

Τοπογραφία κερατοειδούς

Η. Νάκος^{1,2}, Δ. Αλμαλιώτης¹, Σ. Καλαμπαλίκης, Α. Δημητρίου³

Περίληψη

Ανασκοπική παρουσίαση της τοπογραφίας κερατοειδούς ως διαγνωστικής μεθόδου στην οφθαλμολογία με στόχο την παρουσίαση του απεικονιστικού της προφίλ και την ερμηνεία της.

Λέξεις κλειδιά: κερατοειδή τοπογραφία, χάρτες placidos's disk, Pentacam, Scheimpflug, κερατόκωνοι, φακοί επαφούς, PRK, Lasik

1. Εργαστήριο Πειραματικής Οφθαλμολογίας Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη

2. Οφθαλμολογική Κλινική, 424 ΓΣΝΕ, Θεσσαλονίκη

3. Οφθαλμολογική κλινική Γ. Νοσοκομείου Καβάλας

Corresponding author: D. Almaliotis

E-mail: almaliotis_diamantis@yahoo.gr

Οι συγγραφείς δεν έχουν κανένα εμπορικό ενδιαφέρον.

Εισαγωγή

Η τοπογραφία γενικά είναι η επιστήμη που απεικονίζει λεπτομερώς μία επιφάνεια.

Η κερατοτοπογραφία ή τοπογραφία κερατοειδούς (corneal topography, photokeratoscopy ή videokeratography) (Εικόνα 1) είναι μία μη επεμβατική, ανώδυνη, γρήγορη και ακριβής απεικονιστική τεχνική χαρτογράφησης του κερατοειδούς χιτώνα του οφθαλμού.

Ενώ το κερατόμετρο JAVAL (Εικόνα 2) μετρά την ακτίνα καμπυλότητας λαμβάνοντας υπόψη τέσσερα κεντρικά σημεία σε απόσταση τριών¹⁻³ χιλιοστών, η τοπογραφία επεκτείνει το εύρος μέτρησης σ' ένα πλέγμα χιλιάδων σημείων που σαρώνουν το σύνολο του κερατοειδούς υπολογίζοντας και τις περιφερικές καμπυλότητες. Είναι απεικονιστική μέθοδος και ως εκ τούτου είναι εύκολα επαναλήψιμη και με συγκρίσιμα αποτελέσματα.



Εικόνα 1: Τοπογραφία Κερατοειδούς



Εικόνα 2: Κερατόμετρο JAVAL

Χρησιμοποιείται ευρέως:

Α. Στον προσδιορισμό της διάθλασης, ιδιαίτερα σε δύσκολες περιπτώσεις.

Β. Στην εφαρμογή φακών επαφής (μαλακών, ημί-σκληρων ή σκληρικών).

Γ. Στη διάγνωση, παρακολούθηση και αντιμετώπιση του κερατοκώνου¹ της διαφανούς περιφερικής λέπτυνσης (pellucid marginal degeneration) και της κερατόσφαιρας (ενδοκερατικοί δακτύλιοι, cross-linking), σε κερατεκτασίες και στην παρακολούθηση της μεταβολής του αστιγματισμού σε τραύματα ή παθήσεις όπως η περιφερική κερατολέπτυνση ή νόσος του Terrien. Ο κερατόκωνος, για παράδειγμα, ορίζεται ως μη φλεγμονώδης προοδευτική λέπτυνση του κερατοειδούς που προκαλεί ανώμαλο αστιγματισμό, μυωπία, κωνική προεξοχή του κερατοειδούς κατώτερα, και μειωμένη ποιότητα της όρασης. Με τα σύγχρονα ψηφιοποιημένα συστήματα και με τη συνεχή εξέλιξη των λογισμικών δεν λαμβάνονται μόνο οι κερατομετρικές ενδείξεις όπως με το κερατόμετρο Javal αλλά και παράμετροι όπως η καμπυλότητες σε όλη την κερατοειδική έκταση,

η πρόσθια και οπίσθια ανύψωση², το πάχος του κερατοειδούς και το βάθος του προσθίου θαλάμου³.

Δ. Στις διαθλαστικές χειρουργικές επεμβάσεις (PRK, LASIK) τόσο προεγχειρητικά για την ακριβή προσδιορισμό της διάθλασης, την εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό του excimer laser, τη διάγνωση κλινικού ή υποκλινικού κερατοκώνου ή άλλων καταστάσεων που αποτελούν πιθανές αντενδείξεις όσο και για την μετεγχειρητική παρακολούθηση των ασθενών. Η ραγδαία αύξηση του αριθμού των διαθλαστικών επεμβάσεων που πραγματοποιούνται τη σημερινή εποχή παγκοσμίως έχει κάνει την κερατοπογραφία ιδιαίτερα δημοφιλή μεταξύ των οφθαλμολογικών εξετάσεων.

Ε. Στις μεταμοσχεύσεις του κερατοειδούς κυρίως μετεγχειρητικά.

ΣΤ. Στη χειρουργική επέμβαση του καταρράκτη για τον υπολογισμό της διοπτρικής ισχύος του ενδοφακού και στη λήψη απόφασης για ένθεση τορικού ενδοφακού (ακριβής καθορισμός του άξονα και της τιμής του αστιγματισμού).

Ιστορική Αναδρομή

Το 1619 ο Schneider έδωσε την πρώτη ακριβή περιγραφή της ανατομίας του οφθαλμού και του σχήματος του κερατοειδούς χρησιμοποιώντας γυάλινες μπάλες γνωστής καμπυλότητας⁴.

Έπειτα χρησιμοποιήθηκαν διάφορα εργαλεία μελέτης του κερατοειδούς όπως το κερατόμετρο, το οφθαλμόμετρο, το φωτοκερατοσκόπιο και ο δίσκος του Placido.

Η τοπογραφία του κερατοειδούς γεννήθηκε το 1880, όταν ο Πορτογάλος οφθαλμίατρος Antonio Placido παρήγαγε τις αντανάκλασεις του δίσκου που φέρει το όνομά του (Placido's disk, δίσκος με εναλλασσόμενους άσπρους και μαύρους δακτυλίους) στον κερατοειδή.

Ο Javal Louis, επίσης πρωτοπόρος στο χώρο τη δεκαετία του 1880 και πατέρας του κερατομέτρου, ενσωμάτωσε τους δακτυλίους στο οφθαλμόμετρό του προσθέτοντας ένα μεγεθυντικό φακό. Επίσης πρότεινε τη φωτογράφιση της παραγόμενης εικόνας και τη διαγραμματική παράστασή της ώστε να επιτραπεί η ανάλυσή της σε δεύτερο χρόνο.

Το 1896, ο Allvar Gullstrand ενσωματώνει το δίσκο στο οφθαλμοσκόπιο του. Έτσι χρησιμοποιώντας ένα μικροσκόπιο εξετάζει τις φωτογραφίες του κερατοειδούς και έτσι ήταν σε θέση να υπολογίσει την καμπυλότητα μέσω ενός αριθμητικού αλγορίθμου. Επειδή ο δίσκος του Placido ήταν επίπεδος η ακριβειά του για τη μελέτη της περιφέρειας του κερατοειδούς ήταν ελατ-

τωμένη.

Στη δεκαετία του 1950, η εταιρεία Wesley Jessen έκανε χρήση ενός καμπύλου μολύ για να ισοσταθμίσει την παραπάνω αδυναμία. Επίσης, η καμπυλότητα του κερατοειδούς θα μπορούσε να προσδιοριστεί από τη σύγκριση των φωτογραφιών των δακτυλίων με τυποποιημένες εικόνες.

Στη δεκαετία του 1980, φωτογραφίες των προβαλλόμενων δακτυλίων στον κερατοειδή ψηφιοποιήθηκαν με το χέρι και στη συνέχεια αναλύθηκαν με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Σύντομα ακολούθησε αυτοματοποίηση της διαδικασίας με τη χρήση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής και την άμεση εισαγωγή των δεδομένων σ' ένα υπολογιστή.

Στη δεκαετία του 1990, τα συστήματα τοπογραφίας έγιναν εμπορικά διαθέσιμα από μεγάλο αριθμό προμηθευτών.

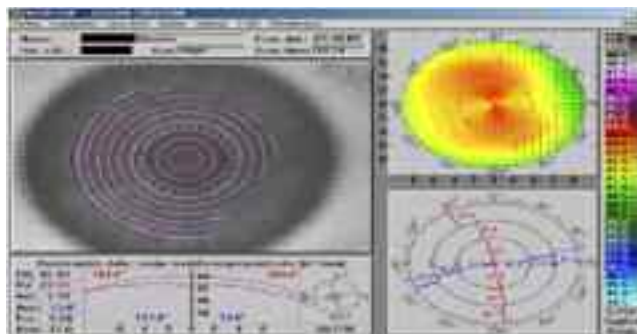
Το πρώτο αυτόματο σύστημα ήταν το Corneal Modeling System (CMS-1 που αναπτύχθηκε από την Computed Anatomy, Inc. in New York City, υπό την καθοδήγηση του Martin Gersten και μια ομάδα χειρουργών στο Eye and Ear Infirmary της Νέας Υόρκης. Η τιμή των πρώτων μηχανημάτων ήταν αρκετά υψηλή (περίπου \$ 80.000) με αποτέλεσμα η χρήση τους να περιορίζεται μόνο στην έρευνα. Με την πάροδο του χρόνου οι τιμές μειώθηκαν σημαντικά κάνοντας την κερατοτογραφία προσιτή για το σύνολο των ασθενών του σύγχρονου κόσμου.

Τα σύγχρονα συστήματα τοπογραφίας κερατοειδή μπορούν να υπολογίσουν τις καμπυλότητες και τον αστιγματισμό σε διάφορες ζώνες, την ασφαιρικότητα ανά μεσημβρινό, και τη συμμετρία (ή την ασυμμετρία) του. Με εφαρμογή των τεχνικών σάρωσης σχισμής (slit-scanning)^{5,6} και Scheimpflug imaging μπορούμε να έχουμε παχυμετρικά, υψομετρικά, και καμπυλομετρικά στοιχεία όλου του κερατοειδή, όχι μόνο της πρόσθιας αλλά και της οπίσθιας επιφάνειάς του.

Αρχές λειτουργίας

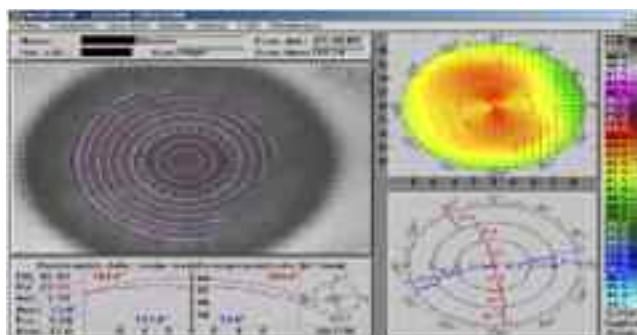
Τοπογραφία Placido

Η πλειοψηφία των τοπογραφικών συσκευών βασίζεται στην τοπογραφία με βάση το δίσκο του Placido (Εικόνα 3,4). Στηρίζονται στην ίδια αρχή με αυτή του κερατόμετρου Javal, δηλαδή από τη μεγέθυνση της κερατοειδικής ανάκλασης υπολογίζεται η καμπυλότητα του κερατοειδούς, με τη διαφορά ότι η τοπογραφία μπορεί να σαρώσει μεγαλύτερη έκταση και όχι μόνο τα κεντρικά 3mm.



Εικόνα 3: Τοπογραφία με βάση τον δίσκο του Placido. Απεικόνιση με το σύστημα WaveLight® ALLEGRO Topolyzer σε μύωπα. Αριστερά πάνω: απεικόνιση δακτυλίων στον κερατοειδή,

Δεξιά πάνω: καμπυλομετρικός χρωματικός χάρτης, Αριστερά κάτω: Κερατομετρικές ενδείξεις περισσότερο και λιγότερο κυρτού άξονα σε διοπτρίες και άξονας του κερατοειδικού αστιγματισμού, Δεξιά κάτω: Απεικόνιση κερατομετρικής δύναμης σε διοπτρίες.



Εικόνα 4: Ο ίδιος ασθενής μετά από επέμβαση LASIK.

Διακρίνονται σε:

A. Μεγάλου κώνου: Έχουν το πλεονέκτημα ότι διαθέτουν περισσότερους δακτυλίους, και έτσι ο υπολογισμός αφορά περισσότερα σημεία και είναι πιο ακριβής. Όμως, η μεγάλη απόσταση του θόλου από τον κερατοειδή έχει ως αποτέλεσμα πολλές φορές να επηρεάζεται η προβαλλόμενη εικόνα από τη μύτη, τα υπερόφρουα τόξα και τις βλεφαρίδες. Το εκάστοτε λογισμικό διορθώνει τα κενά από τα ελλειπή δεδομένα με ειδικούς αλγορίθμους.

B. Μικρού κώνου: Διαθέτουν λιγότερους δακτυλίους, προβάλλουν πολύ κοντά στην κερατοειδική επιφάνεια και έτσι τα σημεία που δεν σαρώνονται είναι ελάχιστα.

Και οι δύο κατηγορίες στηρίζονται στην ίδια οπτική αρχή: λαμβάνουν σημεία μέτρησης από το όριο της ανάκλασης του δακτυλίου, δηλαδή βασίζονται στην εναλλαγή της αντίθεσης μεταξύ της φωτεινής και της σκοτεινής αντανάκλασης. Για το λόγο αυτό απαιτείται σκοτεινός χώρος.

Η ψηφιακή καταγραφή των ανακλάσεων-ειδώλων των ομόκεντρων δακτυλίων οδηγούν στον υπολογισμό της τιμής της ακτίνας καμπυλότητας της κερατοειδικής επιφάνειας και στην απεικόνιση του τοπογραφικού χάρτη με τη μορφή περιγραμμάτων ισούψων ή χρωματικών ζωνών.

Οι σημερινοί Placido disk τοπογράφοι απεικονίζουν και τον λεγόμενο υψομετρικό χάρτη. Με βάση τις καμπυλομετρικές ενδείξεις, επιλέγεται μία σφαιρική επιφάνεια καλύτερης εφαρμογής δηλαδή μία σφαιρική επιφάνεια όσο το δυνατό πιο κοντά με μαθηματική προσέγγιση στην πραγματική κερατοειδική επιφάνεια.

Με τη βοήθεια της επιφάνειας αυτής, καθώς και των καμπυλομετρικών ενδείξεων, το λογισμικό του μηχανήματος υπολογίζει πόσο απέχει κάθε κερατοειδικό σημείο από την υποθετική αυτή επιφάνεια δημιουργώντας τον υψομετρικό χάρτη.

Μειονεκτήματα της τοπογραφίας του Placido είναι τα παρακάτω:

1. Δίνει πληροφορίες μόνο για την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή.

2. Το λογισμικό της συσκευής υποθέτει ότι τα είδωλα των ανακλάσεων του Placido disk βρίσκονται όλα σ' ένα επίπεδο, αυτό του αισθητήρα του μηχανήματος. Όμως ο κερατοειδής δεν είναι επίπεδος αλλά κυρτός με αποτέλεσμα τα είδωλα που αντιστοιχούν σε διάφορες αξονικές θέσεις να σχηματίζονται σε διαφορετικές αποστάσεις και να μην βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Έτσι κάποια από τα είδωλα των ανακλάσεων λαμβάνονται από τον αισθητήρα του τοπογράφου μη εστιασμένα και το λογισμικό δεν μπορεί να τα επεξεργαστεί με ακρίβεια.

3. Το λογισμικό υποθέτει ότι η κορυφή του κερατοειδούς και το μετωπικό σημείο του ταυτίζονται με τον οπτικό άξονα του οργάνου (που ευθυγραμμίζεται με τον άξονα προσήλωσης). Η υπόθεση αυτή ισχύει στο φυσιολογικό κερατοειδή όμως δεν ισχύει σε κερατοειδείς με ασύμμετρο σχήμα, όπως συμβαίνει στον κερατόκωνο.

4. Ως γνωστό η πρώτη διαθλαστική επιφάνεια είναι στην πραγματικότητα αυτή μεταξύ αέρα - δακρυϊκής στοιβάδας, και αυτήν ακριβώς μετρά ο τοπογράφος. Στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων, το σχήμα της δακρυϊκής στοιβάδας είναι ίδιο με αυτό του υποκείμενου κερατοειδή. Σε ορισμένες όμως παθολογικές

καταστάσεις, ο κερατοειδής δεν λιπαίνεται ικανοποιητικά από τα δάκρυα (ξηροφθαλμία). Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η τοπογραφία θα δώσει μετρήσεις που δεν απεικονίζουν με ακρίβεια το σχήμα της στοιβάδας δακρύων, και συνεπώς του κερατοειδή, και έτσι τα αποτελέσματα δεν ανταποκρίνονται στην πραγματική γεωμετρία του κερατοειδούς. Γι' αυτό ο εξεταστής πρέπει να ελέγχει τη φωτογραφία της ανάκλασης των δακτυλίων από την οποία προήλθε ο τοπογραφικός χάρτης και να αναζητά σημεία όπου διασπώνται οι αντανακλάσεις, σημάδι ανωμαλίας της δακρυϊκής στοιβάδας. Αν υπάρχουν τέτοια σημεία η εξέταση είναι αναξιόπιστη και πρέπει να εκτελεστεί με την ενστάλαξη τεχνητών δακρύων. Γι' αυτό η τοπογραφία πρέπει να προηγείται εξετάσεων όπως η τονομέτρηση με το τονόμετρο του Goldman οι οποίες αλλοιώνουν τη δακρυϊκή στιβάδα ή μεταβάλλουν το σχήμα του κερατοειδή.

5. Άλλο μειονέκτημα της *Placido disk* τοπογραφίας είναι το εξής: έγινε σαφές ότι ο τοπογράφος δεν μπορεί να υπολογίσει άμεσα το σχήμα του κερατοειδή, αλλά υπολογίζει μόνο τις καμπυλότητές του, βασιζόμενος στο σχήμα των ανακλώμενων δακτυλίων. Έπειτα συγκρίνει την παραγόμενη ανάκλαση με την ανάκλαση από ένα γνωστό σχήμα (συνήθως οι τοπογράφοι βαθμονομούνται με μια σφαίρα ακτίνας καμπυλότητας 7.8 mm όση η μέση ακτίνα καμπυλότητας του εμμετροπικού κερατοειδή). Στη συνέχεια υπολογίζεται το σχήμα του κερατοειδή από τη σύγκριση των καμπυλοτήτων που μετρήθηκαν με μία επιφάνεια βέλτιστης εφαρμογής (BFS- Best Fit Sphere). Αυτός ο τρόπος υπολογισμού είναι ανεπαρκής σε ασύμμετρους κερατοειδείς (π.χ. κερατόκωνος) και επειδή βασίζεται σε μία σειρά από υποθέσεις, πολλές φορές δεν μπορεί να διαχωρίσει αν ένα σημείο με πολύ μεγάλες καμπυλότητες στον κερατοειδή είναι ανύψωση ή εμβάθυνση. Έτσι το λογισμικό είναι πιθανό να αστοχήσει στην ακριβή σχεδιασμό της επιφάνειας. Οι συσκευές Scheimpflug imaging, που θα αναφερθούν παρακάτω, μετρούν απευθείας τα υψομετρικά δεδομένα και είναι απαλλαγμένες από τέτοια σφάλματα.

6. Τέλος, μειονέκτημα αποτελεί το ότι η *Placido disk* τοπογραφία βασίζεται στην ανάκλαση ομόκεντρων δακτυλίων για να μετρήσει την καμπυλότητα του κερατοειδή. Έτσι η μέτρηση του κέντρου του δεν είναι πραγματική αλλά υπολογισμένη υποθετικά από τα υπόλοιπα δεδομένα. Αυτό συμβαίνει, γιατί οι μετρήσεις λαμβάνονται στα όρια των δακτυλίων, και στο γεωμετρικό κέντρο του κερατοειδή που δεν υπάρχει δακτύλιος, δεν υπάρχει και μέτρηση. Το λογισμικό του τοπογράφου υποθέτει την καμπυλότητα εκείνου του σημείου, αλλά αυτό δεν είναι πάντα σωστό σε ασύμμε-

τρονς κερατοειδείς.

Άλλες Διατάξεις Κερατομετρίας

Μία ελαφρώς διαφορετική τακτική υιοθέτησε η εταιρεία Laserlight στον τοπογράφο Astramax. Ένας τροποποιημένος δίσκος Placido παρέχει στο λογισμικό που «ερμηνεύει» τις αντανάκλασεις στοιχεία τόσο για τη σχετική ομόκεντρη απόσταση των ανακλάσεων μεταξύ τους, όσο και για την απόστασή τους στον κερατοειδή. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιεί τρεις κάμερες για να φωτογραφίσει τις ανακλάσεις από τρεις διαφορετικές γωνίες, και με αυτό τον τρόπο προκύπτουν πιο ακριβή τοπογραφικά δεδομένα. Επιπλέον, παρέχει χάρτες παχυμετρίας και τοπογραφίας της οπίσθιας επιφάνειας. Το σύστημα Orbscan της Orbtex και μετέπειτα της Bausch & Lomb (Εικόνα 5) χρησιμοποιεί την τοπογραφία Placido disk σε συνδυασμό με την τεχνική σάρωσης σχισμής (*slit scanning*).



Εικόνα 5: Τοπογράφος Orbscan της Bausch & Lomb.

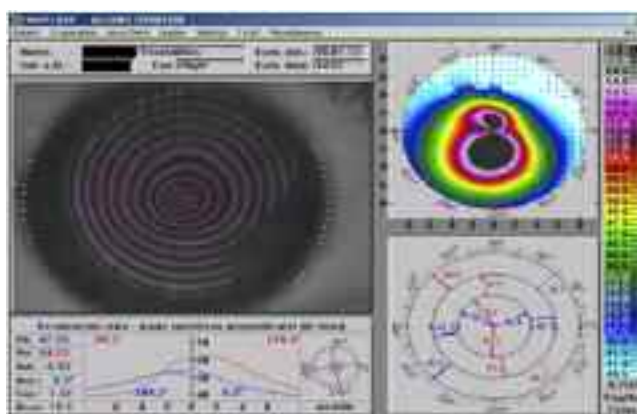
Προβάλλει στον κερατοειδή ταυτόχρονα ρινικά και κροταφικά 40 (20 x2) πολύ λεπτές κάθετες δέσμες φωτός, υπό γωνία 45°, οι οποίες εστιάζονται πάνω στην κερατοειδική επιφάνεια την ίδια στιγμή που εστιάζονται και οι ανακλάσεις από το δίσκο Placido. Οι δέσμες αυτές σαρώνουν τον ρινικό και κροταφικό κερατοειδή και 240 σημεία από κάθε δέσμη δίνουν πληροφορίες που αναλύονται από το λογισμικό του μηχανήματος και από την ανάκλασή τους (το πρόσθιο και οπίσθιο όριο της ανάκλασης αντιστοιχεί στην πρόσθια και οπίσθια κερατοειδική επιφάνεια, αντίστοιχα) από τα δεδομένα αυτά υπολογίζεται υπολογίζεται ο παχυμετρικός χάρτης του κερατοειδούς και ο καμπυλομετρικός χάρτης της οπίσθιας επιφάνειας. Η πιο κοινή απεικόνιση του Orbscan είναι ο τετραπλός χάρτης που περιλαμβάνει δισδιάστατο χάρτη με χρωματική κλίμακα για την ανύψωση της πρόσθιας και της

οπίσθιας επιφάνειας, χάρτες παχυμετρίας, καμπυλομετρικό και διοπτρικής ισχύος.

Η συσκευή Orbscan βοήθησε στη διάγνωση του υποκλινικού κερατοκώνου^{7,8} με τη βοήθεια του καμπυλομετρικού και υψομετρικού χάρτη της οπίσθιας επιφάνειας. Ο αρχόμενος (υποκλινικός) κερατόκωνος δεν παρουσιάζει μεγάλη ανύψωση (elevation) στην πρόσθια κερατοειδική επιφάνεια γιατί το επιθήλιο ομαλοποιεί τους καμπυλομετρικούς και υψομετρικούς χάρτες καθιστώντας τον κώνο αόρατο. Όμως η οπίσθια επιφάνεια, με το μονόστιβο ενδοθήλιο, δεν μπορεί να ομαλοποιήσει τον κώνο, και η εκτασία είναι εμφανής με την τοπογραφία Orbscan^{9,10,11}. Έτσι, οι ασθενείς αυτοί προσεγγίζονται θεραπευτικώς με διαφορετικό τρόπο και με περισσότερη ασφάλεια για την αποφυγή μεταχειρητικής εκτασίας^{12,13,14,15} (ενημέρωση του ασθενούς, αναβολή επέμβασης ή συνδυασμός της με cross-linking θεραπεία).

Επειδή το σύστημα βασίζεται στις κερατοειδικές ανακλάσεις, είναι δυνατό να παράγει ανακριβείς χάρτες αν υπάρχει κάποια θόλωση στον κερατοειδή. Ακόμα, στερείται ακρίβειας στη μέτρηση του σημείου και της καμπυλότητας της κορυφής του κερατοειδή, γιατί τα δεδομένα της τεχνικής slit scanning είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους χωρίς κοινό σημείο αναφοράς. Οι ατέλειες που αναφέρθηκαν εξαλείφονται προοδευτικά με τα χρόνια με την εξέλιξη των λογισμικών.

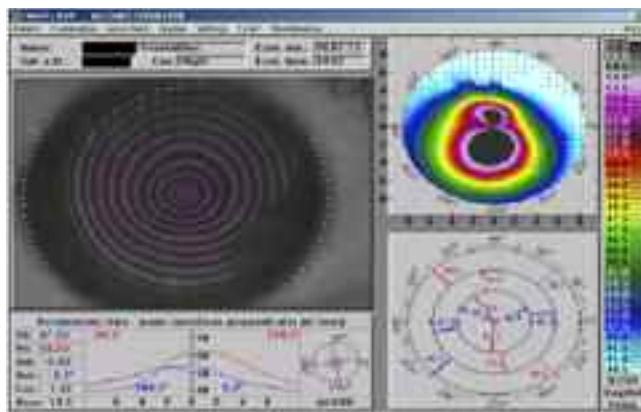
Η WaveLight® ALLEGRO Topolyzer (Εικόνα 6) επίσης στηρίζεται στο σύστημα του δίσκου του Placido. Βασίζεται στην εκτίμηση 22 δακτυλίων με 22.000 εκτιμώμενα σημεία ανύψωσης και ευαισθησία απεικόνισης μικρότερη από 1/10 pixel.



Εικόνα 6: Απεικόνιση κερατοκώνου με το σύστημα WaveLight® ALLEGRO Topolyzer.

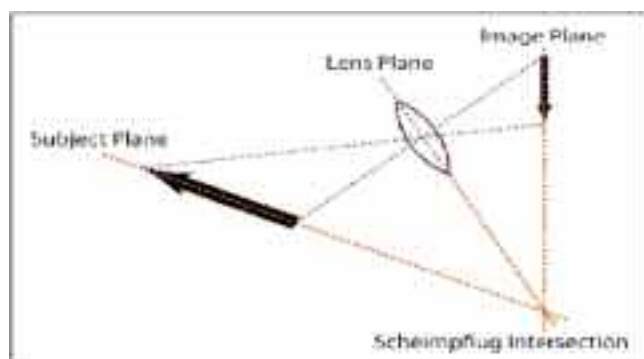
Η τελευταία τεχνολογία που συγκεντρώνει την προσοχή τελευταία είναι η Scheimpflug imaging, προς τιμή του Αυστριακού λοχαγού Theodore Scheimpflug, που

την εξέλιξε καθώς ερευνούσε τρόπους βελτίωσης της ποιότητας των αεροφωτογραφιών. Την τεχνική εφαρμόζει η συσκευή *Pentacam Comprehensive Eye Scanner της Oculus*, η συσκευή *WaveLight Oculyzer της Alcon* και η συσκευή *Galilei της Ziemer* (Εικόνα 7).



Εικόνα 7: GALILEI G2

Η αρχή λειτουργίας (Εικόνα 8) βασίζεται σε μία απλή διαπίστωση: όταν το επίπεδο που θέλουμε να φωτογραφίσουμε σχηματίζει γωνία με το επίπεδο του φιλμ, αν δώσουμε κλίση στο φακό, ώστε η κάθετος στον οπτικό του άξονα να διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζουν τα επίπεδα του θέματος και του φιλμ, τότε όλο το θέμα της φωτογραφίας είναι εστιασμένο ανεξάρτητα από το βάθος πεδίου. Βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής αποτελεί το μεγάλο βάθος πεδίου και η δυνατότητα απεικόνισης όλου του προσθίου ημιμορίου μέχρι και το οπίσθιο όριο του φακού^{16,17,18,19,20}.



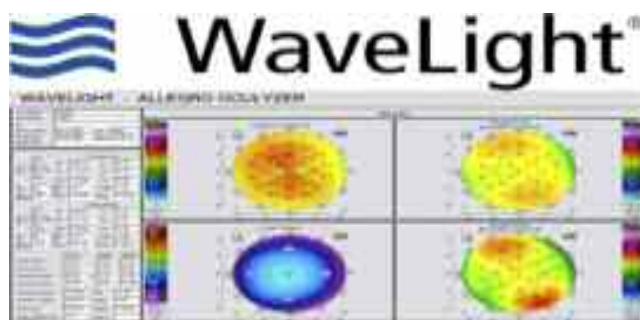
Εικόνα 8: Αρχή Scheimpflug

Από τις δύο παραπάνω συσκευές, η πρώτη και η δεύτερη χρησιμοποιεί μια περιστρεφόμενη κάμερα *Scheimpflug* και η τρίτη δύο περιστρεφόμενες κάμερες και ένα δίσκο *Placido*.

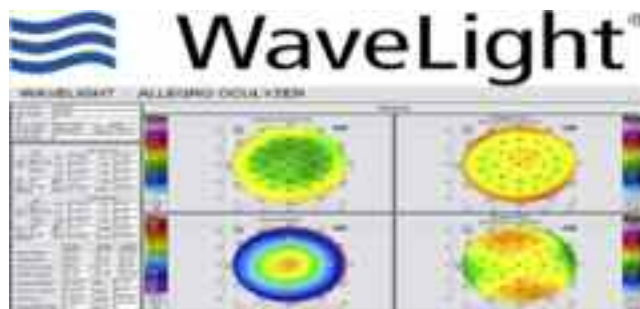
Στην *WaveLight® Oculyzer* (Εικόνα 9,10) που χρησι-

μοποιεί την τεχνολογία *Pentacam* η περιστρεφόμενη κάμερα *Scheimpflug* λαμβάνει 50 φωτογραφίες σε πραγματικό χρόνο σαρώνοντας 25.000 σημεία. Χρησιμοποιεί τις προηγμένες φόρμουλες *Holladay/Holladay EKR Detail Report* και *Belin/Ambrosio Enhanced Ectasia Display*.

Οι δυνατότητές τους είναι εντυπωσιακές: η *Pentacam* μπορεί να παράγει καμπυλομετρικούς και υψομετρικούς χάρτες από την πρόσθια και οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδή και παχυμετρικούς χάρτες του κερατοειδή και του προσθίου θαλάμου^{21,22,23,24}. Μπορεί ακόμα να υπολογίσει τον όγκο του προσθίου θαλάμου και να φωτογραφίσει τον κρυσταλλοειδή φακό σε τομές αποκαλύπτοντας θολώσεις^{25,26,27}.



Εικόνα 9: Τετραπλή απεικόνιση με το σύστημα *Pentacam* της τοπογραφίας *WaveLight® Oculyzer*: κερατομετρικές ενδείξεις πρόσθιας επιφάνειας, πρόσθια και οπίσθια ανύψωση κερατοειδούς και παχυμετρικός χάρτης.



Εικόνα 10: Ο ίδιος ασθενής μετά από επέμβαση *LASIK*.

Η συσκευή *Galilei* διαθέτει δύο περιστρεφόμενες *Scheimpflug* κάμερες και ένα δίσκο *Placido* (Εικόνα 11,12), και μπορεί να κάνει όλα τα παραπάνω, ενώ με μυδρίαση του οφθαλμού υποστηρίζει ότι μπορεί να παράγει και χάρτες του κρυσταλλοειδή φακού.



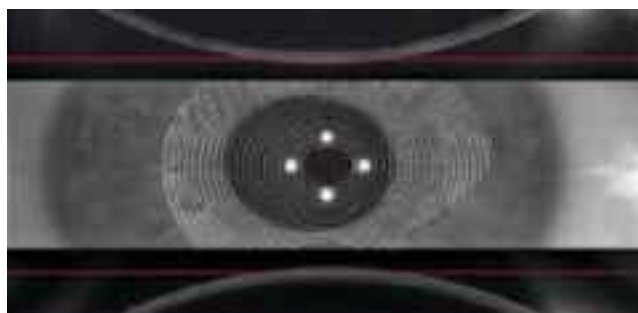
Εικόνα 11: Πλεονεκτήματα Dual Scheimpflug. Το διπλό σύστημα Scheimpflug επιτρέπει στο Galilei G2 να περιστρέφει την κεφαλή μέτρησης μόνο 180° και όχι 360° όπως οι αναλυτές μονού Scheimpflug.

Μ' αυτόν τον τρόπο:

- α) μειώνεται ο χρόνος λήψης στο μισό β) μειώνεται και το περιθώριο σφαλμάτων από την κίνηση του οφθαλμού.*

Οι συσκευές αυτές δεν επηρεάζονται από μικρές θολώσεις του κερατοειδή όπως η *Orbscan*, ενώ μπορούν να υπολογίσουν με ακρίβεια το σημείο και την καμπυλότητα της κορυφής του κερατοειδή (από συνυπολογισμό όλων των δεδομένων κατά την περιστροφή της κάμερας). Επίσης, με τους υψομετρικούς χάρτες, μπορούν να υπολογίσουν ακριβέστατα τη διαθλαστική ισχύ σε όλη την έκταση του κερατοειδή. Γνωρίζοντας την ακριβή τοπογραφία, μπορεί να υπολογιστεί η κλίση με την οποία πέφτει μία ακτίνα φως 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 που ισχύει μόνο παραξονικά.

Η σημασία αυτής της μέτρησης φαίνεται και από το ότι οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιούνται σήμερα για το υπολογισμό της ισχύος των ενδοφακών υποθέτουν ότι η ισχύς της πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδή συνδέονται με την ίδια σχέση, ανεξάρτητα από το άτομο, κάτι που προφανώς παύει να ισχύει στην μυωπική PRK και LASIK, όπου η πρόσθια επιφάνεια επιπεδώνεται. Αν λοιπόν ο χειρουργός στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέξει τον ενδοφακό με βάση την ισχύ της πρόσθιας κερατοειδικής επιφάνειας, μάλλον θα αποτύχει στην επίτευξη εμμετρωπίας. Καθώς όμως οι παραπάνω συσκευές υπολογίζουν πλέον τη διαθλαστική ισχύ όλου του κερατοειδούς αυτό αποφεύγεται.

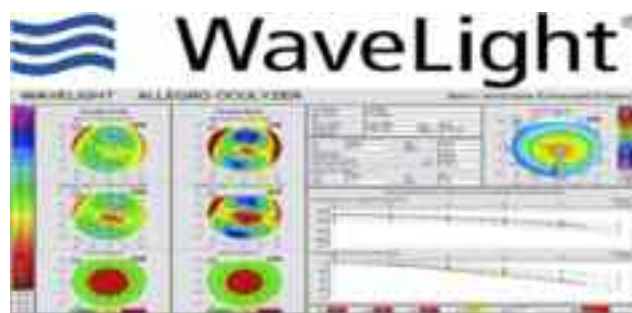


Εικόνα 12: Συνδυασμός Placido – Scheimpflug.

Το νέο GALILEI G2, είναι σύστημα διπλής Scheimpflug / Placido, ικανό να συγχωνεύσει όλα τα δεδομένα σε μία 3D ανακατασκευή του κερατοειδούς και βιομετρίας πρόσθιου θαλάμου.

Τι απεικονίζει η κερατοτοπογραφία

Τα συστήματα τοπογραφίας που αναφέρθηκαν απεικονίζουν λεπτομερώς τον κερατοειδή και συγχρόνως αποτελούν διαγνωστική διαδικασία για διάφορες παθήσεις του. Από αυτή λαμβάνονται πληροφορίες για την καμπυλότητα, το σχήμα πρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας, τη διοπτρική δύναμη και το πάχος του κερατοειδή. Η απεικόνιση σημείο προς σημείο γίνεται με τη χρήση **δισδιάστατων** (2D) ή **τριδιάστατων** (3D) χαρτών ή τη χρήση κάποιας φόρμουλας απεικόνισης και υπολογισμού (Εικόνα 13,14).



Εικόνα 13: Αριστερός οφθαλμός ασθενούς με κερατόκωνο με βάση τη φόρμουλα Belin/Ambrosio.

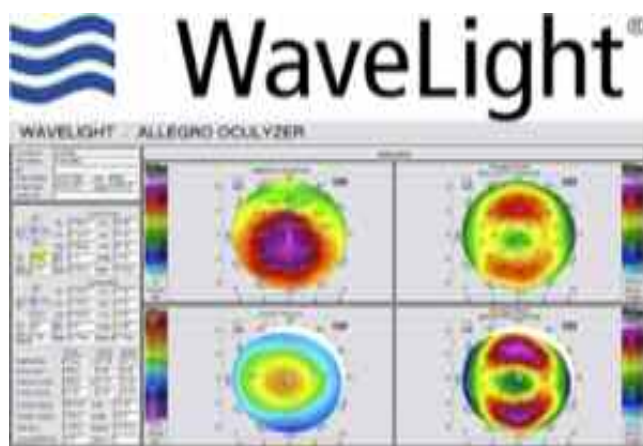
Κάθε χάρτης έχει χρωματική κλίμακα που αντιστοιχεί σε κάποιο φάσμα διοπτριών και δίνει διαφορετικές πληροφορίες. Κάθε σημείο του ορίζεται με πολικές συντεταγμένες που αφορούν την απόσταση από το κέντρο και τον αντίστοιχο άξονα σε μοίρες. Οι κατηγορίες χαρτών είναι οι εξής:

1. **Αξονικοί Axial (power) χάρτες:** είναι οι απλούστεροι, συνηθέστεροι και περισσότερο χρησιμοποιούμενοι

δίνοντας πληροφορίες για την καμπυλότητα του κερατοειδούς. Στη χρωματική κλίμακα τα θερμά χρώματα (κόκκινο) αντιπροσωπεύουν τις πιο κυρτές περιοχές ενώ τα ψυχρά (μπλε) τις πιο επίπεδες. Μειονεκτούν στην απεικόνιση μικρών παραλλαγών καμπυλότητας καθώς και στην απεικόνιση της περιφέρειας.

2. **Εφαπτομενικοί (tangential) χάρτες:** είναι πιο ευαίσθητοι χάρτες και προσφέρουν ακριβέστερη απεικόνιση των κερατοειδικών βλαβών με μια εφαπτομενική σχέση με την καμπυλότητα του φυσιολογικού κερατοειδούς.

3. **Χάρτες ανύψωσης (elevation):** Απεικονίζουν το μετρούμενο ύψος ή βάθος (υψομετρική διαφορά) από το οποίο η κερατοειδική καμπυλότητα αποκλίνει σε σύγκριση με μία σφαιρική επιφάνεια αναφοράς **BFS (Best Fit Sphere)**.



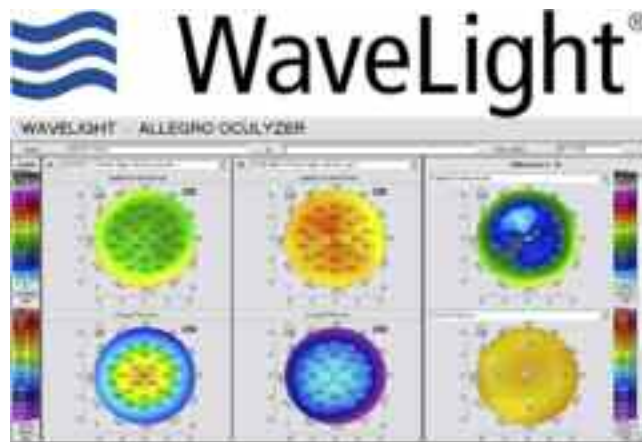
Εικόνα 14: Τετραπλή απεικόνιση δεξιού και αριστερού οφθαλμού ασθενούς με κερατόκωνο.

Ενώ η οπίσθια επιφάνεια δεν είναι τόσο σημαντική σ' ότι αφορά τη διάθλαση όσο η πρόσθια, εντούτοις η μελέτη της βοηθά στη διάγνωση παθήσεων όπως ο κερατόκωνος ακόμη και σε αρχόμενα στάδια. Οι αξονικοί και εφαπτομενικοί χάρτες είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι από τα μηχανήματα τοπογραφίας όμως δεν έχουν τη δυνατότητα διάγνωσης του κερατόκωνου σε αρχικό στάδιο. Ένας υποκλινικός κερατόκωνος θα μπορούσε να διαγνωσθεί μόνο με ένα χάρτη ανύψωσης της οπίσθιας επιφάνειας στον οποίο θα φαινόταν σημαντική υψομετρική διαφορά και λεπύτωση στα συγκεκριμένα σημεία (**Orbscan και Pentacam**).

4. **Διαθλαστικοί (refractive) χάρτες:** Δίνουν τιμές της πραγματικής διαθλαστικής δύναμης του κερατοειδούς με βάση το νόμο του Snell. Αξιολογείται ιδιαίτερα το κεντρικό τμήμα του χάρτη και βρίσκουν πεδίο εφαρ-

μογής στις διαθλαστικές επεμβάσεις πριν και μετά για τη διόρθωση του διαθλαστικού σφάλματος.

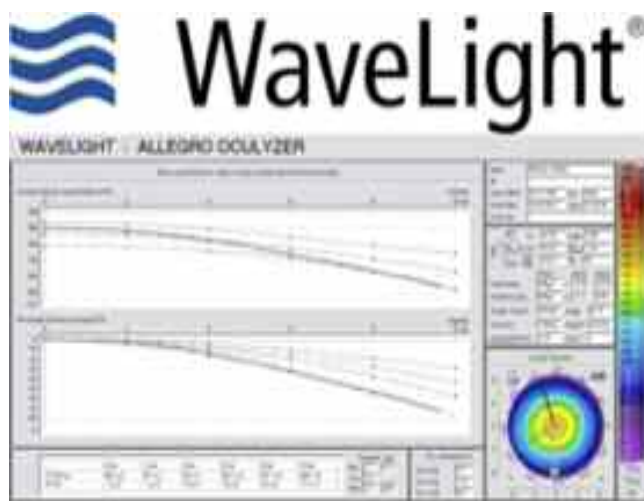
5. **Χάρτες διαφοράς (difference):** Προκύπτουν από τη διαφορά δύο άλλων (Εικόνα 15). Παρέχουν πληροφορίες για τυχόν διαφορές σε καμπυλότητες μεταξύ δύο αρχικών χαρτών. Χρησιμεύουν κυρίως προεγχειρητικά και μετεγχειρητικά καθώς και στη χρήση φακών επαφής.



Εικόνα 15: Σύγκριση κερατομετρικών ενδείξεων και παχυμετρίας σε μύοπα ασθενή πριν και ένα μήνα μετά από επέμβαση Lasik.

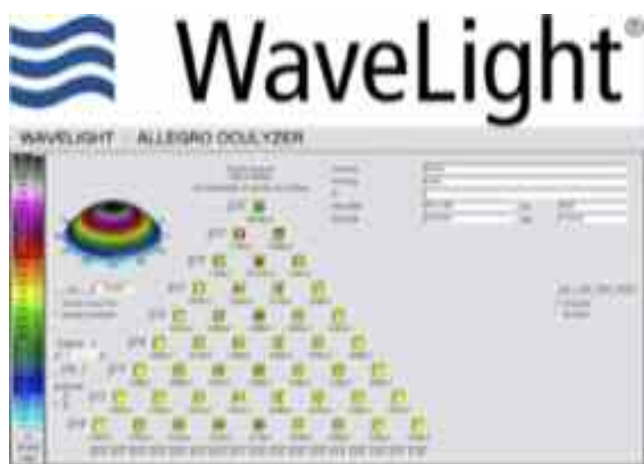
6. **Χάρτες παχυμετρίας (corneal thickness):** Τόσο η τοπογραφία Orbscan όσο και η Pentacam παρέχουν χάρτες παχυμετρίας^{28,29,30,31,32} του κερατοειδούς (Εικόνα 16) σε όλη την έκταση και έτσι υπερέχουν σ' ότι αφορά την ευκολία έναντι της παχυμετρίας επαφής με υπέρηχο αφού δεν απαιτείται επαφή (**contact**).

Στην τοπογραφία **Orbscan** τα στοιχεία παρέχονται με χρωματική κωδικοποίηση όπου το πράσινο αντιπροσωπεύει το φυσιολογικό πάχος του κερατοειδούς, το μωβ και τα ζεστά χρώματα δείχνουν παχύτερες περιοχές, ενώ το κόκκινο χρησιμοποιείται για να εμφανίσει λεπτότερες περιοχές. Μελέτες δείχνουν ότι το Orbscan τείνει να υπερεκτιμά τον παχύ κερατοειδή και να υποεκτιμά τον λεπτότερο. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τις δύο επιφάνειες του κερατοειδούς, η Pentacam καθορίζει το πάχος του κερατοειδούς σε όλα τα σημεία. Το σύστημα έχει αποδειχθεί ότι είναι ιδιαίτερα αξιόπιστο και δίνει παραπλήσια αποτελέσματα με την παχυμετρία υπερήχων^{33,34,35,36,37}. Φαίνεται να πλεονεκτηεί, συγκριτικά με την Orbscan, σε οφθαλμούς μετεγχειρητικά.

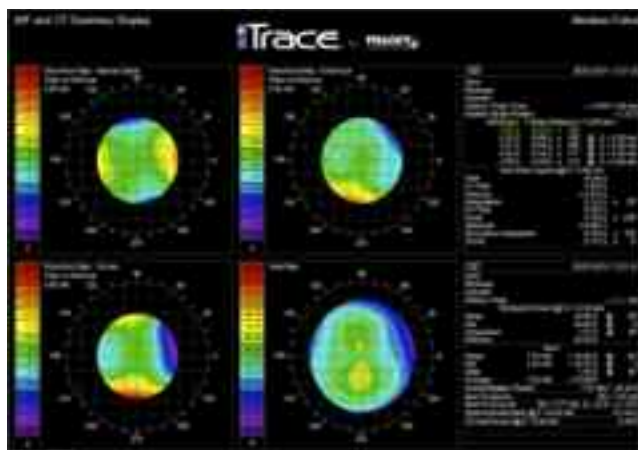


Εικόνα 16: Παχυμετρία Pentacam με το σύστημα WaveLight® Oculyzer.

7. Χάρτες εκτροπομετρίας και μετώπου κύματος (wavefront analysis) (Εικόνα 17,18). Τα σύγχρονα μηχανήματα τοπογραφίας χρησιμοποιώντας την τεχνολογία ray - tracing, και την ανάλυση του Zernike απεικονίζουν τις ανώτερης τάξης εκτροπές του κερατοειδούς, εκτιμούν το κωνοειδές του Sturm, το βάθος του πεδίου και την ευαισθησία στην αντίθεση (contrast sensitivity) παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για την εκπαίδευση των ασθενών και τον καθορισμό της θεραπείας. Χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα στις διαθλαστικές επεμβάσεις για την εισαγωγή δεδομένων στα αντίστοιχα μηχανήματα Laser.



Εικόνα 17: Μελέτη εκτροπών με βάση την ανάλυση Zernike.



Εικόνα 18: Wavefront -Tracey ανάλυση ασθενούς πριν από επέμβαση Lasik όπου εκτιμάται και η διάθλαση του ασθενούς προεγχειρητικά και απεικονίζεται ο αξονικός χάρτης.

Πως ερμηνεύεται η τοπογραφία του κερατοειδούς

Η τοπογραφία ερμηνεύεται αρχικά με τη χρήση της χρωματικής κλίμακας του εκάστοτε μηχανήματος. Η χρωματική κλίμακα δεν είναι ακριβώς η ίδια σε όλα τα συστήματα τοπογραφίας. Επιπλέον το κάθε σύστημα παρέχει μία σειρά τοπογραφικών δεικτών που ποσοτικοποιούν τις πληροφορίες. Είναι δυνατό να διακριθούν σε:

1. Δείκτες όλης της επιφάνειας του κερατοειδούς.
2. Δείκτες της περιφέρειας του κερατοειδούς.
3. Δείκτες συνδυαζόμενων τμημάτων του κερατοειδούς.

Επίσης χρησιμεύουν στη διαφορική διάγνωση μεταξύ κερατοκόνου και άλλων παραμορφώσεων του κερατοειδούς, στην εκτίμηση της οπτικής οξύτητας και στην εφαρμογή φακών επαφής. Οι δείκτες **δεν είναι ίδιοι** για όλα τα τοπογραφικά μηχανήματα, ενώ ο ίδιος δείκτης μπορεί να υπολογίζεται διαφορετικά σε κάθε μηχανήμα.

Οι πιο σημαντικοί δείκτες (Εικόνα 19) είναι οι παρακάτω:

1. **SIMK** (Simulated Keratometry): Δίνει πληροφορίες για την καμπυλότητα στο κέντρο (3mm).
2. **SIMKS** (Simulated steep Keratometry): είναι ο πιο κυρτός μεσημβρινός του κερατοειδή στο κέντρο.
3. **SIMKF** (Simulated Flat Keratometry): είναι ο πιο επίπεδος μεσημβρινός ο οποίος είναι κάθετος στον προηγούμενο.
4. **CSI** (Center Surrounded Index): Αφορά τη διαφορά ισχύος μεταξύ της κεντρικής και περιφερικής μοίρας

του κερατοειδούς στα 3-6 mm.

5. **AVE-IN**: Κεντρική παχυμετρία σε μm .^{38,39,40,41,42}

6. **DSI** (Differential Sector Index): Η μεγαλύτερη διαφορά διοπτρικής ισχύος υπολογισμένη ανά δύο κυκλικών τομών.

7. **OSI** (Opposite Sector Index): Η μεγαλύτερη διαφορά διοπτρικής ισχύος σε απέναντι κυκλικούς τομείς.

8. **AA** (Analyzed Area): Ο λόγος της επιφάνειας που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των δεικτών προς την ολική κερατοειδική επιφάνεια που προβάλλουν οι δακτύλιοι του δίσκου του Placido.

9. **IAI** (Irregular Astigmatism Index): Αφορά τη μέση διακύμανση της διοπτρικής δύναμης κατά μήκος των ημι-μεσημβρινών ανάμεσα στους δακτυλίους του δίσκου του Placido.

10. **SAI** (Surface Asymmetry Index): Η διαφορά της κερατοειδικής διαθλαστικής δύναμης μεταξύ σημείων του ίδιου δακτυλίου που βρίσκονται σε αντιδιαμετρικές θέσεις.

11. **KPI** (Keratoconus Prediction Index): Είναι μία γραμμική σχέση των προηγούμενων δεικτών εκτός του AVE-IN και δείχνει την πιθανότητα (%) να υπάρχει κερατόκωνος.^{43,44}

12. **I-S** (inferior-superior) index: Υπολογίζει τη διαφορά της μέσης τιμής της διοπτρικής δύναμης μεταξύ ανώτερων και κατώτερων ωρών και εκτιμά την πιθανότητα ύπαρξης κερατοκώνου.

13. **CEI** (Corneal Eccentricity Index) για τον κερατόκωνο.⁴⁵

14. **IAI** (Irregular Astigmatism Index): για τον κερατόκωνο.

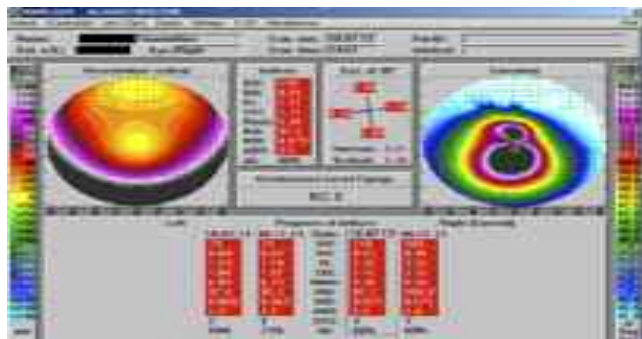
15. **IVA**: Δείκτης ασυμμετρίας επιφάνειας

16. **CKI** (Central Keratokonosis Index).

17. Ο δείκτης της ασυμμετρίας ύψους (**IHA**).

18. Ο δείκτης του ύψους αποκέντρωσης (**IHD**).

19. Ο συντελεστής εκτροπής (**ABR**) για την εκτίμηση των εκτροπών⁴⁶.



Εικόνα 19: Δείκτες κερατοκώνου με το σύστημα Wavelight Topolyzer.

Επίλογος

Συνοψίζοντας, η τοπογραφία κερατοειδούς αποτελεί σημαντικότερη, αξιόπιστη διαγνωστική οφθαλμολογική προσέγγιση η οποία φυσικά δεν έχει εξαντλήσει τα όριά της. Έχει εκποτίσει από τη συνήθη οφθαλμολογική πρακτική το κερατόμετρο Javal που για δεκαετίες προσέφερε αρκετά στη διάγνωση παθήσεων του κερατοειδούς.

Κυριότερες ενδείξεις της αποτελεί η διαθλαστική χειρουργική^{47,48,49,50} και ο κερατόκωνος (διάγνωση - παρακολούθηση - αντιμετώπιση). Τα εργαλεία της είναι οι διαφόρων ειδών χάρτες και δείκτες. Βέβαια, πρέπει να τονιστεί ότι δεν μπορεί να λειτουργήσει σωστά αυτόνομα αλλά πρέπει πάντα σε συνδυάζεται με τις υπόλοιπες οφθαλμολογικές εξετάσεις όπως την υποκειμενική και αντικειμενική διάθλαση με τον προσδιορισμό της οπτικής οξύτητας και την εξέταση στη σχισμοειδή λυχνία. Ένας ασθενής που πάσχει από κάποια οφθαλμική ή συστηματική πάθηση η οποία δε διαγιγνώσκεται με τις τοπογραφίες **Placido**, **Orbscan**, ή **Pentacam** μπορεί να είναι ακατάλληλος για διαθλαστική επέμβαση.

Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι το μέλλον επιφυλάσσει ακόμη μεγαλύτερη εξέλιξη και νέα τεχνολογία θα εισάγεται συνεχώς. Η περαιτέρω έρευνα θα βελτιώσει την ακρίβεια αυτών των διαγνωστικών εργαλείων. Η τεχνητή νοημοσύνη που συνεχώς εισάγεται στα νέα συστήματα βελτιώνει συνεχώς την ευαισθησία και την ειδικότητά τους στη διάγνωση.

Υποσημείωση: Η εργασία αυτή δεν έχει χρηματοδοτηθεί από κάποια πηγή ούτε υπάρχει κάποιο προσωπικό συμφέρον.

CORNEAL TOPOGRAPHY

E. Nakos^{1,2}, D. Almaliotis¹, A. Dimitriou³

1. Laboratory of Experimental Ophthalmology, Aristotle University of Thessaloniki

2. Ophthalmology Department, 424 Army General Hospital, Thessaloniki

3. Ophthalmology Department of General Hospital of Kavala

Abstract

Retrospective presentation of corneal topography as a screening method in Ophthalmology with aim to present the examination's imaging profile and its interpretation. The use of this method and the expectations for the future.

Key words: cornea, topography, maps, Placido's disk, Pentacam, Scheimpflug, keratokonus, contact lenses, PRK, Lasik, corneal index.

Βιβλιογραφία

- Rabinowitz YS. Ectatic disorders of the cornea. In: Foster CS, Azar DT, Dohlman CH, editors. *Smolin and Thoft's the cornea: Scientific foundations and clinical practice*. 4th edn. Philadelphia PA: Lippincott Williams and Wilkins; 2005. pp. 889–911.
- Twa MD, Coral-Ghanem C, Barth B. Corneal topography and contact lenses. In: Mannis MJ, Zadnik K, Coral-Ghanem C, Kara-Jose N, editors. *Contact lenses in ophthalmic practice*. New York: Springer-Verlag; 2003. pp. 37–67.
- Wheeldon CE, McGhee CN. Corneal tomography and anterior chamber imaging. In: Brightbill FS, editor. *Corneal surgery: Theory, technique, and tissue*. St Louis, MO: CV Mosby Co; 1986. pp. 83–92.
- Daxecker F. Christoph Scheiner's eye studies. *Documenta Ophthalmol* 1992; 81:27–35.
- Cairns G, McGhee CN. Orbscan computerized topography: Attributes, applications, and limitations. *J Cataract Refract Surg* 2005; 31:205–220.
- Liu Z, Huang AJ, Pflugfelder SC. Evaluation of corneal thickness and topography in normal eyes using the Orbscan corneal topography system. *Br J Ophthalmol* 1999; 83:774–778.
- Keratotomy study group. Minimising the risk of corneal ectasia after LASIK; Available from: <http://www.kmsg.org/Users/upload/journal/29Cornealectasia.doc>. [accessed on 2009 Dec 20].
- Agarwal A, Jacob S, Agarwal S. Posterior corneal changes in refractive surgery. In: Agarwal S, Agarwal A, Agarwal A, editors. *Step by step corneal topography*. 2005. p. 55.
- Tananuvat N, Pansatankul N. Assessment of the anterior structures of eyes in a normal Northern Thai group using the Orbscan II. *J Med Assoc Thai* 2005; 88(9):S105–113.
- Tanabe T, Oshika T, Tomidokoro A, et al. Standardized color-coded scales for anterior and posterior elevation maps of scanning slit corneal topography. *Ophthalmology* 2002; 109:1298–1302.
- Rao SN, Raviv T, Majmudar PA, Epstein RJ. Role of Orbscan II in screening keratoconus suspects before refractive corneal surgery. *Ophthalmology* 2002; 109:1642–1646.
- Fam HB, Lim KL. Corneal elevation indices in normal and keratoconic eyes. *J Cataract Refract Surg* 2006; 32:1281–1287.
- Wang Z, Chen J, Yang B. Posterior corneal surface topographic changes after laser in situ keratomileusis are related to residual corneal bed thickness. *Ophthalmology* 1999; 106:406–409.
- Kamiya K, Oshika T. Corneal forward shift after excimer laser keratorefractive surgery. *Semin Ophthalmol* 2003; 18:17–22.
- Twa MD, Roberts C, Mahmoud AM, Chang JS Jr. Response of the posterior corneal surface to laser in situ keratomileusis for myopia. *J Cataract Refract Surg* 2005; 31:61–71.
- Verges C, Cazal J. Applications of PENTACAM in anterior segment analysis; *Highlights of Ophthalmology*; 2009. pp. 11–15. Available at: www.oculus.de/pl/downloads/dyn/oculus/presse/172/verges_english.pdf. [accessed on 2009 Dec 10].
- Belin MW, Holladay JT, Dick HB, Ambrósio R. Why cataract and refractive surgeons need the pentacam; Available at: http://www.oculus.de/chi/downloads/dyn/sonstige/sonstige/press_cataract_pentacam_0206.pdf. [accessed on 2009 Dec 15]
- Ciolino JB, Belin MW. Changes in the posterior cornea after laser in situ keratomileusis and photorefractive keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 2006; 32:1426–1431.
- Ciolino JB, Khachikian SS, Cortese MJ, Belin MW. Long-term stability of the posterior cornea after laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2007; 33:1366–1370.
- Ha BJ, Kim SW, Kim SW, Kim EK, Kim TI. Pentacam and Orbscan II measurements of posterior corneal elevation before and after photorefractive keratectomy. *J Refract Surg* 2009; 25:290–295.
- Holladay J. Holladay report on the pentacam; New advances and technology with pentacam; Available from: www.oculus.de/pl/downloads/dyn/oculus/presse/158/oculus_low_res.pdf. [accessed on 2009 Dec 4]
- Belin MW, Khachikian SS. Keratoconus/ectasia detection with the oculus Pentacam: Belin/Ambrosio enhanced ectasia display; New advances and technology with pentacam; Available from: www.oculus.de/pl/downloads/dyn/oculus/presse/158/oculus_low_res.pdf. [accessed on 2009 Dec 4]
- Belin MW, Ambrosio R. The Brains behind the BAD: Simplifying pre-operative keratoconus screening; Available from: <http://www.oteurope.com/ophthalmologytimes/europe/Cornea/The-brains-behind-the-BAD/ArticleStandard/Article/detail/626901>. [accessed on 2009 Dec 2]
- Belin MW, Khachikian SS. New software able to detect early ectatic disease: Screening tool incorporates data

from the posterior corneal surface and corneal thickness map; Available from: <http://www.pconsupersite.com/default.asp?ID=19077>. [accessed on 2009 Dec 1]

25. Uçakhan OO, Ozkan M, Kanpolat A. Corneal thickness measurements in normal and keratoconic eyes: Pentacam comprehensive eye scanner versus noncontact specular microscopy and ultrasound pachymetry. *J Cataract Refract Surg* 2006; 32:970–977.

26. Lackner B, Schmidinger G, Pieh S, Funovics MA, Skorpik C. Repeatability and reproducibility of central corneal thickness measurement with Pentacam, Orbscan, and ultrasound. *Optom Vis Sci* 2005; 82:892–899.

27. Hashemi H, Mehravaran S. Central corneal thickness measurement with Pentacam, Orbscan II, and ultrasound devices before and after laser refractive surgery for myopia. *J Cataract Refract Surg* 2007; 33:1701–1707.

28. Kim SW, Byun YJ, Kim EK, Kim TI. Central corneal thickness measurements in unoperated eyes and eyes after PRK for myopia using Pentacam, Orbscan II, and ultrasonic pachymetry. *J Refract Surg* 2007; 23:888–894.

29. Al-Mezaine HS, Al-Amro SA, Kangave D, Sadaawy A, Wehaib TA, Al-Obeidan S. Comparison between central corneal thickness measurements by oculus pentacam and ultrasonic pachymetry. *Int Ophthalmol* 2008; 28:333–338.

30. Ciolino JB, Khachikian SS, Belin MW. Comparison of corneal thickness measurements by ultrasound and scheimpflug photography in eyes that have undergone laser in situ keratomileusis. *Am J Ophthalmol* 2008; 145:75–80.

31. Ambrósio R, Jr, Alonso RS, Luz A, Coca Velarde LG. Corneal-thickness spatial profile and corneal-volume distribution: Tomographic indices to detect keratoconus. *J Cataract Refract Surg* 2006; 32:1851–1859.

32. Holladay JT, Hill WE, Steinmueller A. Corneal power measurements using scheimpflug imaging in eyes with prior corneal refractive surgery. *J Refract Surg* 2009; 25:862–868.

33. Kim SW, Kim EK, Cho BJ, Kim SW, Song KY. Use of the pentacam true net corneal power for intraocular lens calculation in eyes after refractive corneal surgery. *J Refract Surg* 2009; 25:285–289.

34. Yi JH, Shin JY, Ha BJ, Kim SW, Cho BJ, Kim EK, et al. The comparison of central and mean true-net power (Pentacam) in calculating IOL-power after refractive surgery. *Korean J Ophthalmol* 2009; 23:1–5.

35. Savini G, Barboni P, Profazio V, Zanini M, Hoffer KJ. Corneal power measurements with the Pentacam Scheimpflug camera after myopic excimer laser surgery. *J Cataract Refract Surg* 2008; 34:809–813.

36. Savini G, Barboni P, Carbonelli M, Hoffer KJ. Accuracy of Scheimpflug corneal power measurements for intraocular lens power calculation. *J Cataract Refract Surg* 2009; 35:1193–1197.

37. Viteri E. Using the Pentacam for IOL power calculation;

Highlights of ophthalmology; 2009 pp. 13–16. Available from: http://www.pentacam.com/downloads/artikel/2008-Article_Pentacam_Using_the_Pentacam_for_IOL_power_calculation_Issue%203_2008_English.pdf. [accessed on 2009 Nov 10]

38. Wong AC, Wong CC, Yuen NS, Hui SP. Correlational study of central corneal thickness measurements on Hong Kong Chinese using optical coherence tomography, Orbscan and ultrasound pachymetry. *Eye (Lond)* 2002; 16:715–721.

39. González-Méijome JM, Cerviño A, Yebra-Pimentel E, Parafita MA. Central and peripheral corneal thickness measurement with Orbscan II and topographical ultrasound pachymetry. *J Cataract Refract Surg* 2003; 29:125–132.

40. Hashemi H, Yazdani K, Mehravaran SH, Fotouhi A. Central corneal thickness measurement with Orbscan II and an ultrasound pachymeter. *Iranian J Ophthalmol* 2004; 17:1–9.

41. Doughty MJ, Jonuscheit S. An assessment of regional differences in corneal thickness in normal human eyes, using the Orbscan II or ultrasound pachymetry. *Optometry* 2007; 78:181–190.

42. Hashemi H, Roshani M, Mehravaran S, Parsafar H, Yazdani K. Effect of corneal thickness on the agreement between ultrasound and Orbscan II pachymetry. *J Cataract Refract Surg* 2007; 33:1694–1700.

43. Qazi MA, Cua IY, Roberts CJ, Pepose JS. Determining corneal power using Orbscan II videokeratography for intraocular lens calculation after excimer laser surgery for myopia. *J Cataract Refract Surg* 2007; 33:21–30.

44. Lim L, Wei RH, Chan WK, Tan DT. Evaluation of keratoconus in Asians: Role of Orbscan II and Tomey TMS-2 corneal topography. *Am J Ophthalmol* 2007; 143:390–400.

45. Probst LE. Orbscan II. Indices for Keratoconus. In: Probst LE, editor. *Lasik: Advances, controversies, and customs*. Thorofare, NJ: Slack, Inc; 2004. pp. 3–14.

46. Karpecki PM. Bausch and lomb Orbscan II/IIz anterior segment analysis system. In: Wang MX, editor. *Corneal topography in the wavefront era*. Thorofare, NJ: Slack, Inc; 2006. pp. 191–206.

47. Vajpayee RB, Sinha R, Sharma N, Titiyal JS, Tandon R. Posterior corneal ectasia following LASIK. *Klin Oczna* 2005; 107:46–48.

48. Nawa Y, Masuda K, Ueda T, Hara Y, Uozato H. Evaluation of apparent ectasia of the posterior surface of the cornea after keratorefractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 2005; 31:571–573.

49. Ueda T, Nawa Y, Masuda K, Ishibashi H, Hara Y, Uozato H. Posterior corneal surface changes after hyperopic laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2005; 31:2084–2087.

50. Hashemi H, Mehravaran S. Corneal changes after laser refractive surgery for myopia: Comparison of Orbscan II and Pentacam findings. *J Cataract Refract Surg* 2007; 33:841–847.