010;18:19324–38.
- ¹⁸ Vos FM, van der Heijde RGL, Spoelder HJW, van Stokkum IHM, Groen FCA. A new instrument to measure the shape of the cornea based on pseudorandom color coding. *IEEE Trans Instrum Meas* 1997;46:794–7.
19. Gatinel D, Saad A. The challenges of the detection of subclinical keratoconus at its earliest stage. *Int J Kerat Ectatic Dis.* 2012;1:36–43.
20. Krachmer JH, Feder RS, Belin MW. Keratoconus and related noninflammatory corneal thinning disorders. *Surv Ophthalmol.* 1984;28(4):293–322.
21. Belin MW, Asota IM, Ambrosio R, Jr, Khachikian SS. What's in a name: keratoconus, pellucid marginal degeneration, and related thinning disorders. *Am J Ophthalmol.* 2011;152(2):157–162.
22. Jones-Jordan LA, Walline JJ, Sinnott LT, Kymes SM, Zadnik K. Asymmetry in keratoconus and vision-related quality of life. *Cornea.* 2013;32(3):267–272.