ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΡΙΩΝ ΕΚΤΡΟΠΟΜΕΤΡΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

ΣΙΔΕΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΥ ΣΟΦΙΑ

ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ: 2007-2008

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ
ΕΛΛΑΔΑ 2008
Ανάπτυξη παντού Ανάπτυξη για όλους

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΡΙΩΝ ΕΚΤΡΟΠΟΜΕΤΡΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

ΣΙΔΕΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΥ ΣΟΦΙΑ

Η παρούσα εργασία υπεβλήθη ως μέρος των υποχρεώσεών μου για την απονομή του μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών “ΟΠΤΙΚΗ & ΟΡΑΣΗ” και παρουσιάστηκε στην τριμελή επιτροπή αποτελούμενη από τους:

1. Dr.Παναγοπούλου Σοφία
2. Dr.Μοσχανδρέα Ιωάννα
3. Dr.Τσιλιμπάρη Μιλτιάδη

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΔΕΚ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περίληψη

Σκοπός

Νέες τεχνολογίες μπορούν πλέον να καθορίζουν τις οφθαλμικές εκτροπές πέρα από το σφαίρωμα και τον αστιγματισμό. Οι υψηλής τάξης εκτροπές του οφθαλμού μπορούν να μετρηθούν με πολλούς τρόπους, όπως για παράδειγμα με την χρήση εκτροπόμετρων . Θεωρητικά, η διόρθωση των εκτροπών πέρα από την σφαίρα και τον κύλινδρο αυξάνει σημαντικά την ανάλυση της αμφιβληστροειδικής εικόνας και το contrast, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ποιότητα της όρασης των ασθενών. Οι εκτροπές υψηλής τάξης εμφανίζονται συνήθως σε μικρότερο ποσοστό από ότι οι εκτροπές χαμηλής τάξης. Διορθώσεις εκτροπών υψηλής τάξης με διαθλαστική χειρουργική, φακούς επαφής ή και με ενδοφακούς προϋποθέτουν ακριβείς μετρήσεις των εκτροπών αυτών. Ωστόσο, η σύγκριση μετρήσεων διαφορετικών εκτροπόμετρων καθώς και η γνώση της συμφωνίας των μετρήσεων εκτροπών υψηλής τάξης με την χρήση εκτροπόμετρων, αποτέλεσε και αποτελεί σημαντικό πεδίο μελέτης, παρέχοντας την δυνατότητα για καλύτερη και πιο χρήσιμη οφθαλμολογική πληροφορία. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι Α) η εκτίμηση της συμφωνίας των εκτροπών χαμηλής και υψηλής τάξης για τα εκτροπόμετρα Wasca Coas ,Wave Analyzer ,iTrace και Β) η αξιολόγηση της συμφωνίας του σφαιρώματος μεταξύ των τριών εκτροπομέτρων καθώς και με την κυκλοπληγική διάθλαση με φορόπτερο.

Μεθοδολογία

Στη μελέτη έλαβαν μέρος 62 συμμετέχοντες με μέσο όρο ηλικίας 28 έτη (από 18 έως 58). Όλοι οι εξεταζόμενοι εξετάστηκαν από το ίδιο άτομο. Αρχικά, τοποθετήθηκε cyclogyl κολλύριο το οποίο δημιούργησε μυδρίαση και κυκλοπληγία. Έχοντας περάσει τουλάχιστον 20 λεπτά από την τοποθέτηση του cyclogyl, ώστε η κόρη των εξεταζόμενων να ανοίξει τουλάχιστον στα 7 mm, πραγματοποιήθηκε αρχικά έλεγχος του σφαιρώματος και του κυλίνδρου με την βοήθεια φορόπτερου (cyclo refraction). Ο μέσος όρος του σφαιρώματος και του κυλίνδρου ήταν -2,5 D (από -10,25 έως +2,5 D) και -0,5 D (από 0 έως -2,25 D) αντίστοιχα. Αμέσως μετά ο χειριστής ήταν έτοιμος να αξιολογήσει τις εκτροπές χαμηλής και υψηλής τάξης στην κεντρική οπτική ζώνη των 6mm.Η αξιολόγηση των εκτροπών χαμηλής και υψηλής τάξης, πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια των εκτροπομέτρων Wasca Coas(1), Wave Analyzer(2) και iTrace(3). Υπολογίστηκε το RMS για τις εκτροπές $2^{ης}$ -$6^{ης}$ τάξης, των

συνολικών εκτροπών και των εκτροπών υψηλής τάξης. Για την σύγκριση των εκτροπών με τα τρία μηχανήματα χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο των Bland and Altman [30,31,32] ανά δυο μηχανήματα. Τέλος, υπολογίστηκε σε ένα δείγμα 10 ατόμων η επαναληψιμότητα των μετρήσεων για καθένα από τα τρία μηχανήματα. Πραγματοποιήθηκαν πέντε μετρήσεις για κάθε οφθαλμό για καθένα από τα τρία μηχανήματα.

Αποτελέσματα

Για τις συγκρίσεις των μηχανημάτων 1-2 και 2-3 διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζουν καλή συμφωνία τόσο για τις εκτροπές $2^{ης}$ τάξης όσο και για τις συνολικές εκτροπές. Για τις εκτροπές $2^{ης}$ τάξης καλύτερη συμφωνία παρατηρείται στα μηχανήματα 2-3 με ποσοστό διαφωνίας 40,5%, ακολούθως η συμφωνία των μηχανημάτων 1-2 με ποσοστό διαφωνίας 43,3% και τέλος η συμφωνία των μηχανημάτων 1-3 με ποσοστό διαφωνίας 61,3%. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν για τις συνολικές εκτροπές. Γενικά, οι συγκρίσεις των μηχανημάτων για τις εκτροπές υψηλής τάξης παρουσιάζουν κακή συμφωνία με ποσοστά διαφωνίας πάνω από το 100%. Για την σύγκριση των σφαιρωμάτων παρατηρήθηκε ότι η σύγκριση των σφαιρωμάτων μεταξύ των μηχανημάτων 2-4 και 1-4 παρουσιάζουν την μικρότερη διαφωνία με ποσοστά 44% και 49% αντίστοιχα. Η χειρότερη συμφωνία παρατηρείται στη σύγκριση των μηχανημάτων 1-3 με ποσοστό διαφωνίας 108%. Τέλος, στο Wasca παρατηρείται καλύτερη επαναληψιμότητα σε σχέση με το Wave Analyzer και iTrace.

Συμπεράσματα

Παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφωνίες για τις εκτροπές υψηλής τάξης ανάμεσα στα τρία μηχανήματα Αντίθετα, για τις εκτροπές $2^{ης}$ τάξης και για τις συνολικές εκτροπές παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ των τριών μηχανημάτων. Καλύτερη συμφωνία σφαιρωμάτων με το cyclo sphere refraction έχουν τα μηχανήματα Wave Analyzer και Wasca Coas. Τέλος, η επαναληψιμότητα για τις εκτροπές $2^{ης}$ τάξης και για τις συνολικές εκτροπές είναι καλή ενώ σε γενικές γραμμές η επαναληψιμότητα των $3^{ης}$ μέχρι και $6^{ης}$ τάξης χαρακτηρίζεται κακή.

Abstract

Purpose

New optical technologies can detect ocular aberrations beyond defocus and astigmatism. Ocular aberrations can be measured in several ways, including the use of aberrometer. In theory, correction of HOAs beyond simple sphere and cylinder increases retinal image resolution and contrast which in turn allows patients to see the world with finer and higher contrast. HOAs are usually of much smaller magnitude than low order aberrations. Successful HOA correction through customized lazer refractive surgery, contact lenses or intraocular lenses relies on an accurate measurement of HOA. However, a comparison of the HOA measurements among different aberrometers and the knowledge of the measurement agreements with the use of aberrometers has always been an important field of research offering the opportunity for better and more useful ophthalmological information. Purposes of this study are a) the evaluation of agreement of low and high order aberrations using the aberrometers Wasca Coas, Wave Analyzer and iTrace and b) the assessment of the agreement of the sphere measurements with the three aberrometers and with the cycloplegic refraction with phoropter.

Methods

In the study took part 62 participants. The average age of the 62 participants was 28 years old (from 18 to 58 years old). All the participants were examined by the same person. Initially, cyclogyl collyrium was placed upon the eye in order to create mydriasis and cycloplegia. Twenty minutes after the infusion of the cyclogyl in order to dilate the pupil 7mm, an examination of the sphere and the cylinder was conducted with the use of a phoropter. The average value of the sphere and the cylinder were 5D (from -10,25 to +2,5 D) and -0,5D (from 0 to -2,25) respectively. Promptly after that the operator was ready to evaluate the low and high order aberrations in the central optical zone of 6mm. The evaluation of the low and high order aberrations was conducted with the use of Wasca Coas(1), Wave Analyzer(2) and iTrace(3) aberrometers. The RMS for the 2^{nd} to 6^{th} order of aberrations, of the total aberrations and the high order aberrations was measured as well. For the comparison of the aberrations measured with the three devices as named above the statistical methods of

Bland and Altman were employed per two devices. Finally, the repeatability of the measurement results for each of the three devices was checked in a specimen of 10 people. Five measurements took place for each eye with each of the three devices.

Results

From the comparisons of the devices 1-2 and 2-3 it was concluded that they present adequate agreement not only on the 2nd order aberrations but for the total aberrations as well. Regarding the 2nd order aberrations an agreement of larger scale is noticed in the devices 2-3 with a 40,5% of disagreement, then comes the agreement of 1-2 devices with 43,3% of disagreement and last comes the agreement of 1-3 devices with 61,3% of disagreement. Similar results were noticed in the field of total aberrations. Generally the comparison of the devices measurements for the high order aberrations demonstrates a very bad percentage of agreement, with percentages of disagreement above 100%. For the comparison of spheres we noticed that the sphere comparison among the devices 2-4 and 1-4 demonstrate the smallest percentage of agreement, 44% and 49% respectively. The largest scale disagreement can be found in the comparison of 1-3 devices with 108% percentage of disagreement. Finally, Wasca demonstrates more accurate repeatability than the Wave Analyzer and the iTrace.

Conclusions

Important disagreements in the measurements with the three devices are highlighted regarding the high order aberrations. On the contrary, regarding the 2nd order aberrations and the total aberrations we noticed a large scale agreement among the three devices. Wave Analyzer and Wasca Coas demonstrate the largest scale sphere agreement with the cyclo sphere refraction. In the end, the repeatability regarding the 2nd order aberrations and the total aberrations is good, while in general the repeatability of the 3rd to the 6th order of aberrations is considered to be bad.

Ευχαριστίες

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όλους εκείνους που συντέλεσαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας και με βοήθησαν ο καθένας με τον δικό του τρόπο.

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως την κ.Παναγοπούλου για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλα τα σημεία της παρούσας εργασίας. Υπό την συνεχή επίβλεψή της η εργασία αυτή διεκπεραιώθηκε επιτυχώς.

Ευχαριστώ την κ.Μοσχανδρέα. Με τις κατάλληλες οδηγίες της, η στατιστική ανάλυση της συγκεκριμένης εργασίας πραγματοποιήθηκε με επιτυχία.

Επίσης, ευχαριστώ τον κ.Τσιλιμπάρη για την επιθυμία του να συμμετέχει στην συγκεκριμένη εργασία.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό από τα εξεταστήρια και τις γραμματείες του Β.Ε.Μ.Μ.Ο για την κατανόηση που έδειξαν όλο αυτό το διάστημα.

Ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου για την πολύτιμη βοήθεια τους τα δυο αυτά χρόνια.

Και τέλος την οικογένεια μου για την συμπαράσταση και βοήθεια που μου προσέφερε.

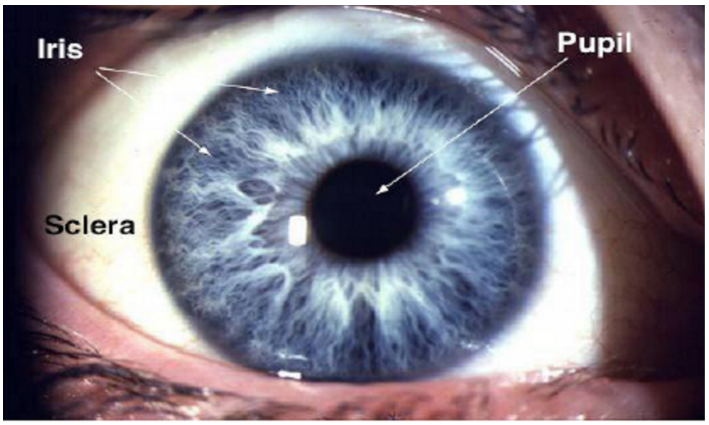
Περιεχόμενα:

Α) Γενικό μέρος

1) *Οφθαλμός - Ανατομία*

Το **μάτι** ή **οφθαλμός** είναι το οπτικό όργανο του ανθρώπου και άλλων ζωντανών οργανισμών. Μέσω αυτού λαμβάνονται τα οπτικά ερεθίσματα και γίνεται αντιληπτό το περιβάλλον.

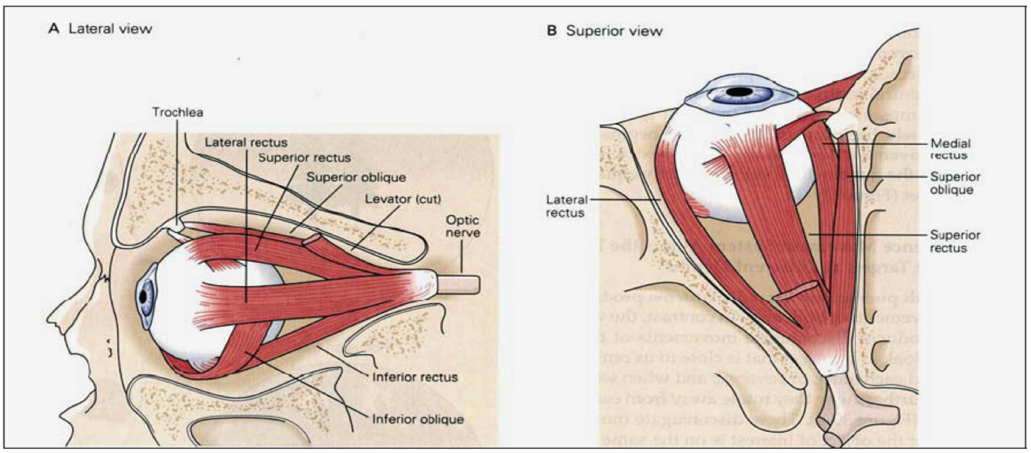
Με τα μάτια του ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τον κόσμο γύρω του. Είναι το **κύριο όργανο** που χρησιμοποιεί καθημερινά για να διεκπεραιώνει κάθε του επιθυμία. Πραγματικά, τα μάτια, μας βοηθούν να επιβιώσουμε και ταυτόχρονα εξασφαλίζουν άμεση επικοινωνία με τον ’έξω-σωματικό’ μας κόσμο.



Εικόνα 1 : Ανθρώπινος οφθαλμός όπου φαίνεται ξεκάθαρα η ίριδα και η κόρη.

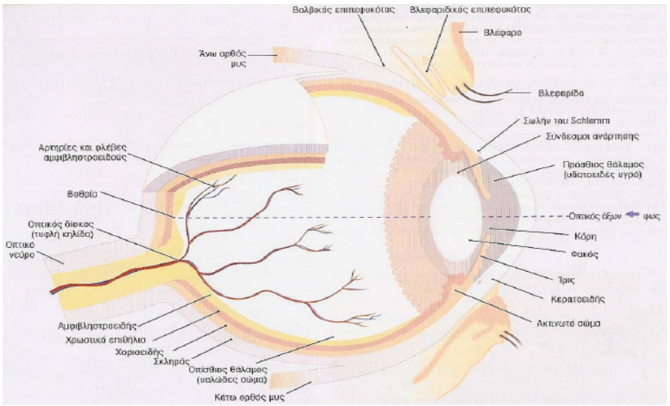
Ο οφθαλμός βρίσκεται μέσα στον σύστοιχο κόγχο από τον οποίο προστατεύεται πάνω, κάτω, πίσω και πλάγια. Ο κόγχος έχει σχήμα τετράπλευρης πυραμίδας (εικόνα 2) το τοίχωμα της οποίας καλύπτεται από περιόστεο. Εντός του κόγχου εκτός από τον βολβό του οφθαλμού βρίσκονται ακόμη τα εξής: ο δακρυϊκός αδένας, οφθαλμοκινητικοί μύες, το λίπος του κόγχου, αγγεία και νεύρα. Ο οφθαλμός προστατεύεται έμπροσθεν από το άνω και κάτω βλέφαρο (εικόνα 1), που αποτελούν δύο κινητά δερματομυώδη πέταλα, που ανοιγοκλείνουν αυτόματα ή κατόπιν βούλησης. Η οπίσθια επιφάνεια των βλεφάρων καλύπτεται από βλεννογόνο ουσία που ονομάζεται επιπεφυκότας ο οποίος εκτός της προστασίας που παρέχει, λειτουργεί και σαν επικουρικός δακρυϊκός αδένας από τον οποίο εκκρίνονται δάκρυα. Το δακρυϊκό σύστημα αποτελείται από δύο τμήματα, το εκκριτικό που παράγονται τα δάκρυα με τα οποία διατηρείται υγρός ο επιπεφυκότας και ο κερατοειδής, και το

αποχετευτικό τμήμα που αποτελείται από τα δακρυϊκά σωληνάρια, τον δακρυϊκό ασκό και το ρινοδακρυικό πόρο με τον οποίο τα δάκρυα παροχετεύοντας στην ρινική κοιλότητα. Στην κατασκευή του οφθαλμού, διακρίνουμε επίσης τους οφθαλμοκινητικούς μύες, με τους οποίους επιτυγχάνεται η στροφή του οφθαλμού σε διάφορες κατευθύνσεις. Αυτοί είναι οι: τέσσερις ορθοί και δύο λοξοί. Στους μύες επίσης λαμβάνονται και ο ανελκτήρας του άνω βλεφάρου (εικόνα 2).



Εικόνα 2: Οφθαλμοκινητικοί μύες, οφθαλμικός κόγχος

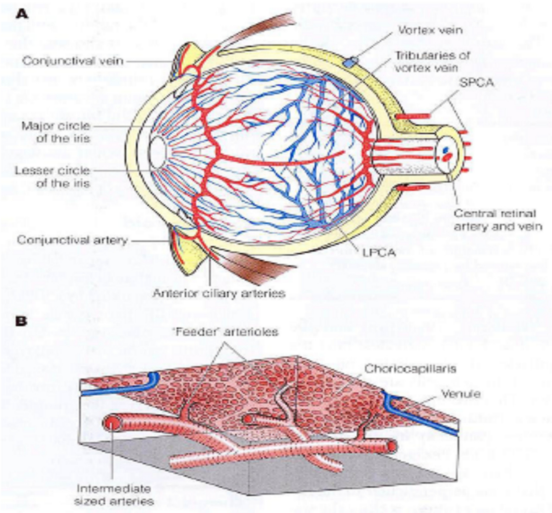
Ο βολβός του οφθαλμού είναι σχεδόν σφαιρικός με διάμετρο 24 - 25 mm περίπου. Διακρίνονται σε αυτόν τρεις χιτώνες:
Ο ινώδης χιτώνας, ο αγγειώδης και ο νευρικός/αμφιβληστροειδής χιτώνας (εικόνα 3).



Εικόνα 3: Ανατομικά στοιχεία του ανθρώπινου οφθαλμού

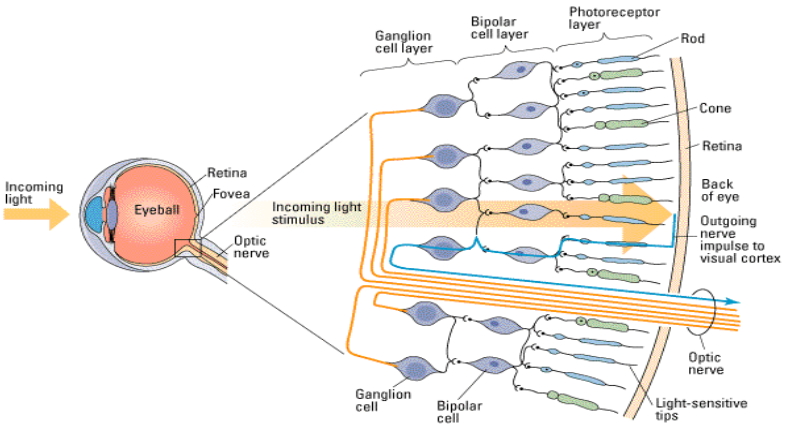
Ο **ινώδης χιτώνας**: είναι η εξωτερική μεμβράνη του οφθαλμικού βολβού, η οποία του προσδίδει σχήμα και αντοχή. Η κεντρική περιοχή στο μπροστινό μέρος είναι κυρτή και διαφανής και λέγεται κερατοειδής χιτώνας.

Ο **αγγειώδης χιτώνας** είναι μία λεπτή μεμβράνη ανάμεσα στον εξωτερικό, προστατευτικό, σκληρό χιτώνα και στον αμφιβληστροειδή. Διακρίνεται προς τα πίσω σε χοριοειδή, ακτινωτό σώμα στην μέση και ίριδα εμπρός. Περιέχει πολλά κύτταρα χρωστικής ουσίας, μεγάλα αιμοφόρα αγγεία και χοριοτριχοειδή (εικόνα 4) που συμβάλλουν στη θρέψη του ματιού και στον σχηματισμό του υαλοειδούς σώματος και του υδατοειδούς υγρού.



Εικόνα 4 : Α.Χοριοειδική κυκλοφορία Β. Μεγάλα αγγεία και χοριοτριχοειδή

Ο τρίτος χιτώνας του οφθαλμικού βολβού είναι ο **νευρικός / αμφιβληστροειδής χιτώνας** ο οποίος φέρει τους φωτουποδοχείς και έχει σχήμα κατά προσέγγιση σφαιρικό (εικόνα 5) . Πρόκειται για μία εσωτερική μεμβράνη η οποία δέχεται και μεταφέρει στον εγκέφαλο οπτικά ερεθίσματα. Η αγγείωσή του γίνεται από την κεντρική αρτηρία του αμφιβληστροειδούς .Οι νευρικές ίνες του αμφιβληστροειδούς συρρέουν προς την οπτική θηλή και σχηματίζουν το οπτικό νεύρο.



Εικόνα 5 : Σχηματική αναπαράσταση του αμφιβληστροειδή χιτώνα

2) *Τα οπτικά μέσα του οφθαλμού*

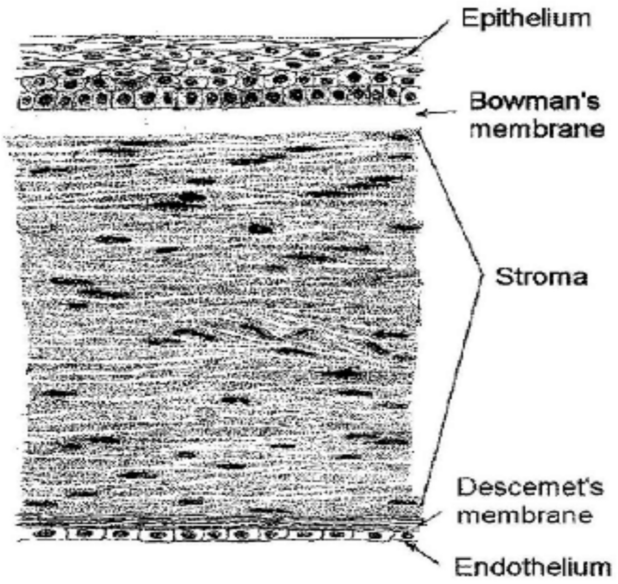
Τα οπτικά μέσα του οφθαλμού είναι οργανωμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπουν την διάδοση του φωτός με πολύ χαμηλά επίπεδα σκέδασης[1,2]. Η γεωμετρία των οπτικών μέσων είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει τον σχηματισμό ευκρινούς ειδώλου στον αμφιβληστροειδή με σχετικά χαμηλές οπτικές εκτροπές[3,4,5]. Το οπτικό σύστημα του οφθαλμού αποτελείται από τέσσερις διαθλαστικές επιφάνειες:

1) Οι εισερχόμενες στον οφθαλμό ακτίνες συναντούν τη πρώτη διαθλαστική επιφάνεια η οποία είναι η πρόσθια επιφάνεια του ***κερατοειδή*** με σχήμα επιμήκους ελλειψοειδούς[6]. Η οπίσθια επιφάνεια του κερατοειδή έχει σχήμα κατά προσέγγιση σφαιρικό.

   Ο **κερατοειδής χιτώνας** έχει πάχος 540 μικρά στο κέντρο και περίπου 700 μικρά στην περιφέρεια, ενώ αποτελείται από τα εξής στρώματα (εικόνα 6):

   - ***Επιθήλιο*** : Στην εξωτερική πλευρά του κερατοειδή υπάρχει το επιθήλιο το οποίο αποτελείται από 5-7 στρώσεις επιθηλιακών κυττάρων. Τα επιθηλιακά κύτταρα στην βάση του επιθηλίου έχουν κυλινδρικό σχήμα ενώ τα επιφανειακά είναι πεπλατυσμένα. Το σύνολο των κυττάρων του επιθηλίου συνολικά αναγεννάται κάθε επτά ημέρες. Ο πολλαπλασιασμός των επιθηλιακών κυττάρων πραγματοποιείται κυρίως στην περιφέρεια του κερατοειδή και πιο συγκεκριμένα στο σκληροκερατοειδικό όριο όπου βρίσκονται τα αρχέγονα κύτταρα. Η πορεία των επιθηλιακών κυττάρων από την μίτωση ως την απόπτωση συνοδεύεται με μετακίνηση από την περιφέρεια προς το κέντρο και από την βάση του επιθηλίου προς την επιφάνεια. Το επιθήλιο αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία βρίσκεται η δακρυϊκή στοιβάδα. Η δακρυϊκή στοιβάδα είναι η εξώτατη διαθλαστική επιφάνεια του οφθαλμού η οποία μέσω της επιφανειακής τάσης λαμβάνει το λείο σχήμα που απαιτείται για διάθλαση του φωτός χωρίς σημαντική σκέδαση.
   - ***Βασική μεμβράνη*** : Βρίσκεται ακριβώς κάτω από το επιθήλιο η οποία αποτελείται από ίνες κολλαγόνου τύπου IV.
   - ***Bowman μεμβράνη*** : Βρίσκεται κάτω από την βασική μεμβράνη. Το στρώμα αυτό είναι πολύ ανθεκτικό με αποτέλεσμα να προστατεύει τον κερατοειδή από τραυματισμούς.

- ***Στρώμα*** : Το στρώμα είναι το παχύτερο τμήμα (περίπου 500 μm) και βρίσκεται ακριβώς κάτω από την μεμβράνη του Bowman . Αποτελείται από λεπτές κολλαγόνες ίνες οι οποίες είναι παράλληλα τοποθετημένες και με διαφορετική κατεύθυνση μεταξύ τους. Ο ειδικός αυτός σχηματισμός των κολλαγόνων ινών προσδίδει στον κερατοειδή αφ' ενός διαύγεια και αφ' ετέρου μηχανική σταθερότητα. Ανάμεσα στις ίνες κολλαγόνου υπάρχει η εξωκυττάρια ουσία η οποία αποτελείται κυρίως από γλυκοσαμινογλυκάνες στις οποίες δεσμεύεται νερό μέσω δεσμών υδρογόνου. Τέλος στο στρώμα υπάρχουν διάσπαρτα κερατοκύτταρα.
- ***Δεσκεμέτιος μεμβράνη*** : Βρίσκεται ανάμεσα στο στρώμα και το ενδοθήλιο. Είναι η λεπτότερη από όλες τις μεμβράνες (περίπου 10-20μm). Η Δεσκεμέτιος μεμβράνη είναι η βασική μεμβράνη του ενδοθηλίου.
- ***Ενδοθήλιο*** : Το ενδοθήλιο αποτελείται από μία μονοκυτταρική στρώση εξαγωνικών κυττάρων τα οποία δεν αναγεννώνται. Τα κύτταρα αυτά παίζουν ζωτικό ρόλο στη διατήρηση της διαύγειας του κερατοειδή μέσω της άντλησης νερού από τον κερατοειδή προς το πρόσθιο θάλαμο. Αυτή η διάταξη εξασφαλίζει την πυκνή διάταξη των ινών κολλαγόνου του στρώματος σε διαδοχικές στρώσεις. Σε περιπτώσεις ανεπάρκειας του ενδοθηλίου να επιτελέσει αυτή τη λειτουργία η μέση απόσταση μεταξύ των ινών του κολλαγόνου αυξάνει με αποτέλεσμα τη σκέδαση και την απώλεια της διαύγειας του κερατοειδή.



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση των στοιβάδων του κερατοειδή

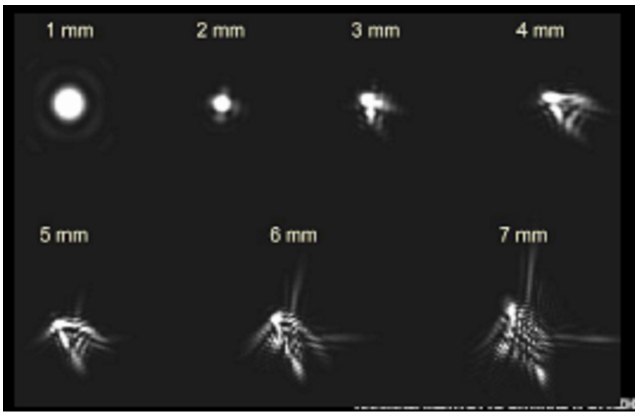
2) Εν συνεχεία το φως συναντά τον πρόσθιο θάλαμο (πάχος 3,3-3,5mm) όπου εμπεριέχεται ***υδατοειδές υγρό*** με δ.δ = 1,336 (δεύτερο οπτικό στοιχείο).
3) Η ίριδα αποτελεί το διάφραγμα του οπτικού συστήματος το οποίο ρυθμίζει την ποσότητα του φωτός που φτάνει στον αμφιβληστροειδή. Πίσω από την ίριδα βρίσκεται ***ο κρυσταλλοειδής φακός*** με δ.δ = 1,41 και πάχος 3,5-4,0 mm (ο οποίος αποτελεί το τρίτο οπτικό στοιχείο) όπου μέσω της διαδικασίας της προσαρμογής [7,8] καθίσταται δυνατή η ευκρινής απεικόνιση τόσο των κοντινών όσο και των μακρινών αντικειμένων.
4) Ο χώρος πίσω από τον κρυσταλλοειδή φακό καταλαμβάνεται από το ***υαλώδες σώμα*** με δ.δ = 1,337 (το οποίο αποτελεί το τέταρτο οπτικό στοιχείο).

3) *Ποιότητα όρασης- αμφιβληστροειδικού ειδώλου*

Η ποιότητα της όρασης του ανθρώπινου οφθαλμού εξαρτάται τόσο οπτικούς τόσο και από νευρωνικούς παράγοντες.

Οπτικοί παράγοντες:

- **Εκτροπές χαμηλής τάξης**. Σ' αυτή τη κατηγορία ανήκουν ο στιγματισμός και το σφαίρωμα (μυωπία, υπερμετρωπία). **Εκτροπές υψηλής τάξης** (τρίτης τάξης και άνω). Στις εκτροπές υψηλής τάξης εμφανίζονται το κόμα, το τρεφόιλ, το τετραφόιλ, η σφαιρική εκτροπή κ.τ.λ. Για μεγάλες διαμέτρους της κόρης (4-7 mm) οι εκτροπές (υψηλής τάξης) είναι αυτές που καθορίζουν την διακριτική ικανότητα και την ποιότητα της εικόνας (εικόνα 7).
- **Περίθλαση** [7,8] . Για μικρές διαμέτρους της κόρης (< 2 mm) η περίθλαση είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την διακριτική ικανότητα του οφθαλμού(εικόνα 7).
- **Σκέδαση.** Καθώς το φως διέρχεται η ποιότητα του ειδώλου μειώνεται
- **Φακός.** Η ποιότητα της όρασης καθορίζεται επίσης από την προσαρμοστική ικανότητα του φακού.

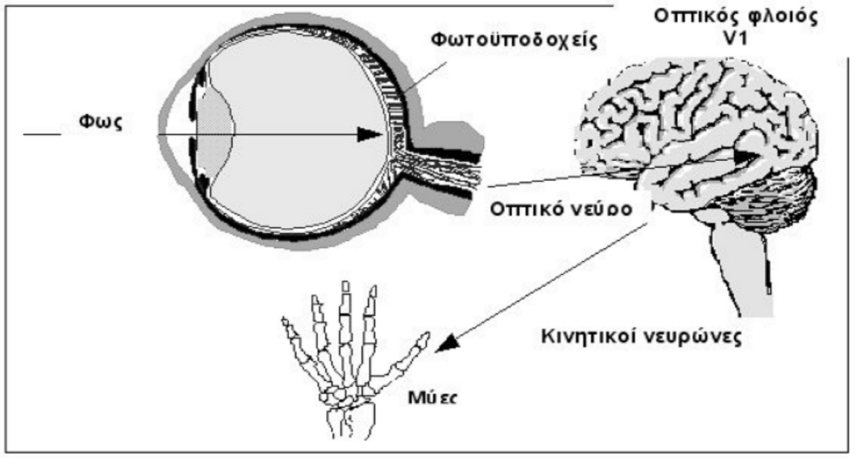


Εικόνα 7. Συνάρτηση διασποράς σημείου (PSF) για διαφορετικές διαμέτρους της κόρης του οφθαλμού. Ιδανική διάμετρος κόρης περίπου στα 2.5mm

Νευρωνικοί παράγοντες:

Η αίσθηση της όρασης αποτελεί ένα αμάλγαμα μιας ομάδας διαφορετικών ικανοτήτων, που λειτουργούν αυτόνομα και ενσωματώνονται σε μια ενοποιημένη αντίληψη του χώρου. Το πόσο ικανοποιητικά μπορούμε να κινούμαστε στο περιβάλλοντα χώρο και να αντιλαμβανόμαστε τις σκηνές που εξελίσσονται γύρω μας εξαρτάται από το πόσο αποτελεσματικά ο εγκέφαλος επεξεργάζεται τις οπτικές πληροφορίες που δέχεται.

- Η οπτική αντίληψη αρχίζει στον αμφιβληστροειδή και πραγματοποιείται σε δύο στάδια (εικόνα 8) . Το φως που διέρχεται από την πρόσθια επιφάνεια του οφθαλμού προβάλλεται στον αμφιβληστροειδή χιτώνα με τους φωτουποδοχείς όπου το μέγεθος και η χωρική κατανομή των οποίων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του αμφιβληστροειδικού ειδώλου. Οι φωτουποδοχείς μετατρέπουν την φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρικό σήμα (νευρικές ώσεις). Στη συνέχεια οι ώσεις αυτές μεταβιβάζονται, μέσω του οπτικού νεύρου, αρχικά στον έξω γονατώδη πυρήνα (LGN) και στη συνέχεια στο κέντρο της όρασης (V1, πρωτοταγής οπτικός φλοιός) και σε ανώτερα κέντρα του εγκεφάλου για περαιτέρω επεξεργασία, αναγκαία για την αντίληψη [π.χ. στο V4 για την αποκωδικοποίηση του χρώματος, της μορφής και του σχήματος των εικόνων, και στο V5 για τον προσανατολισμό, την κίνηση και το βάθος πεδίου εικόνων]. Εκεί, οι οπτικές πληροφορίες αναλύονται και «εκδηλώνονται μέσω αντιδράσεως του μυο-σκελετικού μας συστήματος (π.χ αντανακλαστικά, κίνηση).



Εικόνα 8. Τα στάδια αντίληψης της όρασης και η απαραίτητη επεξεργασία για την «εκδήλωση» της κίνησης.

4) Οφθαλμικές εκτροπές[44] *(μερικές από αυτές)*

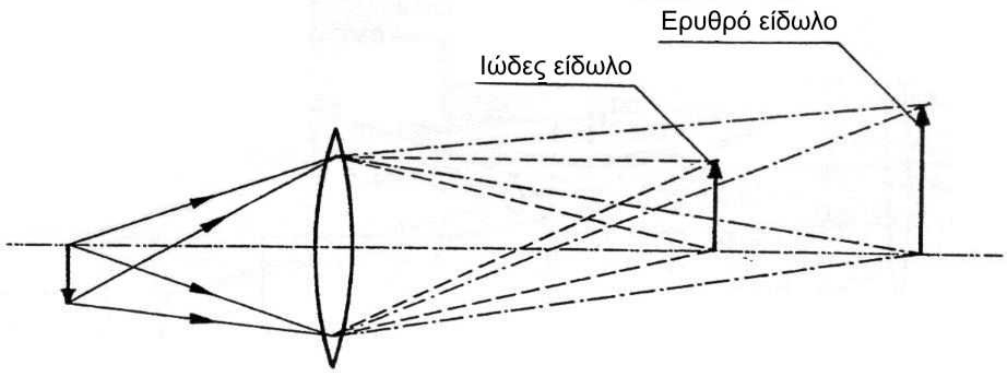
➢ *Χρωματική εκτροπή*

Το χρωματικό σφάλμα των φακών αποτελεί άμεση συνέπεια του δείκτη διάθλασης αυτού. Ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού (n) εξαρτάτε από το μήκος κύματος του φωτός που προσπίπτει σε αυτό. Όλες επομένως οι ιδιότητες και τα μεγέθη ενός φακού, τα οποία εξαρτώνται από το δείκτη διάθλασης, μεταβάλλονται με το μήκος κύματος, δηλαδή το χρώμα του φωτός. Σύμφωνα με τη παραξονική θεωρεία (θεωρία Gauss), δύο βασικά μεγέθη που εξαρτώνται από το μήκος κύματος του φωτός, είναι η εστιακή απόσταση του φακού (f), ή γενικότερα η θέση του ειδώλου, και κατά συνέπεια η μεγέθυνση

$$m = \frac{S_i}{S_o}$$

(όπου S_i η απόσταση του ειδώλου από το φακό και S_0 η απόσταση του αντικειμένου από το φακό).

Εάν δηλαδή ένας φακός έχει ως αντικείμενο μια πηγή λευκού φωτός τότε δημιουργείται ένα πλήθος ειδώλων, ένα για κάθε μήκος κύματος, σε διαφορετικές αποστάσεις από το φακό και με διαφορετικά μεγέθη (εικόνα 9). Η μεταβολή στη θέση των ειδώλων συνιστά το **αξονικό χρωματικό σφάλμα** (axial chromatic aberration), ενώ η μεταβολή στο μέγεθος, το **πλευρικό χρωματικό σφάλμα** (lateral chromatic aberration). Επειδή ο δείκτης διάθλασης αυξάνεται προς τα μικρότερα μήκη κύματος, το ιώδες είδωλο θα είναι εγγύτερα προς το φακό, άρα και μικρότερο απ' ότι το ερυθρό είδωλο. Μεταξύ των δύο αυτών ειδώλων, που αντιστοιχούν περίπου στα δύο άκρα του ορατού φάσματος, υπάρχουν άπειρα είδωλα όλων των χρωμάτων. Είναι προφανές λοιπόν ότι σε όποια θέση και αν τοποθετηθεί το επίπεδο απεικόνισης του ειδώλου, θα εστιάζει καλά το είδωλο ενός μόνο χρώματος.



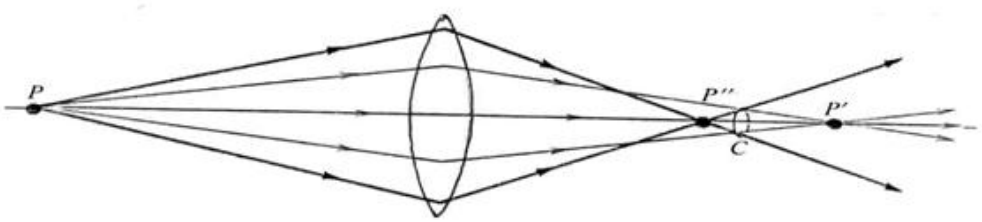
Εικόνα 9: Χρωματική εκτροπή

- ***Μονοχρωματικές εκτροπές***

Σφαιρική εκτροπή

Το **σφάλμα σφαιρικής εκτροπής** (spherical aberration) εμφανίζεται από σφαιρικούς φακούς, κάτοπτρα κατά την απεικόνιση σημείου που βρίσκεται πάνω στον οπτικό άξονα, σε πεπερασμένη ή άπειρη απόσταση, όταν το άνοιγμα του φακού / κατόπτρου είναι μεγάλο. Η σφαιρική εκτροπή (εικόνα 10) συνίσταται στο ότι το σημείο εστίασης των περιφερειακών (μη αξονικών) ακτίνων της δέσμης, δεν συμπίπτει με το σημείο εστίασης των κεντρικών (αξονικών) ακτίνων, αλλά είναι μετατοπισμένο κατά μήκος του άξονα. Η παρουσία θετικής σφαιρικής εκτροπής υποδηλώνει ότι οι ακτίνες που διαδίδονται από την περιφέρεια της κόρης διαθλώνται περισσότερο από τις κεντρικές

(αξονικές) ακτίνες. Για λόγους πρακτικών εφαρμογών μπορούμε να διακρίνουμε δύο είδη σφαιρικής εκτροπής, την **αξονική σφαιρική εκτροπή** (longitudinal spherical aberration), και την **εγκάρσια σφαιρική εκτροπή** (transverse spherical aberration).



Εικόνα 10. Σφαιρική εκτροπή

Αστιγματισμός και Καμπύλωση πεδίου

Το σφάλμα του **αστιγματισμού** και το σφάλμα της **καμπύλωσης πεδίου** εξετάζονται μαζί γιατί αν και επιδρούν κατά διαφορετικό τρόπο στο είδωλο, προέρχονται εντούτοις από το ίδιο φαινόμενο.

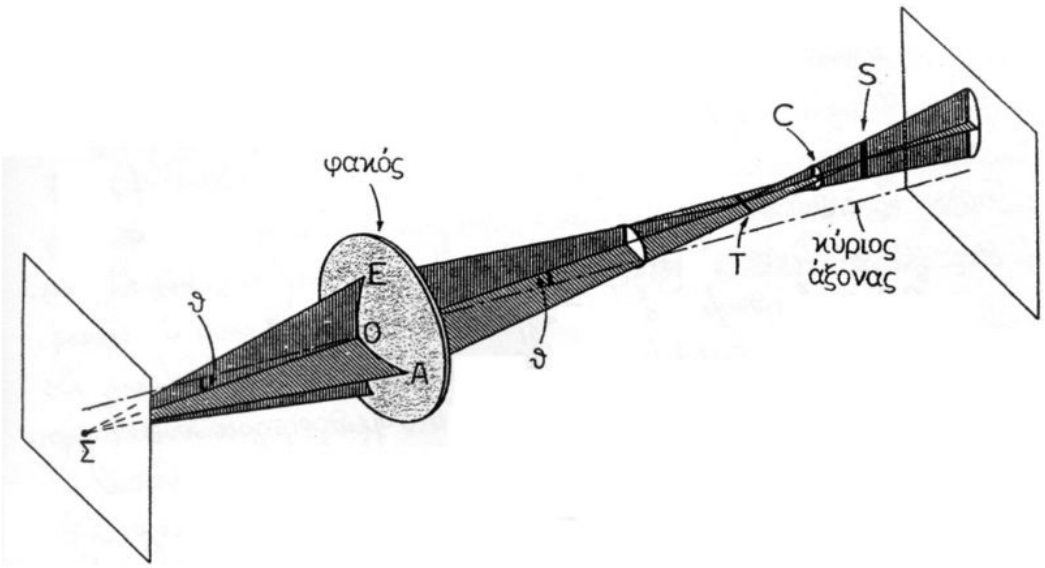
Έστω ότι ένας φακός είναι διορθωμένος από το σφαιρικό σφάλμα και την κόμη, τότε για αντικείμενα που βρίσκονται σε σχετικά μεγάλη απόσταση από τον κύριο άξονα παρατηρείτε οτι τα είδωλα τους είναι μη στιγματικά. Συγκεκριμένα, μια λεπτή στιγματική δέσμη που ξεκινάει από το σημείο Σ και της οποίας ο άξονας σχηματίζει γωνία θ με τον κύριο άξονα του φακού (σχήμα 11) μετατρέπεται σε αστιγματική. Οι ακτίνες που περιέχονται στο επίπεδο που ορίζεται από τον άξονα της δέσμης και τον κύριο άξονα ονομαζόμενο πρωτεύον ή μεσημβρινό επίπεδο (tangential plane) (ΟΕ), καθώς και των παράλληλων προς αυτό επιπέδων, συγκεντρώνονται στο πρωτεύων ή μεσημβρινό είδωλο (εστιακή γραμμή Τ). Το είδωλο αυτό είναι μια μικρή ευθεία γραμμή κάθετη στο πρωτεύον επίπεδο. Αντίστοιχα, οι ακτίνες που προέρχονται από το δευτερεύον ή ακτινικό επίπεδο (sagital plane) (ΟΑ) που είναι κάθετο στο πρωτεύον καθώς και των παραλλήλων προς αυτό επιπέδων, συγκεντρώνονται στο δευτερεύον ή ακτινικό είδωλο (S) που είναι μια μικρή ευθεία κάθετη στο δευτερεύον επίπεδο. Οι δύο εστιακές γραμμές Τ και S είναι προφανώς ασύμβατα κάθετες μεταξύ τους και κάθετες στον άξονα της δέσμης. Η διατομή της αστιγματικής δέσμης κοντά στις εστιακές γραμμές είναι γενικά μια έλλειψη, της οποίας ο μεγάλος άξονας είναι

παράλληλος προς την εγγύτερη εστιακή γραμμή. Στη μέση περίπου της απόστασης των εστιακών γραμμών η διατομή της δέσμης γίνεται σχεδόν κυκλική και το εμβαδόν της παίρνει την ελάχιστη τιμή. Ο κύκλος αυτός ονομάζεται κύκλος ελάχιστης σύγχυσης . Η απόσταση των δύο αστιγματικών γραμμών l ονομάζεται αστιγματική διαφορά και δίνεται από τη σχέση:

$$l = s'_t - s'_s$$

όπου οι αποστάσεις s'_t και s'_s μετρούνται κατά μήκος της κύριας ακτίνας, του άξονα συμμετρίας της δέσμης.

Ο αστιγματισμός όπως και η κόμη οφείλονται στην ασυμμετρία της προσπίπτουσας δέσμης ως προς το φακό. Η συμπεριφορά τους διαφέρει στο ότι ο αστιγματισμός κυριαρχεί όταν η γωνία θ είναι μεγάλη και η δέσμη λεπτή, ενώ η κόμη κυριαρχεί όταν η γωνία θ είναι μικρή και η δέσμη ευρεία. Μια άλλη διαφορά είναι ότι η κόμη διαχέει το είδωλο κάθετα προς τον άξονα της δέσμης, ενώ ο αστιγματισμός διαχέει το είδωλο κατά μήκος του άξονα της δέσμης.



Εικόνα 11: Αστιγματισμός

Στην εικόνα 12 φαίνεται ότι μεταβάλλοντας τη γωνία πρόσπτωσης θ της εισερχόμενης δέσμης, οι αποστάσεις στις οποίες δημιουργούνται το μεσημβρινό είδωλο T και το ακτινικό είδωλο S μεταβάλλονται. Για μικρές σχετικά γωνίες θ , οι αποστάσεις αυτές δημιουργούν κύκλους, άρα η επιφάνεια του ειδώλου είναι σφαίρα, που για θ=0, εφάπτεται στο επίπεδο Gauss (παραξονικό επίπεδο εστίασης). Όταν η

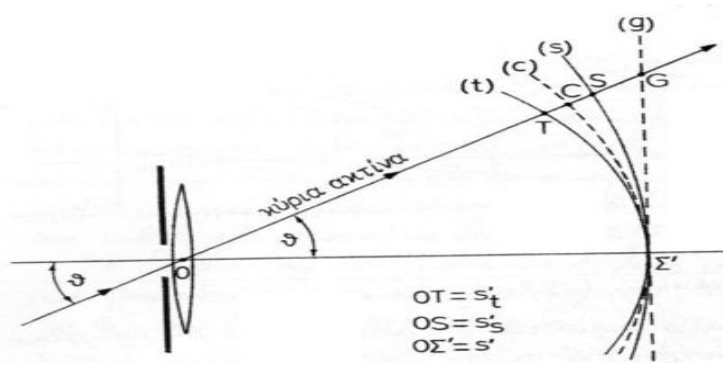
επιφάνεια (t) προηγείται της (s)**,** όπως στη περίπτωση του συγκλίνοντα φακού και του σχήματος, ο αστιγματισμός λέγεται εσωτερικός ή αρνητικός και ο φακός υποδιορθωμένος. Όταν προηγείται η επιφάνεια (s) ισχύουν τα αντίθετα. Όταν αυξάνεται η γωνία θ, οι τομές των αστιγματικών αυτών επιφανειών γίνονται παραβολές και στη συνέχεια στρέφουν προς το επίπεδο του Gauss, γιατί παρεμβαίνουν σφάλματα ανώτερης τάξης. Η επιφάνεια ελάχιστης σύγχυσης (c) που σχηματίζεται το ευκρινέστερο είδωλο, βρίσκεται σε ίση περίπου απόσταση από τις δύο αστιγματικές εστιακές επιφάνειες, άρα είναι και αυτή καμπύλη όμοια με τις προηγούμενες. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί την **καμπύλωση πεδίου** (field curvature), η οποία όταν υπάρχει μας υποχρεώνει να κάμψουμε ανάλογα την επιφάνεια του ειδώλου. Η ακτίνα καμπυλότητας αυτής της επιφάνειας ονομάζεται **ακτίνα Petzval** (Petzval radius) και υπολογίζεται βάσει της σχέσης :

$$R_p = [n'_k \sum_{j=1}^{k-1} \frac{(n_j - n'_j)c_i}{n_j n'_j}]^{-1}$$

όπου k είναι ο αριθμός των διοπτρικών επιφανειών, n ο δείκτης διάθλασης του αντικειμενικού χώρου, n’ ο δείκτης διάθλασης του χώρου ειδώλου και

$$c_i = \frac{1}{r_i}$$

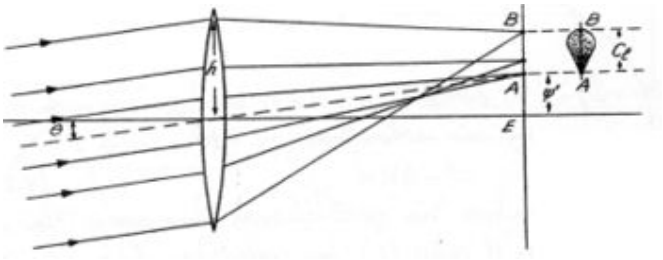
Η καμπυλότητα της διοπτρικής επιφάνειας



Εικόνα 12.

Κόμα

Το **σφάλμα κόμης** είναι το σφαιρικό σφάλμα δέσμης που παρουσιάζει ελαφριά ασυμμετρία ως προς το φακό, γιατί ο άξονας της δεν συμπίπτει με τον κύριο άξονα του φακού.



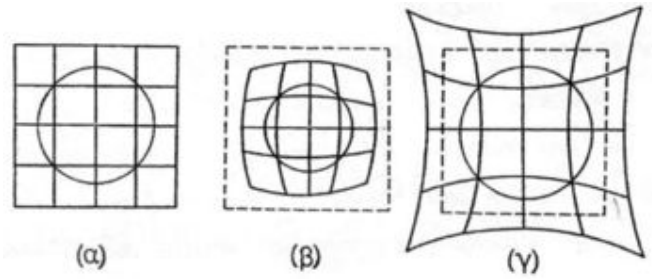
Εικόνα 13: Θετικό σφάλμα κόμης

Ο μηχανισμός της δημιουργίας της κόμης σε ένα μεσημβρινό επίπεδο συγκλίνοντος φακού, φαίνεται στην εικόνα 13, όπου οι περιφερειακές ακτίνες από ένα μακρινό φωτεινό σημείο συγκλίνουν στο Β, δίνοντας έτσι μεγαλύτερη μεγέθυνση από τις αξονικές που συγκλίνουν στο Α. Ενώ δηλαδή το σφαιρικό σφάλμα οφείλεται στη διαφορά της εστιακής απόστασης που παρουσιάζουν οι διάφορες ζώνες του φακού, το σφάλμα κόμης προέρχεται από τη διαφορά μεγέθυνσης που παρουσιάζουν οι ζώνες αυτές.

Παραμόρφωση

Η **παραμόρφωση ειδώλου** (distortion) δεν επηρεάζει την ευκρίνεια αυτού, αλλά μετατοπίζει τα σημεία του από τη θέση την οποία έπρεπε να έχουν σύμφωνα με την παραξονική θεωρεία. Συνεπώς, η μεγέθυνση δεν είναι σταθερή σε όλο το πεδίο του φακού. Για να μην αναπτύσσεται η παραμόρφωση θα πρέπει το διάφραγμα του φακού να συμπίπτει με το φακό. Στη περίπτωση αυτή έχουμε το **ορθοσκοπικό σύστημα** (orthoscopic system). Εάν το διάφραγμα απομακρυνθεί από το φακό, τότε εμφανίζεται η παραμόρφωση. Το είδωλο π.χ. ενός ορθογώνιου πλέγματος (εικόνα 14) παίρνει τη μορφή (β) εάν το διάφραγμα είναι μπροστά από στο φακό, οπότε έχουμε την **αρνητική ή βαρελοειδή παραμόρφωση** (barrel distortion), ενώ εάν το διάφραγμα είναι πίσω από το φακό, τότε το είδωλο έχει τη μορφή (γ) και έχουμε τη **θετική παραμόρφωση ή παραμόρφωση μηνίσκου** (positive distortion). Στην

αρνητική παραμόρφωση η μεγέθυνση ελαττώνεται καθώς τα σημεία του ειδώλου απομακρύνονται από το κέντρο του πεδίου, ενώ στη θετική συμβαίνει το αντίθετο.



Εικόνα 14 . Το είδωλο ενός πλέγματος από φακό με μηδενική παραμόρφωση (α), με θετική (γ), και αρνητική (β).

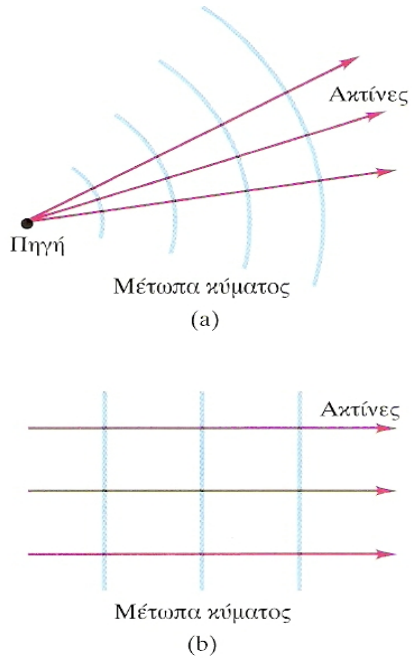
5.1) Εκτροπομετρία-Ανάλυση μετώπου κύματος [43]

Η χαρτογράφηση του κερατοειδή με τη βοήθεια των τοπογράφων, μας παρέχει μια πλήρη εικόνα για την καμπυλότητα και τη διαθλαστική ισχύ του κερατοειδή. Η διαθλαστική ισχύς του οφθαλμού ως αναφορά το σφαίρωμα τον κύλινδρο και τον άξονά του, μπορούν να μετρηθούν με μια πληθώρα οργάνων (εικόνα 15). Ωστόσο, προσπάθειες των επιστημόνων για μια περισσότερο ολοκληρωμένη εικόνα του οφθαλμού και της διαθλαστικής του δύναμης (από τον κερατοειδή μέχρι τον αμφιβληστροειδή), κατέληξαν στο να αναπτυχθεί ένας άλλος τρόπος με τον οποίο μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορία από τον ανθρώπινο οφθαλμό, ο οποίος ονομάζεται ***διαθλασιμετρία μετώπου κύματος***. Η ποιότητα της όρασης εξαρτάται από την ποιότητα των διαθλαστικών του μέσων. Πέρα από το κερατοειδή, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε για την ποιότητα των υπόλοιπων οπτικών στοιχείων του οφθαλμού (π.χ φακός, υαλώδες κ.τ.λ), καθώς όσο πιο ομοιογενή είναι τα διαθλαστικά μέσα του οφθαλμού, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα της όρασης και τόσο μικρότερες οι συνολικές εκτροπές. Έτσι, για τον υπολογισμό των ολικών εκτροπών του οφθαλμού τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε η καινοτόμος μέθοδος μέτρησης του μετώπου κύματος με σκοπό την πλήρη χαρτογράφηση των ολικών οπτικών σφαλμάτων και της διαθλαστικής δύναμης του οφθαλμού. Τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την χαρτογράφηση των ολικών εκτροπών αποκαλούνται ***εκτροπόμετρα***.

Εικόνα 15. Όργανα για μέτρηση διάθλασης

5 .2) Τι είναι μέτωπο κύματος [43,40]

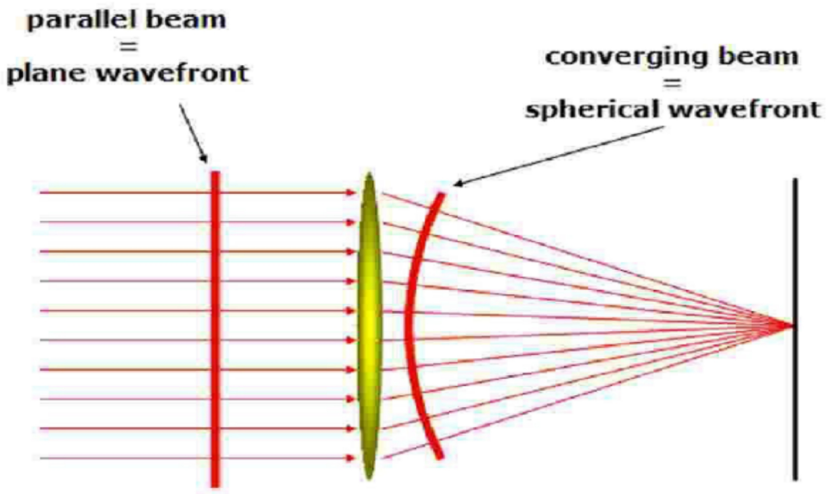
Το φως σύμφωνα με την οπτική φυσική είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο χαρακτηρίζεται από την σχέση c=λ*ν όπου λ είναι το μήκος κύματος του φωτός, ν η συχνότητα και c η ταχύτητα στο κενό που έχει τιμή 3*10^8 m/sec. Το φως διαδίδεται με την μορφή μετώπου κύματος. Χρησιμοποιούμε συχνά την έννοια του **μετώπου κύματος** κατά την περιγραφή της διάδοσης ενός κύματος. Ορίζουμε το μέτωπο κύματος ως τον γεωμετρικό τόπο όλων των σημείων στα οποία η φάση της ταλάντωσης μιας φυσικής ποσότητας, συνδεδεμένη με το κύμα, είναι σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρονική στιγμή όλα τα σημεία ενός μετώπου κύματος βρίσκονται στο ίδιο μέρος του κύκλου της περιοδικής τους μεταβολής. Ένα γνώριμο παράδειγμα είναι η κορυφή του υδάτινου κύματος. Όταν ρίχνουμε ένα βότσαλο σε μια ήρεμη δεξαμενή, οι κύκλοι που σχηματίζονται από τις κορυφές του κύματος κατά τη διάδοσή τους είναι μέτωπα κύματος .Όταν ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκπέμπονται από μια μικρή φωτεινή πηγή, μπορούμε να αναπαραστήσουμε τα μέτωπα κύματος με σφαιρικές επιφάνειες ομόκεντρες με τη πηγή ή όπως στην εικόνα , με τις τομές των επιφανειών αυτών πάνω στο επίπεδο του διαγράμματος. Σε πολύ μεγάλη απόσταση από την πηγή, όπου οι ακτίνες των σφαιρών έχουν γίνει πολύ μεγάλες, ένα τμήμα μιας σφαιρικής επιφάνειας μπορεί να θεωρηθεί επίπεδο, οπότε έχουμε ένα επίπεδο κύμα (εικόνα 16).



Εικόνα 16. Μέτωπα κύματος και ακτίνες, (a) Όταν τα μέτωπα του κύματος είναι επιφάνειες σφαίρας, οι ακτίνες ξεκινούν από το κέντρο των σφαιρών. (b) Όταν τα μέτωπα του κύματος είναι επίπεδα, οι ακτίνες είναι παράλληλες.

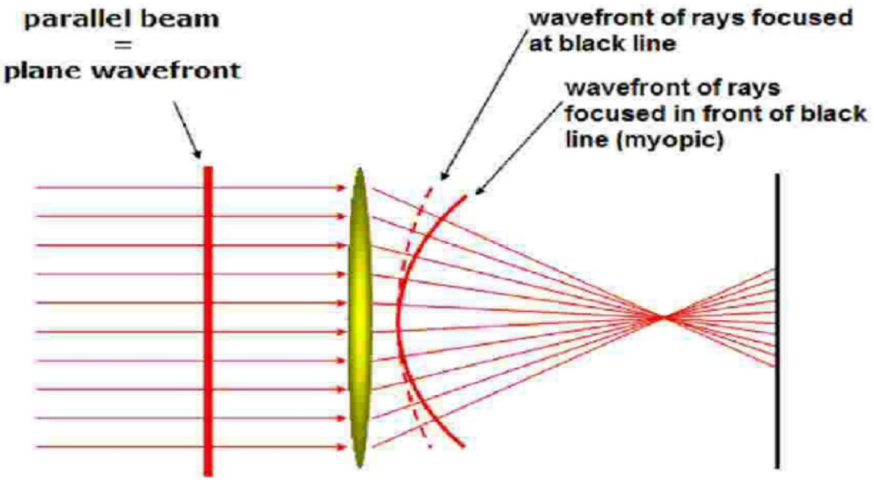
Αν τα κύματα οδεύουν σε ένα ομογενές, ισοτροπικό υλικό (δηλαδή ένα υλικό που έχει παντού και προς όλες τις κατευθύνσεις τις ίδιες ιδιότητες), οι ακτίνες είναι πάντα ευθείες γραμμές κάθετες στα μέτωπα κύματος. Σε μια διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δυο υλικών, όπως για παράδειγμα αέρας κερατοειδής, το φως καθυστερεί αλλά η συχνότητα παραμένει σταθερή. Επίσης, κατά την πορεία ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος μέσα από ανομοιογενή υλικό, το μέτωπο κύματος στις περιοχές με τα μεγαλύτερα εμπόδια θα καθυστερεί με αποτέλεσμα να γίνεται περισσότερο καμπύλο στις περιοχές αυτές .

Μια δέσμη παράλληλων ακτίνων η οποία εισέρχεται στον οφθαλμό έχει επίπεδο μέτωπο κύματος. Όταν η δέσμη εισέλθει στο εσωτερικό του οφθαλμού το Wavefront θα έχει καμπύλο μορφή και οι ακτίνες εστιάζουν όλες στο ίδιο σημείο, όταν πρόκειται για εμμετροπικό οφθαλμό (εικόνα 17).



Εικόνα 17. Οι παράλληλες ακτίνες αποκτούν καμπύλο μορφή όταν εισέλθουν στον οφθαλμό.

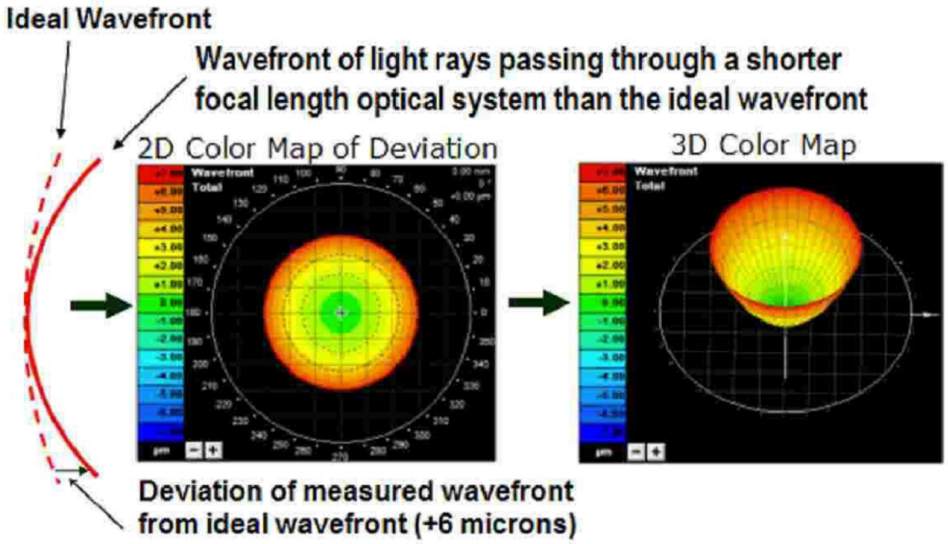
Για έναν μυωπικό οφθαλμό του ίδιου αξονικού μήκους σε σχέση με έναν εμμετροπικό οφθαλμό θα παρουσιάζει Wavefront το οποίο θα είναι πιο καμπύλο εξ' αιτίας της μεγαλύτερης δύναμης (διοπτρίες) του οφθαλμού (εικόνα 18)



Εικόνα 18. Wavefront σε μυωπικό οφθαλμό.(κόκκινη-έντονη καμπύλη)

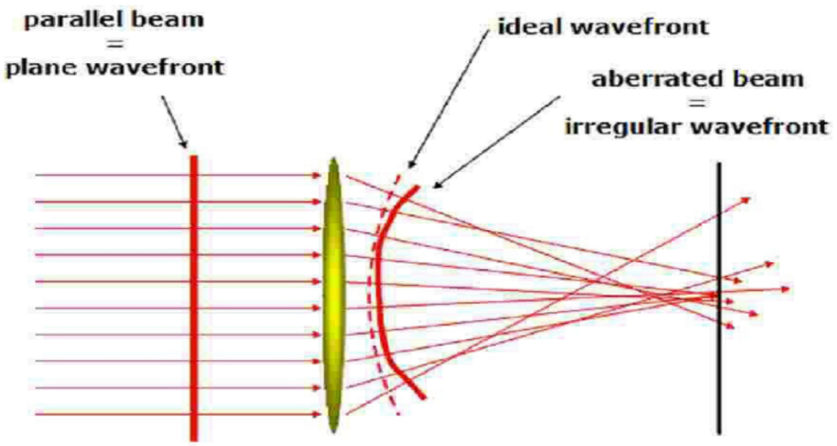
Υπολογίζουμε (σε μικρόμετρα) την διαφορά ανάμεσα σε ένα ιδανικό Wavefront (ideal Wavefront) και στο πραγματικό Wavefront (actual Wavefront) για όλα τα οπτικά μέσα του ανθρώπινου οφθαλμού. Όταν το πραγματικό Wavefront προηγείται στον ίδιο χρόνο από το ιδανικό Wavefront, τότε η απόκλιση του Wavefront error παρουσιάζει θετικές τιμές. Εάν το πραγματικό Wavefront καθυστερεί σε σχέση με το ιδανικό Wavefront, τότε η απόκλιση παρουσιάζει αρνητικές τιμές (σε μικρόμετρα). Μπορούμε να παρουσιάσουμε αυτές τις χωρικά αναλυώμενες αποκλίσεις του μετρούμενου Wavefront από το ιδανικό, είτε με ένα δυσδιάστατο χρωματικό χάρτη, είτε με ένα τρισδιάστατο χάρτη. Η εικόνα 19 παρουσιάζει ένα Wavefront από ακτίνες

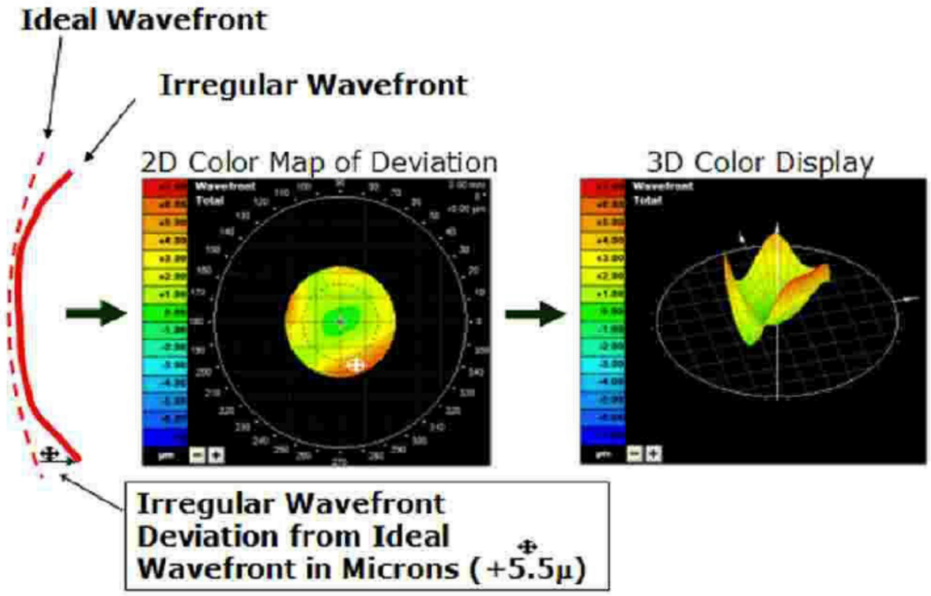
φωτός οι οποίες περνούν μέσα από αξονικό μήκος οφθαλμού μικρότερο από αυτό του ιδανικού Wavefront (εμμετρωπικός οφθαλμός).



Εικόνα 19. Χρωματικοί χάρτες, Δυσδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση

Επίσης, είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι τα απτικά του οφθαλμού δεν είναι τελείως σφαιρικά ή ασφαιρικά. Το Wavefront για τον ανθρώπινο οφθαλμό είναι ακανόνιστο (irregular) στις αποκλίσεις από το ιδανικό Wavefront εξ' αιτίας της διαφορετικής ισχύς των οπτικών του μέσων (εικόνα 20).

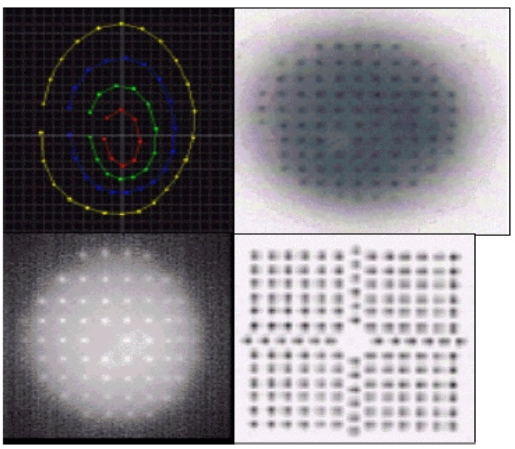




Εικόνα 20. Irregular Wavefront

5.3) Πολυώνυμα Zernike

Οι αποκλίσεις ανάμεσα στο πραγματικό Wavefront και στο ιδανικό Wavefront αναφέρονται ως εκτροπές ή σφάλματα. Οι Wavefront μετρήσεις σχηματίζουν μια παράταξη σημείων (εικόνα 21). Γνωρίζοντας την ακριβή θέση του κάθε σημείου όταν δεν υπάρχουν οπτικές εκτροπές, μπορούμε να εντοπίσουμε τις εκτροπές στην περίπτωση που τα σημεία εμφανιστούν σε διαφορετική θέση. Το 1934, ο Fritz Zernike[11] δημοσίευσε ένα άρθρο στο οποίο περιγράφει τα πολυώνυμα Zernike και πως αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να ποσοτικοποιήσουν τα οπτικά σφάλματα

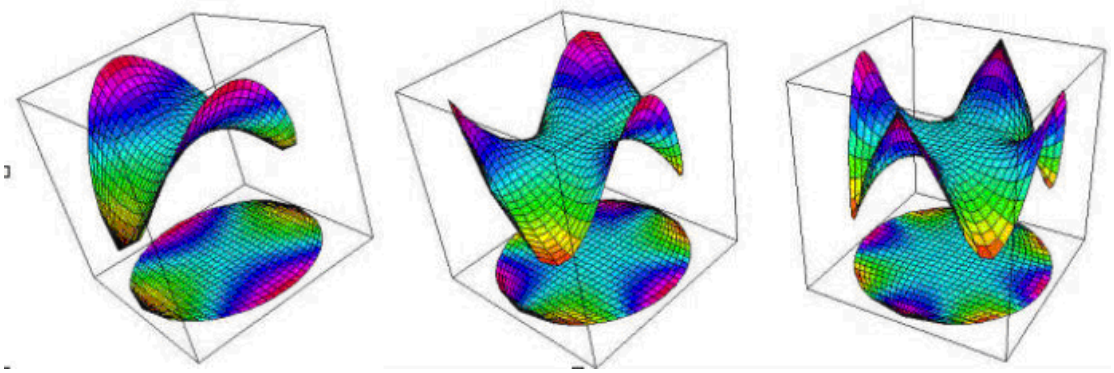


Εικόνα. 21. Οι Wavefront μετρήσεις σχηματίζουν μια παράταξη σημείων

Τα πολυώνυμα Zernike είναι ορθογώνια, κανονικοποιημένα και αποτελούν βάση του χώρου των συνεχών συναρτήσεων και είναι ορισμένα μέσα στον μοναδιαίο κύκλο.

Τα Wavefront δεδομένα, είτε αυτά είναι η διαφορά του οπτικού δρόμου (OPD) είτε το Wavefront σφάλμα (Wavefront Error-WFE), παίρνουν την μορφή μιας τρισδιάστατης επιφάνειας. Κάθε πολυώνυμο Zernike αναπαριστά το σχήμα της επιφάνειας μετρούμενη σε OPD ή WFE μονάδες.

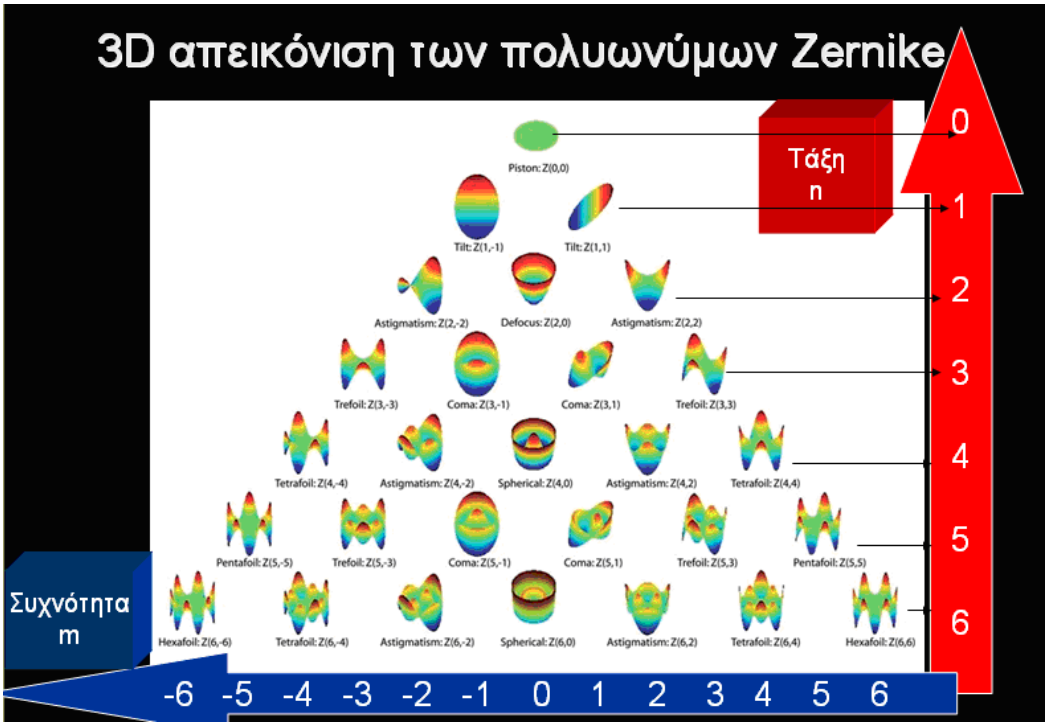
Τα πολυώνυμα Zernike τα οποία αναπαριστούν διαφορετικά σχήματα έχουνε διαφορετικό δεικτών Z_n^m**.** Οι δείκτες m και n αναπαριστούν την πολυπλοκότητα στο σχήμα το οποίο απεικονίζεται ή την λεπτομέρεια η οποία μπορεί να περιγραφεί. Πολυώνυμα Zernikes με χαμηλές τιμές στους δείκτες αναπαριστούν απλά σχήματα με λίγες κορυφές και κοιλάδες. Πολυώνυμα Zernikes με υψηλές τιμές στους δείκτες αναπαριστούν πολύπλοκα σχήματα και απεικονίζουν περισσότερη λεπτομέρεια (εικόνα 22)



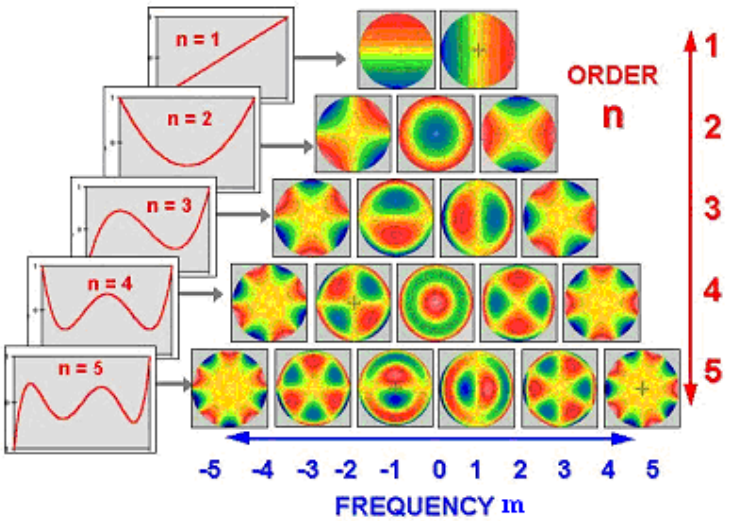
Εικόνα 22. Wavefronts στα οποία διακρίνονται οι κορυφές και οι κοιλάδες.

Τα πολυώνυμα αυτά μπορούν να εκφράσουν εκτροπές χαμηλής τάξης, όπως το σφαίρωμα και ο αστιγματισμός αλλά και εκτροπές υψηλής τάξης όπως το κόμα τρεφόιλ, σφαιρική εκτροπή, τετραφόιλ , δευτερογενή αστιγματισμό κ.τ.λ.

Στην εικόνα 23 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση των πολυωνύμων Zernike μέχρι και $5^{ης}$ τάξης και στην εικόνα 24 η δυσδιάστατη απεικόνιση.



Εικόνα 23. Τρισδιάστατη απεικόνιση των Wavefront μέχρι έκτης τάξης εκτροπές.

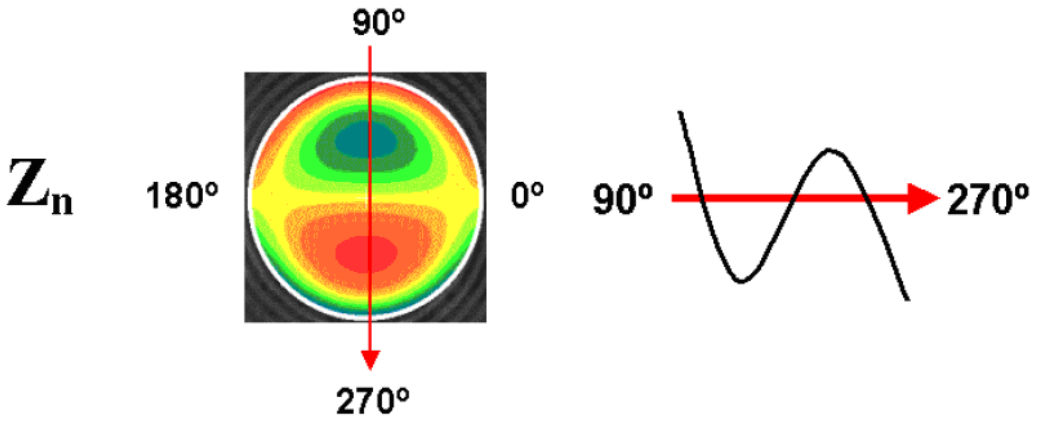


Εικόνα 24. Δυσδιάστατη απεικόνιση των Wavefront μέχρι πέμπτης τάξης εκτροπές.

Με n σημειώνεται η τάξη της εκτροπής (ακτινικός όρος) ο οποίος είναι πάντα θετικός. Όσο πιο μεγάλη η τιμή του n τόσο μεγαλύτερο αριθμό κορυφών και κοιλάδων μπορούμε να δούμε δια μέσω των μεσημβρινών.

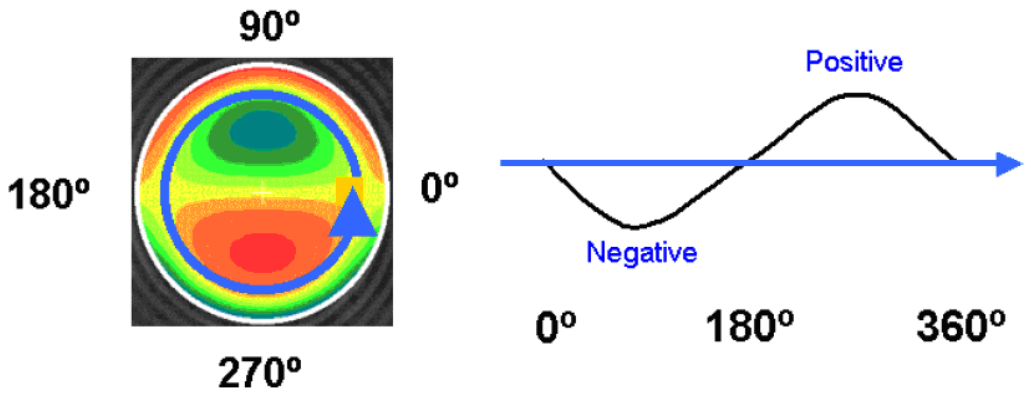
Στο παράδειγμα της εικόνας 25, οι κορυφές και οι κοιλάδες φαίνονται πιο καθαρά κατά μήκος του μεσημβρινού 270^0-90^0.Οι κόκκινη περιοχή στο γράφημα

αναπαριστά κορυφή (προηγείται) και η μπλε κοιλάδα (καθυστερεί-μεγάλη διαθλαστική ισχύς) .



Εικόνα 25. Μεσημβρινός 270 ^{0} -90 ^{0} .

Με m σημειώνεται η συχνότητα (γωνιακός όρος). Η εικόνα 26 προβάλει το πλάτος το οποίο αλλάζει από μεσημβρινό σε μεσημβρινό ακολουθώντας ημιτονοειδή συνάρτηση.



Εικόνα 26.Το πλάτος αλλάζει από μεσημβρινό σε μεσημβρινό ακολουθώντας ημιτονοειδή

5.4) Μαθηματικές εκφράσεις των πολυωνύμων Zernike

Ένα μέτωπο κύματος μπορεί να περιγραφεί από το παρακάτω άθροισμα:

$$W(\rho,\theta) = \sum_{n,m} C_n^m Z_n^m(\rho,\theta)$$

Όπου C_n^m ο συντελεστής που προκύπτει από το ανάπτυγμα για το πολυώνυμο Zernike

Ο γενικός τύπος για τα πολυώνυμα Zernike σε πολικές συντεταγμένες είναι:

$$Z_n^m(\rho,\theta) = \begin{cases} N_n^m R_n^m(\rho)\cos m\theta; m \geq 0 \\ -N_n^m R_n^m(\rho)\sin m\theta; m \geq 0 \end{cases}$$

Με

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s!\left[0.5(n+|m|-s\right]!\left[0.5(n-|m|-s\right]!} \rho^{n-2s}$$

Και

$$N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}}}$$

Και

$$\delta_{m0} = 1; m = 0$$
$$\delta_{m0} = 0; m \neq 0$$

η συνάρτηση του Kronecker

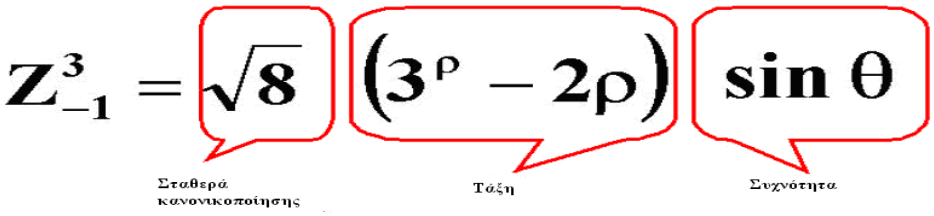
Όσο περισσότεροι όροι προστίθενται στο παραπάνω άθροισμα τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια με την οποία προσεγγίζεται το μέτωπο κύματος.

Αντικαθιστώντας τιμές για τα m και n, ο τύπος $Z_n^m(\rho,\theta)$ υπολογίζει τα πολυώνυμα οποιασδήποτε τάξης και συχνότητας. Μερικά παραδείγματα δίνονται στον πίνακα 1.

Η εικόνα 27 δίνει ένα παράδειγμα της μορφής των πολυωνύμων. Αρχικά γράφεται η κανονικοποιημένη σταθερά , έπειτα δίνεται η τάξη των πολυωνύμων , και τέλος η συχνότητα, ο γωνιακός όρος, ο οποίος μπορεί να είναι μια ημιτονοειδής ή μία συνημιτονοειδής συνάρτηση.

Descriptor	n	f	Results of Expansion
Tilt	1	±1	$2\rho \sin\Theta$ $2\rho \cos\Theta$
Defocus	2	0	$\sqrt{3}\ (2\rho^2 - 1)$
Coma	3	±1	$\sqrt{8}\ (3\rho^3 - 2\rho) \sin\Theta$ $\sqrt{8}\ (3\rho^3 - 2\rho) \cos\Theta$
Astigmatism	3	±2	$\sqrt{6}\ \rho^2 \sin 2\Theta$ $\sqrt{6}\ \rho^2 \cos 2\Theta$
Coma	3	±3	$\sqrt{8}\ \rho^3 \sin 3\Theta$ $\sqrt{8}\ \rho^3 \cos 3\Theta$
Spherical Aberration	4	0	$\sqrt{5}\ (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$
Astigmatism	4	±4	$\sqrt{10}\ \rho^4 \sin 4\Theta$ $\sqrt{10}\ \rho^4 \cos 4\Theta$
Spherical Aberration	6	0	$\sqrt{7}\ (20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1)$

Πίνακας 1. Ημιτονοειδής και συνημιτονοειδής μορφή των πολυωνύμων Zernike



Εικόνα 27. Αρχικά γράφεται η σταθερά κανονικοποίησης, έπειτα δίνεται η τάξη των πολυωνύμων , και τέλος η συχνότητα, ο γωνιακός όρος, ο οποίος μπορεί να είναι μια ημιτονοειδής ή μία συνημιτονοειδής συνάρτηση.

5.5) RMS (Root Mean Square)

Για τον υπολογισμό των εκτροπών χαμηλής και υψηλής τάξης χρησιμοποιείτε είτε ο συντελεστής του πολυωνύμου Zernike είτε η τιμή του RMS.

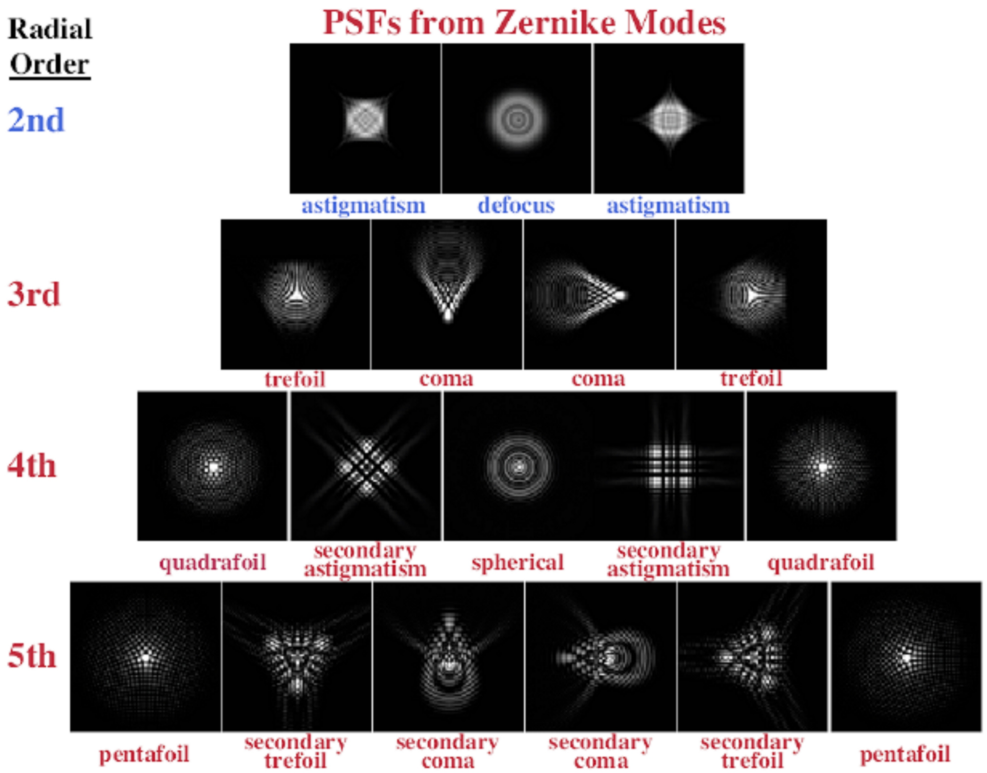
Το RMS είναι μια παράμετρος η οποία φανερώνει το κατά πόσο λείο είναι το μέτωπο κύματος σε ένα μάτι. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται στην απόκλιση ενός οπτικού συστήματος από το ιδανικό. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο περισσότερα είναι τα οπτικά σφάλματα σε ένα οπτικό σύστημα. Η τιμή του Rms μπορεί να υπολογιστεί για καθένα από τους συντελεστές των πολυωνύμων Zernike ξεχωριστά αλλά και συνολικά για κάθε τάξη (3η,4η,5ης ...).Η τιμή του υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{Rms} = \sqrt{\sum_{n,m} C_n^{m\,2}}$$

Όπου C_n^m οι συντελεστές των πολυωνύμων Zernike

5.6) PSF (Point Spread Function)

Ως PSF ορίζεται η συνάρτηση διασποράς σημείου. Εκτός από την χρήση του RMS για τις εκτροπές του ανθρώπινου οφθαλμού, χρησιμοποιείται και το PSF. Η εικόνα 28 παρουσιάζει τα PSF για εκτροπές μέχρι 5^{ης} τάξης.

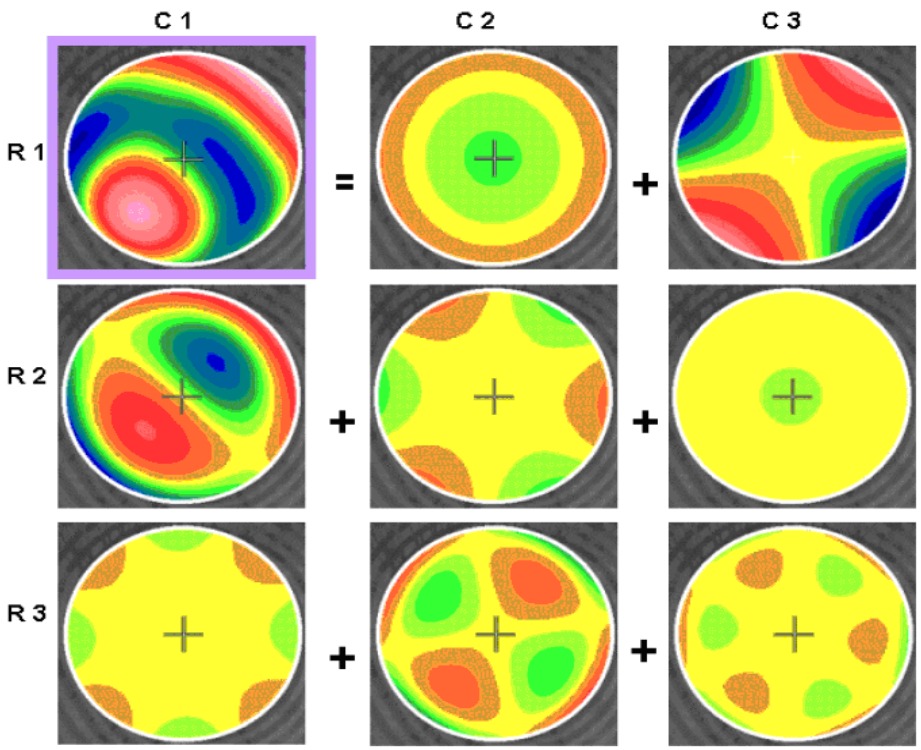


Εικόνα 28. PSF για εκτροπές μέχρι 5^{ης} τάξης

5.7) Σύνθεση των πολυωνύμων Zernike[11]

Κάθε Wavefront αποτελείται από μια σειρά-άθροισμα επιμέρους εκτροπών. Το άθροισμα αυτό παρουσιάζεται στην εικόνα 29. Ο πρώτος χάρτης δημιουργείται από το άθροισμα άλλων χαρτών. Το εύρος των χρωματικών διαφορών στους εκτροπομετρικούς χάρτες ποικίλει. Όσο πιο μεγάλος είναι ο συντελεστής των πολυωνύμων Zernike τόσο πιο μεγάλο είναι το εύρος των χρωμάτων. Ο χάρτης C3,R2 ο οποίος απεικονίζει σφαιρική εκτροπή, έχει δυο χρώματα, υποδηλώνοντας χαμηλό συντελεστή και μικρά ποσά της συγκεκριμένης εκτροπής. Ο χάρτης C3,R1,

αστιγματισμός, και ο C1,R2, κόμα παρουσιάζουν μεγάλο εύρος χρωμάτων υποδηλώνοντας μεγάλο συντελεστή και μεγάλα ποσά των συγκεκριμένων εκτροπών.



Εικόνα 29. Κάθε Wavefront αποτελείται από μια σειρά-άθροισμα επιμέρους εκτροπών

6.1) Τεχνολογίες-Μηχανήματα μέτρησης μετώπου κύματος

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα αναφερθούνε τρεις τεχνολογίες οι οποίες μετράνε οφθαλμικές εκτροπές. Οι τεχνολογίες αυτές και τα αντίστοιχα μηχανήματα είναι:

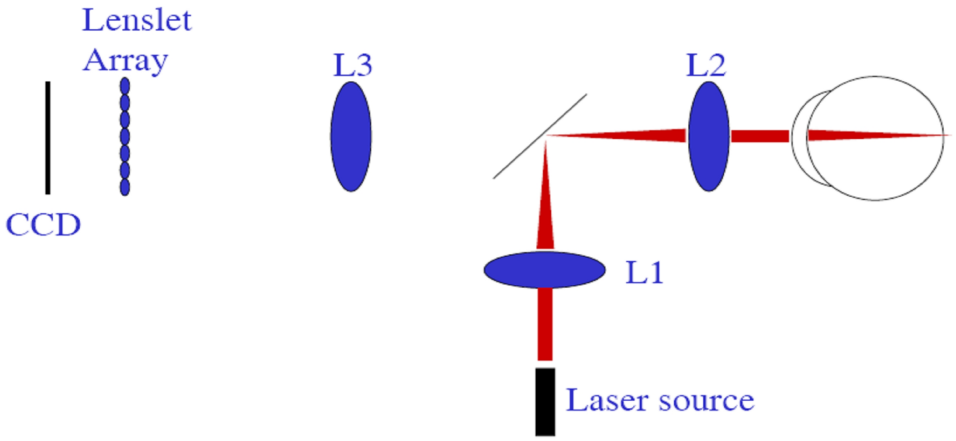
- Αρχή Hartmann-Shack [12, 13, 14, 15] Μηχάνημα **Wasca Coas 1.41.05** [41]
- Αρχή Tcherning [16,17,18] Μηχάνημα **Allegretto** [42]
- Αρχή Ray Tracing [19] Μηχάνημα **iTrace 3.1** [43]

6.2) Αρχή Hartmann-Shack- Μηχάνημα Wasca Coas

Η εκτροπομετρία Hartmann-Shack παραδοσιακά χρησιμοποιείται για την μέτρηση των εκτροπών που προκαλούνται από αστρονομικά τηλεσκόπια από διαταραχές του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας. Για την μέτρηση των οφθαλμικών εκτροπών χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1994 από τους Liang et al.[12] Κεντρικό εξάρτημα αυτών των συστημάτων είναι ο αισθητήρας Hartmann-Shack. Την αρχή Hartmann-Shack χρησιμοποιεί τι εκτροπόμετρο Wasca Coas (εικόνα 30).

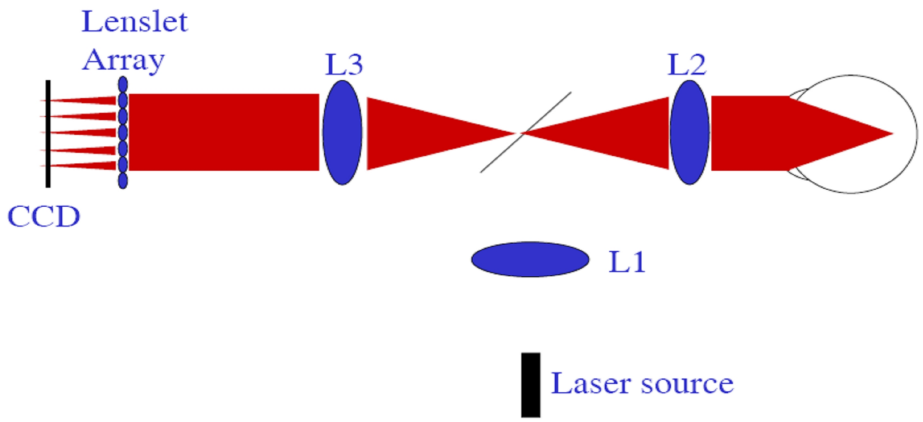
Εικόνα 30. Εκτροπόμετρο Wasca Coas

Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου εφαρμοσμένη στον ανθρώπινο οφθαλμό παρουσιάζεται στις εικόνα 31 .Το σύστημα χρησιμοποιεί μια φωτοδίοδο υπερ-υψηλής λαμπρότητας (SLD Super Luminance Photodiode), η ακτινοβολία της οποίας εισέρχεται στον οφθαλμό από το άνοιγμα της κόρης μέσω κατάλληλων οπτικών μέσων, δημιουργώντας μια δευτερογενή πηγή στον αμφιβληστροειδή.



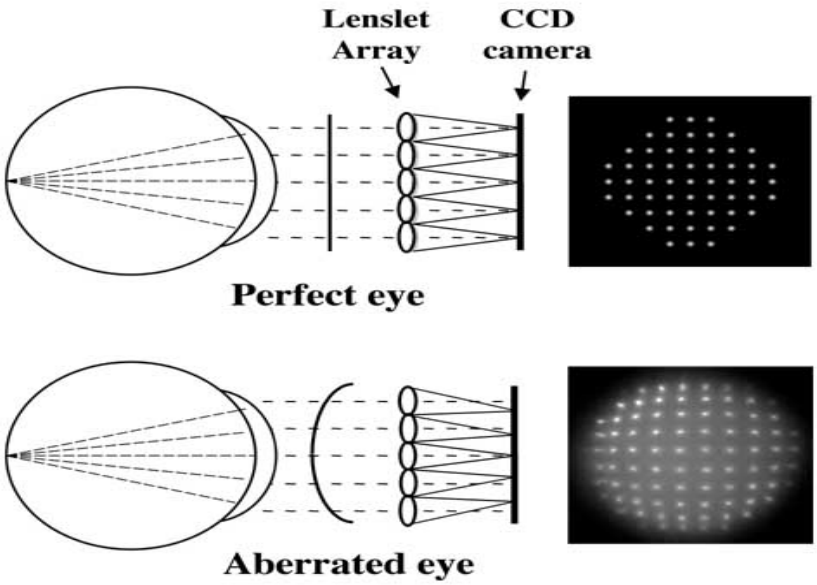
Εικόνα 31. Η εισερχόμενη δέσμη δημιουργεί δευτερογενή πηγή στον αμφιβληστροειδή.

Εν συνεχεία, το φως ανακλάται από τον αμφιβληστροειδή, περνάει από τα απτικά του οφθαλμού έχοντας υποστεί παραμόρφωση εξ' αιτίας των σφαλμάτων και των ατελειών των μέσων που διέρχεται. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται και το ανάλογο Wavefront. Το Wavefront αυτό που δημιουργείται καταλήγει σε μια συστοιχία μικροφακών (πλέγμα μικροφακών), καθένας από τους οποίους εστιάζει ένα μικρό κομμάτι από το μέτωπο κύματος πάνω σε ένα αισθητήρα (εικόνα 32)



Εικόνα 32. Το εξερχόμενο φως καταλήγει σε μία συστοιχία φακών.

Εάν το Wavefront είναι παραμορφωμένο σε σχέση με το ιδανικό Wavefront τότε εξερχόμενες ακτίνες θα εστιάσου σε διαφορετικά σημεία από τα κέντρα των μικροφακών (εικόνα 33).

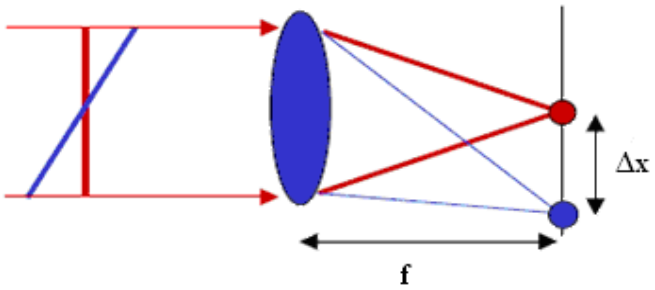


Εικόνα 33. Συστοιχία μικροφακών και τα σημεία στον αμφιβληστροειδή για ένα εμμετροπικό οφθαλμό και ένα οφθαλμό με εκτροπές

Η απόκλιση κάθε σημείου από το ιδανικό σημείο εστίασης των κεντροειδών των μικροφακών πάνω στην κάμερα είναι μια ένδειξη της κλίσης του μετώπου κύματος στο συγκεκριμένο σημείο (εικόνα 34). Η τοπική κλίση για κάθε μικροφακό υπολογίζεται από την σχέση: τοπική κλίση = $\Delta x/f$

όπου f η εστιακή απόσταση του κάθε μικροφακού και Δx η απόσταση του πραγματικού σημείου από το ιδανικό πάνω στη CCD κάμερα.

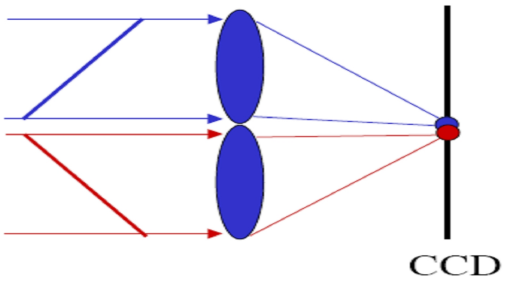
Οι κλίσεις αυτές αντιστοιχούν στις αποκλίσεις από το ιδανικό μέτωπο κύματος και απεικονίζονται με μορφή χρωματικού χάρτη. Με τον τρόπο αυτό η παραμόρφωση του μετώπου κύματος που μετράται από τον αισθητήρα αντιστοιχεί στις εκτροπές του οφθαλμού οι οποίες έχουν αναχθεί στο επίπεδο της κόρης.



Εικόνα 34. Τοπική κλίση του μετώπου κύματος

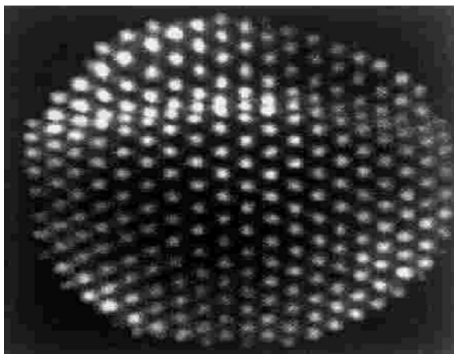
Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μέτρηση γίνεται στιγμιαία παρέχοντας υψηλή ανάλυση.

Η τεχνική Hartmann-Shack έχει κάποιους περιορισμούς-εμπόδια. Καθώς οι εκτροπές αυξάνουν, σημείο το οποίο εστιάζει σε ένα μικροφακό υπάρχει πιθανότητα να μετακινηθεί στην περιοχή εστίασης ενός γειτονικού μικροφακού (εικόνα 35) . Αυτό το «μπλέξιμο»των σημείων (criss-cross) πάνω στην κάμερα μπορεί να οδηγήσει σε λάθος μετρήσεις.



Εικόνα 35. Criss- Cross φιανόμενο.

Ορισμένοι κατασκευαστές έχουνε τοποθετήσει ειδικό σύστημα συντονισμού των ακτίνων πάνω στην διάταξη των μικροφακών ώστε το φαινόμενο αυτό να περιοριστεί. Με τον τρόπο όμως αυτό απορρίπτονται σημεία με αποτέλεσμα η προσπάθεια αυτή να οδηγεί σε λάθος υπολογισμούς των Wavefront. Η εικόνα 36 προβάλει μια Hartmann-Shack εικόνα από ένα οφθαλμό με λίγες εκτροπές. Η εικόνα αυτή αποκαλύπτει την δυσκολία της τεχνολογίας αυτής στο να υπολογίζει τα κέντρα των σημείων τα οποία ποικίλουν σε ένταση, σχήμα και απόσταση από τα γειτονικά σημεία. Η τεχνολογία αυτή γίνεται ακόμα πιο πολύπλοκη με μεγαλύτερες δυσκολίες όταν οι εκτροπές είναι πολλές. Τέλος, και η μικρή διάμετρος της κόρης αποτελεί εμπόδιο της μεθόδου καθώς όταν η κόρη γίνεται μικρότερη ο αριθμός των σημείων μειώνεται.

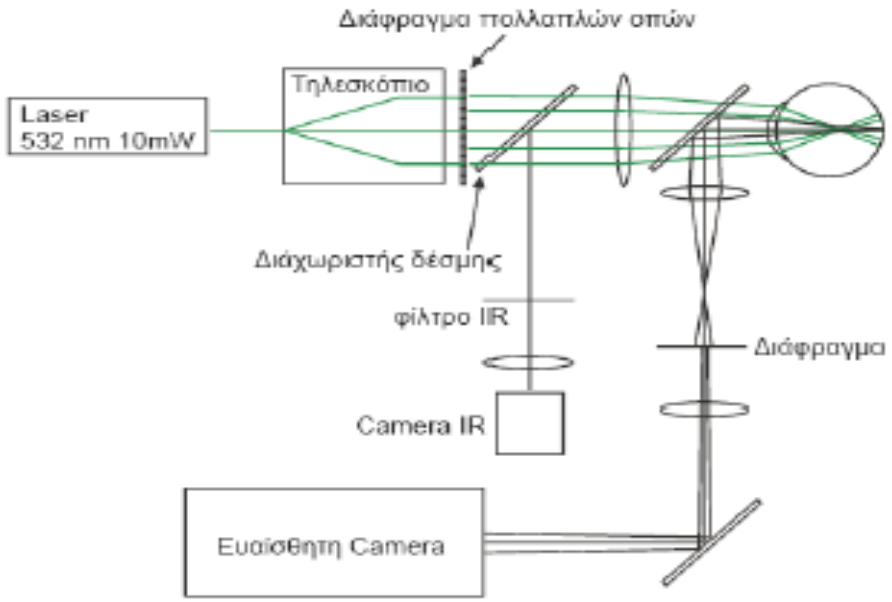


Εικόνα 36. Hartmann-Shack εικόνα από ένα οφθαλμό με λίγες εκτροπές

Ένας τρόπος για να αποφευχθεί το πρόβλημα της αλληλοεπικάλυψης σημείων, είναι η χρησιμοποίηση μεγαλύτερων μικροφακών με μικρότερη εστιακή απόσταση.

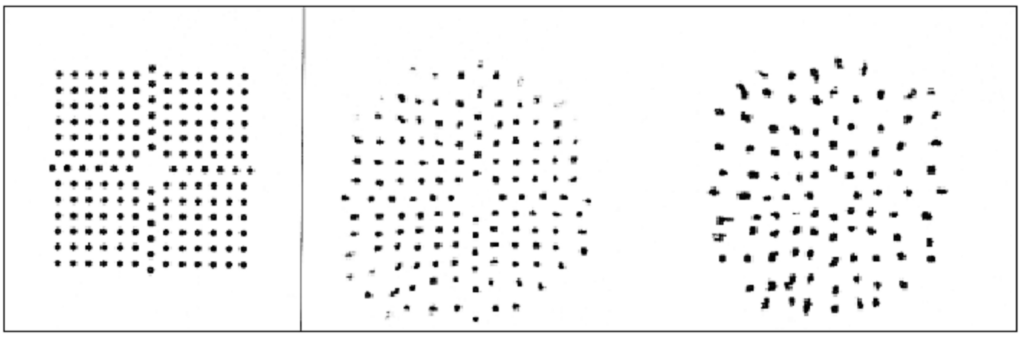
6.3) Αρχή Tscherning- Μηχάνημα Allegretto

Σύμφωνα με την αρχή αυτή, ένα διάφραγμα πολλών οπών τοποθετείτε μπροστά από ένα τηλεσκόπιο που κάνει τη δέσμη του laser παράλληλη, δημιουργώντας ένα αριθμό παράλληλων δεσμών που εισέρχονται στο υπό εξέταση οπτικό σύστημα. Προκειμένου να γίνει σαφής αντιστοιχία των σημείων τομής των δεσμών εισόδου με τις κηλίδες στον αμφιβληστροειδή, οι δέσμες εστιάζουν πριν τον αμφιβληστροειδή με την χρήση ενός φακού και υπό την μορφή τετράγωνου πλέγματος (σχήμα 37).



Εικόνα 37 . Διάταξη αρχής Tscherning

Το εστιασμένο πλέγμα έχει παραμορφωθεί λόγω των ανωμαλιών που συνάντησε στην διαδρομή το φως από τα οπτικά του οφθαλμού. Όπως στην αρχή H-S έτσι και η αρχή Tscherning, βρίσκει την θέση όλων των σημείων σε αντιστοιχία με την ιδανική θέση. Το σύνολο των κηλίδων στον αμφιβληστροειδή απεικονίζεται σε μια κάμερα υψηλής ευαισθησίας. Η επεξεργασία ειδώλων όπως αυτή στην εικόνα 38 , με χρήση ειδικού λογισμικού οδηγεί στον υπολογισμό των οπτικών εκτροπών του οφθαλμού. Η μέθοδος αυτή όπως και η αρχή H-S,παρουσιάζει το πρόβλημα της αλληλοεπικάλυψης σημείων για εκτροπές υψηλής τάξης



Εικόνα 38. Η εικόνα αριστερά μας παρουσιάζει την απεικόνιση των σημείων στον αμφιβληστροειδή για ένα ιδανικό οπτικό σύστημα, ενώ οι εικόνες δεξιά δείχνουν οπτικά συστήματα με εκτροπές.

Το μηχάνημα το οποίο εφαρμόζει την αρχή Tscherning είναι το Allegretto (εικόνα 39).

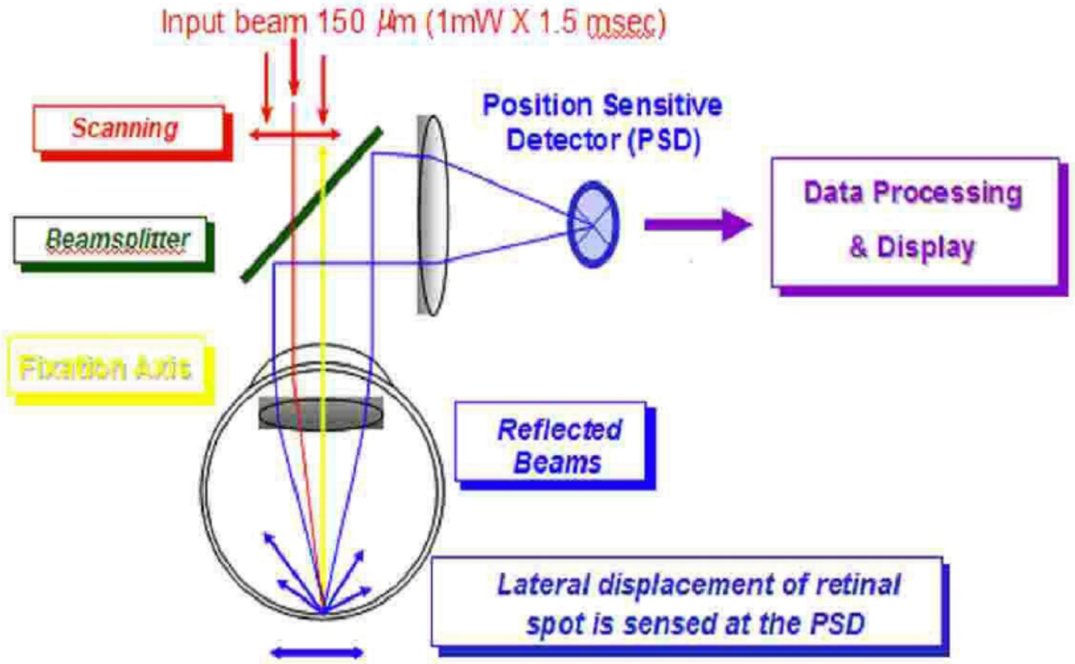
Εικόνα 39. Εκτροπόμετρο Allegreto.

6.4) Αρχή Ray Tracing-Μηχάνημα iTrace

Το εκτροπόμετρο iTrace (εικόνα 40) ακολουθεί την αρχή Ray-Traycing

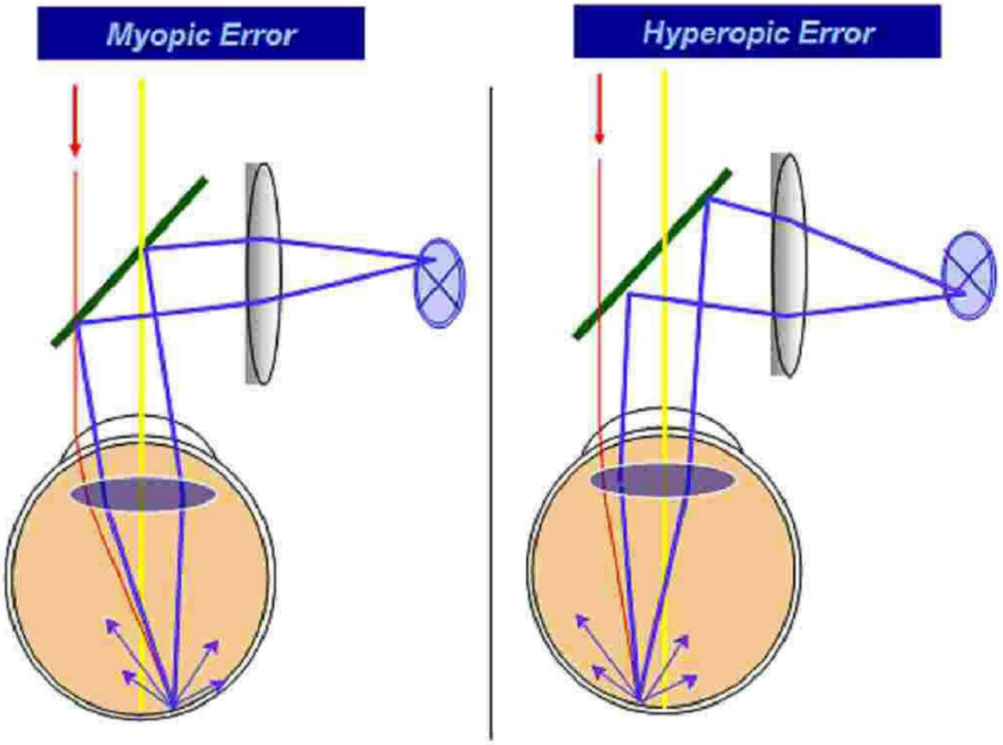
Εικόνα 40. Εκτροπόμετρο iTrace

Στην τεχνική αυτή η δέσμη ενός διοδικού laser εισάγεται στον οφθαλμό παράλληλα με τον οπτικό άξονα διαδοχικά από διαφορετικά σημεία εισόδου. Η εικόνα 41 παρουσιάζει την διάταξη της τεχνικής αυτής. Όταν η θέση του πρώτου σημείου καθοριστεί, έπειτα η ακτίνα μετακινείται σε νέα θέση. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται για 256 διαφορετικά σημεία δια μέσω της κόρης εισόδου. Εάν το μάτι είναι εμμετρωπικό, τότε όλα τα 256 σημεία θα πέσουν στο κέντρο του αμφιβληστροειδή (εικόνα 41)



Εικόνα 41 . Αρχή Ray Tracing

Εν γένει, λόγω των εκτροπών η δέσμη δεν θα συναντήσει τον αμφιβληστροειδή στο σημείο τομής του με την γραμμή όρασης (δηλαδή στο κεντρικό βοθρίο), αλλά σε κάποιο άλλο σημείο το οποίο θα δημιουργήσει μια δευτερογενή πηγή σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 42 όπου έχει παρθεί μέτρηση για έναν μυωπικό και έναν υπερμετρωπικό οφθαλμό όπου η κατεύθυνση διάδοσης του επιστέφοντος κύματος εξαρτάται από τη θέση της δευτερογενούς πηγής.

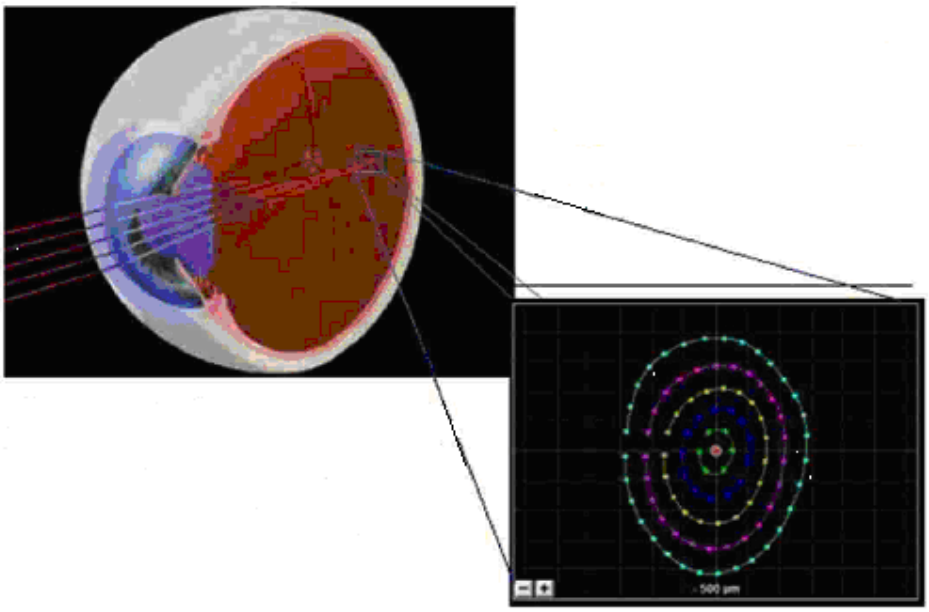


Εικόνα 42. Αρχή Ray Tracing για ένα μυωπικό και ένα υπερμετρωπικό οφθαλμό.

Με χρήση συστήματος φακών των οποίων ο ρόλος είναι να συζεύξουν οπτικά το επίπεδο του αμφιβληστροειδή με αυτόν του δέκτη μιας CCD κάμερας μετράται η απόσταση του κεντροειδούς της δευτερογενής πηγής από το κεντρικό βοθρίο. Από την απόσταση αυτή υπολογίζεται η εγκάρσια εκτροπή για το σημείο εισόδου της δέσμης. Μέσω της διαδοχικής μέτρησης των εγκάρσιων εκτροπών για διαφορετικά σημεία εισόδου, «χαρτογραφούνται» οι συνολικές εκτροπές του οπτικού συστήματος του οφθαλμού. Όταν μια σειρά σημείων προβάλλεται διαδοχικά δια μέσω της κόρης εισόδου, τότε δημιουργείται ένα pattern πάνω στον αμφιβληστροειδή (εικόνα 43).

Η Ray Tracing τεχνική, έχει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες. Η διαδοχική λήψη των σημείων σημαίνει ότι δεν υπάρχει σύγχυση στην ανάλυση μεταξύ της θέσης των σημείων στην κόρη εισόδου και τη τοποθέτηση των

σημείων στον αμφιβληστροειδή, καθώς κάθε σημείο προβάλλεται χωριστά και διαδοχικά. Αυτό σημαίνει ότι οφθαλμοί που έχουν εκτροπές υψηλής τάξης μπορούν να μετρηθούν με την τεχνολογία Ray Tracing. Επίσης, οι ακτίνες που προβάλλονται δια μέσω της κόρης εισόδου ελέγχονται από το λογισμικό, με αποτέλεσμα το σύστημα να μπορεί να ανιχνεύει το μέγεθος της κόρης και έπειτα να προβάλει όλα τα σημεία μέσα από την κόρη η οποία μπορεί να έχει διάμετρο από 2mm έως και 8mm.



Εικόνα 43 . Σχηματισμένο pattern στον αμφιβληστροειδή

Β) Ειδικό Μέρος

1) Σκοπός της μελέτης

Α) Εκτίμηση της συμφωνίας των εκτροπών χαμηλής και υψηλής τάξης για τα εκτροπόμετρα

- Wasca Coas
- Wave Analyzer
- iTrace

Β) Αξιολόγηση της συμφωνίας του σφαιρώματος μεταξύ των τριών εκτροπομέτρων καθώς και με την κυκλοπληγική διάθλαση με φορόπτερο.

2) Παρόμοιες μελέτες-Δημοσιεύσεις

Νέες τεχνολογίες μπορούν πλέον να καθορίζουν τις οφθαλμικές εκτροπές πέρα από το σφαίρωμα και τον αστιγματισμό. Οι εκτροπές του οφθαλμού μπορούν να μετρηθούν με πολλούς τρόπους, όπως για παράδειγμα με την χρήση εκτροπόμετρων (π.χ Shack- Hartmann, Tscherning, Retinal ray tracey) ή και με την χρήση ρεφρακτόμετρων. Η τεχνική Shack-Hartmann μπόρεσε στα μέσα του 1990 [20] να μετρήσει τις εκτροπές υψηλής τάξης του ανθρώπινου οφθαλμού. Θεωρητικά, η διόρθωση των εκτροπών πέρα από την σφαίρα και τον κύλινδρο αυξάνει σημαντικά την ανάλυση της αμφιβληστροειδικής εικόνας και το contrast, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ποιότητα της όρασης των ασθενών. Οι εκτροπές υψηλής τάξης εμφανίζονται συνήθως σε μικρότερο ποσοστό από ότι οι εκτροπές χαμηλής τάξης. Διορθώσεις εκτροπών υψηλής τάξης με διαθλαστική χειρουργική, φακούς επαφής ή και με ενδοφακούς βασίζονται στις ακριβείς μετρήσεις των εκτροπών αυτών. Ωστόσο, η σύγκριση μετρήσεων διαφορετικών εκτροπόμετρων καθώς και η γνώση της συμφωνίας των μετρήσεων εκτροπών υψηλής τάξης με την χρήση εκτροπόμετρων, αποτέλεσε και αποτελεί σημαντικό πεδίο μελέτης, και δίνει την δυνατότητα για καλύτερη και πιο χρήσιμη οφθαλμολογική πληροφορία.

Το 2005 ο **Chung et al** [21] εκτίμησαν την συμφωνία των εκτροπών υψηλής τάξης ανάμεσα σε εκτροπόμετρα τα οποία βασίζονται στην αρχή του Hartmann-Shack. Τα εκτροπόμετρα τα οποία συνέκριναν ήταν τα: Wave Scan (Visx Inc.) , LADARWave

(Alcon Inc.) , και Zywave (Bausch & Lomb Inc). 17 εθελοντές πήραν μέρος στην μελέτη οι οποίοι δεν είχαν υποβληθεί σε διαθλαστική χειρουργική στο παρελθόν. Επίσης, έγινε κυκλοπληγία 1% σε όλους τους εξεταζόμενους (πριν την εξέταση) ώστε η κόρες να διευρυνθούν τουλάχιστον στα 7.0 mm. Οι εκτροπές υπολογίστηκαν από τα κεντρικά 6 mm της κόρης του κάθε εξεταζόμενου. Οι εκτροπές υψηλής τάξης υπολογίστηκαν με πολυώνυμα Zernike. Από τους συντελεστές των πολυωνύμων υπολογίστηκαν, το RMS για το κόμμα, την σφαιρική εκτροπή, και τις ολικές εκτροπές τρίτης και τέταρτης τάξης.

Χρησιμοποιήθηκε Paired t test για να συγκρίνει τις εκτροπές υψηλής τάξης ανά 2 εκτροπόμετρα. Τα αποτελέσματα από το paired t test έδειξαν αν τα εκτροπόμετρα (ανά 2) απέδιδαν σημαντικές ασυμφωνίες των RMS για τις εκτροπές υψηλής τάξης.

34 μάτια εξετάσθηκαν με το Wave Scan και το LADARWave, και 32 μάτια με το Zywave. Η μέση ηλικία ήταν 26.3, και η μέση τιμή σφαιρώματος -4,30 D. Για το κάθε μηχάνημα, η μέση τιμή RMS τρίτης τάξης ήταν υψηλότερη από την μέση τιμή RMS τέταρτης τάξης (πίνακάς 2). Συγκρίνοντας τα 3 μηχανήματα, το WaveScan είχε τη χαμηλότερη μέση τιμή RMS για κάθε εκτροπή υψηλής τάξης, ενώ το Zywave μέτρησε τις υψηλότερες τιμές στη μέση τιμή RMS για κάθε εκτροπή υψηλής τάξης. Οι συντελεστές της διακύμανσης και στα 3 εκτροπόμετρα δεν διέφεραν κατά πολύ. Συγκρίνοντας την συμφωνία των μετρήσεων, τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικές διαφορές για όλα τα RMS των εκτροπών υψηλής τάξης ανάμεσα σε κάθε 2 μηχανήματα εκτός από την διαφορά των εκτροπών τρίτης τάξης (κόμα) ανάμεσα στο LADARWave και WaveScan (πίνακας 3).

Table 1. Means (μm) of RMS values obtained from the 3 aberrometers.

RMS	Aberrometer	Mean ± SD	CV (%)	Range
Third-order coma	LADARWave	0.168 ± 0.083	49.4	0.041–0.381
	Zywave	0.255 ± 0.139	54.5	0.050–0.594
	WaveScan	0.150 ± 0.076	50.7	0.008–0.319
Fourth-order spherical aberration	LADARWave	0.140 ± 0.112	80.0	0–0.39
	Zywave	0.178 ± 0.138	77.5	0.01–0.51
	WaveScan	0.099 ± 0.082	82.8	0–0.223
Total third-order HOA	LADARWave	0.227 ± 0.087	38.3	0.058–0.442
	Zywave	0.335 ± 0.139	41.5	0.052–0.766
	WaveScan	0.200 ± 0.083	41.5	0.052–0.421
Total fourth-order HOA	LADARWave	0.185 ± 0.094	50.8	0.055–0.443
	Zywave	0.230 ± 0.123	53.5	0.074–0.587
	WaveScan	0.147 ± 0.063	42.9	0.051–0.279

CV = coefficient of variation; HOA = higher-order aberration; RMS = root mean square

Πίνακας 2: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις για όλα τα rms

Γενικά, τα αποτελέσματα από το LADARWave ήταν όμοια με αυτά από το WaveScan, και οι μεγαλύτερες ασυμφωνίες στις τιμές των RMS ήταν ανάμεσα στα WaveScan και Zywave. Ανάμεσα σε 12 paired t test, 9 tests έδειξαν P values μικρότερη από 0,01 και 2 tests είχαν P values ανάμεσα στο 0,01και 0,05.

Table 2. Results of paired *t* tests comparing the RMS values between any 2 devices.

RMS	Aberration	*P* Value
Third-order coma	LADARWave : Zywave	< .0001
	LADARWave : WaveScan	.09
	Zywave : WaveScan	< .0001
Fourth-order spherical aberration	LADARWave : Zywave	.04
	LADARWave : WaveScan	.005
	Zywave : WaveScan	.0001
Third-order total HOA	LADARWave : Zywave	< .00001
	LADARWave : WaveScan	.02
	Zywave : WaveScan	< .00001
Fourth-order total HOA	LADARWave : Zywave	.006
	LADARWave : WaveScan	.003
	Zywave : WaveScan	< .00001

HOA = higher-order aberration; RMA = root mean square

Πίνακας 3: Αποτελέσματα από το Paired t test

Οι απόλυτες μέσες διαφορές των RMS ήταν χαμηλότερες ανάμεσα στα LADARWave και WaveScan για τις εκτροπές τρίτης τάξης (κόμα) και των ολικών εκτροπών τρίτης τάξης. Για το RMS της σφαιρικής εκτροπής και για το RMS των ολικών εκτροπών τέταρτης τάξης, οι απόλυτες μέσες διαφορές ήταν όμοιες ανάμεσα στα LADARWave και WaveScan και ανάμεσα στα LADARWave και Zywave. Τα WaveScan και Zywave παρουσίασαν τις μεγαλύτερες μέσες διαφορές.

Ο Mirshahi et al.[22] χρησιμοποίησαν το εκτροπόμετρο Zywave για να αξιολογήσουν την επαναληψιμότητα των εκτροπών υψηλής και χαμηλής τάξης. Βρήκαν μεγάλη μεταβλητότητα στις εκτροπές υψηλής τάξης και ικανοποιητική επαναληψιμότητα για τις εκτροπές δεύτερης τάξης.

Ο Cheng et al.[23] Χρησιμοποίησαν το εκτροπόμετρο Wasca Coas για να αξιολογήσουν την επαναληψιμότητα των εκτροπών υψηλής τάξης. Βρήκαν μεγάλη μεταβλητότητα στις εκτροπές υψηλής τάξης.

Ο Jos J. Rozema et al.[24] σύγκριναν ποιοτικά τα εκτροπόμετρα Visual Function Analyzer (Tracey), OPD-scan , the Zywave , WASCA , MultiSpot Hartmann-Shack device, και Allegretto Wave Analyzer.

Ο Wang et al[25], εκτίμησαν την ακρίβεια (accuracy) του σφαιρώματος (σφαίρα, κύλινδρο) και του σφαιρικού ισοδύναμου συγκρίνοντας το την διάθλαση με την υποκειμενική μέθοδο (manifest refraction) με την διάθλαση από τα εκτροπόμετρα WaveScan και Tracey. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και τα δυο μηχανήματα ήταν αξιόπιστα.

3) Χαρακτηριστικά των τριών μηχανημάτων-ποιοτική σύγκριση [24]

Τα χαρακτηριστικά τα οποία θα αναφέρουμε ώστε να παρουσιάσουμε μία ποιοτική σύγκριση των μηχανημάτων είναι:

Α) Αρχή λειτουργία του κάθε μηχανήματος

- ✓ Αρχή Hartmann-Shack
- ✓ Αρχή Tscherning
- ✓ Αρχή Ray Tracing

Β) Λεπτομέρειες μετρήσεων

- ✓ Μήκος κύματος: Είναι το χρώμα το φωτός που χρησιμοποιείται από κάθε μηχάνημα.
- ✓ Ταχύτητα μέτρησης: Αναφέρεται στην ταχύτητα που απαιτείται για μία μέτρηση.
- ✓ Εύρος διοπτριών: Είναι το εύρος μέσα στο οποίο το διαθλαστικό σφάλμα του ασθενή μπορεί να αντισταθμιστεί από τους εσωτερικούς φακούς του εκτροπόμετρου.
- ✓ Έλεγχος για την ποιότητα των μετρήσεων: Εκτιμάει την αξιοπιστία της μέτρησης, είτε αυτόματα από υπολογιστή είτε μετά την μέτρηση από την χειριστή.
- ✓ Δυνατότητα αυτόματης μέτρησης: Δείχνει εάν το εκτροπόμετρο μπορεί να εκπληρώσει αυτόματα μια μέτρηση, μετά από την ανάλογη ευθυγράμμιση.

Γ) Ευθυγράμμιση μετρήσεων

- ✓ Άξονας μέτρησης: Είναι ο άξονας κατά μήκος του οποίου λαμβάνεται η μέτρηση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί κατά μήκος του άξονα όρασης (η γραμμή η οποία συνδέει το κεντρικό βοθρίο, το κέντρο της κόρης με τον στόχο), ή κατά μήκος του οπτικό άξονα (συνδέοντας το κεντρικό βοθρίο, τα κομβικά σημεία του οφθαλμού με τον στόχο).
- ✓ Στόχος που βλέπει ο ασθενής: Αναφέρεται στον στόχο τον οποίο βλέπει ο ασθενής έτσι ώστε να μειωθούν οι οφθαλμικές κινήσεις του.

- ✓ Διαδικασία ευθυγράμμισης για τον χειριστή: Είναι σημαντική αυτή η διαδικασία έτσι ώστε να τα οπτικά του εκτροπόμετρου να ευθυγραμμιστούν με τον άξονα όρασης του ασθενή.

Δ) Λεπτομέρειες υπολογισμών

- ✓ Αριθμός των πολυωνύμων Zernike: Αυτή η παράμετρος δείχνει την χωρική ανάλυση μιας εικόνας Wavefront. Όσο περισσότερα πολυώνυμα Zernike χρησιμοποιεί ένα μηχάνημα τόσο μεγαλύτερη η χωρική ανάλυση.
- ✓ Μέγεθος της κόρης για τα πολυώνυμα Zernike: Εκφράζοντας τις εκτροπές του οφθαλμού σε όρους από συντελεστές Zernike, είναι αναγκαίο ότι θα πρέπει να ελέγχεται η διάμετρος της κόρης πάνω στην οποία οι εκτροπές καθορίζονται. Αυτοί οι συντελεστές αλλάζουν όταν οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται για διαφορετικό μέγεθος κόρης και ίσως αυτό προκαλέσει προβλήματα αν συγκρίνονται δεδομένα από κόρες διαφορετικού μεγέθους.

Ε) Ανάλυση των δεδομένων

- ✓ Retinal Spot Pattern: Εικόνα σημείων στον αμφιβληστροειδή.
- ✓ Διάθλαση: σφαίρωμα, κύλινδρος και άξονας..
- ✓ Wavefront total: Wavefront των συνολικών εκτροπών.
- ✓ Wavefront από εκτροπές υψηλής τάξης: Αναφέρεται στις εκτροπές οι οποίες παραμένουν μετά από την διόρθωση του σφαιρώματος και του κυλίνδρου
- ✓ RMS: Το RMS παρέχει πληροφορία για το πόσο λείο είναι ένα μέτωπο κύματος.
- ✓ 3D-Wavefront: Wavefront τριών διαστάσεων. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο για τον υπολογισμό του σχήματος του μετρούμενου Wavefront
- ✓ Point Spread Function (PSF): εικόνα από την πηγή των σημείων (π.χ αμφιβληστροειδή). Δηλώνει την συνάρτηση διασποράς σημείου
- ✓ Modulation Transfer Function (MTF): Ένδειξη του contrast όπου γραμμές ειδικών χωρικών συχνοτήτων μπορούν να διακριθούν από τον ασθενή
- ✓ Οπτική οξύτητα: Προσομοίωση με την μέθοδο του Snellen “E” όπως φαίνεται από τα Wavefronts
- ✓ Συντελεστές των πολυωνύμων Zernike: Οι τιμές των πολυωνύμων Zernike οι οποίες προβάλλονται στην οθόνη

Σύγκριση των τριών μηχανημάτων

Α) Αρχή λειτουργία του κάθε μηχανήματος

Το iTrace χρησιμοποιεί την αρχή Ray Tracing, το Wasca Coas την αρχή Hartmann-Shack και τέλος το Allegretto την αρχή Tscherning.

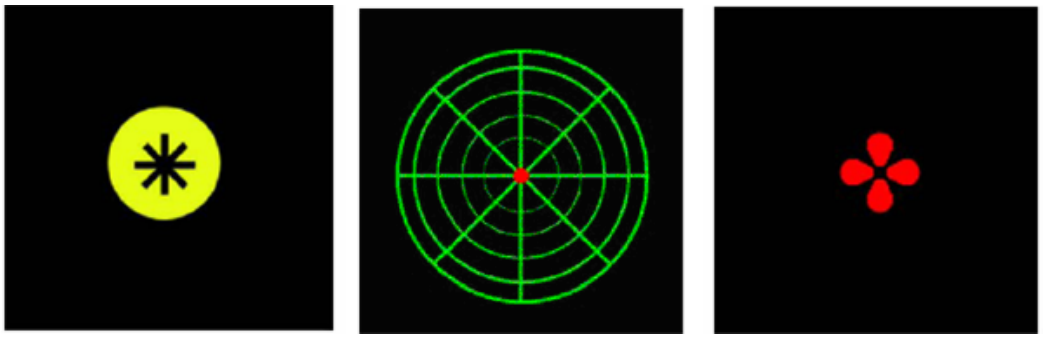
Β) Λεπτομέρειες μετρήσεων

- ✓ Μήκος κύματος: Κάθε μηχάνημα χρησιμοποιεί μονοχρωματικό Laser το οποίο εκπέμπει κόκκινο ή υπέρυθρο φως. Το iTrace χρησιμοποιεί μήκος κύματος στα 650 nm, το Wasca Coas εκπέμπει στα 850 nm και το Allegretto στα 660 nm. Σε αυτά τα μήκη κύματος, οι μετρούμενες εκτροπές θα είναι ελαφρώς διαφορετικές από τις εκτροπές που υπολογίζονται με εκπεμπόμενο φως από το μέσο του οπτικού φάσματος. Συγκεκριμένα, το σφαίρωμα υπάρχει περίπτωση να διαφέρει κατά 0.7 διοπτρίες το περισσότερο ανάμεσα στα υπέρυθρα και στα πράσινα μήκη κύματος..
- ✓ Ταχύτητα μέτρησης: Το Wasca πραγματοποιεί τις μετρήσεις σε 13msec, το iTrace σε <50msec και το Allegretto σε 40msec.
- ✓ Εύρος διοπτριών: Το εύρος των διοπτριών για το iTrace ως αναφορά το σφαίρωμα είναι -15 έως +15 διοπτρίες, για το Wasca από -15 έως +7 διοπτρίες και κύλινδρο από 0 έως ± 6 και για το Allegretto από -12 έως +6 και κύλινδρο από 0 έως ± 4.
- ✓ Έλεγχος για την ποιότητα των μετρήσεων: Το iTrace υπολογίζει την αξιοπιστία της μέτρησης καθώς φαίνονται τα σημεία τα οποία έχουν χαθεί από το pattern στον αμφιβληστροειδή. Καλή μέτρηση θεωρείται αυτή στην οποία δεν έχουνε χαθεί περισσότερα από 20 σημεία (εικόνα). Το Wasca δεν διαθέτει έλεγχο για την ποιότητα των μετρήσεων, και τέλος το Allegretto προβάλει χάρτη με τα σημεία που έχουνε πέσει πάνω στον αμφιβληστροειδή και πόσο αυτά απέχουν από το ιδανικό pattern.
- ✓ Δυνατότητα αυτόματης μέτρησης: Το Allegretto και το iTrace διαθέτουν σύστημα αυτόματης μέτρησης.

Γ) Ευθυγράμμιση μετρήσεων

- ✓ Άξονας μέτρησης: Όλα τα μηχανήματα μετρούν κατά μήκος του άξονα όρασης.

- ✓ Στόχος που βλέπει ο ασθενής (fixation target): Και οι τρεις συσκευές έχουν τον στόχο στο κέντρο(εικόνα 44)

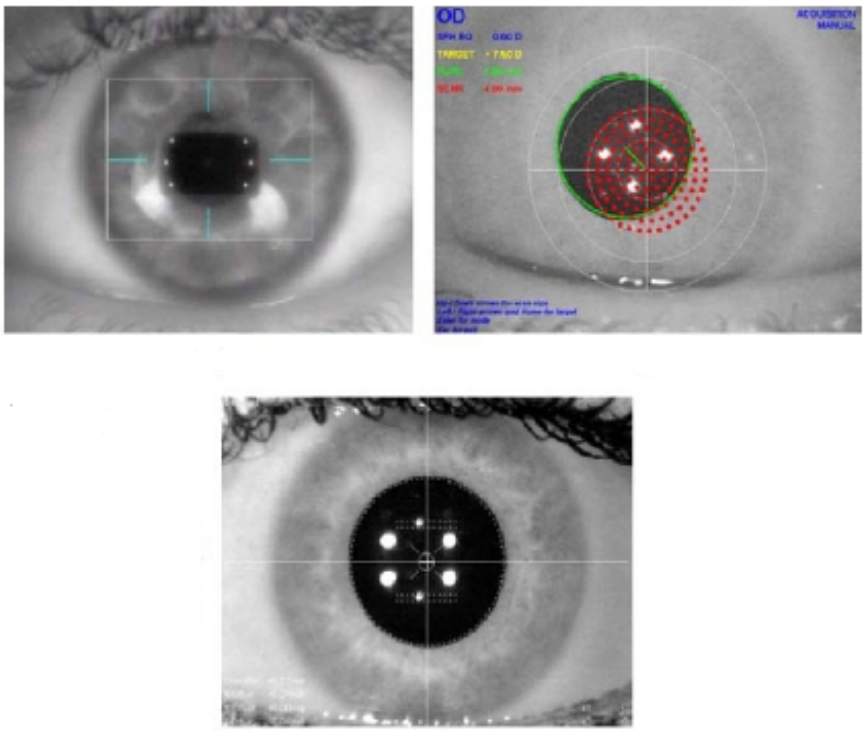


Α Β Γ

Εικόνα 44. Η εικόνα Α δείχνει το fixation target από το iTrace, η εικόνα Β από το Wasca και η εικόνα Γ από το Allegretto.

- ✓ Διαδικασία ευθυγράμμισης για τον χειριστή (εικόνα 45): Η ευθυγράμμιση για το Wasca είναι αρκετά απαιτητική καθώς ο χειριστής θα πρέπει να τοποθετήσει αρχικά το ορθογώνιο πλαίσιο στο υπό εξέταση οφθαλμό και να έπειτα να προσπαθήσει όχι μόνο να τοποθετήσει τα έξι φωτεινά σημεία στην κόρη του ασθενή αλλά και να μην φαίνονται θολά. Η μέθοδος αυτή καθορίζεται αποκλειστικά και μονό από την ικανότητα του χειριστή με αποτέλεσμα η ευθυγράμμιση να είναι ευαίσθητη όχι μόνο κατά μήκος του οπτικού άξονα αλλά και κατά την οριζόντια και κάθετη κατεύθυνση. Το iTrace καθορίζει την άκρη της κόρης από την οποία μπορεί να βρεθεί και το κέντρο αυτής. Μετακινώντας ο χειριστής το μέσα έξω έτσι ώστε τα τέσσερα φωτεινά σημεία να μην είναι θολερά. Η κακή ευθυγράμμιση του οπτικού άξονα σε αντιστοιχία με το κέντρο της κόρης ελέγχεται από μια πράσινη γραμμή. Όταν η πράσινη γραμμή γίνει βούλα στο κέντρο της κόρης τότε λαμβάνεται αυτόματα και η μέτρηση. Τέλος η ευθυγράμμιση του Allegretto είναι και αυτή αρκετά απαιτητική διαδικασία. Αρχικά εντοπίζεται η άκρη της κόρης αυτόματα έτσι ώστε να βρεθεί το κέντρο αυτής, το οποίο είναι σημαδεμένο με μικρό σταυρό. Εν συνεχεία ο χειριστής μετακινεί μέσα έξω το μηχάνημα έτσι ώστε να βρεθεί στην σωστή απόσταση από τον εξεταζόμενο. Στην απόσταση αυτή εμφανίζεται ένας δεύτερος μικρός σταυρός (κάθετος

στον προηγούμενο), και μόλις τα δυο σταυρόνημα ταυτίσουν τα κέντρα τους τότε λαμβάνεται αυτόματα η μέτρηση.



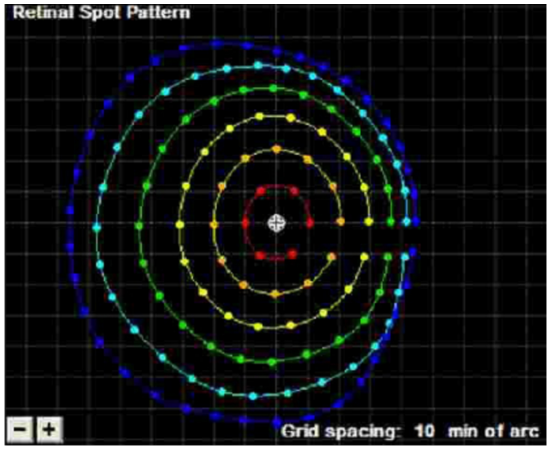
Εικόνα 45. Η εικόνα πάνω αριστερά δείχνει την ευθυγράμμιση του Wasca, η εικόνα πάνω δεξιά του iTrace και κάτω του Allegretto.

Δ) Λεπτομέρειες υπολογισμών

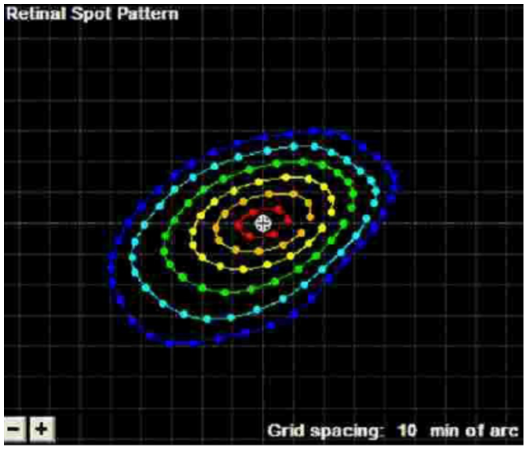
- ✓ Αριθμός των πολυωνύμων Zernike: Το iTrace χρησιμοποιεί 27 πολυώνυμα Zernike ($6^{ης}$ τάξης,εικόνα), το Wasca πάνω από 65 ($10^{ης}$ τάξης) και το Allegretto πάνω από 27 ($6^{ης}$ τάξης)
- ✓ Μέγεθος της κόρης για τα πολυώνυμα Zernike: Καθορίζεται από τον χειριστή και για τα τρια μηχανήματα.

Ε) Ανάλυση των δεδομένων

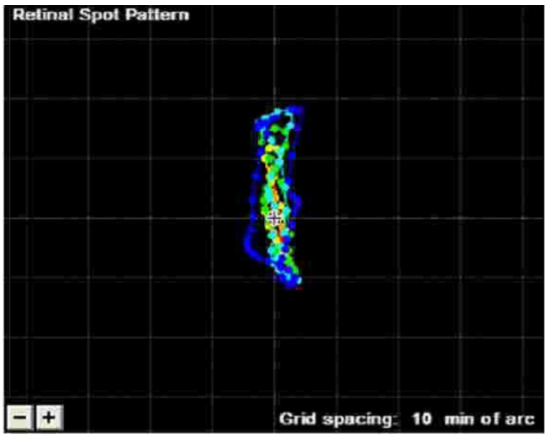
- ✓ Retinal Spot Pattern: Και τα τρία εκτροπόμετρα εμφανίζουν τα σημεία στον αμφιβληστροειδή σε διάφορες μορφές (εικόνα 46)


Retinal Spot Pattern
Grid spacing: 10 min of arc

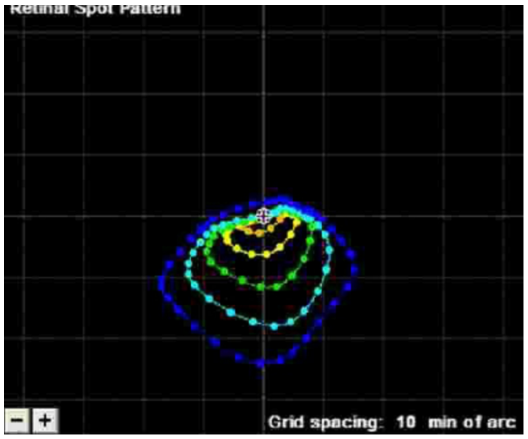
A


Retinal Spot Pattern
Grid spacing: 10 min of arc

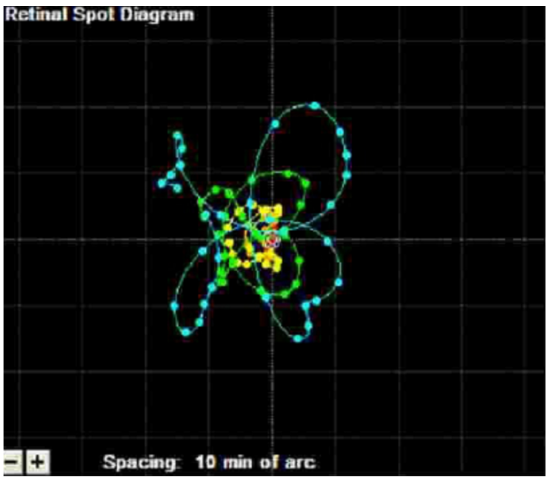
B


Retinal Spot Pattern
Grid spacing: 10 min of arc

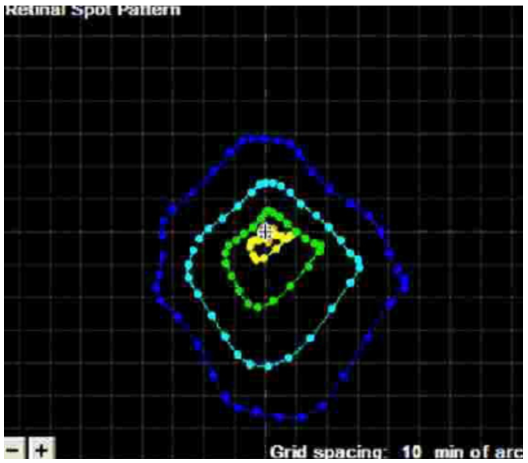
Γ


Grid spacing: 10 min of arc

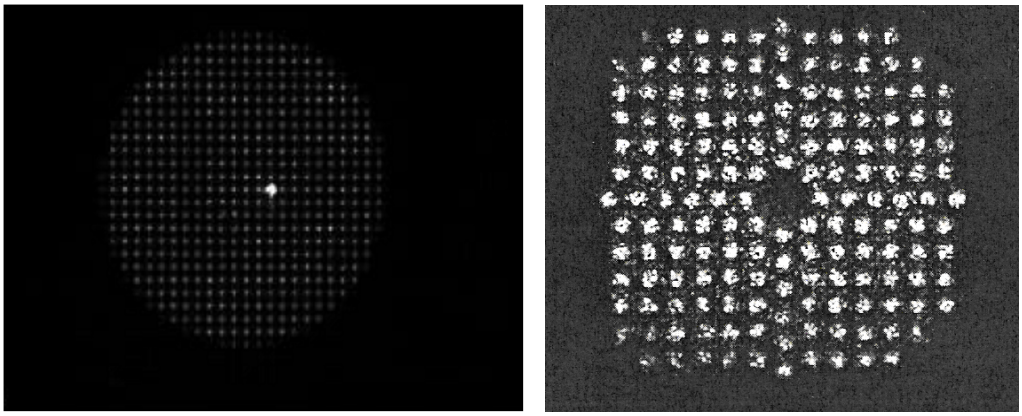
Δ


Retinal Spot Diagram
Spacing: 10 min of arc

E


Grid spacing: 10 min of arc

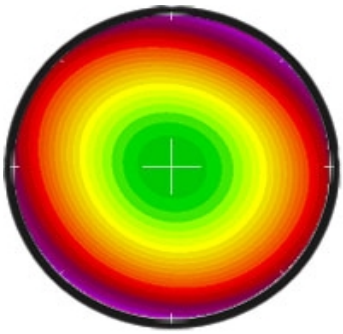
Z

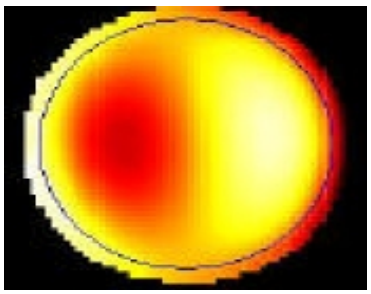


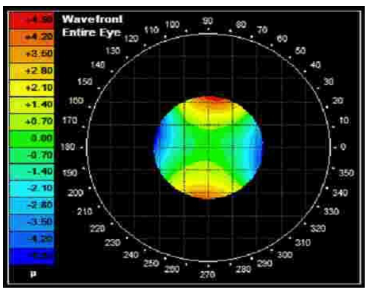
Η Θ

Εικόνα 46. Οι εικόνες Α-Ζ παρουσιάζουν εικόνες από το retinal pattern με την το μηχάνημα iTrace. Συγκεκριμένα η εικόνα Α παρουσιάζει εικόνα από υπερμετρωπικό ασθενή. Στην εικόνα Β φαίνεται υπερμετρωπικός αστιγματισμός, στην Γ ο κύλινδρος φαίνεται να έχει μεγαλύτερη επιρροή στην αμφιβληστροειδική εικόνα . Στην εικόνα Δ προβάλλεται κάθετο κόμα, στην Ε τετραφόιλ και στην Ζ σφαιρική εκτροπή. Στην εικόνα Η φαίνονται τα σημεία του retinal pattern με το μηχάνημα Wacsa Coas και τέλος στην εικόνα Θ τα σημεία με το μηχάνημα Allegretto.

- ✓ Διάθλαση: Και τα τρία μηχανήματα παρέχουν αυτό το χαρακτηριστικό.
- ✓ Wavefront συνολικών εκτροπών: Και τα τρία μηχανήματα παρέχουν αυτό το χαρακτηριστικό (εικόνα 47)

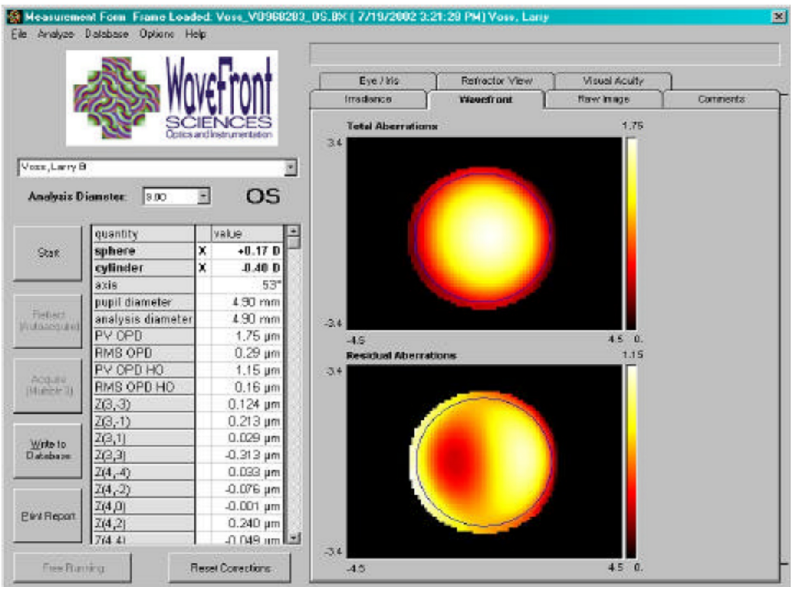






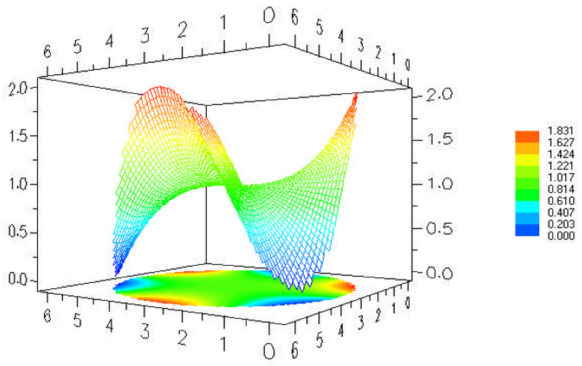
Εικόνα 47: Wavefront και από τα τρία μηχανήματα. Πάνω Wavefront συνολικών εκτροπών από το Allegretto, κάτω αριστερά Wavefront υψηλής τάξης εκτροπών από το Wasca και κάτω δεξιά Wavefront συνολικών εκτροπών από το iTrace.

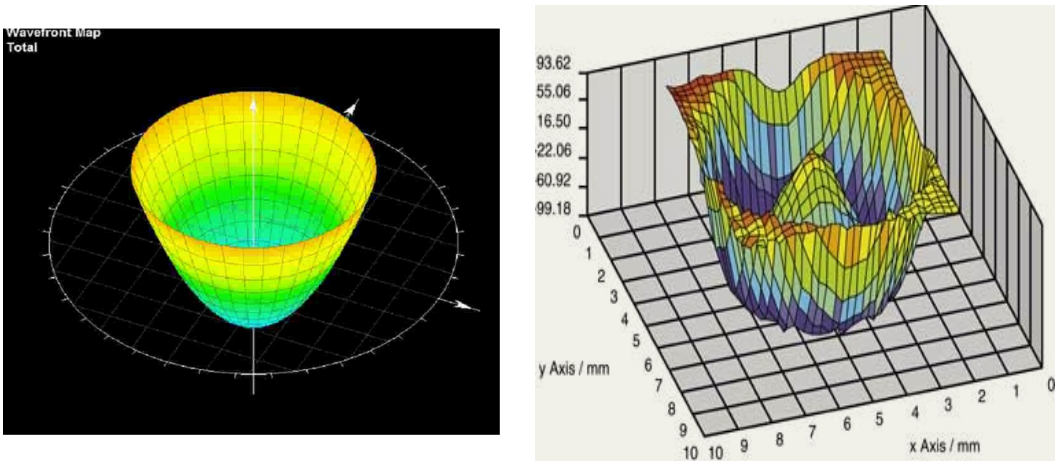
- ✓ Wavefront από εκτροπές υψηλής τάξης (εικόνα 48): Και τα τρία μηχανήματα παρέχουν αυτό το χαρακτηριστικό. Ένα παράδειγμα απο το Wasca εκτροπόμετρο παρουσιάζεται στη εικόνα 48 όπου απεικονίζεται Wavefront και για τις συνολικές αλλά και για τις υψηλής τάξης εκτροπές.



Εικόνα 48. Η εικόνα πάνω παρουσιάζει τις συνολικές εκτροπές και η κάτω τις εκτροπές υψηλής τάξης

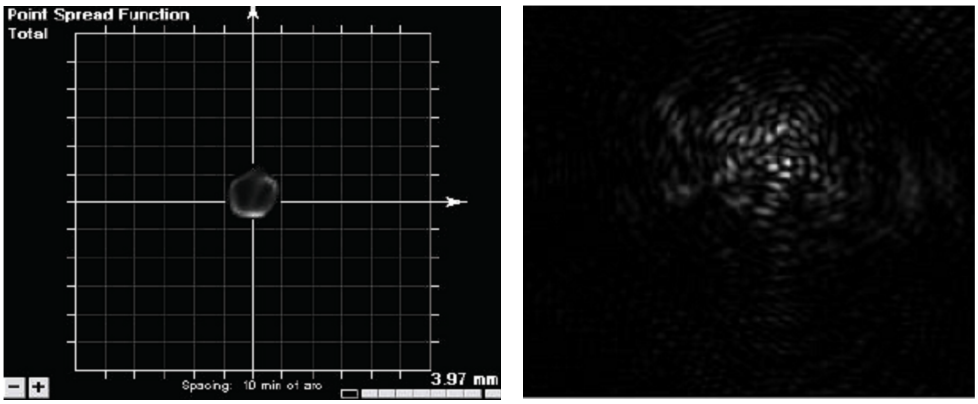
- ✓ RMS: Και τα τρια εκτροπόμετρα παρέχουν RMS, συμπεριλαμβάνοντας RMS για τις συνολικες εκτροπές αλλά και RMS για τις εκροπές υψηλής τάξης.
- ✓ 3D-Wavefront: Και τα τρία μηχανήματα παρέχουν αυτό το χαρακτηριστικό (εικόνα 49)





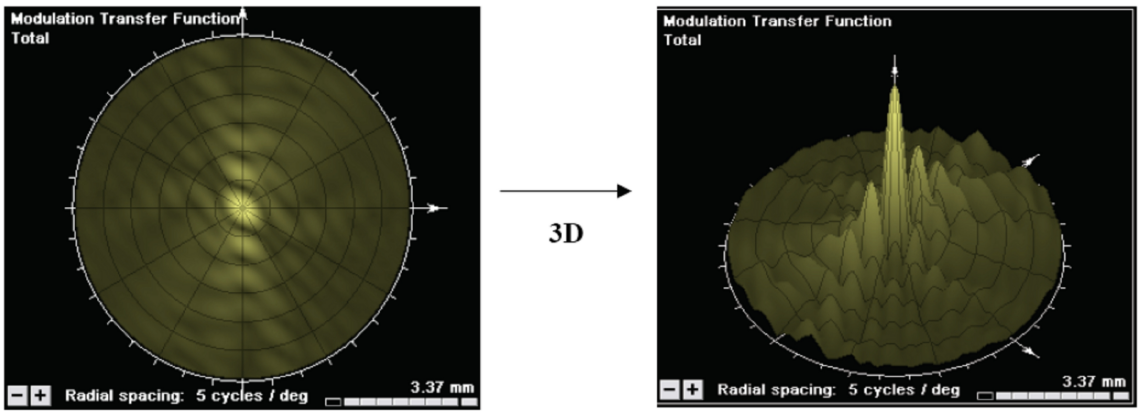
Εικόνα 49. 3-D ανάλυση Wavefront με Wasca (πάνω εικόνα), . 3-D ανάλυση Wavefront με Allegretto (κάνω δεξιά) και 3-D ανάλυση Wavefront με iTrace (κάτω αριστερά).

- ✓ Point Spread Function (PSF): Και τα τρία εκτροπόμετρα παρέχουν αυτό το χαρακτηριστικό (εικόνα 50)



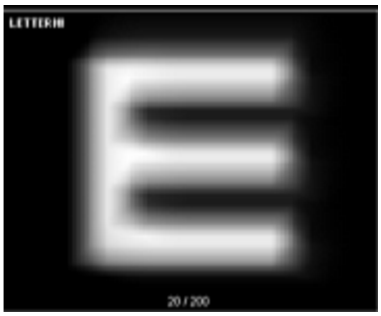
Εικόνα 50. PSF από το iTrace (αριστερά) και από το Wasca (δεξιά).

- ✓ Modulation Transfer Function (MTF): Μόνο το iTrace παρέχει αυτό το χαρακτηριστικό (εικόνα 51).



Εικόνα 51. MTF σε μορφή 2-D και σε μορφή 3-D από το iTrace

- ✓ Οπτική οξύτητα: Αυτό το χαρακτηριστικό το διαθέτουν τα εκτροπόμετρα iTrace και Wasca (εικόνα 52).



Εικόνα 52. Γράμμα «Ε» με τη μέθοδο του Sneller

4) Χαρακτηριστικά του δείγματος - Διαδικασία εξέτασης

Για την διεκπεραίωση της παρούσας μελέτης συμμετείχαν 62 άτομα με μέσο όρο ηλικίας 28 (από 18 μέχρι 58). Όλοι οι εξεταζόμενοι εξετάστηκαν από το ίδιο άτομο. Αρχικά, τοποθετήθηκε cyclogyl κολλύριο το οποίο δημιούργησε μυδρίαση (άνοιγμα της κόρης) και κυκλοπληγία (παράλυση του ακτινωτού μυός). Έχοντας περάσει τουλάχιστον 20 λεπτά από την τοποθέτηση του cyclogyl, ώστε η κόρη των εξεταζόμενων να ανοίξει τουλάχιστον στα 7 mm, πραγματοποιήθηκε αρχικά έλεγχος του σφαιρώματος και του κυλίνδρου με την βοήθεια φορόπτερου (cyclo refraction). Ο μέσος όρος του σφαιρώματος και του κυλίνδρου ήταν -2,5 D (από -10,25 έως +2,5 D) και -0,5 D (από 0 έως -2,25 D) αντίστοιχα. Αμέσως μετά ο χειριστής ήταν έτοιμος να αξιολογήσει τις εκτροπές χαμηλής και υψηλής τάξης στην κεντρική οπτική ζώνη των 6mm.Η αξιολόγηση των εκτροπών χαμηλής και υψηλής τάξης, πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια των εκτροπομέτρων Wasca Coas, Wave Analyzer και iTrace. Οι εκτροπές υπολογίστηκαν με πολυώνυμα Zernike. Για την σωστή λήψη των μετρήσεων ο χειριστής και ο εξεταζόμενος βρίσκονταν σε πλήρη συνεργασία. Έτσι, ο χειριστής έδινε κατάλληλες οδηγίες ώστε ο εξεταζόμενος 1) να ευθυγραμμίσει τον υπό εξέταση οφθαλμό με το κέντρο του στόχου με την βοήθεια κατάλληλης μπάρας στήριξης (εικόνα 53) και 2) να διατηρήσει τους οφθαλμούς και το κεφάλι του εξεταζόμενου σε σταθερή θέση. Από κάθε μηχάνημα πραγματοποιήθηκε μια μέτρηση για κάθε οφθαλμό.

Εικόνα 53. ευθυγράμμιση του οφθαλμού με το κέντρο του στόχου με την βοήθεια κατάλληλης μπάρας στήριξης

5.1) Στατιστική ανάλυση

Για την σύγκριση των εκτροπών με τα τρία μηχανήματα χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο των Bland and Altman[30,31,32] το οποίο χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της συμφωνίας μεταξύ δυο μεθόδων. Έτσι, για την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων της συγκεκριμένης μελέτης πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις Bland and Altman ανά δυο μηχανήματα. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει τις διαφορές μεταξύ των μετρήσεων για τον ίδιο εξεταζόμενο, την μέση τιμή της διαφοράς των μετρήσεων $\bar{d}$ και τέλος την τυπική απόκλιση s_d των διαφορών. Έπειτα, εκτιμιούνται τα όρια συμφωνίας (limits of agreement) τα οποία υπολογίζονται από τον τύπο $\bar{d} \pm 1{,}96 * s_d$. Καθώς οι διαφορές στην παρούσα μελέτη παρουσιάζουν σχεδόν κανονική κατανομή, τα όρια συμφωνίας δηλώνουν ότι το 95% των διαφορών θα βρίσκονται μεταξύ αυτών των ορίων. Πραγματοποιήθηκαν διαγράμματα διασποράς (με την βοήθεια του προγράμματος excel) έναντι του μέσου όρου των μετρήσεων. Τα διαγράμματα αυτά μας επιτρέπουν να ανακαλύψουμε κάθε πιθανή σχέση ασυμφωνίας των μετρήσεων. Για καλύτερη ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή των διαφορών. Επίσης υπολογίσαμε το διάστημα εμπιστοσύνης για την αξιολόγηση της στατιστικής σημαντικότητας των διαφορών των υπό μελέτη μηχανημάτων. Το διάστημα εμπιστοσύνης παρέχει 95% σιγουριά ότι η πραγματική μέση τιμή των διαφορών, βρίσκεται στο διάστημα αυτό. Στην περίπτωση κατά την οποία το

διάστημα εμπιστοσύνης εμπεριέχει το μηδέν στις υπολογιζόμενες διαφορές δεν παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι όταν πραγματοποιείται μια μόνο μέτρηση από κάθε εξεταζόμενο και από κάθε μηχάνημα δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί ποιο μηχάνημα-μέθοδος είναι περισσότερο επαναλήψιμη (ακριβής). Έτσι υπολογίστηκε σε ένα δείγμα 10 ατόμων η επαναληψιμότητα των μετρήσεων και για τα τρία μηχανήματα ώστε να διαπιστωθεί το κατά πόσο μοιάζουν οι επαναλαμβανόμενες μετρήσεις για κάθε εξεταζόμενο από κάθε μηχάνημα. Πάρθηκαν πέντε μετρήσεις για κάθε οφθαλμό και από τα τρία μηχανήματα. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι εάν μία μέθοδος παρουσιάζει κακή επαναληψιμότητα για το ίδιο άτομο , τότε μπορούμε να βγάλουμε συμπέρασμα για την συμφωνία μεταξύ των μηχανημάτων, η οποία αναμένεται να είναι επίσης κακή.

Για τον υπολογισμό της επαναληψιμότητας χρησιμοποιήθηκε (μέσω του προγράμματος spss) ανάλυση διασποράς μιας κατεύθυνσης (one way ANOVA). Παίρνοντας τους εξεταζόμενους ως παράγοντα υπολογίστηκε την within-subject deviation, s_w. Πολλαπλασιάζοντας το s_w με τον αριθμό 2,77 δημιουργήθηκε ο συντελεστής επαναληψιμότητας ώστε να γίνει εκτίμηση των σφαλμάτων μέτρησης. Όσο πιο μεγάλος είναι ο συντελεστής επαναληψιμότητας , τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταβλητότητα. Τιμή του συντελεστή επαναληψιμότητας για παράδειγμα ίση με 0,215 σημαίνει ότι δεν αναμένεται ότι δυο μετρήσεις στο ίδιο μηχάνημα για τον ίδιο ασθενή να διαφέρουν περισσότερο από 0,215 μονάδες.

Τέλος, καθώς και τα τρία μηχανήματα υπολογίζουν σφαίρωμα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των σφαιρωμάτων από την υπολογιζόμενη τιμή του Wasca, του Allegretto, του iTrace και τέλος της τιμής από το cyclo refraction.

5.2) Πίνακες επαναληψιμότητας

Επαναληψιμότητα για το Wasca στον δεξιό οφθαλμό.	Μέση Τιμή Rms	Τυπική Απόκλιση Μέσης Τιμής rms	Συντελεστής Επαναληψιμότητας : 2,77* s_w
Z(2,-2)	-0,25	0,69	0,177
Z(2,0)	2,95	3,00	0,285
Z(2,2)	-0,24	0,49	0,202
Rms 2nd order	3,79	1,99	0,285
Z(3,-3)	0,05	0,12	0,102
Z(3,-1)	-0,17	0,11	0,131
Z(3,1)	0,04	0,12	0,069
Z(3,3)	-0,06	0,12	0,104
Rms 3rd order	0,29	0,08	0,116
Rms coma	0,22	0,09	0,103
Rms Z(3,-1)	0,17	0,11	0,122
Rms Z(3,1)	0,10	0,08	0,069
Z(4,-4)	0,00	0,05	0,051
Z(4,-2)	0,00	0,05	0,058
Z(4,0)	0,08	0,05	0,061
Z(4,2)	0,01	0,08	0,056
Z(4,-4)	0,02	0,04	0,049
Rms 4rd order	0,02	0,02	0,012
Rms Z(4,0)	0,08	0,05	0,051
Z(5,-5)	0,00	0,03	0,036
Z(5,-3)	0,00	0,03	0,033
Z(5,-1)	0,01	0,05	0,040
Z(5,1)	-0,02	0,03	0,022
Z(5,3)	0,00	0,02	0,034
Z(5,-5)	0,00	0,03	0,025
Rms 5rd order	0,08	0,03	0,034
Z(6,-6)	0,00	0,01	0,028
Z(6,-4)	0,01	0,01	0,020
Z(6,-2)	0,00	0,01	0,023
Z(6,0)	0,00	0,02	0,035
Z(6,2)	0,00	0,01	0,035
Z(6,4)	0,00	0,02	0,030
Z(6,-6)	-0,02	0,03	0,038
Rms 6rd order	0,04	0,02	0,033
Rms total	3,81	1,98	0,285
Rms total HO	0,31	0,08	0,113

Πίνακας 4: Επαναληψιμότητα του Wasca για τον δεξιό οφθαλμό για όλους τους συντελεστές Zernike και όλα τα rms.

Επαναληψιμότητα για το Wasca στον αριστερό οφθαλμό.	Μέση Τιμή Rms	Τυπική Απόκλιση Μέσης Τιμής rms	Συντελεστής Επαναληψιμότητας : 2,77* s_w
Z(2,-2)	0,180	0,359	0,168
Z(2,0)	2,985	3,292	0,467
Z(2,2)	-0,561	0,445	0,296
Rms 2nd order	3,900	2,236	0,451
Z(3,-3)	0,044	0,143	0,118
Z(3,-1)	-0,253	0,160	0,193
Z(3,1)	-0,040	0,131	0,076
Z(3,3)	0,101	0,105	0,128
Rms 3rd order	0,353	0,160	0,203
Rms coma	0,292	0,149	0,159
Rms Z(3,-1)	0,253	0,160	0,191
Rms Z(3,1)	0,100	0,093	0,069
Z(4,-4)	-0,025	0,081	0,077
Z(4,-2)	-0,005	0,044	0,047
Z(4,0)	0,063	0,060	0,086
Z(4,2)	-0,002	0,092	0,090
Z(4,-4)	0,008	0,040	0,069
Rms 4rd order	0,026	0,029	0,037
Rms Z(4,0)	0,071	0,049	0,069
Z(5,-5)	-0,014	0,023	0,040
Z(5,-3)	0,003	0,037	0,054
Z(5,-1)	0,021	0,063	0,062
Z(5,1)	0,006	0,018	0,030
Z(5,3)	-0,008	0,026	0,047
Z(5,-5)	-0,009	0,029	0,037
Rms 5rd order	0,083	0,037	0,044
Z(6,-6)	0,002	0,016	0,032
Z(6,-4)	0,003	0,022	0,049
Z(6,-2)	-0,001	0,017	0,035
Z(6,0)	0,002	0,021	0,042
Z(6,2)	0,010	0,026	0,043
Z(6,4)	0,010	0,021	0,039
Z(6,-6)	0,001	0,018	0,033
Rms 6rd order	0,051	0,023	0,045
Rms total	3,932	2,215	0,447
Rms total HO	0,370	0,162	0,196

Πίνακας 5: Επαναληψιμότητα του Wasca για τον αριστερό οφθαλμό για όλους τους συντελεστές Zernike και όλα τα rms .

Επαναληψιμότητα για το Allegretto στον δεξιό οφθαλμό.	Μέση Τιμή Rms	Τυπική Απόκλιση Μέσης Τιμής rms	Συντελεστής Επαναληψιμότητας : 2,77* s_w
Z(2,-2)	-0,088	0,361	0,274
Z(2,0)	2,207	2,887	0,293
Z(2,2)	-0,122	0,327	0,224
Rms 2nd order	3,194	1,754	0,303
Z(3,-3)	0,020	0,106	0,105
Z(3,-1)	-0,034	0,100	0,110
Z(3,1)	0,012	0,086	0,109
Z(3,3)	-0,023	0,082	0,143
Rms 3rd order	0,183	0,056	0,133
Rms coma	0,128	0,043	0,116
Rms Z(3,-1)	0,095	0,045	0,110
Rms Z(3,1)	0,072	0,048	0,092
Z(4,-4)	0,012	0,040	0,068
Z(4,-2)	-0,018	0,055	0,085
Z(4,0)	0,062	0,074	0,091
Z(4,2)	-0,003	0,051	0,051
Z(4,-4)	0,013	0,045	0,083
Rms 4rd order	0,124	0,057	0,106
Rms Z(4,0)	0,074	0,061	0,085
Z(5,-5)	0,006	0,034	0,042
Z(5,-3)	0,001	0,021	0,047
Z(5,-1)	-0,015	0,024	0,059
Z(5,1)	-0,002	0,023	0,047
Z(5,3)	0,003	0,028	0,066
Z(5,-5)	-0,004	0,032	0,062
Rms 5rd order	0,061	0,032	0,070
Z(6,-6)	0,000	0,010	0,036
Z(6,-4)	0,000	0,007	0,023
Z(6,-2)	-0,003	0,010	0,026
Z(6,0)	0,002	0,025	0,054
Z(6,2)	-0,004	0,015	0,043
Z(6,4)	0,003	0,019	0,044
Z(6,-6)	-0,005	0,012	0,036
Rms 6rd order	0,026	0,032	0,042
Rms total	3,212	1,738	0,299
Rms total HO	0,239	0,066	0,141

Πίνακας 6: Επαναληψιμότητα τουAllegretto για τον δεξιό οφθαλμό για όλους τους συντελεστές Zernike και όλα τα rms .

Επαναληψιμότητα για το Allegretto στον αριστερό οφθαλμό.	Μέση Τιμή Rms	Τυπική Απόκλιση Μέσης Τιμής rms	Συντελεστής Επαναληψιμότητας : 2,77* s_w
Z(2,-2)	0,056	0,170	0,180
Z(2,0)	2,124	3,233	0,176
Z(2,2)	-0,297	0,271	0,172
Rms 2nd order	3,311	1,993	0,178
Z(3,-3)	0,000	0,066	0,096
Z(3,-1)	-0,089	0,132	0,132
Z(3,1)	0,005	0,062	0,111
Z(3,3)	0,050	0,082	0,103
Rms 3rd order	0,177	0,102	0,144
Rms coma	0,142	0,091	0,133
Rms Z(3,-1)	0,129	0,090	0,132
Rms Z(3,1)	0,047	0,039	0,095
Z(4,-4)	-0,011	0,030	0,056
Z(4,-2)	0,006	0,036	0,059
Z(4,0)	0,048	0,067	0,068
Z(4,2)	0,004	0,061	0,062
Z(4,-4)	-0,009	0,030	0,073
Rms 4rd order	0,108	0,043	0,063
Rms Z(4,0)	0,065	0,049	0,064
Z(5,-5)	0,006	0,022	0,052
Z(5,-3)	0,007	0,015	0,039
Z(5,-1)	-0,014	0,029	0,053
Z(5,1)	-0,001	0,020	0,044
Z(5,3)	-0,005	0,020	0,047
Z(5,-5)	0,005	0,024	0,055
Rms 5rd order	0,052	0,021	0,042
Z(6,-6)	-0,005	0,019	0,052
Z(6,-4)	-0,003	0,020	0,037
Z(6,-2)	0,001	0,010	0,022
Z(6,0)	0,002	0,018	0,040
Z(6,2)	0,003	0,015	0,040
Z(6,4)	0,010	0,018	0,043
Z(6,-6)	-0,003	0,016	0,041
Rms 6rd order	0,031	0,034	0,041
Rms total	3,327	1,981	0,176
Rms total HO	0,224	0,101	0,122

Πίνακας 7: Επαναληψιμότητα τουAllegretto για τον αριστερό οφθαλμό για όλους τους συντελεστές Zernike και όλα τα rms .

Επαναληψιμότητα για το iTrace στον δεξιό οφθαλμό.	Μέση Τιμή Rms	Τυπική Απόκλιση Μέσης Τιμής rms	Συντελεστής Επαναληψιμότητας : 2,77* s_w
Z(2,-2)	-0,047	0,354	0,202
Z(2,0)	1,797	2,831	0,402
Z(2,2)	-0,088	0,454	0,444
Rms 2nd order	2,961	1,620	0,430
Z(3,-3)	0,008	0,131	0,192
Z(3,-1)	-0,073	0,127	0,243
Z(3,1)	-0,080	0,132	0,164
Z(3,3)	0,020	0,077	0,118
Rms 3rd order	0,238	0,103	0,206
Rms coma	0,174	0,120	0,233
Rms Z(3,-1)	0,102	0,103	0,239
Rms Z(3,1)	0,120	0,096	0,157
Z(4,-4)	-0,012	0,054	0,102
Z(4,-2)	-0,017	0,042	0,091
Z(4,0)	0,116	0,082	0,110
Z(4,2)	-0,029	0,074	0,122
Z(4,-4)	0,025	0,044	0,094
Rms 4rd order	0,172	0,064	0,071
Rms Z(4,0)	0,119	0,078	0,106
Z(5,-5)	0,009	0,035	0,045
Z(5,-3)	-0,002	0,037	0,073
Z(5,-1)	0,009	0,046	0,121
Z(5,1)	0,005	0,029	0,031
Z(5,3)	-0,001	0,017	0,039
Z(5,-5)	0,011	0,026	0,044
Rms 5rd order	0,067	0,047	0,043
Z(6,-6)	0,004	0,009	0,017
Z(6,-4)	0,007	0,012	0,033
Z(6,-2)	-0,002	0,020	0,042
Z(6,0)	-0,009	0,020	0,032
Z(6,2)	0,008	0,016	0,033
Z(6,4)	0,000	0,011	0,029
Z(6,-6)	-0,007	0,015	0,025
Rms 6rd order	0,036	0,024	0,031
Rms total	2,998	1,585	0,413
Rms total HO	0,312	0,110	0,159

Πίνακας 8: Επαναληψιμότητα του iTrace για τον δεξιό οφθαλμό για όλους τους συντελεστές Zernike και όλα τα rms .

Επαναληψιμότητα για το iTrace στον αριστερό οφθαλμό.	Μέση Τιμή Rms	Τυπική Απόκλιση Μέσης Τιμής rms	Συντελεστής Επαναληψιμότητας : 2,77* s_w
Z(2,-2)	0,137	0,230	0,253
Z(2,0)	1,621	3,178	0,262
Z(2,2)	-0,424	0,309	0,340
Rms 2nd order	3,115	1,770	0,265
Z(3,-3)	-0,016	0,157	0,295
Z(3,-1)	-0,156	0,143	0,214
Z(3,1)	-0,042	0,086	0,179
Z(3,3)	0,049	0,138	0,098
Rms 3rd order	0,277	0,148	0,132
Rms coma	0,197	0,122	0,185
Rms Z(3,-1)	0,170	0,125	0,194
Rms Z(3,1)	0,074	0,060	0,147
Z(4,-4)	-0,043	0,051	0,130
Z(4,-2)	-0,003	0,046	0,080
Z(4,0)	0,106	0,106	0,133
Z(4,2)	0,001	0,096	0,123
Z(4,-4)	-0,005	0,048	0,119
Rms 4rd order	0,184	0,078	0,080
Rms Z(4,0)	0,123	0,086	0,081
Z(5,-5)	0,014	0,025	0,046
Z(5,-3)	0,013	0,054	0,099
Z(5,-1)	0,012	0,059	0,059
Z(5,1)	0,012	0,034	0,090
Z(5,3)	-0,012	0,019	0,038
Z(5,-5)	-0,009	0,021	0,036
Rms 5rd order	0,079	0,058	0,079
Z(6,-6)	-0,001	0,007	0,022
Z(6,-4)	-0,001	0,026	0,048
Z(6,-2)	0,006	0,016	0,035
Z(6,0)	-0,017	0,027	0,066
Z(6,2)	-0,003	0,028	0,069
Z(6,4)	0,012	0,016	0,040
Z(6,-6)	0,001	0,013	0,031
Rms 6rd order	0,048	0,032	0,034
Rms total	3,147	1,755	0,268
Rms total HO	0,352	0,167	0,113

Πίνακας 9: Επαναληψιμότητα του iTrace για τον αριστερό οφθαλμό για όλους τους συντελεστές Zernike και όλα τα rms .

5.3) Αποτελέσματα επαναληψιμότητας

2η τάξη

- Η επαναληψιμότητα για τις εκτροπές δεύτερης τάξης είναι καλή (και για τους δυο οφθαλμούς)και για τα τρία μηχανήματα καθώς για μεγάλες μέσες τιμές του rms παρατηρούνται μικροί συντελεστές επαναληψιμότητας. Οι μέσες τιμές με τις τυπικές αποκλίσεις των rms και οι συντελεστές επαναληψιμότητας και για τα τρία μηχανήματα είναι:

  μέση τιμή $3,79 \pm 1,99$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,285 (Wasca OD)

  μέση τιμή $3,9 \pm 2,236$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,451 (Wasca OS)

  μέση τιμή $3,194 \pm 1,754$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,303 (Wave Analyzer OD)

  μέση τιμή $3,311 \pm 1,993$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,178 (Wave Analyzer OS)

  μέση τιμή $2,961 \pm 1,620$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,430 (iTrace OD)

  μέση τιμή $3,115 \pm 1,770$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,265 (iTrace OS)

Για παράδειγμα, στον δεξί οφθαλμό με μέση τιμή rms 3,79 ± 0,285 σημειώνεται συντελεστής επαναληψιμότητας 0,285. Δηλαδή για μέση τιμή rms 3,79 δεν αναμένεται δυο επαναλαμβανόμενες μετρήσεις να διαφέρουν πάνω από 0,285 μονάδες-μικρόμετρα.

Επαναληψιμότητα	Wasca Coas	Wave Analyzer	i-Trace
OD	Καλή	Καλή	Καλή
OS	Καλή	Καλή	Καλή

3ης τάξης

- Για τις εκτροπές τρίτης τάξης παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

  μέση τιμή $0,290 \pm 0,08$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,116 (Wasca OD)

  μέση τιμή $0,353 \pm 0,160$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,203 (Wasca OS)

  μέση τιμή $0,183 \pm 0,056$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,133 (Wave Analyzer OD)

  μέση τιμή $0,177 \pm 0,102$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,144 (Wave Analyzer OS)

μέση τιμή $0,238 \pm 0,103$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,206 (iTrace OD)

μέση τιμή $0,277 \pm 0,148$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,138 (iTrace OS)

Επαναληψιμότητα	Wasca Coas	Wave Analyzer	i-Trace
OD	Καλή	Κακή	Κακή
OS	Ικανοποιητική	Κακή	Ικανοποιητική

\

<u>Κάθετο κόμα</u>

- Για το κάθετο κόμα παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

  μέση τιμή $0,170 \pm 0,11$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,122 (Wasca OD)

  μέση τιμή $0,253 \pm 0,160$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,191 (Wasca OS)

  μέση τιμή $0,095 \pm 0,045$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,110 (Wave Analyzer OD)

  μέση τιμή $0,129 \pm 0,090$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,132 (Wave Analyzer OS)

  μέση τιμή $0,102 \pm 0,103$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,239 (iTrace OD)

  μέση τιμή $0,170 \pm 0,125$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,194 (iTrace OS)

Επαναληψιμότητα	Wasca Coas	Wave Analyzer	i-Trace
OD	Κακή	Κακή	Κακή
OS	Κακή	Κακή	Κακή

<u>Οριζόντιο κόμα</u>

- Για το οριζόντιο κόμα παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

  μέση τιμή $0,100 \pm 0,080$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,069 (Wasca OD)

  μέση τιμή $0,100 \pm 0,093$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,069 (Wasca OS)

  μέση τιμή $0,072 \pm 0,048$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,092 (Wave Analyzer OD)

  μέση τιμή $0,047 \pm 0,039$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,095 (Wave Analyzer OS)

μέση τιμή $0,120 \pm 0,096$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,157 (iTrace OD)

μέση τιμή $0,074 \pm 0,060$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,147 (iTrace OS)

Επαναληψιμότητα	Wasca Coas	Wave Analyzer	i-Trace
OD	Κακή	Κακή	Κακή
OS	Κακή	Κακή	Κακή

Κόμα

- Για το κόμα παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

  μέση τιμή $0,220 \pm 0,090$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,103 (Wasca OD)

  μέση τιμή $0,292 \pm 0,149$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,159 (Wasca OS)

  μέση τιμή $0,128 \pm 0,043$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,116 (Wave Analyzer OD)

  μέση τιμή $0,142 \pm 0,091$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,133 (Wave Analyzer OS)

  μέση τιμή $0,174 \pm 0,120$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,233 (iTrace OD)

  μέση τιμή $0,197 \pm 0,122$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,185 (iTrace OS)

Επαναληψιμότητα	Wasca Coas	Wave Analyzer	i-Trace
OD	Καλή	Κακή	Κακή
OS	Καλή	Κακή	Κακή

$4^{ης}$ τάξης

- Για τις εκτροπές τέταρτης τάξης παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

  μέση τιμή $0,020 \pm 0,020$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,012 (Wasca OD)

  μέση τιμή $0,026 \pm 0,029$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,037 (Wasca OS)

  μέση τιμή $0,124 \pm 0,057$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,106 (Wave Analyzer OD)

  μέση τιμή $0,108 \pm 0,043$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,063 (Wave Analyzer OS)

μέση τιμή $0,172 \pm 0,064$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,071 (iTrace OD)

μέση τιμή $0,184 \pm 0,078$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,080 (iTrace OS)

Επαναληψιμότητα	Wasca Coas	Wave Analyzer	i-Trace
OD	Κακή	Κακή	Καλή
OS	Κακή	Κακή	Καλή

<u>Σφαιρική εκτροπή</u>

- Για την σφαιρική εκτροπή παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

  μέση τιμή $0,080 \pm 0,050$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,051 (Wasca OD)

  μέση τιμή $0,071 \pm 0,049$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,069 (Wasca OS)

  μέση τιμή $0,062 \pm 0,074$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,091 (Wave Analyzer OD)

  μέση τιμή $0,048 \pm 0,007$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,068 (Wave Analyzer OS)

  μέση τιμή $0,116 \pm 0,082$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,110 (iTrace OD)

  μέση τιμή $0,106 \pm 0,106$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,133 (iTrace OS)

Επαναληψιμότητα	Wasca Coas	Wave Analyzer	i-Trace
OD	Κακή	Κακή	Κακή
OS	Κακή	Κακή	Κακή

<u>$5^{η}$ τάξη</u>

- Για τις εκτροπές πέμπτης τάξης παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

  μέση τιμή $0,080 \pm 0,030$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,034 (Wasca OD)

  μέση τιμή $0,083 \pm 0,037$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,044 (Wasca OS)

  μέση τιμή $0,061 \pm 0,032$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,070 (Wave Analyzer OD)

  μέση τιμή $0,052 \pm 0,021$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,042 (Wave Analyzer OS)

μέση τιμή $0,067 \pm 0,047$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,043 (iTrace OD)

μέση τιμή $0,079 \pm 0,058$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,079 (iTrace OS)

Επαναληψιμότητα	Wasca Coas	Wave Analyzer	i-Trace
OD	Καλή	Κακή	Κακή
OS	Ικανοποιητική	Κακή	Κακή

<u>6η τάξη</u>

- Για τις εκτροπές έκτης τάξης παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

  μέση τιμή $0,040 \pm 0,020$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,033 (Wasca OD)

  μέση τιμή $0,051 \pm 0,023$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,045 (Wasca OS)

  μέση τιμή $0,026 \pm 0,032$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,042 (Wave Analyzer OD)

  μέση τιμή $0,031 \pm 0,034$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,041 (Wave Analyzer OS)

  μέση τιμή $0,036 \pm 0,024$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,031 (iTrace OD)

  μέση τιμή $0,048 \pm 0,032$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,034 (iTrace OS)

Επαναληψιμότητα	Wasca Coas	Wave Analyzer	i-Trace
OD	Κακή	Κακή	Κακή
OS	Κακή	Κακή	Κακή

<u>Total</u>

- Για τις συνολικές εκτροπές παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

  μέση τιμή $3,81 \pm 1,98$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,285 (Wasca OD)

  μέση τιμή $3,932 \pm 2,215$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,447 (Wasca OS)

  μέση τιμή $3,212 \pm 1,738$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,299 (Wave Analyzer OD)

  μέση τιμή $3,327 \pm 1,981$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,176 (Wave Analyzer OS)

μέση τιμή $2,998 \pm 1,585$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,413 (iTrace OD)

μέση τιμή $3,147 \pm 1,755$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,268 (iTrace OS)

Επαναληψιμότητα	Wasca Coas	Wave Analyzer	i-Trace
OD	Καλή	Καλή	Καλή
OS	Καλή	Καλή	Καλή

Total high order

- Για τις συνολικές εκτροπές υψηλής τάξης παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

  μέση τιμή $0,310 \pm 0,080$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,113 (Wasca OD)

  μέση τιμή $0,370 \pm 0,162$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,196 (Wasca OS)

  μέση τιμή $0,239 \pm 0,066$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,141 (Wave Analyzer OD)

  μέση τιμή $0,224 \pm 0,101$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,122 (Wave Analyzer OS)

  μέση τιμή $0,312 \pm 0,110$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,159 (iTrace OD)

  μέση τιμή $0,352 \pm 0,167$ και συντελεστή επαναληψιμότητας 0,113 (iTrace OS)

Επαναληψιμότητα	Wasca Coas	Wave Analyzer	i-Trace
OD	Καλή	Ικανοποιητική	Ικανοποιητική
OS	Ικανοποιητική	Ικανοποιητική	Καλή

5.4) Συμπεράσματα επαναληψιμότητας

- Για τις εκτροπές ***δεύτερης τάξης*** η επαναληψιμότητα και για τα τρία μηχανήματα είναι καλή και για τους δύο οφθαλμούς.
- Για τις εκτροπές ***τρίτης τάξης*** το Wasca για τον δεξιό οφθαλμό παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα Για τον αριστερό το Wasca παρουσιάζει ικανοποιητική επαναληψιμότητα. Επίσης, ικανοποιητική επαναληψιμότητα παρουσιάζει και το iTrace για τον αριστερό οφθαλμό. Το iTrace για τον δεξιό

οφθαλμό παρουσιάζει κακή επαναληψιμότητα. Τέλος, κακή επαναληψιμότητα παρουσιάζει το Wave Analyzer και για τους δύο οφθαλμούς.

- Για το ***κάθετο κόμα*** η επαναληψιμότητα και για τα τρία μηχανήματα παρουσιάζει κακή επαναληψιμότητα και για τους δύο οφθαλμούς.
- Για το ***οριζόντιο κόμα*** η επαναληψιμότητα και για τα τρία μηχανήματα παρουσιάζει κακή επαναληψιμότητα και για τους δύο οφθαλμούς.

- Για το ***κόμα*** μόνο το Wasca παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα και για τους δύο οφθαλμούς. Το Wave Analyzer και το iTrace παρουσιάζουν κακή επαναληψιμότητα και για τους δύο οφθαλμούς.
- Για τις εκτροπές ***τέταρτης τάξης*** μόνο το iTrace παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα και για τους δύο οφθαλμούς. Το Wasca και το Wave Analyzer παρουσιάζουν κακή επαναληψιμότητα και για τους δύο οφθαλμούς.
- Για την ***σφαιρική εκτροπή*** η επαναληψιμότητα και για τα τρία μηχανήματα παρουσιάζει κακή επαναληψιμότητα και για τους δύο οφθαλμούς.
- Για τις εκτροπές ***πέμπτης τάξης*** μόνο το Wasca παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα για τον δεξιό οφθαλμό και για τον αριστερό ικανοποιητική. Το Wave Analyzer και το iTrace παρουσιάζουν κακή επαναληψιμότητα και για τους δύο οφθαλμούς.
- Για τις εκτροπές ***έκτης τάξης*** η επαναληψιμότητα και για τα τρία μηχανήματα παρουσιάζει κακή επαναληψιμότητα και για τους δύο οφθαλμούς.
- Για τις ***συνολικές εκτροπές*** η επαναληψιμότητα και για τα τρία μηχανήματα είναι καλή και για τους δύο οφθαλμούς.
- Για τις συνολικές εκτροπές υψηλής τάξης το Wasca παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα για τον δεξιό οφθαλμό και ικανοποιητική για τον αριστερό οφθαλμό. Επίσης, το Wave Analyzer παρουσιάζει ικανοποιητική επαναληψιμότητα και για τους δύο οφθαλμούς. Τέλος, το iTrace παρουσιάζει ικανοποιητική επαναληψιμότητα για τον δεξιό οφθαλμό και καλή για τον αριστερό οφθαλμό.
- Γενικά, στο Wasca παρουσιάζεται καλύτερη επαναληψιμότητα σε σχέση με το Wave Analyzer και το iTrace.
- Διαφορές ανάμεσα στο δεξί και το αριστερό μάτι ενδεχομένως να οφείλονται στον μικρό αριθμό δείγματος.

5.5) Πίνακες-Γραφικές παραστάσεις για την σύγκριση των σφαιρωμάτων

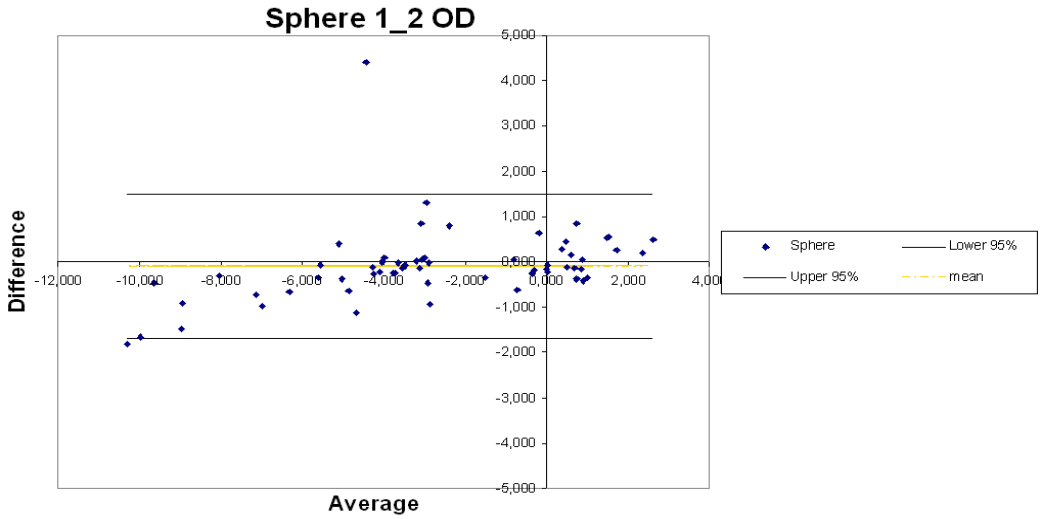
Από τις τιμές των υπολογιζόμενων σφαιρωμάτων των τριών μηχανημάτων και του σφαιρώματος με cyclo refraction έχουμε:

OD	Μέση τιμή Διαφο-ρών	Μέση τιμή (Τυπική Από-κλιση)	Κάτω όριο Δ.Ε	Άνω όριο Δ.Ε	Κάτω LoA	Άνω LoA	(MaxLoA/ Μέση τιμή) *100%
1-2	-0,092	-2,689 (3,296)	-0,298	0,114	-1,685	1,501	63%
1-3	-0,881	-2,294 (3,205)	-1,080	-0,682	-2,415	0,654	105%
1-4	-0,102	-2,684 (3,323)	-0,271	-0,067	-1,407	1,203	52%
2-3	-0,790	-2,248 (3,051)	-0,964	-0,616	-2,131	0,551	95%
2-4	-0,010	-2,638 (3,159)	-0,221	0,201	-1,641	1,621	62%
3-4	0,780	-2,243 (3,066)	0,586	0,974	-0,719	2,279	101%

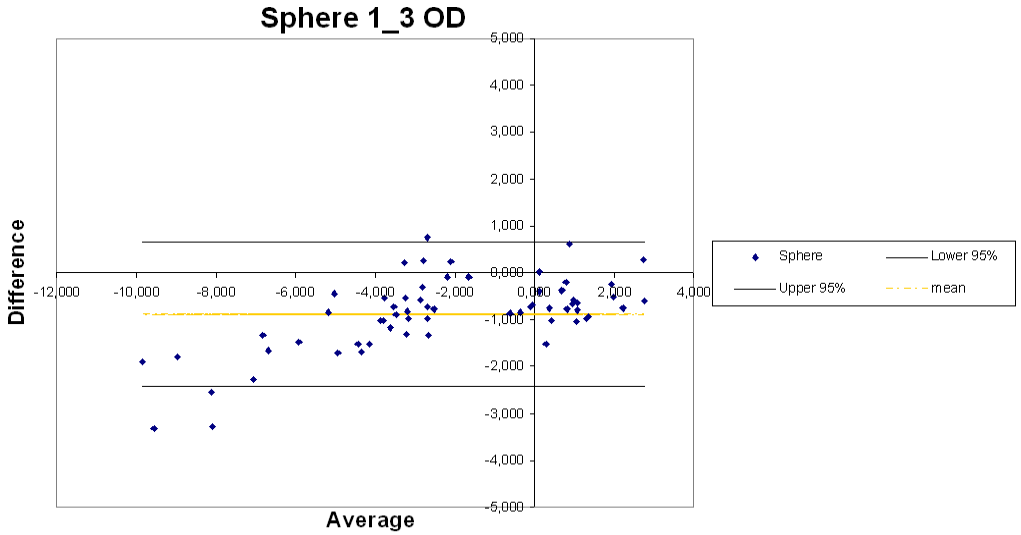
Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά του σφαιρώματος για τον δεξιό οφθαλμό

OS	Μέση τιμή Διαφο-ρών	Μέση τιμή (Τυπική Από-κλιση)	Κάτω όριο Δ.Ε	Άνω όριο Δ.Ε	Κάτω LoA	Άνω LoA	(MaxLoA/ Μέση τιμή) *100%
1-2	-0,138	-2,625 (3,260)	-0,312	0,036	-1,481	1,205	56%
1-3	-0,847	-2,270 (3,236)	-1,054	-0,640	-2,442	0,748	108%
1-4	-0,282	-2,555 (3,342)	-0,406	-0,158	-1,240	0,676	49%
2-3	-0,709	-2,201 (3,080)	-0,858	-0,560	-1,856	0,438	84%
2-4	-0,145	-2,484 (3,179)	-0,267	-0,023	-1,090	0,800	44%
3-4	0,564	-2,129 (3,156)	0,408	0,720	-0,643	1,771	83%

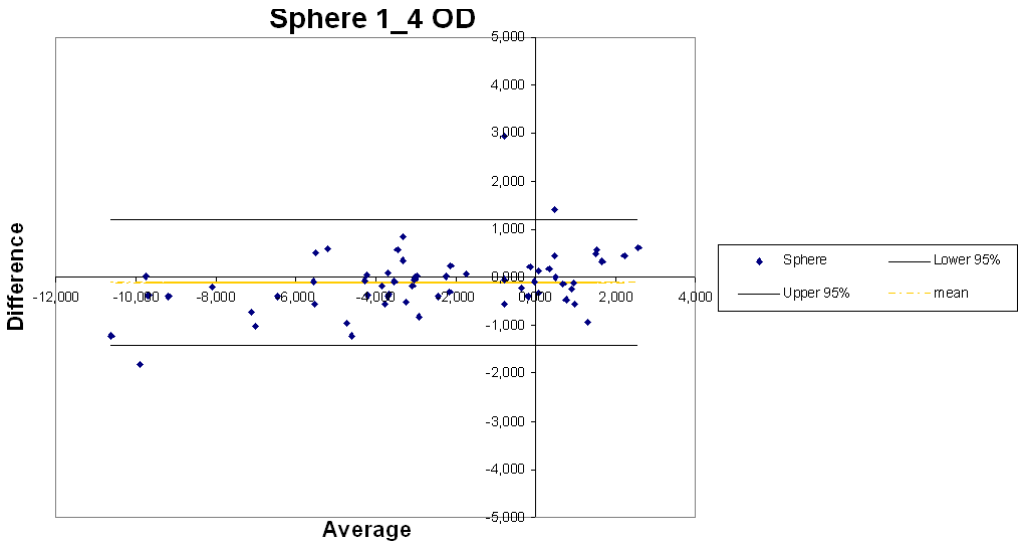
Πίνακας11: Χαρακτηριστικά του σφαιρώματος για τον αριστερό οφθαλμό



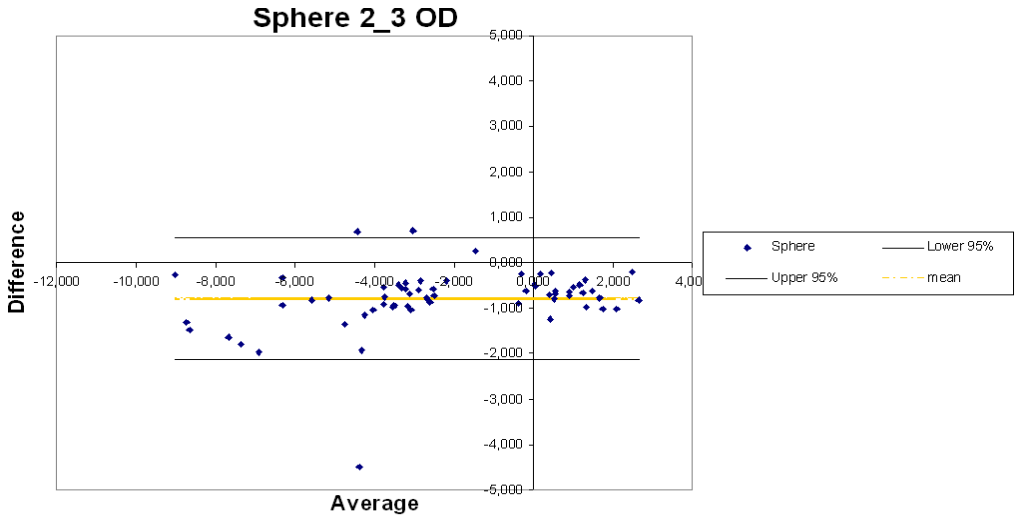
Γράφημα 1: Σύγκριση των σφαιρωμάτων για τα μηχανήματα Wasca και Allegretto



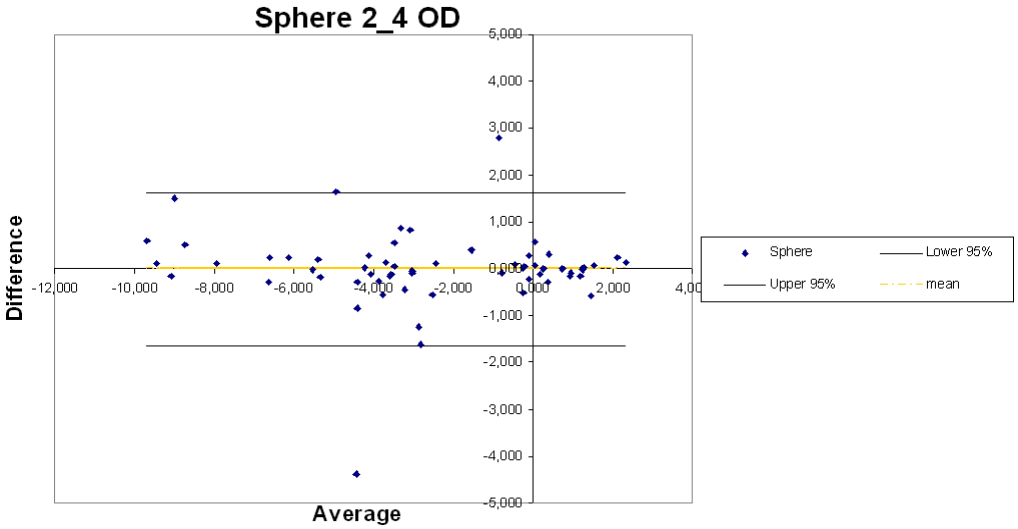
Γράφημα 2: Σύγκριση των σφαιρωμάτων για τα μηχανήματα Wasca και iTrace



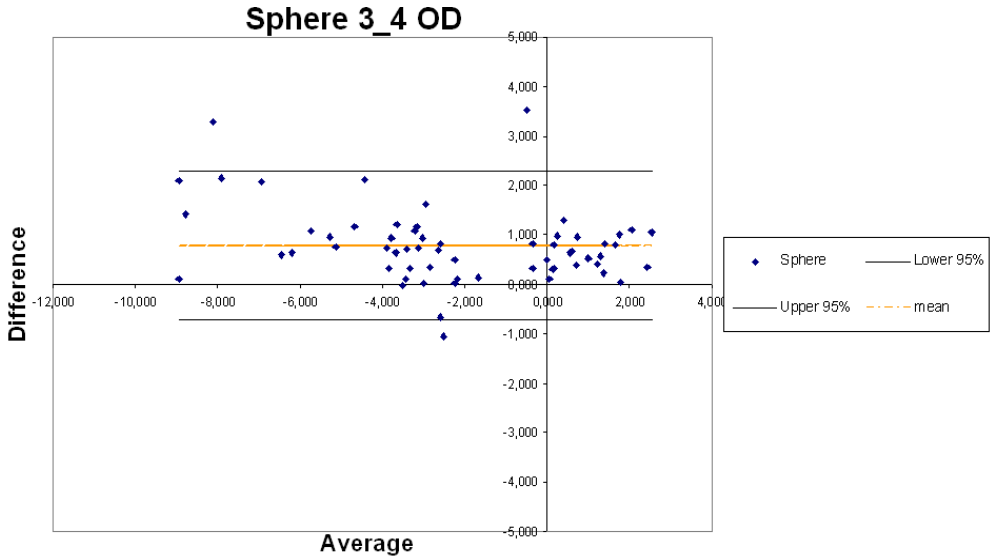
Γράφημα 3: Συγκριση του σφαιρώματος από το Wasca με αυτό από cyclo refraction.



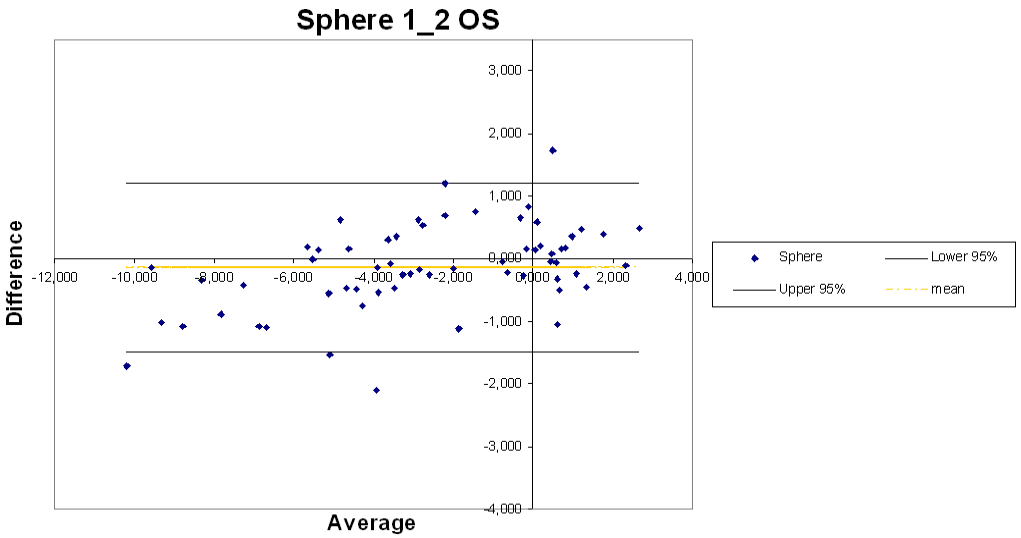
Γράφημα 4: Σύγκριση σφαιρωμάτων για τα μηχανήματα Allegretto και iTrace



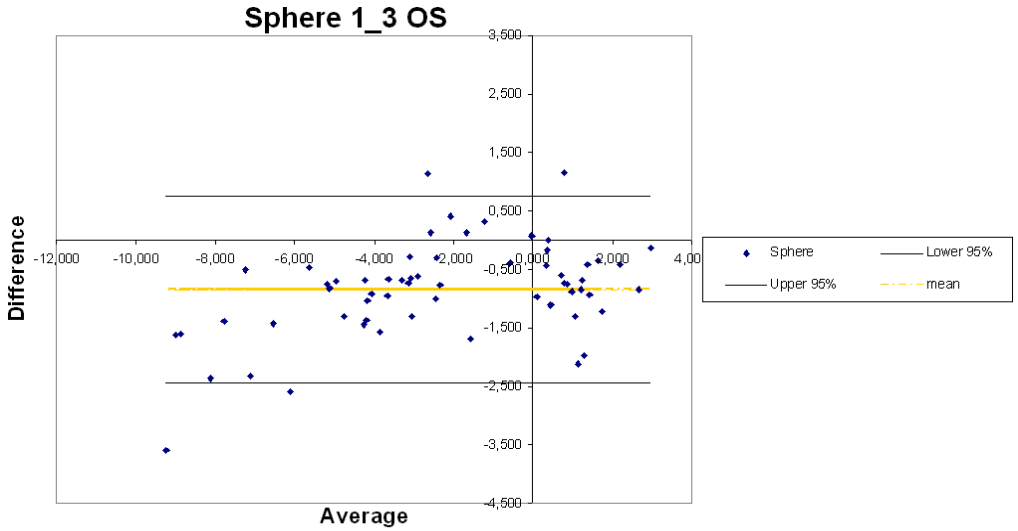
Γράφημα 5: Σύγκριση του σφαιρώματος από το Allegretto με αυτό από το cyclo refraction



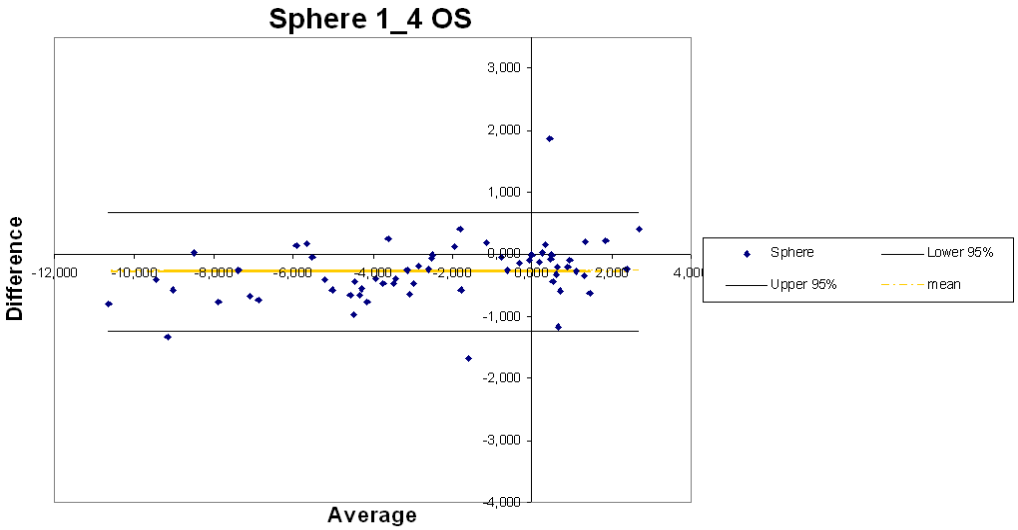
Γράφημα 6: Σύγκριση του σφαιρώματος από το iTrace με αυτό από το cyclo refraction



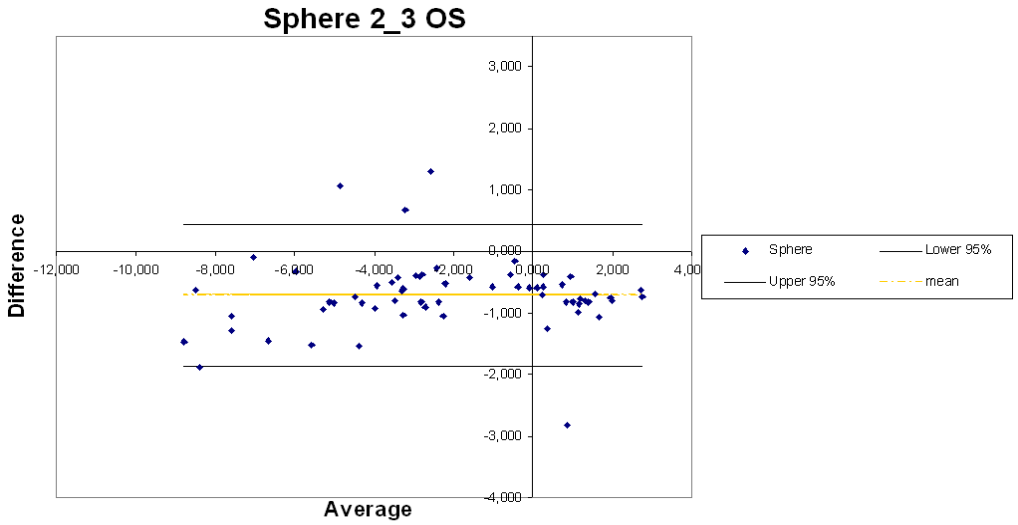
Γράφημα 7: Σύγκριση των σφαιρωμάτων για τα μηχανήματα Wasca και Allegretto



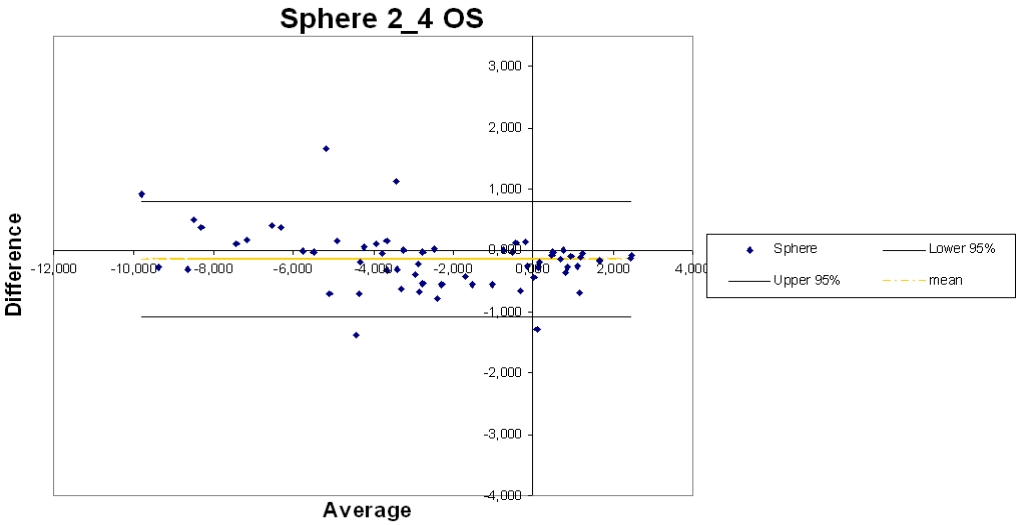
Γράφημα 8: Σύγκριση των σφαιρωμάτων για τα μηχανήματα Wasca και iTrace



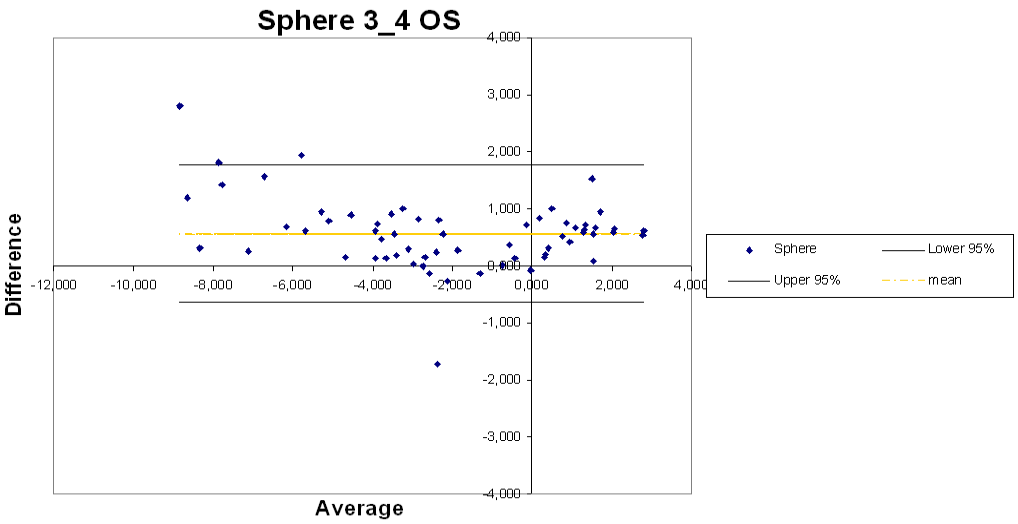
Γράφημα 9: Συγκριση του σφαιρώματος από το Wasca με αυτό από cyclo refraction.



Γράφημα 10: Σύγκριση σφαιρωμάτων για τα μηχανήματα Allegretto και iTrace



Γράφημα 11: : Σύγκριση του σφαιρώματος από το Allegretto με αυτό από το cyclo refraction



Γράφημα 12: Σύγκριση του σφαιρώματος από το iTrace με αυτό από το cyclo refraction

5.6) Ανάλυση γραφημάτων για την σύγκριση των σφαιρωμάτων

- Για την σύγκριση των σφαιρωμάτων υπολογίστηκε η μέση τιμή των σφαιρωμάτων, η μέση τιμή των διαφορών των σφαιρωμάτων (πορτοκαλί γραμμή στο γράφημα), τα όρια συμφωνίας, το 95% διάστημα εμπιστοσύνης και τέλος το ποσοστό διαφωνίας το οποίο ισούται με το απόλυτο μέγιστο όριο συμφωνίας προς την μέση τιμή των σφαιρωμάτων.

1) Σύγκριση σφαιρώματος από το Wasca μηχάνημα με αυτό του Allegretto για τον αριστερό οφθαλμό,1-2, (γράφημα 7)

Για την σύγκριση των σφαιρωμάτων από τα δύο μηχανήματα εφαρμόστηκε η μέθοδος Bland –Altman και υπολογίστηκαν οι διαφορές του σφαιρώματος από το Wasca(1) με τις τιμές του σφαιρώματος από το Wave Analyzer (2).

- Αρχικά, παρατηρείται ότι τα όρια συμφωνίας κυμαίνονται από -1,481 έως 1,205. Έτσι, μπορεί να σημειωθεί ότι τα όρια συμφωνίας σε σχέση με τη μέση τιμή των σφαιρωμάτων είναι ικανοποιητικά, το οποίο σημαίνει ότι δεν παρατηρούνται κλινικά σημαντικές διαφορές. Αυτό αποδεικνύεται και από το ποσοστό διαφωνίας των δυο σφαιρωμάτων το οποίο έχει τιμή 56%. Επίσης, από το διάστημα εμπιστοσύνης σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές (εμπεριέχεται το μηδέν στο διάστημα) μεταξύ των δυο σφαιρωμάτων. Αυτό σημαίνει ότι τα δυο μηχανήματα ως αναφορά τον υπολογισμό των σφαιρωμάτων δεν διαφέρουν συστηματικά.
- Από το γράφημα 7 φαίνεται ότι για τους υπερμέτρωπες (1^o ,4^o τεταρτημόριο) οι διαφορές είναι μοιρασμένες γύρω από το μηδέν, ενώ για τους μύωπες (2^o,3^o τεταρτημόριο) το μεγαλύτερο ποσοστό των διαφορών είναι στο 3^o τεταρτημόριο (αρνητική τιμή) με αποτέλεσμα να συμπεραίνεται ότι το Wasca υπερεκτιμά τους μύωπες σε σχέση με το Wave Analyzer.

2) Σύγκριση σφαιρώματος από το Wasca μηχάνημα με αυτό του iTrace για τον αριστερό οφθαλμό,1-3, (γράφημα 8)

Για την σύγκριση των σφαιρωμάτων μεταξύ των δύο μηχανημάτων εφαρμόστηκε η μέθοδος Bland –Altman και υπολογίστηκαν οι διαφορές του σφαιρώματος από το Wasca(1) με τις τιμές του σφαιρώματος από το iTrace(3).

- Αρχικά, παρατηρείται ότι τα όρια συμφωνίας κυμαίνονται από -2,442 έως 0,748. Έτσι, μπορεί να σημειωθεί ότι το εύρος των ορίων συμφωνίας σε σχέση με τη μέση τιμή των σφαιρωμάτων είναι μεγάλο, το οποίο σημαίνει ότι δεν παρατηρούνται κλινικά σημαντικές διαφορές. Αυτό αποδεικνύεται και από το ποσοστό διαφωνίας των δυο σφαιρωμάτων το οποίο έχει τιμή 108%.
- Από το γράφημα 8 φαίνεται ότι για τους υπερμέτρωπες (1^o ,4^o τεταρτημόριο) οι διαφορές έχουν αρνητική τιμή, το οποίο σημαίνει ότι το iTrace υπερεκτιμά τους υπερμέτρωπες σε σχέση με το Wasca. Αυτή η υπερεκτίμηση είναι συστηματική καθώς από το διάστημα εμπιστοσύνης σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο σφαιρωμάτων. Τέλος, για τους μύωπες οι διαφορές είναι αρνητικές το οποίο σημαίνει ότι το Wasca υπερεκτιμά τους μύωπες σε σχέση με το iTrace. Αυτή η υπερεκτίμηση είναι συστηματική

  καθώς από το διάστημα εμπιστοσύνης σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο σφαιρωμάτων.

3) Σύγκριση σφαιρώματος από το Wasca μηχάνημα με αυτό του cyclo refraction sphere για τον αριστερό οφθαλμό, 1-4, (γράφημα 9)

Για την σύγκριση των σφαιρωμάτων εφαρμόστηκε η μέθοδος Bland –Altman και υπολογίστηκαν οι διαφορές του σφαιρώματος από το Wasca(1) με τις τιμές του σφαιρώματος από το cyclo refraction sphere(4).

- Αρχικά, παρατηρείται ότι τα όρια συμφωνίας κυμαίνονται από -1,240 έως 0,676. Έτσι, μπορεί να σημειωθεί ότι τα όρια συμφωνίας σε σχέση με τη μέση τιμή των σφαιρωμάτων είναι ικανοποιητικά, το οποίο σημαίνει ότι δεν παρατηρούνται κλινικά σημαντικές διαφορές. Αυτό αποδεικνύεται και από το ποσοστό διαφωνίας των δυο σφαιρωμάτων το οποίο έχει τιμή 49%.
- Από το γράφημα 9 φαίνεται ότι για τους υπερμέτρωπες (1^o ,4^o τεταρτημόριο) οι διαφορές είναι μοιρασμένες γύρω από το μηδέν, ενώ για τους μύωπες (2^o,3^o τεταρτημόριο) το μεγαλύτερο ποσοστό των διαφορών είναι στο 3^o

τεταρτημόριο (αρνητική τιμή) με αποτέλεσμα να συμπεραίνεται ότι το Wasca υπερεκτιμά τους μύωπες σε σχέση με το cyclo refraction sphere. Αυτή η υπερεκτίμηση είναι συστηματική καθώς από το διάστημα εμπιστοσύνης σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο σφαιρωμάτων.

4) Σύγκριση σφαιρώματος από το Wave Analyzer μηχάνημα με αυτό του iTrace για τον αριστερό οφθαλμό,2-3, (γράφημα 10)

Για την σύγκριση των σφαιρωμάτων εφαρμόστηκαν η μέθοδος Bland –Altman και υπολογίστηκαν οι διαφορές του σφαιρώματος από το Wave Analyzer (2) με τις τιμές του σφαιρώματος από το iTrace(3).

- Αρχικά, παρατηρείται ότι τα όρια συμφωνίας κυμαίνονται από -1,856 έως 0,438. Έτσι, μπορεί να σημειωθεί ότι το εύρος των ορίων συμφωνίας σε σχέση με τη μέση τιμή των σφαιρωμάτων είναι μεγάλο, το οποίο σημαίνει ότι δεν παρατηρούνται κλινικά σημαντικές διαφορές. Αυτό αποδεικνύεται και από το ποσοστό διαφωνίας των δυο σφαιρωμάτων το οποίο έχει τιμή 84%.
- Από το γράφημα 10 φαίνεται ότι για τους υπερμέτρωπες (1^o ,4^o τεταρτημόριο) οι διαφορές έχουν αρνητική τιμή, το οποίο σημαίνει ότι το iTrace υπερεκτιμά τους υπερμέτρωπες σε σχέση με το Wave Analyzer. Αυτή η υπερεκτίμηση είναι συστηματική καθώς από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή των διαφορών σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο σφαιρωμάτων. Τέλος, για τους μύωπες οι διαφορές είναι αρνητικές το οποίο σημαίνει ότι το Wave Analyzer υπερεκτιμά τους μύωπες σε σχέση με το iTrace. Αυτή η υπερεκτίμηση είναι συστηματική καθώς από το διάστημα εμπιστοσύνης σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο σφαιρωμάτων.

5) Σύγκριση σφαιρώματος από το Wave Analyzer μηχάνημα με αυτό του cyclo refraction sphere για τον αριστερό οφθαλμό,2-4, (γράφημα 11)

Για την σύγκριση των σφαιρωμάτων εφαρμόστηκε η μέθοδος Bland –Altman και υπολογίστηκαν οι διαφορές του σφαιρώματος από το Allegretto(2) με τις τιμές του σφαιρώματος από το cyclo refraction sphere(4).

- Αρχικά, παρατηρείται ότι τα όρια συμφωνίας κυμαίνονται από -1,090 έως 0,800. Έτσι, μπορεί να σημειωθεί ότι τα όρια συμφωνίας σε σχέση με τη μέση τιμή των σφαιρωμάτων είναι ικανοποιητικά, το οποίο σημαίνει ότι δεν παρατηρούνται κλινικά σημαντικές διαφορές. Αυτό αποδεικνύεται και από το ποσοστό διαφωνίας των δυο σφαιρωμάτων το οποίο έχει τιμή 44%.
- Από το γράφημα 11 παρατηρείται ότι για τους υπερμέτρωπες (1^o ,4^o τεταρτημόριο) οι διαφορές είναι αρνητικές, το οποίο σημαίνει ότι το Wave Analyzer υπερεκτιμά τους υπερμέτρωπες σε σχέση με το cyclo sphere. Αυτή η υπερεκτίμηση είναι συστηματική καθώς από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή των διαφορών παρατηρείται ότι σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο σφαιρωμάτων. Για τους μύωπες (2^o,3^o τεταρτημόριο) φαίνεται ότι μέχρι -5,5 διοπτρίες το Wave Analyzer υπερεκτιμά τους μύωπες σε σχέση με το cyclo sphere. Αυτή η υπερεκτίμηση είναι συστηματική καθώς από το διάστημα εμπιστοσύνης σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο σφαιρωμάτων. Τέλος, για μυωπίες άνω των -5,5 διοπτριών η παραπάνω κατάσταση αντιστρέφεται.

6) Σύγκριση σφαιρώματος από το iTrace μηχάνημα με αυτό του cyclo refraction sphere για τον αριστερό οφθαλμό, 3-4, (γράφημα 12)

Για την σύγκριση των σφαιρωμάτων εφαρμόστηκε η μέθοδος Bland –Altman και υπολογίστηκαν οι διαφορές του σφαιρώματος από το iTrace(3) με τις τιμές του σφαιρώματος από το cyclo refraction sphere(4).

- Αρχικά, παρατηρείται ότι τα όρια συμφωνίας κυμαίνονται από -0,643 έως 1,771. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι το εύρος των ορίων συμφωνίας σε σχέση με τη μέση τιμή των σφαιρωμάτων είναι μεγάλο, το οποίο σημαίνει ότι δεν παρατηρούνται κλινικά σημαντικές διαφορές. Αυτό αποδεικνύεται και από το ποσοστό διαφωνίας των δυο σφαιρωμάτων το οποίο έχει τιμή 83%.
- Από το γράφημα 12 φαίνεται ότι για τους υπερμέτρωπες (1^o ,4^o τεταρτημόριο) οι διαφορές έχουν θετική τιμή, το οποίο σημαίνει ότι το iTrace υπερεκτιμά τους υπερμέτρωπες σε σχέση με το cyclo sphere. Αυτή η υπερεκτίμηση είναι συστηματική καθώς από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή των διαφορών παρατηρείται ότι σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο σφαιρωμάτων. Τέλος, για τους μύωπες, οι διαφορές είναι

θετικές το οποίο σημαίνει ότι το cyclo sphere υπερεκτιμά τους μύωπες σε σχέση με το iTrace. Αυτή η υπερεκτίμηση είναι συστηματική καθώς από το διάστημα εμπιστοσύνης σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο σφαιρωμάτων.

5.7) Συμπεράσματα για την σύγκριση σφαιρωμάτων

1) Η ταξινόμηση των συγκρίσεων για τον αριστερό οφθαλμό έχει ως εξής:

α) 2-4 με 44% διαφωνία

β) 1-4 με 49% διαφωνία

γ) 1-2 με 56% διαφωνία

δ) 3-4 με 83% διαφωνία

ε) 2-3 με 84% διαφωνία

ζ) 1-3 με 108% διαφωνία

2) Η ταξινόμηση των συγκρίσεων για τον δεξιό οφθαλμό έχει ως εξής:

α) 1-4 με 52% διαφωνία

β) 2-4 με 62% διαφωνία

γ) 1-2 με 63% διαφωνία

δ) 2-3 με 95% διαφωνία

ε) 3-4 με 101% διαφωνία

ζ) 1-3 με 105% διαφωνία

3) Παρατηρείται ότι υπάρχουν διαφορές ως προς την ταξινόμηση των συγκρίσεων μεταξύ δεξιού και αριστερού οφθαλμού. Οι διαφορές αυτές είναι μικρές.

4) Γενικά, καλύτερη συμφωνία παρουσιάζουν οι συγκρίσεις των σφαιρωμάτων 2-4 και 1-4, ακολουθεί η συμφωνία των 1-2 , έπειτα των 3-4 και 2-3 και τέλος αυτή των 1-3.

5) Το Wasca υπολογίζει το σφαίρωμα περισσότερο μυωπικά σε σχέση με το Wave Analyzer, το iTrace και την κυκλόπληγική διάθλαση με φορόπτερο.

6) Το iTrace υπολογίζει το σφαίρωμα περισσότερο υπερμετρωπικά σε σχέση με το Wave Analyzer, το iTrace και την κυκλόπληγική διάθλαση με φορόπτερο.

5.8)Πίνακες- Γραφήματα για την σύγκριση των τριών μηχανημάτων

Για τις γραφικές παραστάσεις εφαρμόστηκε η στατιστική μέθοδος των Bland-Altman. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν τα rms για τις εκτροπές δεύτερης τάξης, τρίτης τάξης, κάθετου κόμα, οριζόντιου κόμα, κόμα, τέταρτης τάξης, σφαιρικής εκτροπής, πέμπτης τάξης, έκτης τάξης, το rms για τις συνολικές εκτροπές και τέλος το rms για τις συνολικές εκτροπές υψηλής τάξης. Επίσης, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των rms και οι διαφορές των rms ανά δύο μηχανήματα , ορίστηκε η μέση τιμή των διαφορών, τα όρια συμφωνίας των διαφορών (στις γραφικές παραστάσεις), το διάστημα εμπιστοσύνης και τέλος το ποσοστό διαφωνίας το οποίο ισούται με το μέγιστο απόλυτο όριο συμφωνίας προς την μέση τιμή του average rms.
Οι διαφορές που υπολογίσαμε είναι οι:
1) Τιμές των rms για τις εκτροπές από το μηχάνημα Wasca μείον τις τιμές των rms για τις εκτροπές από το μηχάνημα Wave Analyzer.
2) Τιμές των rms για τις εκτροπές από το μηχάνημα Wave Analyzer μείον τις τιμές των rms για τις εκτροπές από το μηχάνημα iTrace.
3) Τιμές των rms για τις εκτροπές από το μηχάνημα Wasca μείον τις τιμές των rms για τις εκτροπές από το μηχάνημα iTrace.
Έτσι, ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν οι παρακάτω πίνακες και γραφήματα:

1-2 OD	Μέση τιμή διαφορών	Κάτω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Άνω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Κάτω όριο συμφωνίας	Άνω όριο συμφωνίας
2nd order rms	0,452	0,267	0,637	-0,977	1,881
3rd order rms	0,079	0,038	0,120	-0,240	0,398
Z(3,-1) rms	0,094	0,044	0,144	-0,292	0,480
Z(3,1) rms	0,013	-0,011	0,037	-0,175	0,201
Coma rms	0,088	0,039	0,137	-0,290	0,466
4rd order rms	0,062	0,033	0,091	-0,159	0,283
Z(4,0) rms	0,051	0,025	0,077	-0,151	0,253
5rd order rms	0,010	-0,003	0,023	-0,092	0,112
6rd order rms	-0,002	-0,010	0,006	-0,063	0,059
Total rms	0,464	0,281	0,647	-0,949	1,877
Total high order rms	0,100	0,056	0,144	-0,241	0,441

Πίνακας 12: Μέση τιμή διαφορών, διαστήματα εμπιστοσύνης και όρια συμφωνίας για την σύγκριση του Wasca (1) με το Allegretto (2), 1-2, για τον δεξί οφθαλμό.

1-2 OS	Μέση τιμή διαφορών	Κάτω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Άνω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Κάτω όριο συμφωνίας	Άνω όριο συμφωνίας
2nd order rms	0,388	0,145	0,631	-1,488	2,264
3rd order rms	0,067	0,007	0,127	-0,398	0,532
Z(3,-1) rms	0,080	0,031	0,129	-0,300	0,460
Z(3,1) rms	0,001	-0,016	0,036	-0,192	0,212
Coma rms	0,074	0,024	0,124	-0,314	0,462
4rd order rms	0,047	0,016	0,078	-0,190	0,284
Z(4,0) rms	0,050	0,027	0,073	-0,128	0,228
5rd order rms	0,005	-0,010	0,020	-0,115	0,125
6rd order rms	-0,008	-0,020	0,004	-0,098	0,082
Total rms	0,404	0,160	0,648	-1,476	2,284
Total high order rms	0,082	0,017	0,147	-0,416	0,580

Πίνακας 13: : Μέση τιμή διαφορών, διαστήματα εμπιστοσύνης και όρια συμφωνίας για την σύγκριση του Wasca (1) με το Allegretto (2), 1-2, για τον αριστερό οφθαλμό.

2-3 OD	Μέση τιμή διαφορών	Κάτω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Άνω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Κάτω όριο συμφωνίας	Άνω όριο συμφωνίας
2nd order rms	0,164	-0,027	0,355	-1,308	1,636
3rd order rms	-0,070	-0,112	-0,028	-0,393	0,253
Z(3,-1) rms	-0,040	-0,070	-0,010	-0,269	0,189
Z(3,1) rms	-0,027	-0,063	0,009	-0,305	0,251
Coma rms	-0,059	-0,096	-0,022	-0,343	0,225
4rd order rms	-0,086	-0,113	-0,059	-0,296	0,124
Z(4,0) rms	-0,063	-0,085	-0,041	-0,232	0,106
5rd order rms	-0,010	-0,020	0,000	-0,088	0,008
6rd order rms	0,003	-0,006	0,012	-0,066	0,072
Total rms	0,150	-0,040	0,340	-1,314	1,614
Total high order rms	-0,105	-0,151	-0,059	-0,458	0,248

Πίνακας 14: Μέση τιμή διαφορών, διαστήματα εμπιστοσύνης και όρια συμφωνίας για την σύγκριση του Allegretto (2) με το iTrace (3), 2-3, για τον δεξί οφθαλμό.

2-3 OS	Μέση τιμή διαφορών	Κάτω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Άνω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Κάτω όριο συμφωνίας	Άνω όριο συμφωνίας
2nd order rms	0,132	-0,070	0,334	-1,426	1,690
3rd order rms	-0,061	-0,112	-0,010	-0,455	0,333
Z(3,-1) rms	-0,031	-0,064	0,002	-0,286	0,224
Z(3,1) rms	-0,035	-0,062	-0,008	-0,245	-0,175
Coma rms	-0,053	-0,089	-0,017	-0,327	0,221
4rd order rms	-0,064	-0,094	-0,034	-0,293	0,165
Z(4,0) rms	-0,055	-0,075	-0,035	-0,293	0,165
5rd order rms	-0,007	-0,022	0,008	-0,125	0,111
6rd order rms	0,011	-0,001	0,023	-0,079	0,101
Total rms	0,128	-0,074	0,330	-1,434	1,690
Total high order rms	-0,087	-0,143	-0,031	-0,520	0,346

Πίνακας 15: Μέση τιμή διαφορών, διαστήματα εμπιστοσύνης και όρια συμφωνίας για την σύγκριση του Allegretto (2) με το iTrace (3), 2-3, για τον αριστερό οφθαλμό.

1-3 OD	Μέση τιμή διαφορών	Κάτω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Άνω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Κάτω όριο συμφωνίας	Άνω όριο συμφωνίας
2nd order rms	0,615	0,356	0,874	-1,384	2,614
3rd order rms	0,052	0,005	0,099	-0,313	0,417
Z(3,-1) rms	0,055	-0,002	0,112	-0,386	0,496
Z(3,1) rms	-0,014	-0,047	0,019	-0,271	0,243
Coma rms	0,029	-0,030	0,088	-0,426	0,484
4rd order rms	-0,024	-0,055	0,007	-0,263	0,215
Z(4,0) rms	-0,013	-0,036	0,010	-0,189	0,163
5rd order rms	0,000	-0,014	0,014	-0,106	0,106
6rd order rms	0,001	-0,008	0,010	-0,068	0,070
Total rms	0,601	0,330	0,872	-1,488	2,690
Total high order rms	-0,014	-0,100	0,072	-0,678	0,650

Πίνακας 16: Μέση τιμή διαφορών, διαστήματα εμπιστοσύνης και όρια συμφωνίας για την σύγκριση του Wasca (1) με το iTrace (3), 1-3, για τον δεξί οφθαλμό.

1-3 OS	Μέση τιμή διαφορών	Κάτω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Άνω όριο (διάστημα εμπιστοσύνης)	Κάτω όριο συμφωνίας	Άνω όριο συμφωνίας
2nd order rms	0,520	0,223	0,817	-1,775	2,815
3rd order rms	0,006	-0,043	0,055	-0,372	0,384
Z(3,-1) rms	0,049	-0,002	0,100	-0,343	0,441
Z(3,1) rms	-0,024	-0,049	0,001	-0,218	0,170
Coma rms	0,020	-0,031	0,071	-0,370	0,410
4rd order rms	-0,017	-0,047	0,013	-0,248	0,214
Z(4,0) rms	-0,005	-0,029	0,019	-0,187	0,177
5rd order rms	-0,003	-0,018	0,012	-0,119	0,113
6rd order rms	0,004	-0,005	0,013	-0,067	0,075
Total rms	0,510	0,192	0,828	-1,948	2,968
Total high order rms	0,010	-0,074	0,094	-0,637	0,657

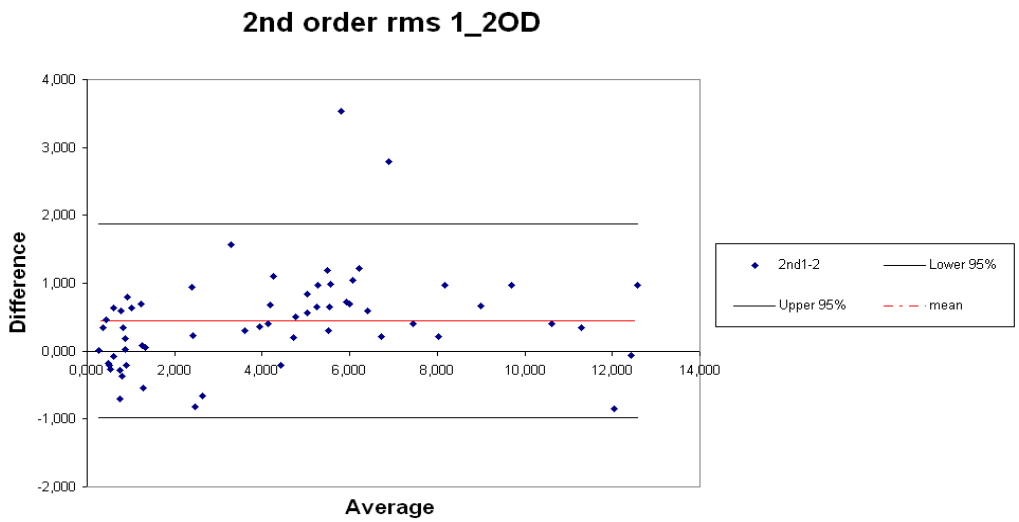
Πίνακας 17: Μέση τιμή διαφορών, διαστήματα εμπιστοσύνης και όρια συμφωνίας για την σύγκριση του Wasca (1) με το iTrace (3), 1-3, για τον αριστερό οφθαλμό.

	μ.τ για το Average Rms (τ.α) 1-2 OD	μ.τ για το Average Rms (τ.α) 2-3 OD	μ.τ για το Average Rms (τ.α) 1-3 OD	μ.τ για το Average Rms (τ.α) 1-2 OS	μ.τ για το Average Rms (τ.α) 2-3 OS	μ.τ για το Average Rms (τ.α) 1-3 OS
2nd order rms	4,343 (3,485)	4,036 (3,166)	4,262 (3,250)	4,359 (4,370)	4,099 (3,110)	4,293 (3,253)
3rd order rms	0,283 (0,143)	0,279 (0,135)	0,318 (0,137)	0,291 (0,137)	0,288 (0,130)	0,321 (0,135)
Z(3,-1) rms	0,164 (0,117)	0,137 (0,122)	0,184 (0,122)	0,173 (0,124)	0,148 (0,115)	0,189 (0,139)
Z(3,1) rms	0,097 (0,057)	0,104 (0,078)	0,111 (0,086)	0,093 (0,058)	0,105 (0,067)	0,110 (0,066)
Coma rms	0,209 (0,111)	0,195 (0,124)	0,238 (0,124)	0,211 (0,123)	0,201 (0,111)	0,238 (0,134)
4rd order rms	0,150 (0,067)	0,162 (0,072)	0,193 (0,091)	0,151 (0,069)	0,159 (0,071)	0,183 (0,077)
Z(4,0) rms	0,101 (0,067)	0,108 (0,065)	0,133 (0,088)	0,097 (0,065)	0,100 (0,061)	0,125 (0,080)
5rd order rms	0,073 (0,030)	0,073 (0,034)	0,078 (0,031)	0,077 (0,028)	0,078 (0,035)	0,081 (0,034)
6rd order rms	0,051 (0,018)	0,051 (0,023)	0,050 (0,019)	0,056 (0,020)	0,054 (0,023)	0,050 (0,018)
Total rms	4,378 (3,463)	4,071 (3,144)	4,303 (3,226)	4,399 (3,442)	4,133 (3,090)	4,335 (3,227)
Total high order rms	0,344 (0,147)	0,346 (0,139)	0,397 (0,151)	0,350 (0,145)	0,353 (0,138)	0,394 (0,139)

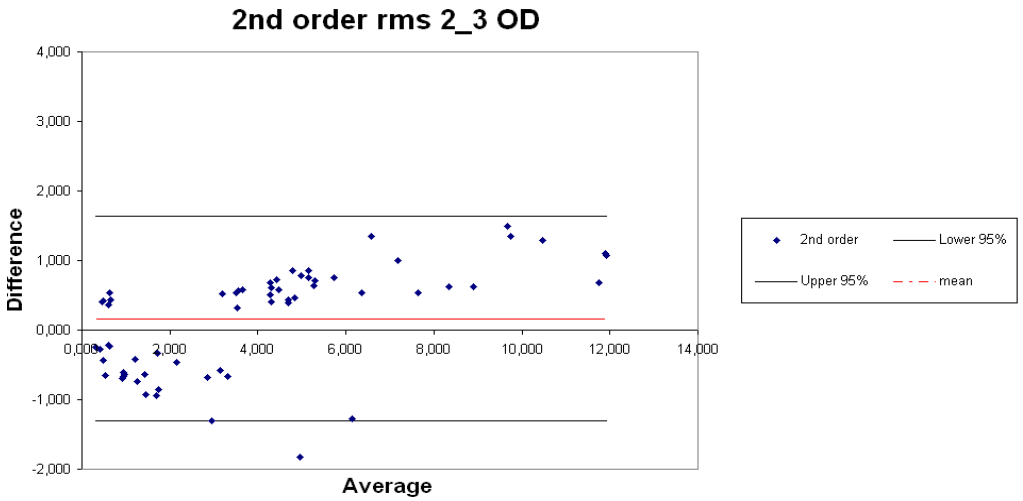
Πίνακας 18: Μέση τιμή του average rms και τυπική απόκλιση και για τα τρία μηχανήματα για τον αριστερό οφθαλμό.

Ποσοστό Διαφωνίας	1-2 OD	2-3 OD	1-3 OD	1-2 OS	2-3 OS	1-3 OS
2nd order rms	43,3%	40,5%	61,3%	52%	41,2%	66%
3rd order rms	141%	141%	131%	183%	158%	119%
Z(3,-1) rms	293%	196%	269%	263%	193%	233%
Z(3,1) rms	207%	293%	244%	228%	233%	198%
Coma rms	223%	176%	203%	220%	163%	172%
4rd order rms	189%	183%	134%	220%	163%	172%
Z(4,0) rms	251%	251%	142%	235%	212%	150%
5rd order rms	150%	121%	136%	162%	160%	147%
6rd order rms	124%	142%	140%	175%	187%	150%
Total rms	43%	40%	62,5%	52%	41%	68%
Total high order rms	128%	132%	170%	166%	195%	168%

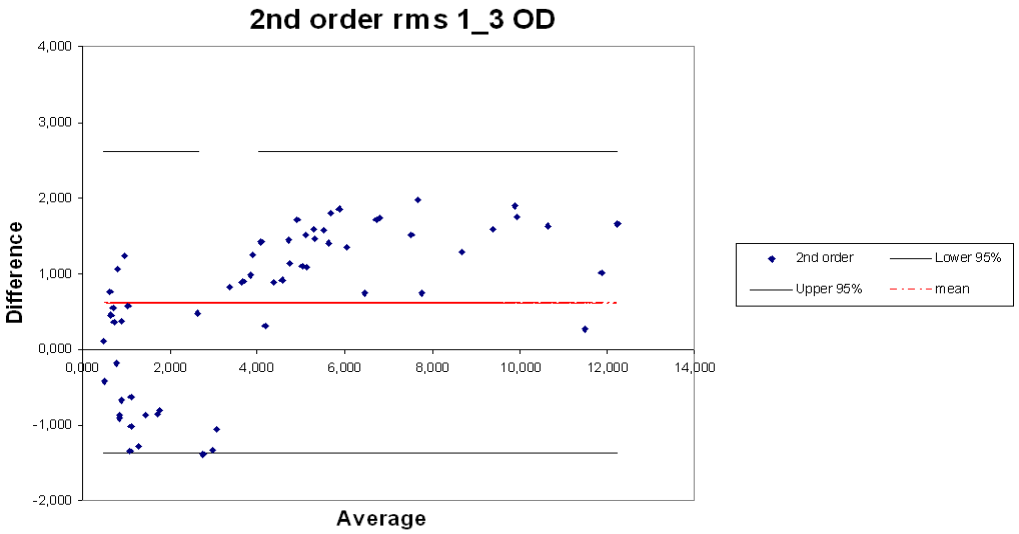
Πίνακας 19: Τιμές για το ποσοστό διαφωνίας για τις εκτροπές χαμηλής και υψηλής τάξης μεταξύ των τριών μηχανημάτων.



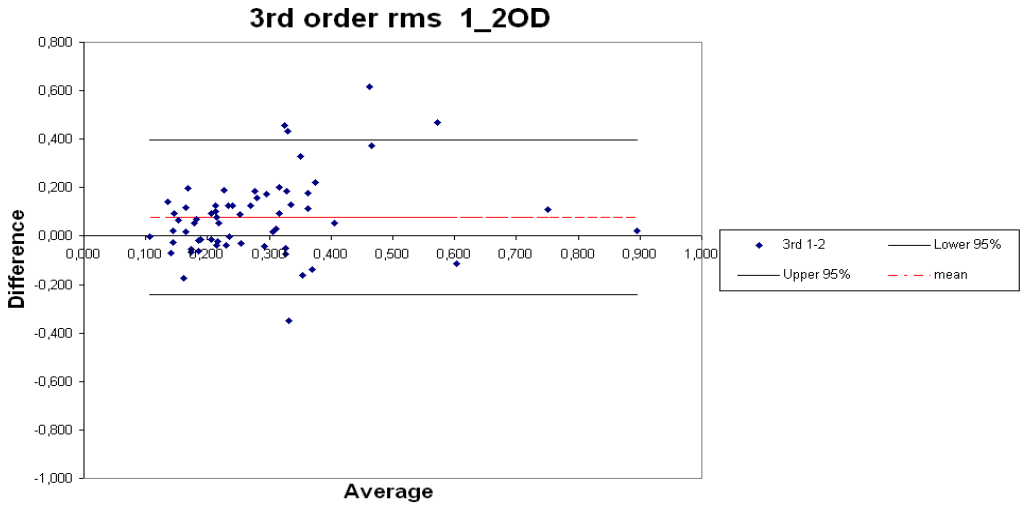
Γράφημα 13: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



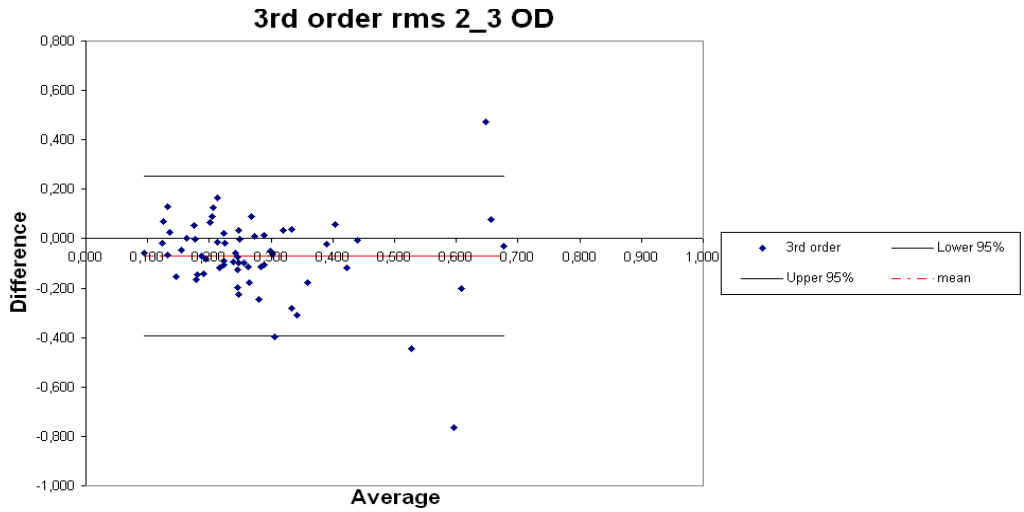
Γράφημα 14: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



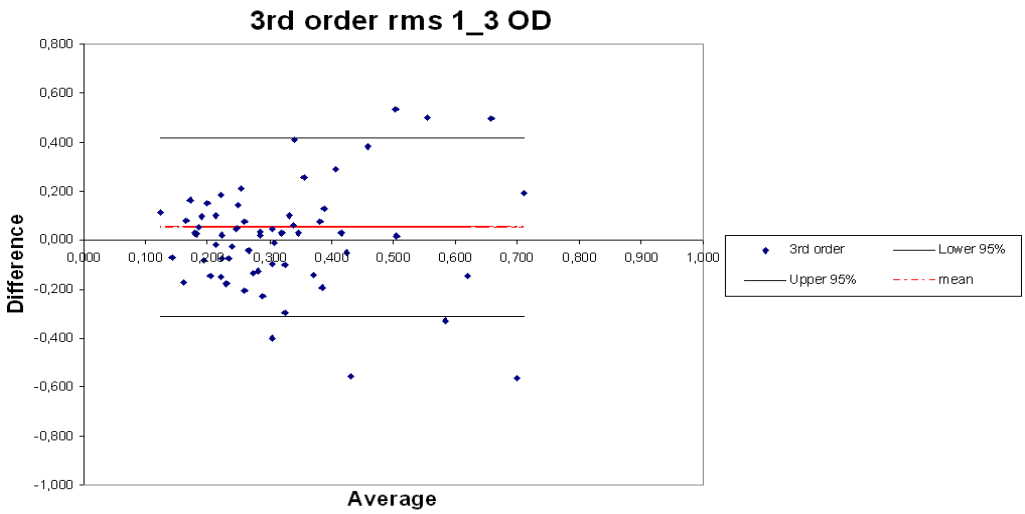
Γράφημα 15: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3).



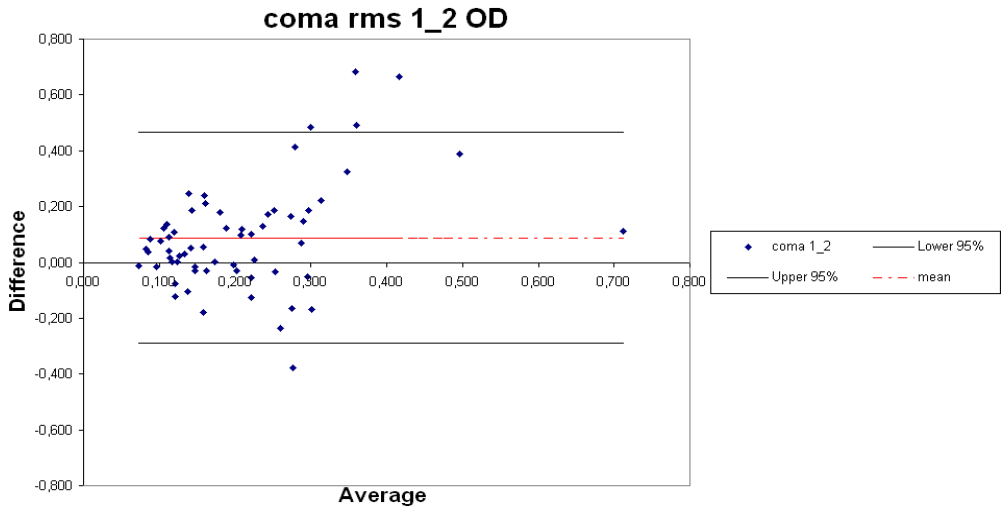
Γράφημα 16: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



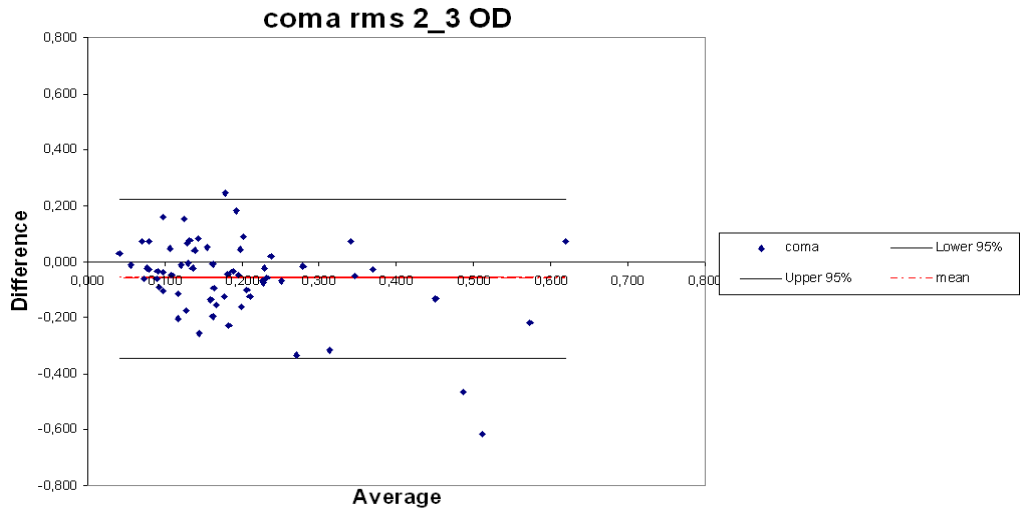
Γράφημα 17:Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



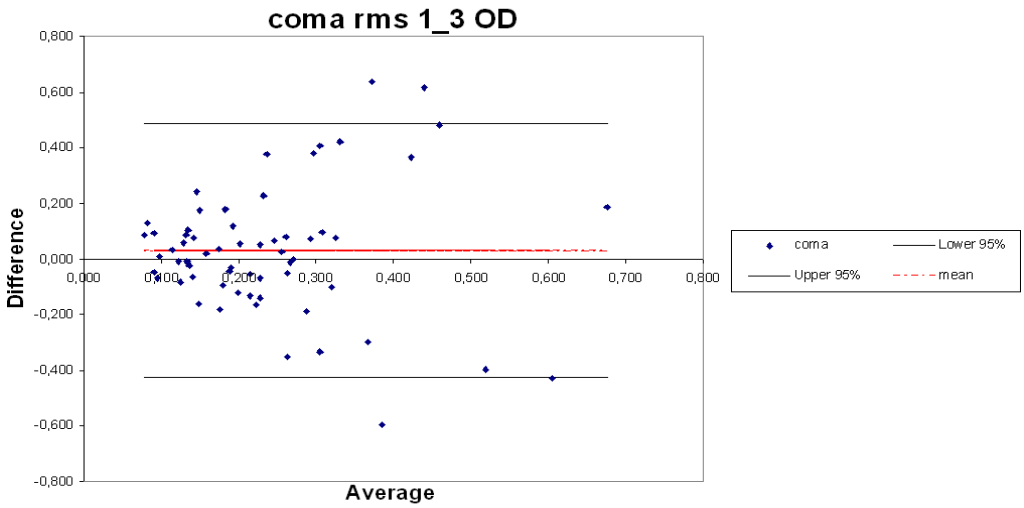
Γράφημα 18 : Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3).



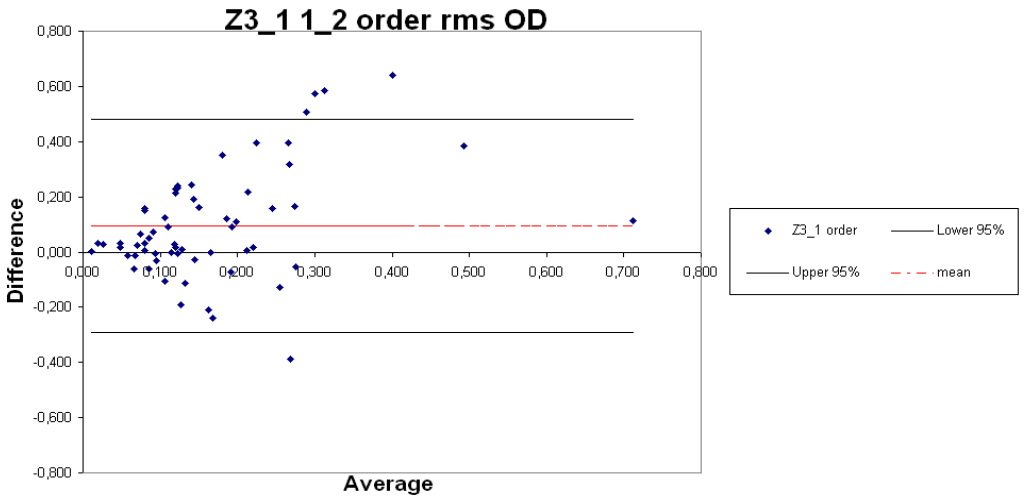
Γράφημα 19: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



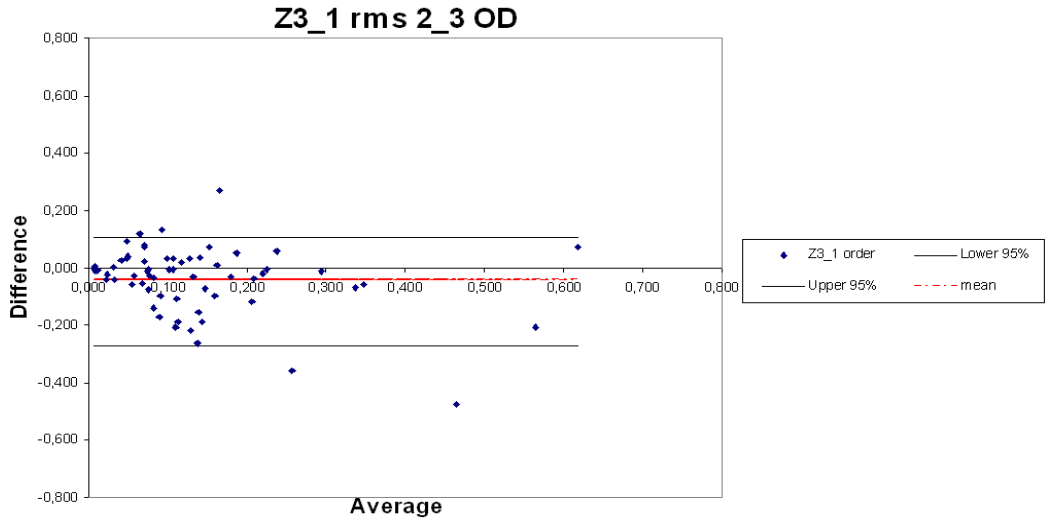
Γράφημα 20: Γράφημα 23:Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



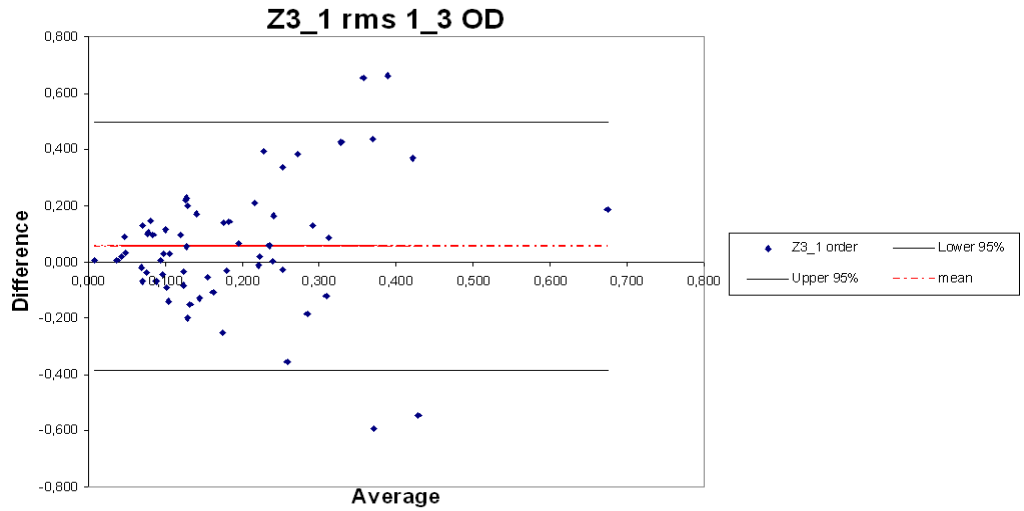
Γράφημα 21: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3).



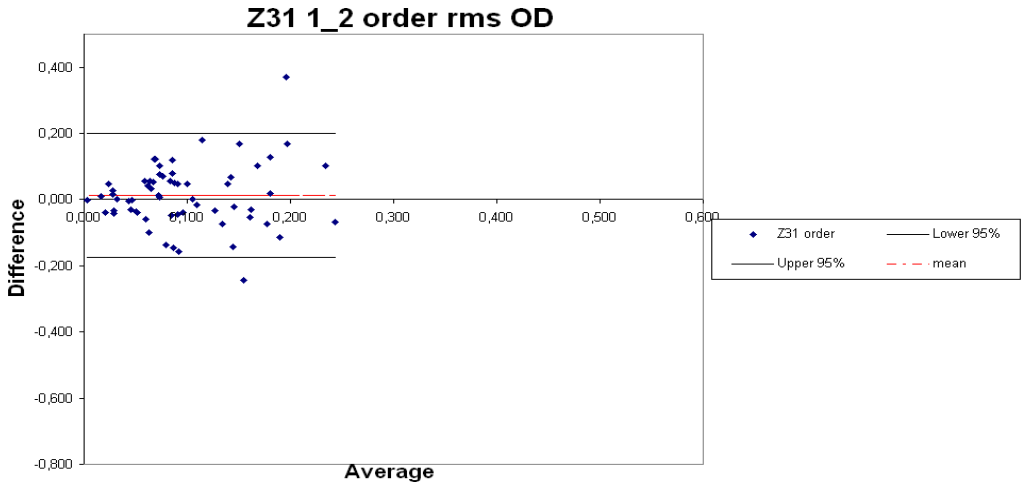
Γράφημα 22: Γράφημα 25: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



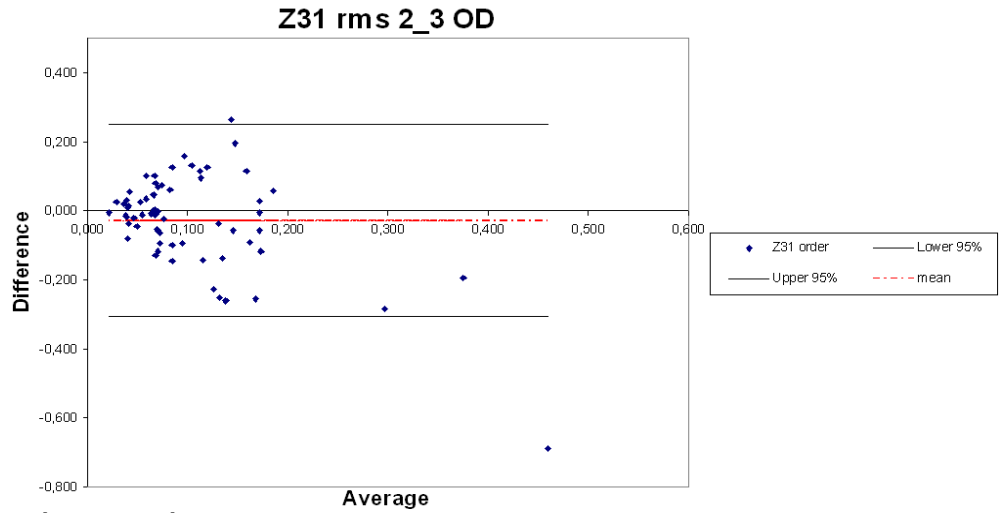
Γράφημα 23: Γράφημα 23:Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



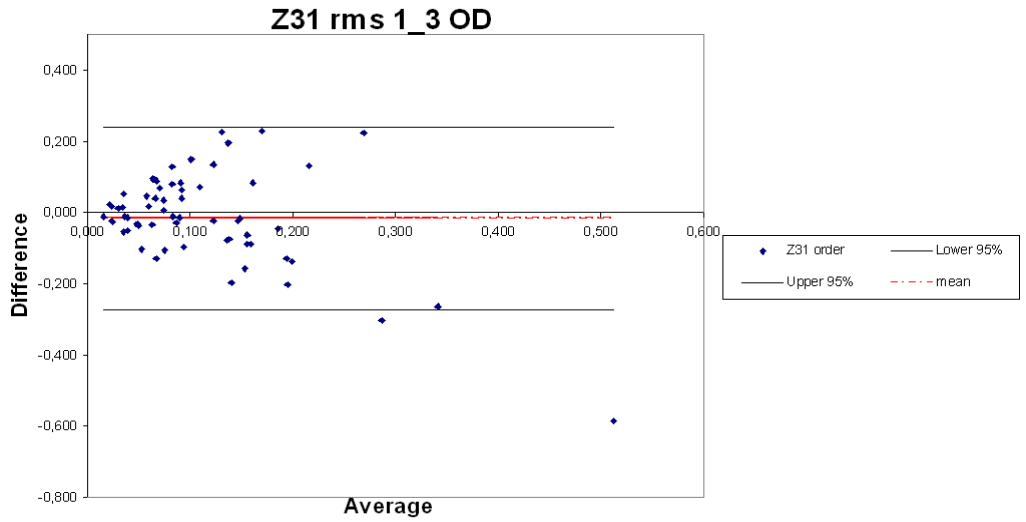
Γράφημα 24: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3).



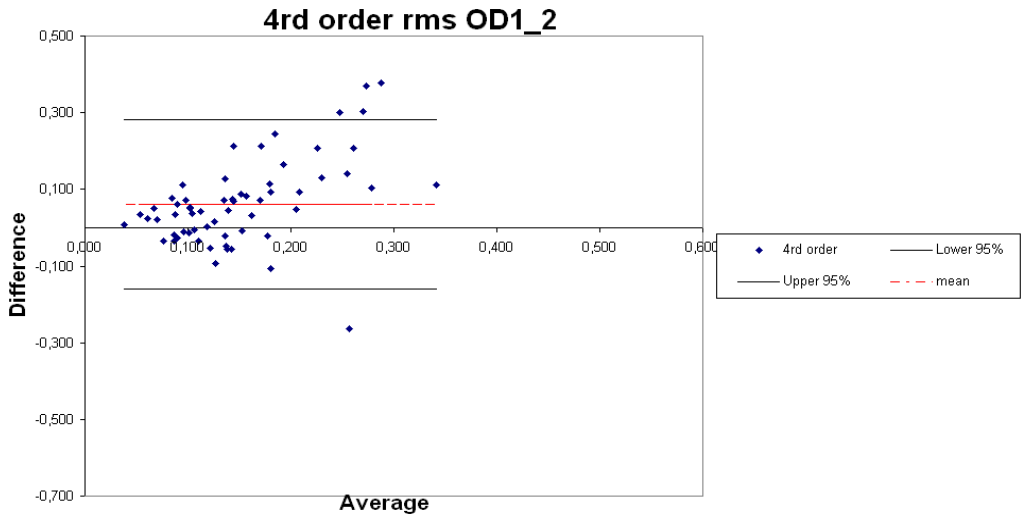
Γράφημα 25: Γράφημα 25: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



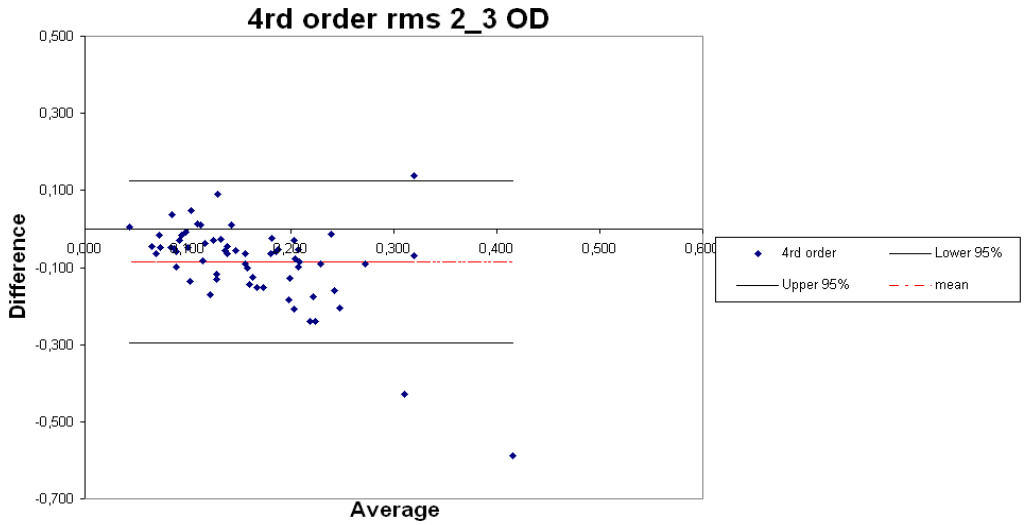
Γράφημα 26:Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



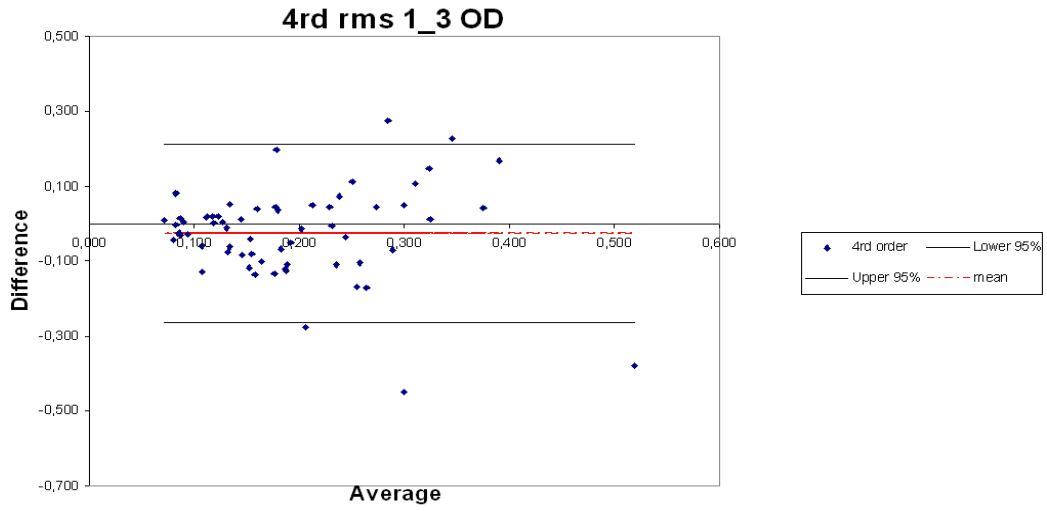
Γράφημα 27: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3).



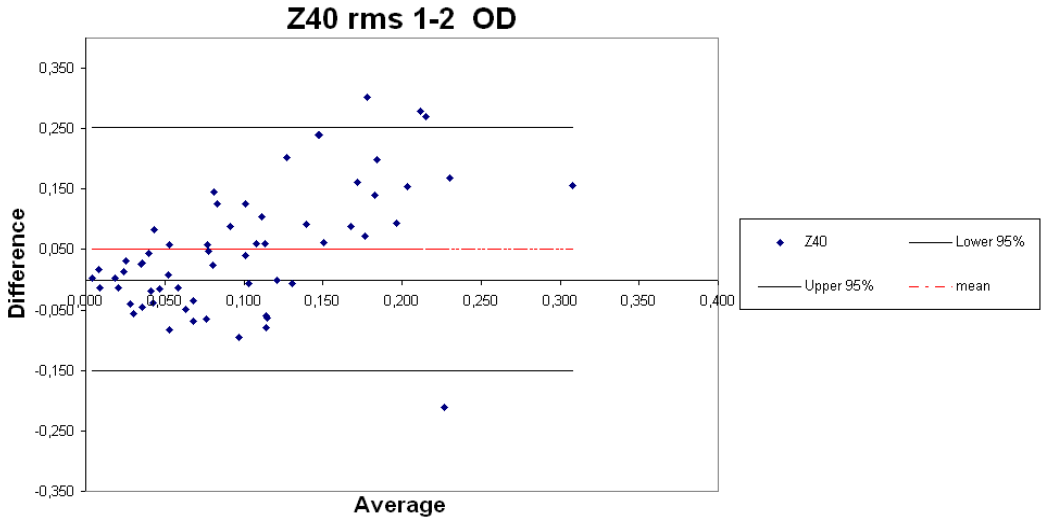
Γράφημα 28: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



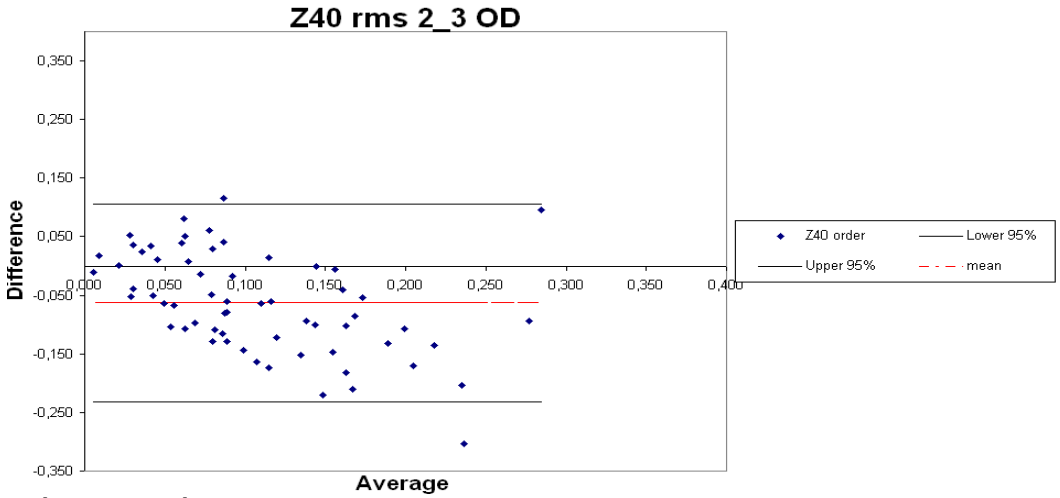
Γράφημα 29: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



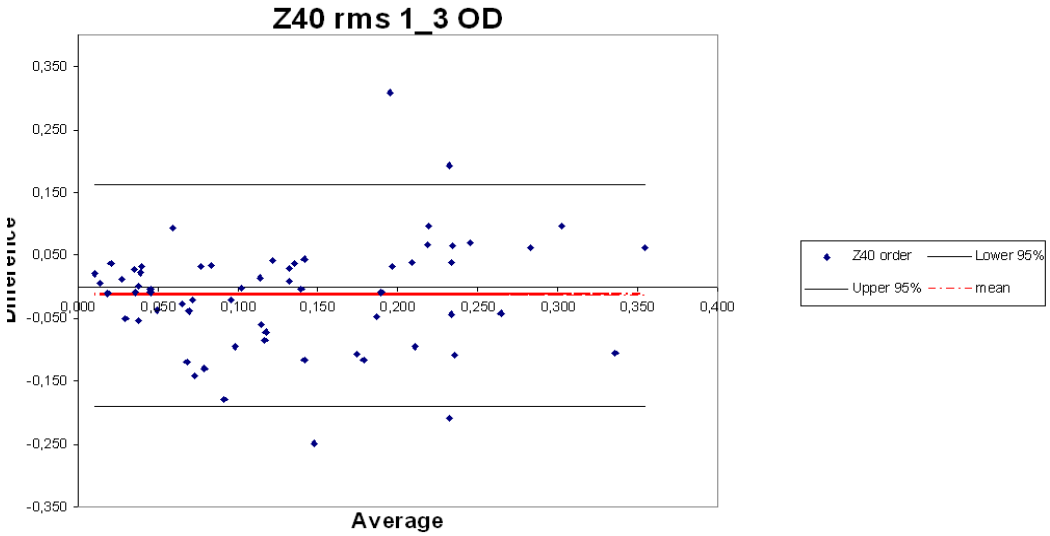
Γράφημα 30: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3).



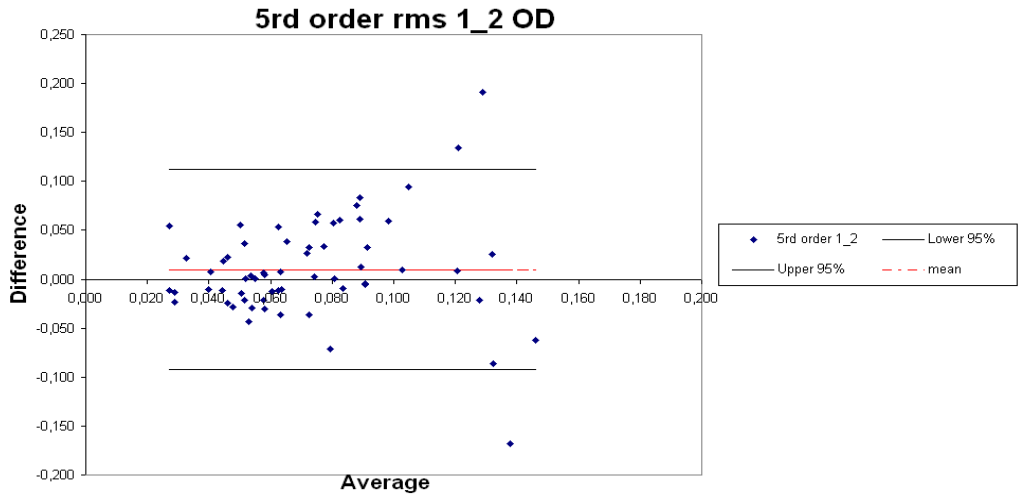
Γράφημα 31: : Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



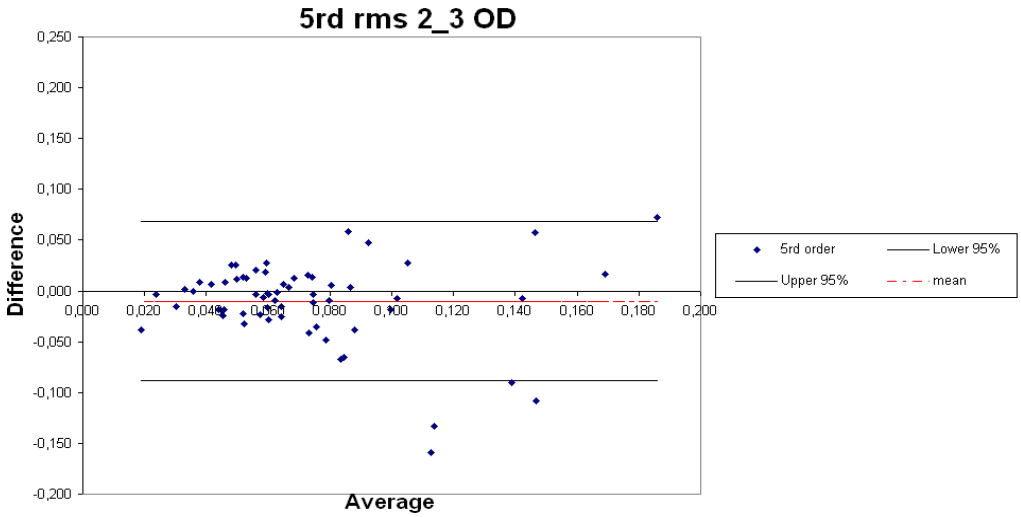
Γράφημα 32: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



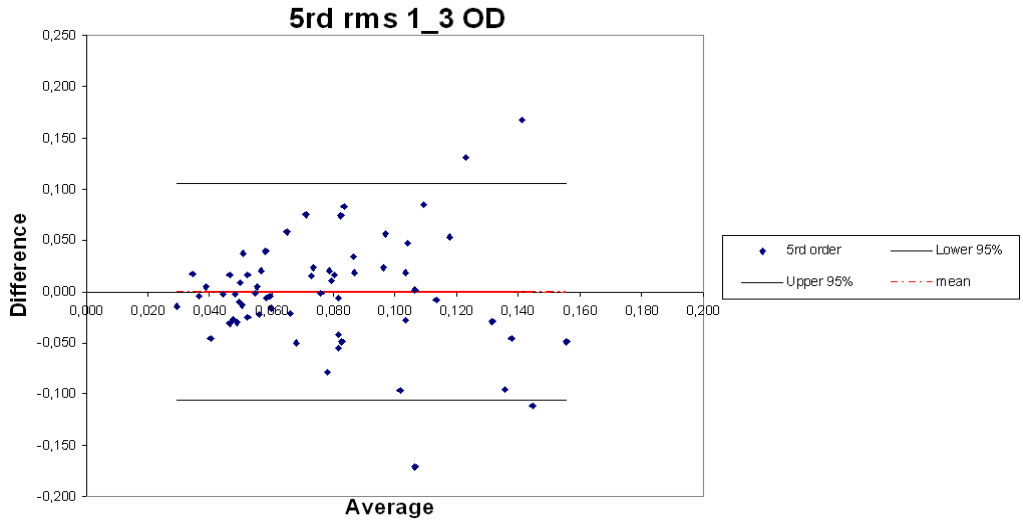
Γράφημα 33: : Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3).



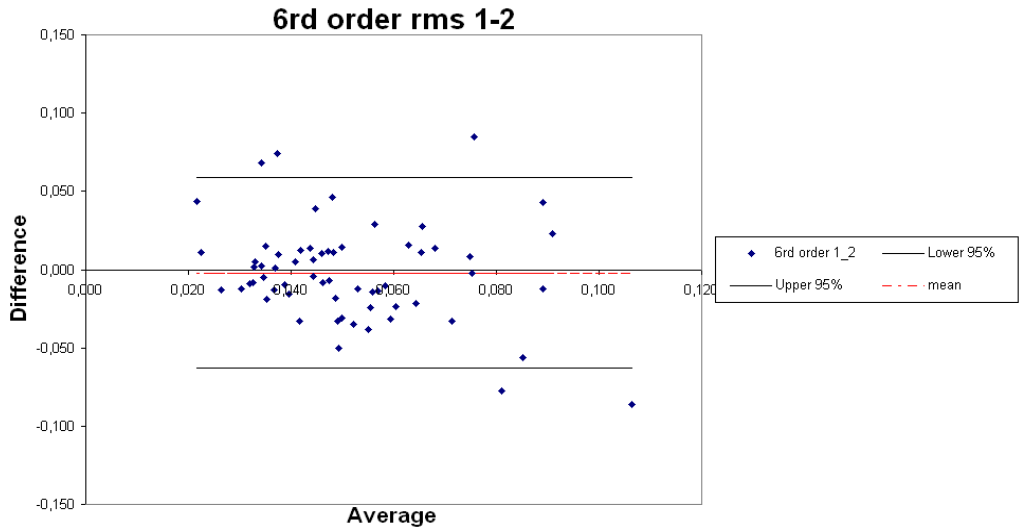
Γράφημα 34 : Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



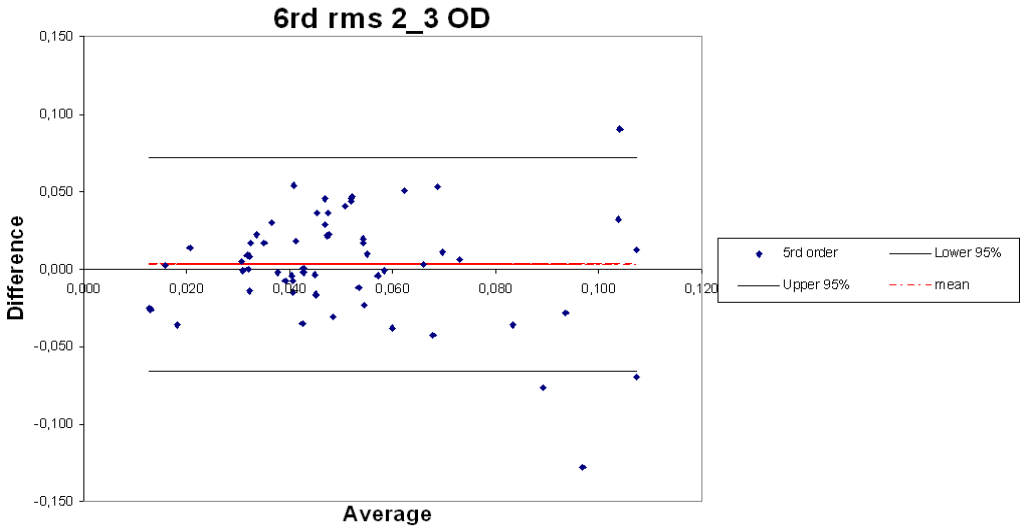
Γράφημα 35: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



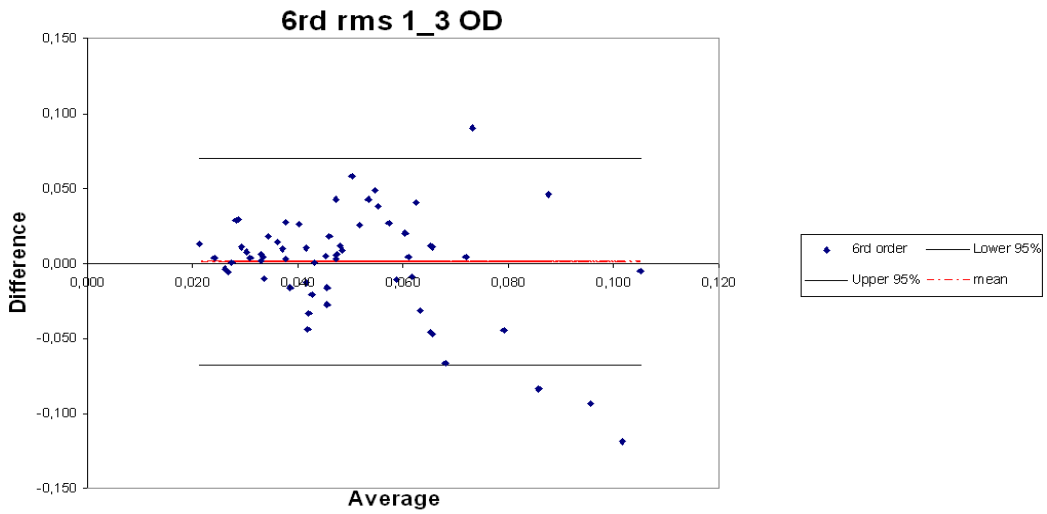
Γράφημα 36: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3).



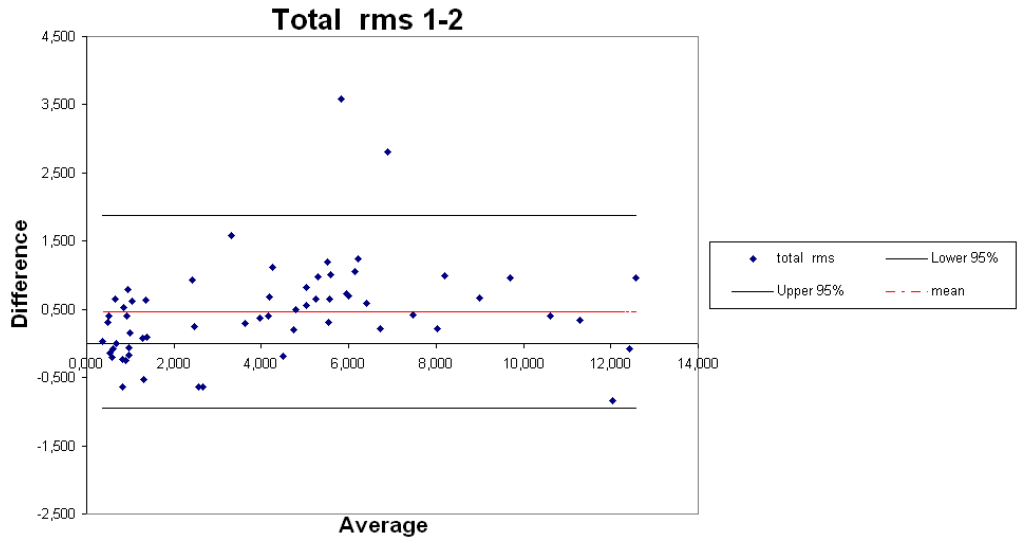
Γράφημα 37: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



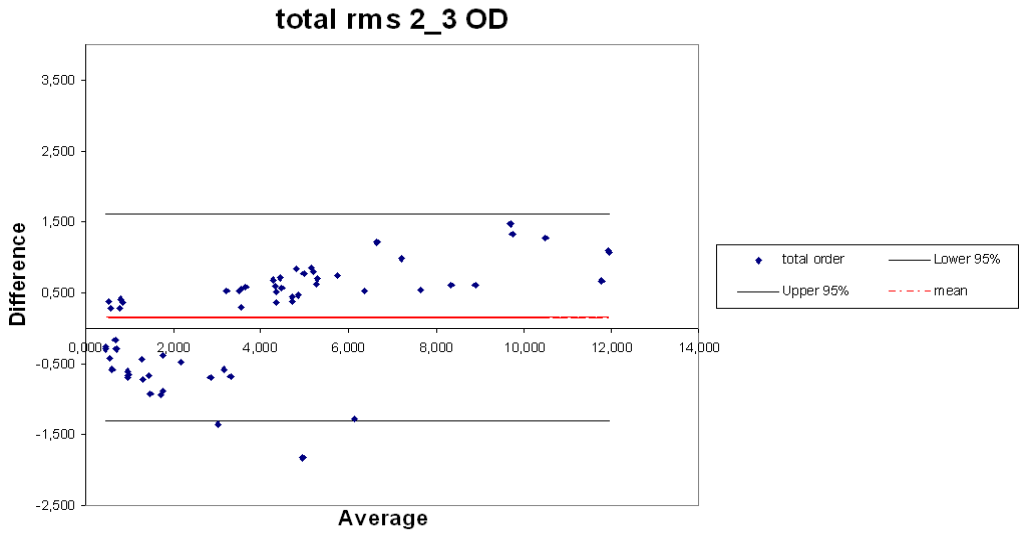
Γράφημα 38: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



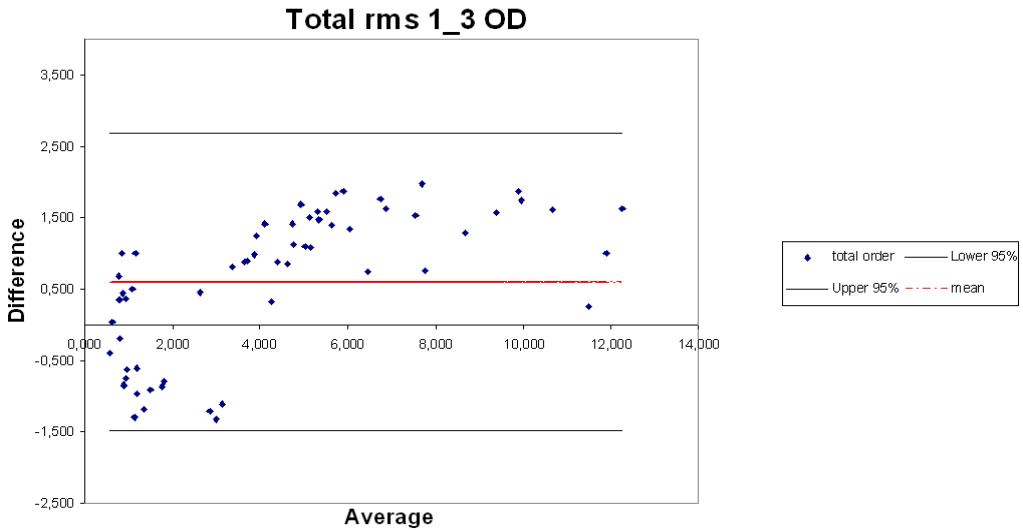
Γράφημα 39: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3).



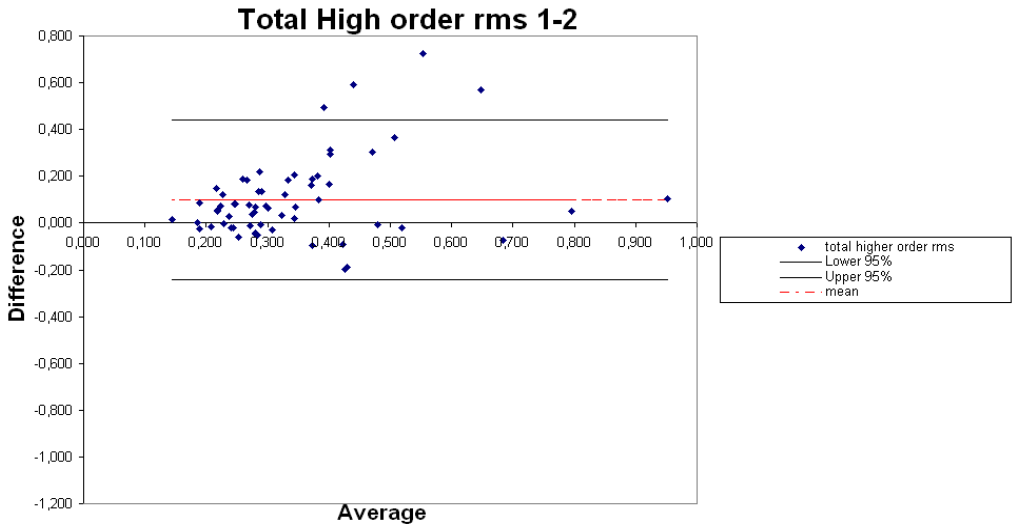
Γράφημα 40: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



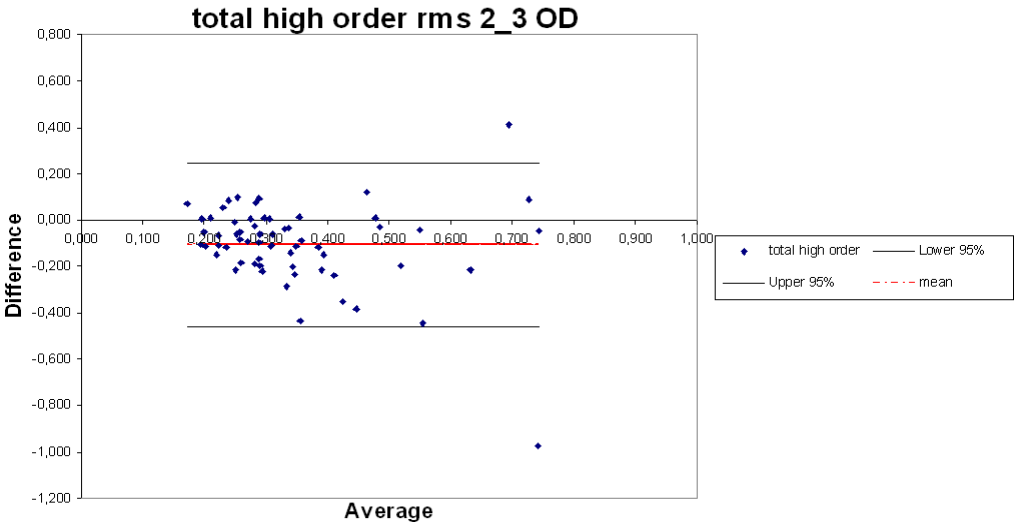
Γράφημα 41: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



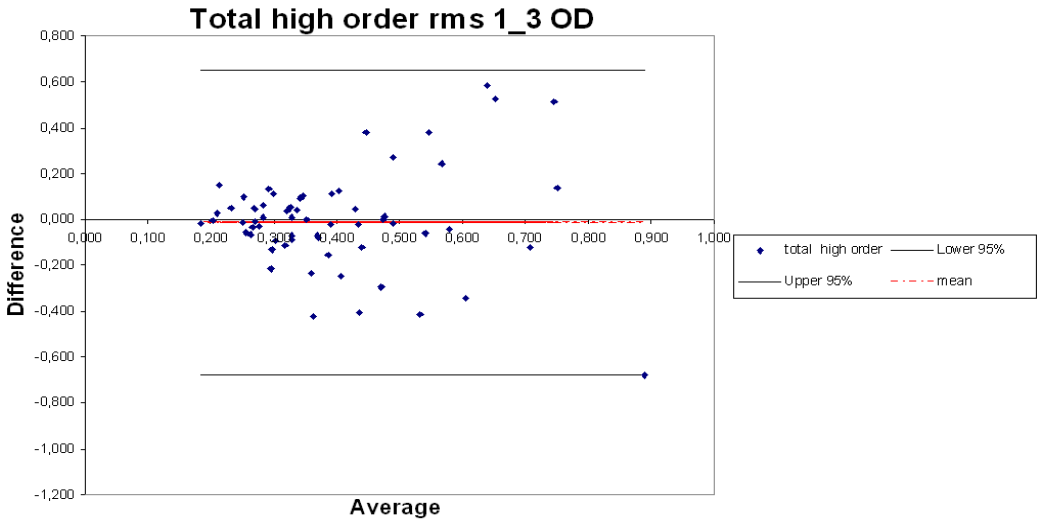
Γράφημα 42: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



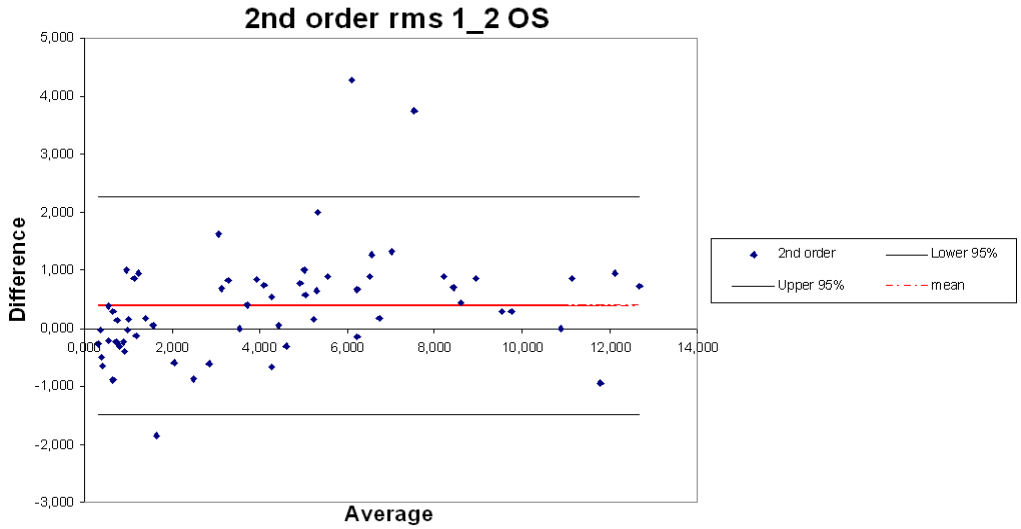
Γράφημα 43: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



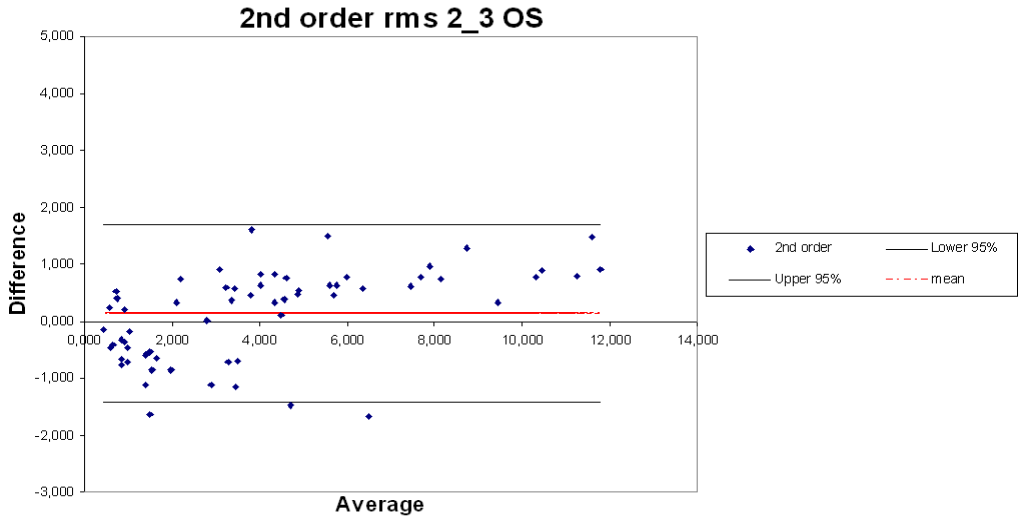
Γράφημα 44: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



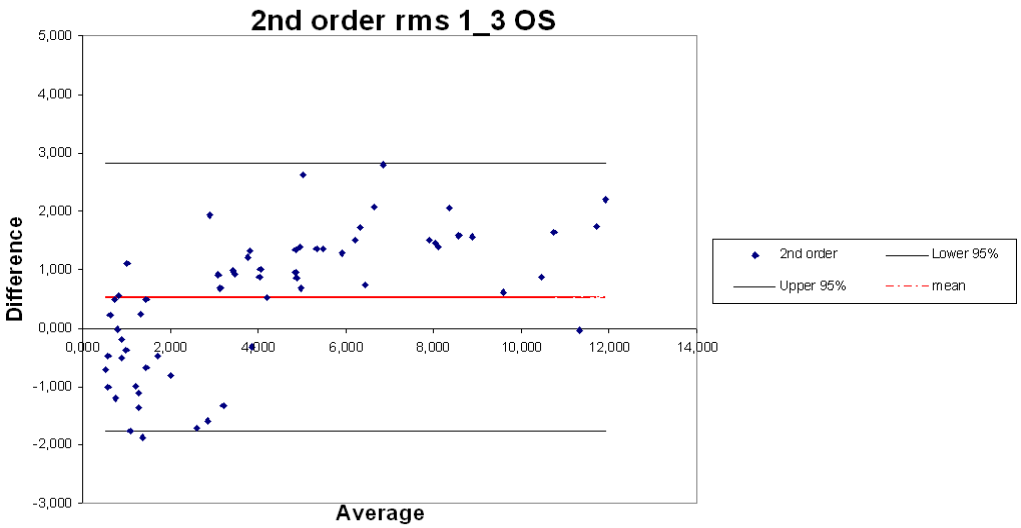
Γράφημα 45: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



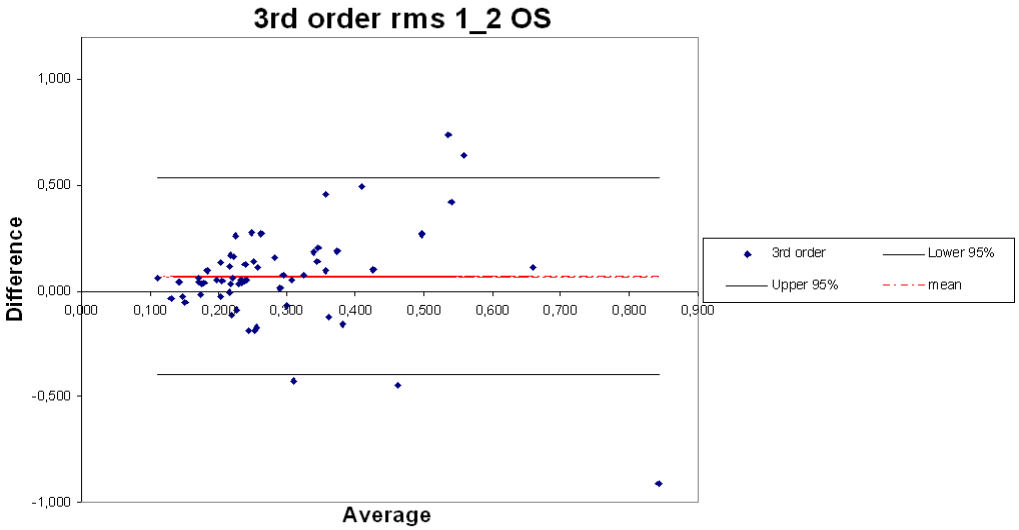
Γράφημα 46: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



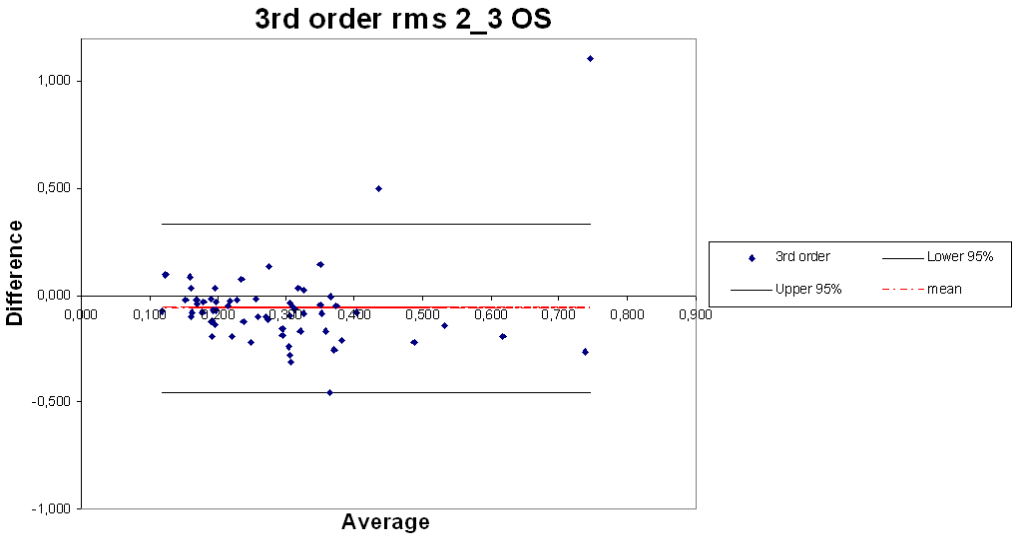
Γράφημα 47: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



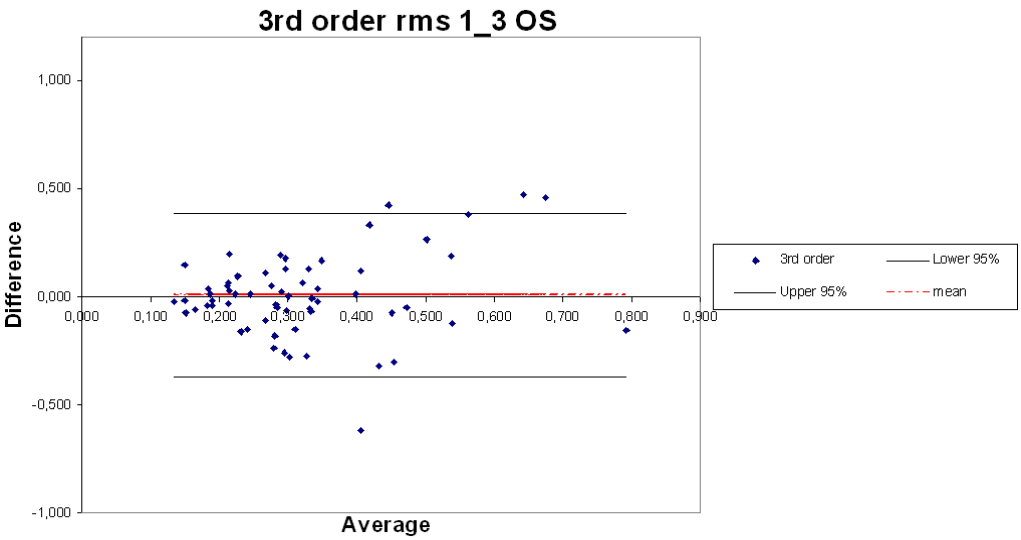
Γράφημα 48: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



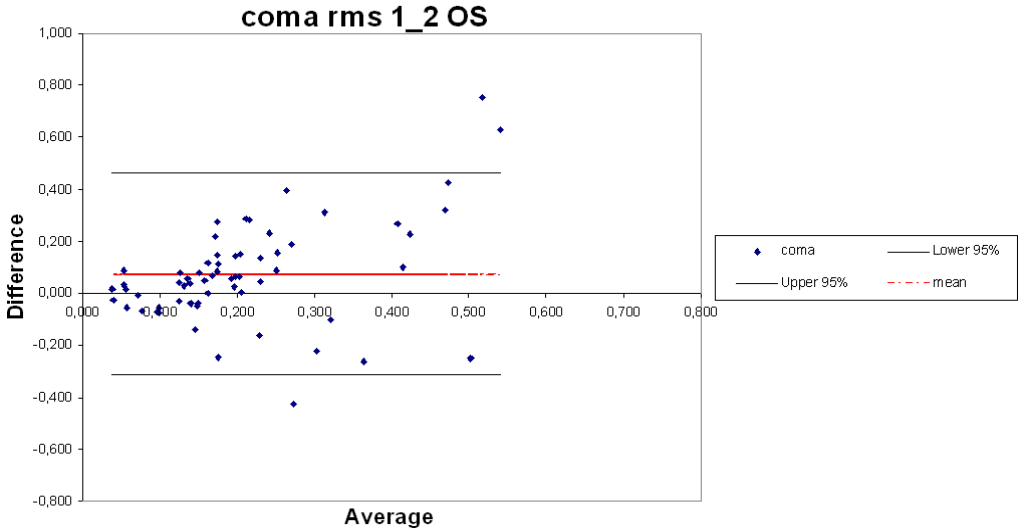
Γράφημα 49: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



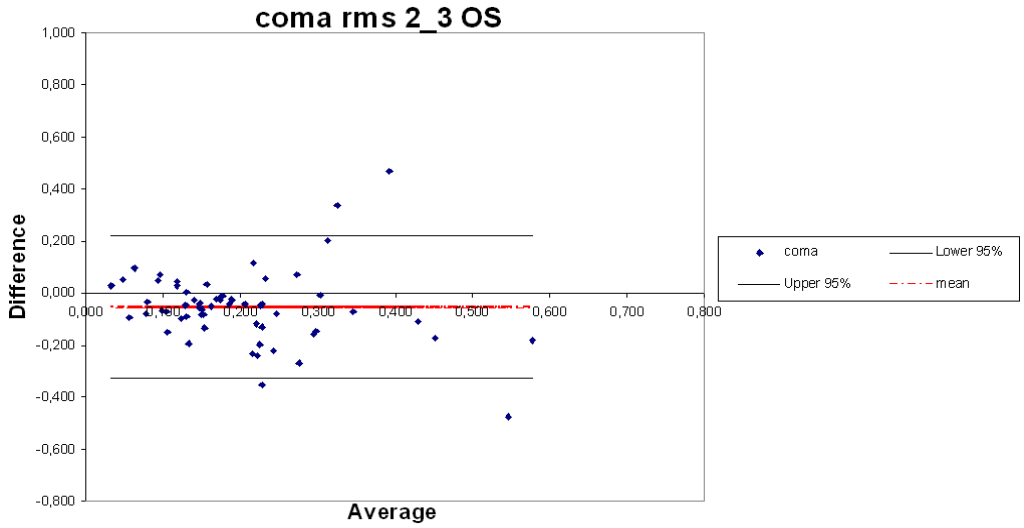
Γράφημα 50: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



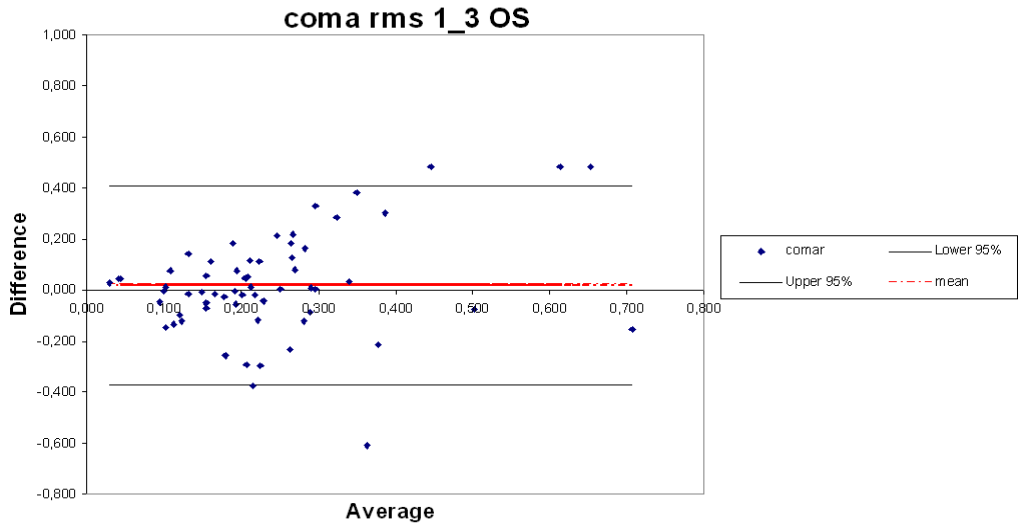
Γράφημα 51: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



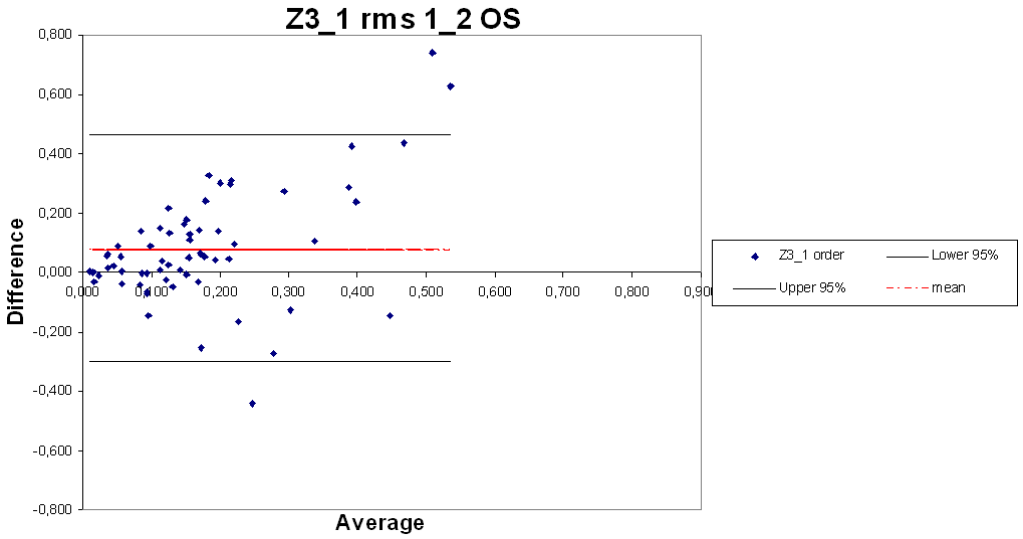
Γράφημα 52: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



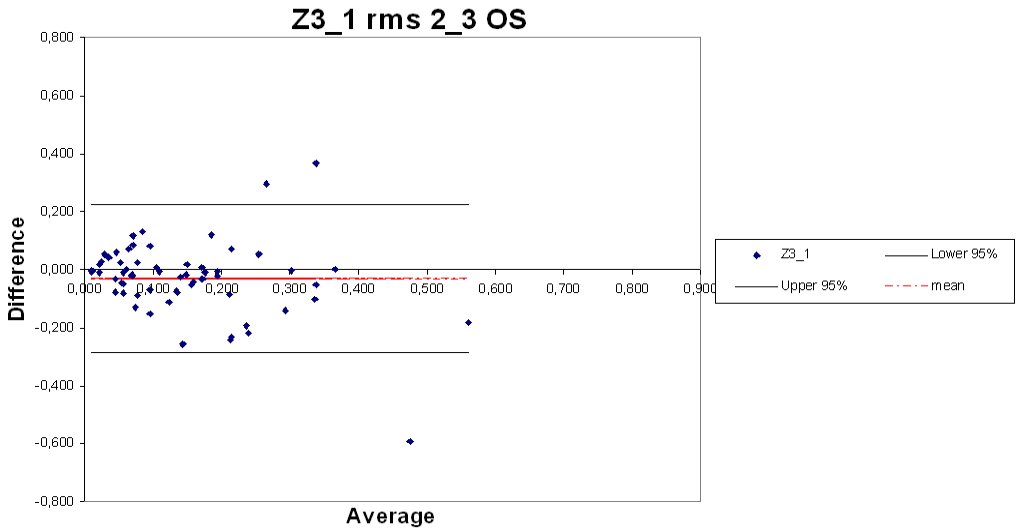
Γράφημα 53: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



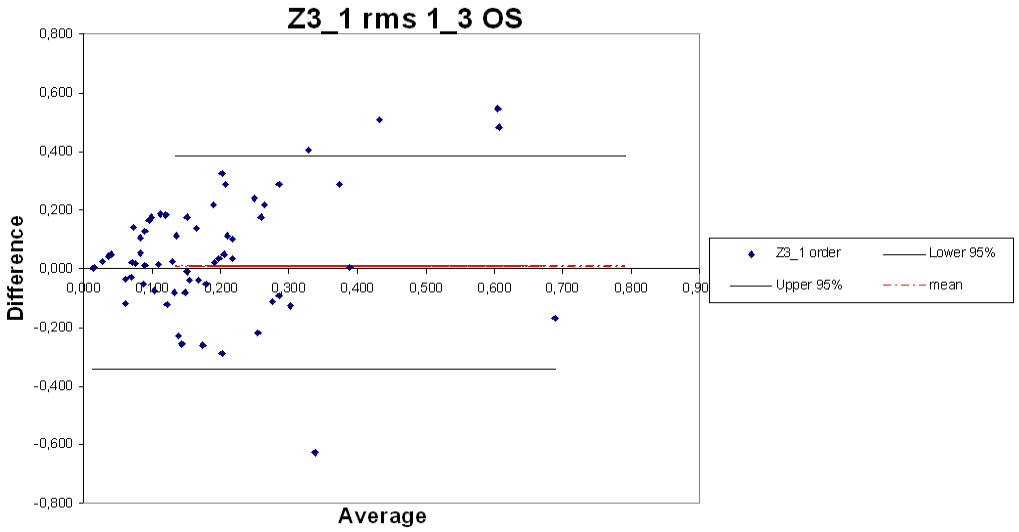
Γράφημα 54: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



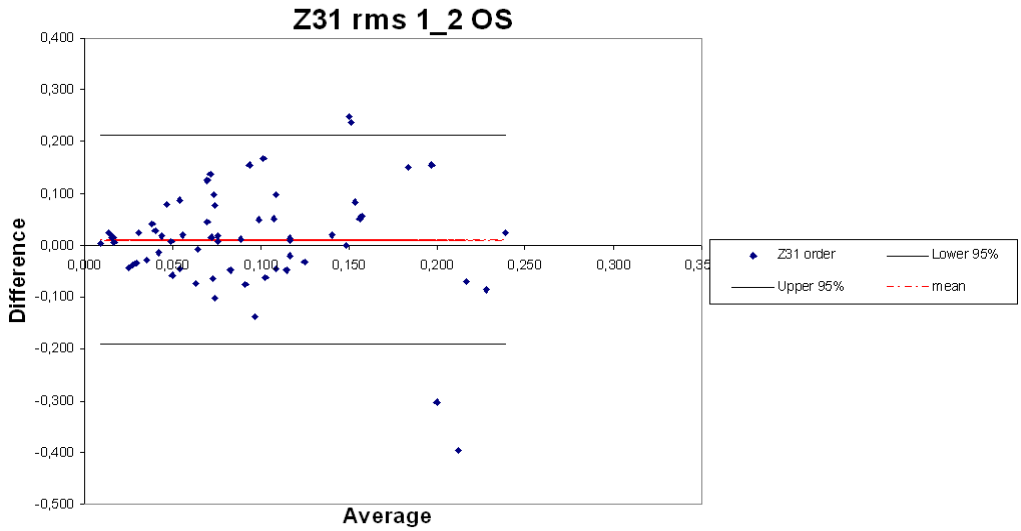
Γράφημα 55: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



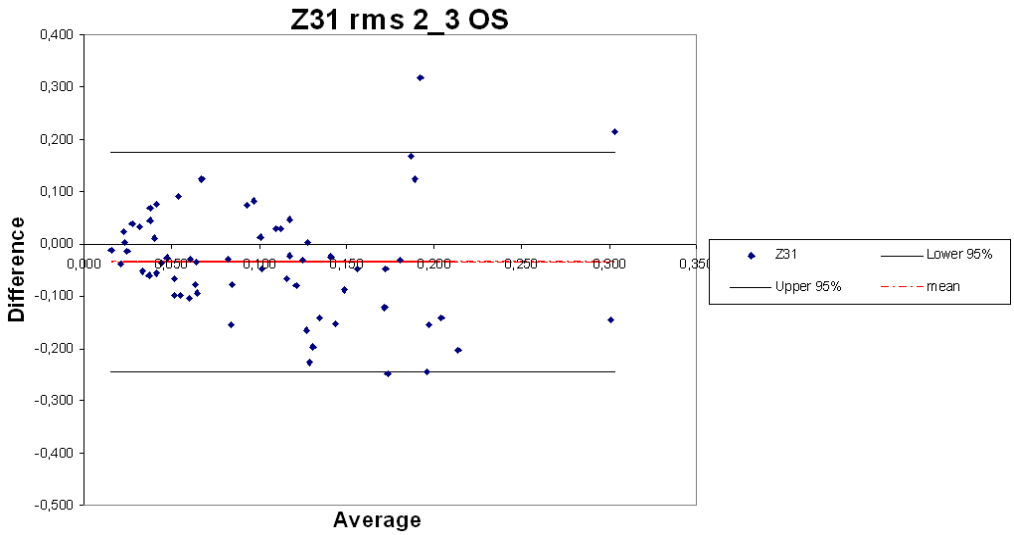
Γράφημα 56: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



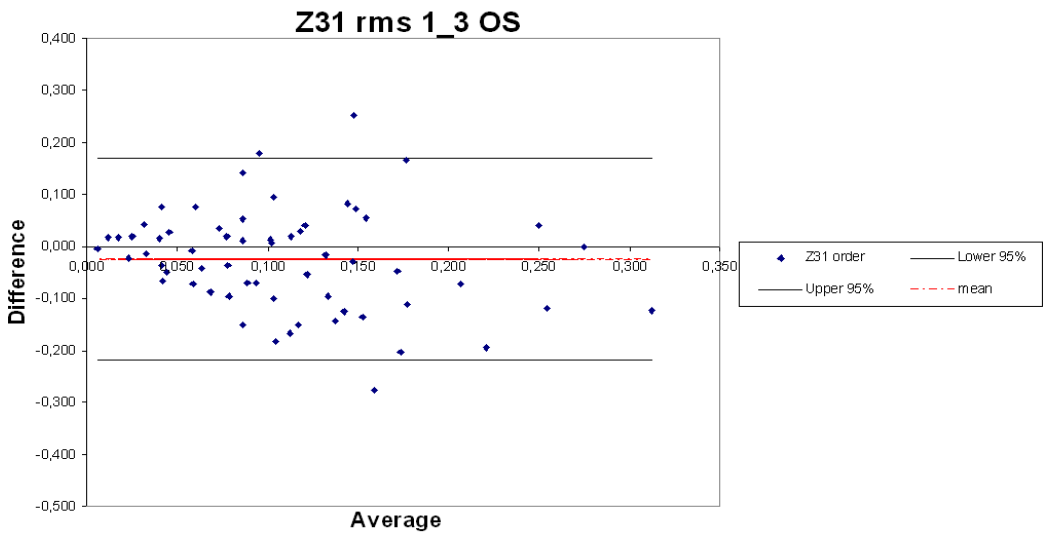
Γράφημα 57: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



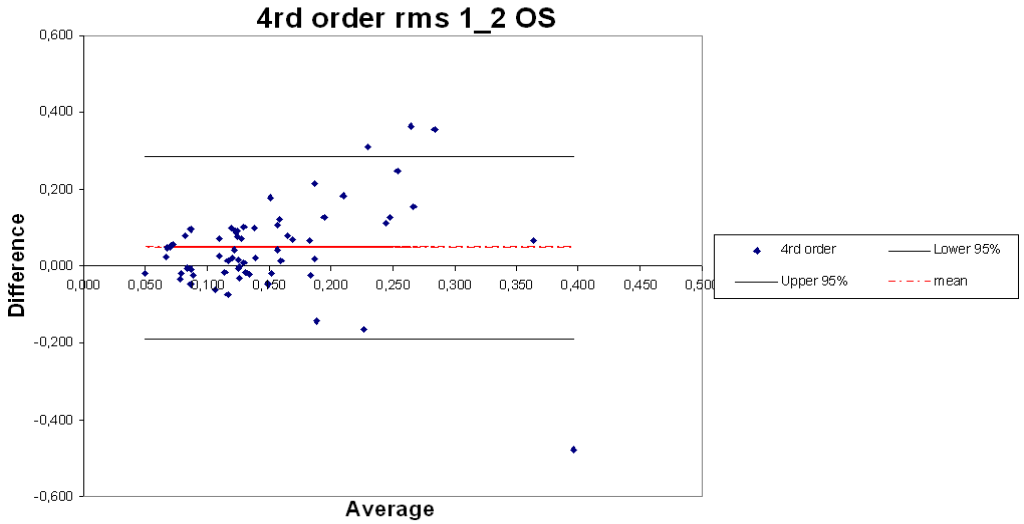
Γράφημα 58: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



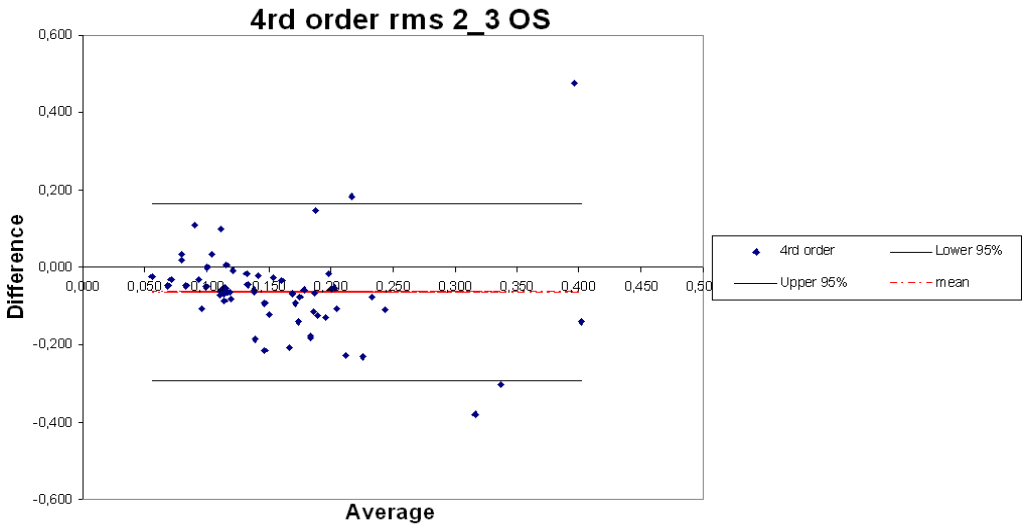
Γράφημα 59: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



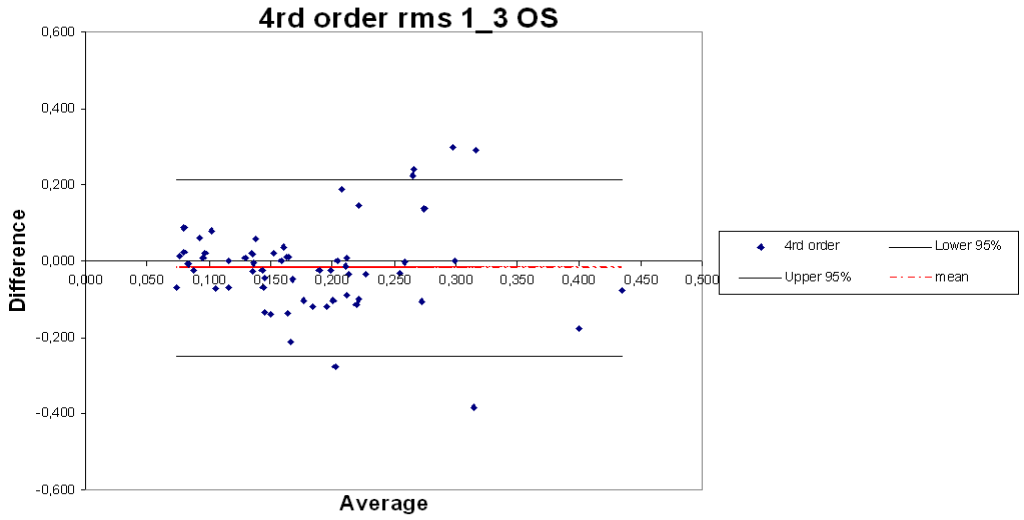
Γράφημα 60: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



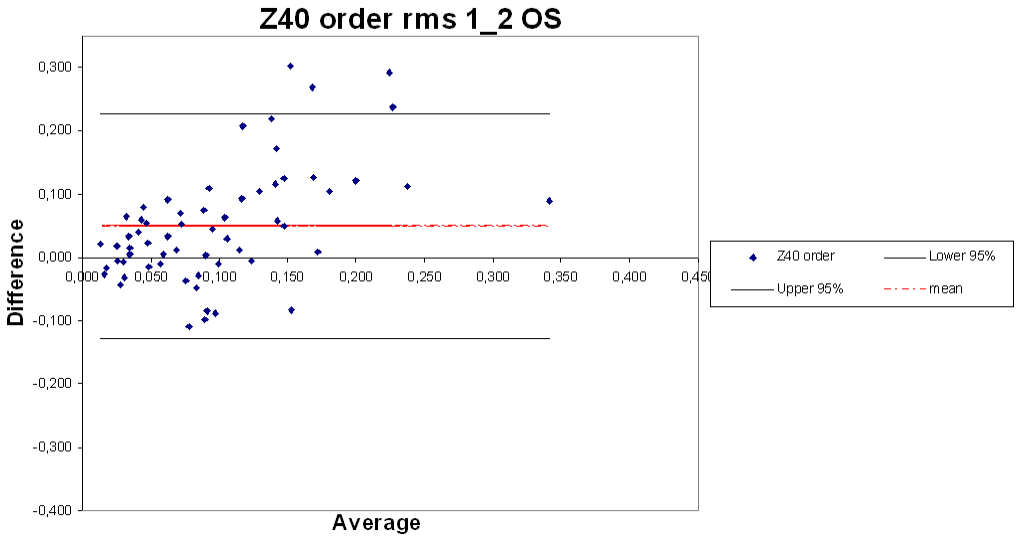
Γράφημα 61: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



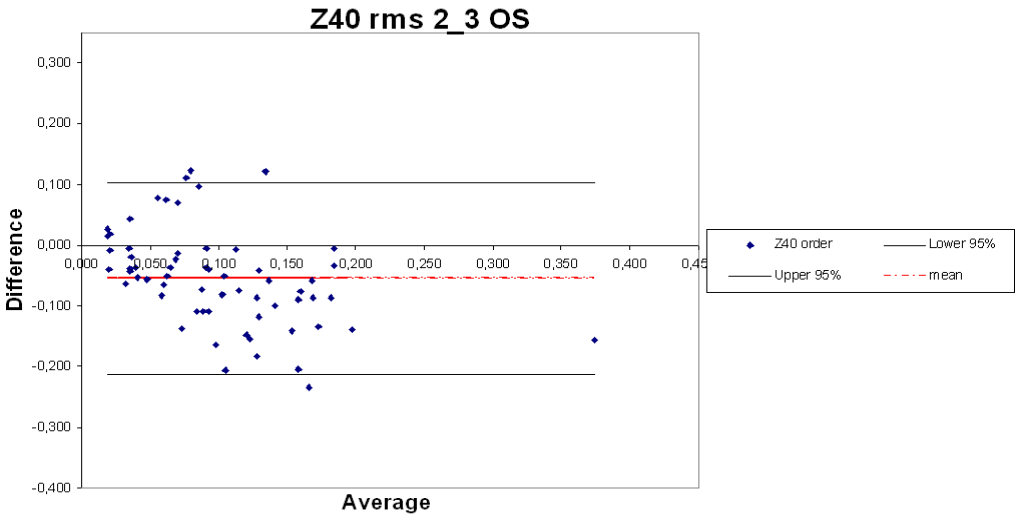
Γράφημα 62: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



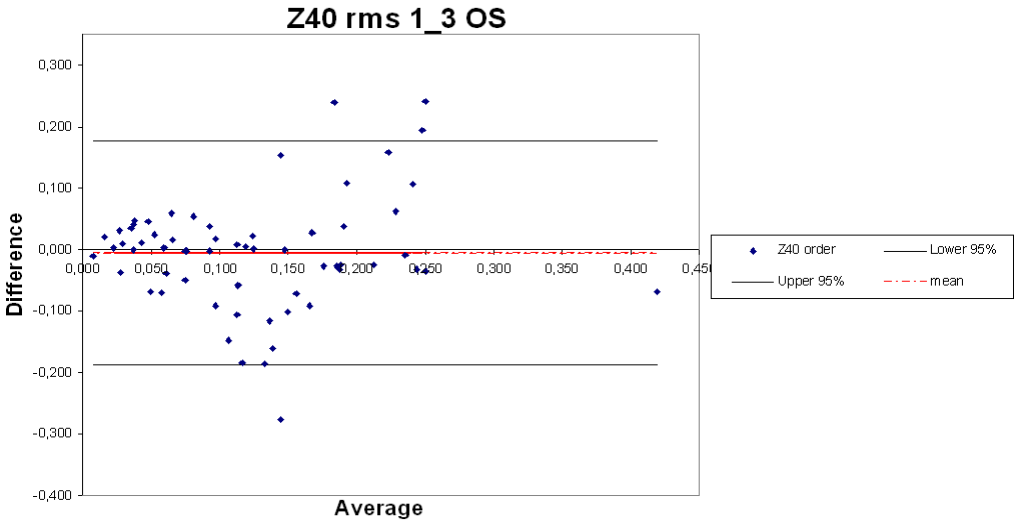
Γράφημα 63: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



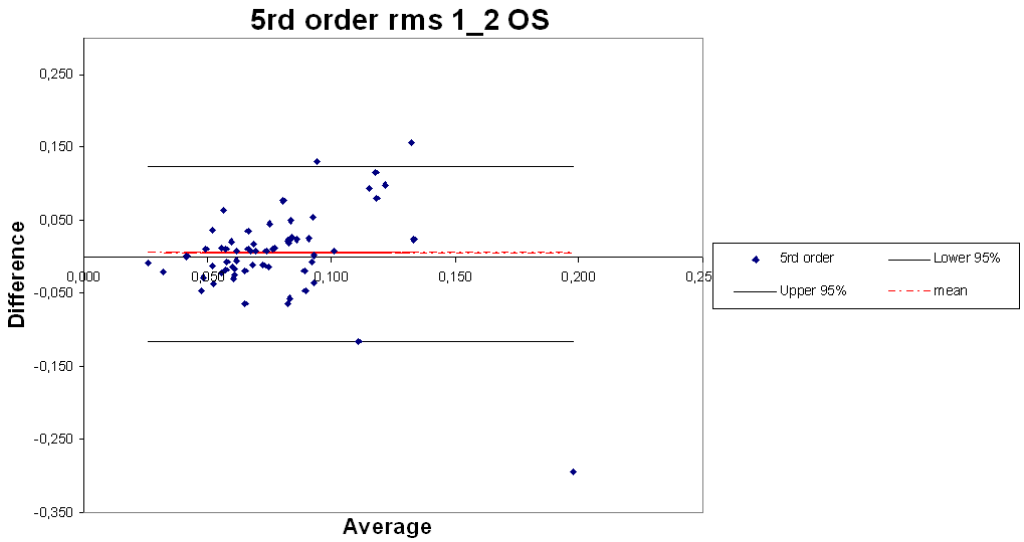
Γράφημα 64: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



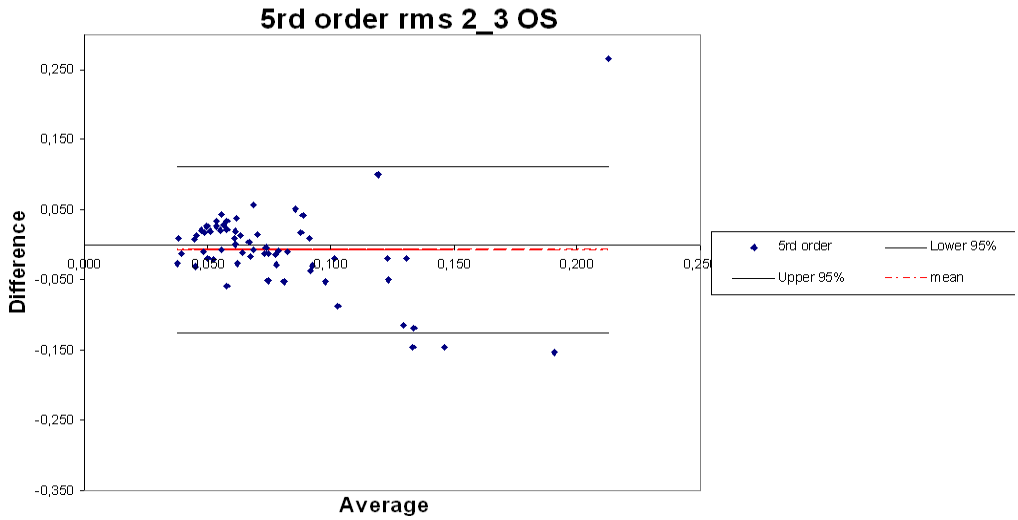
Γράφημα 65: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



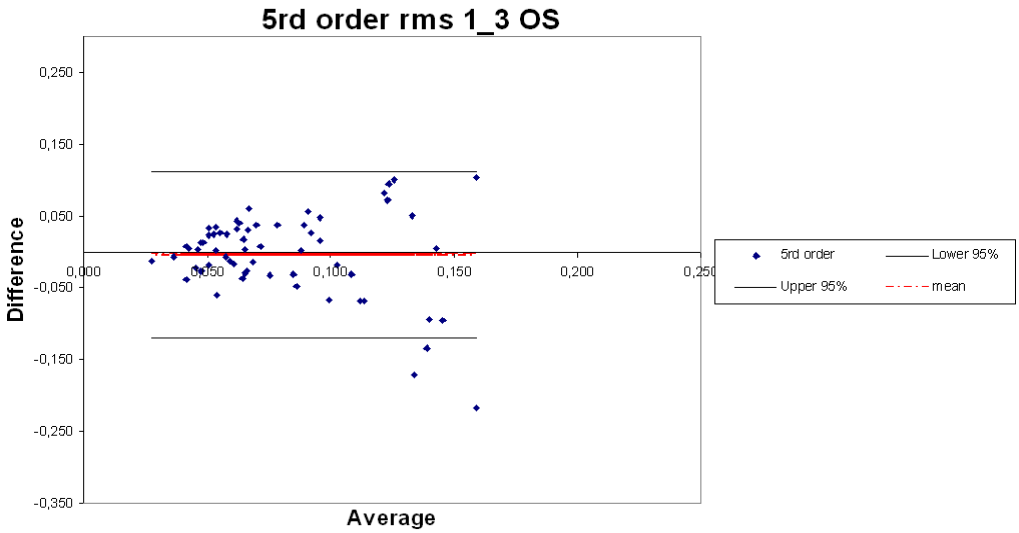
Γράφημα 66: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



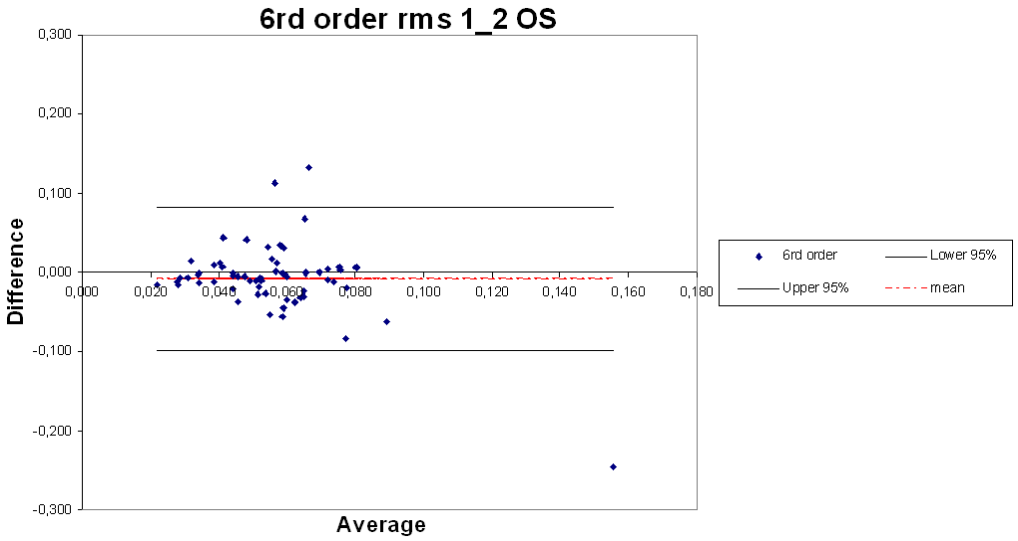
Γράφημα 67: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



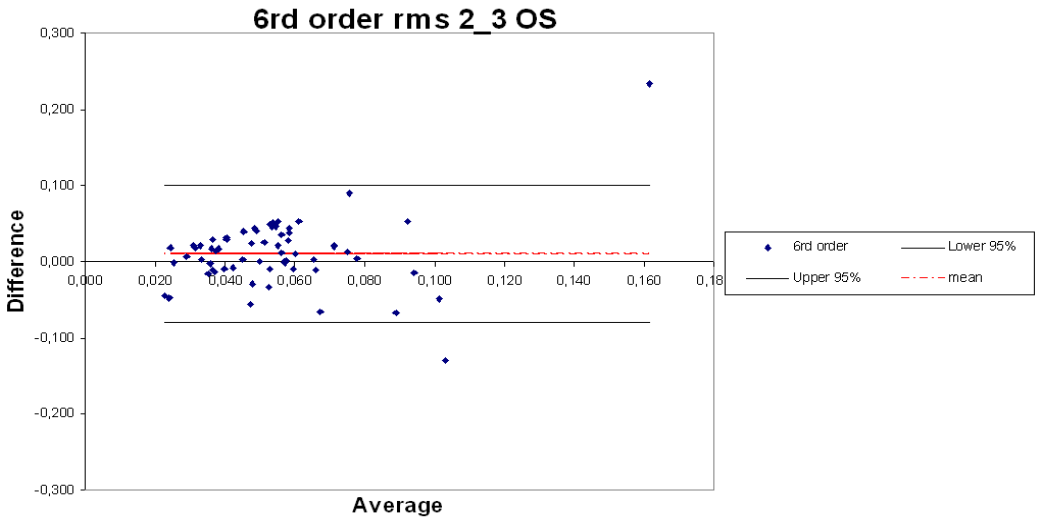
Γράφημα 68: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



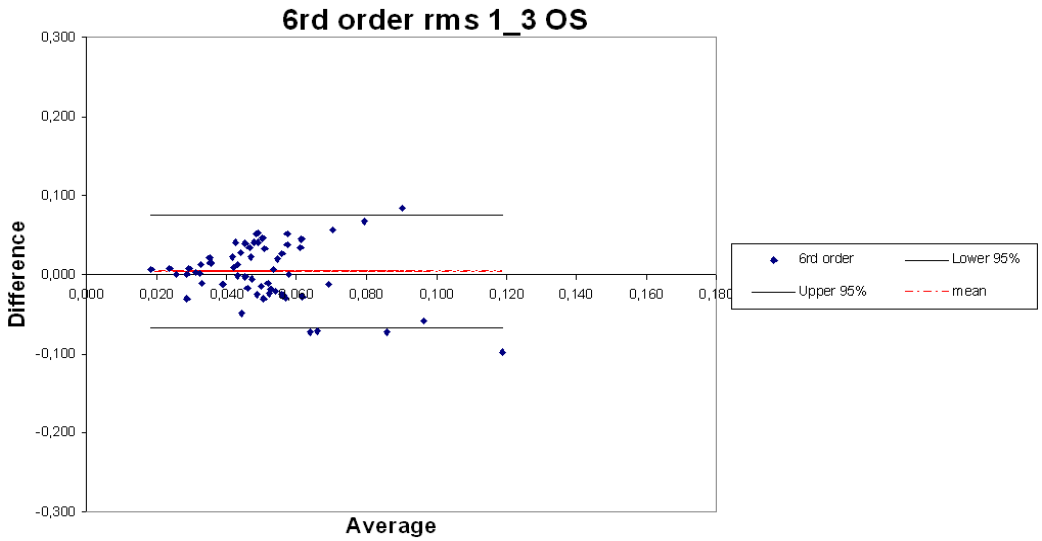
Γράφημα 69: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



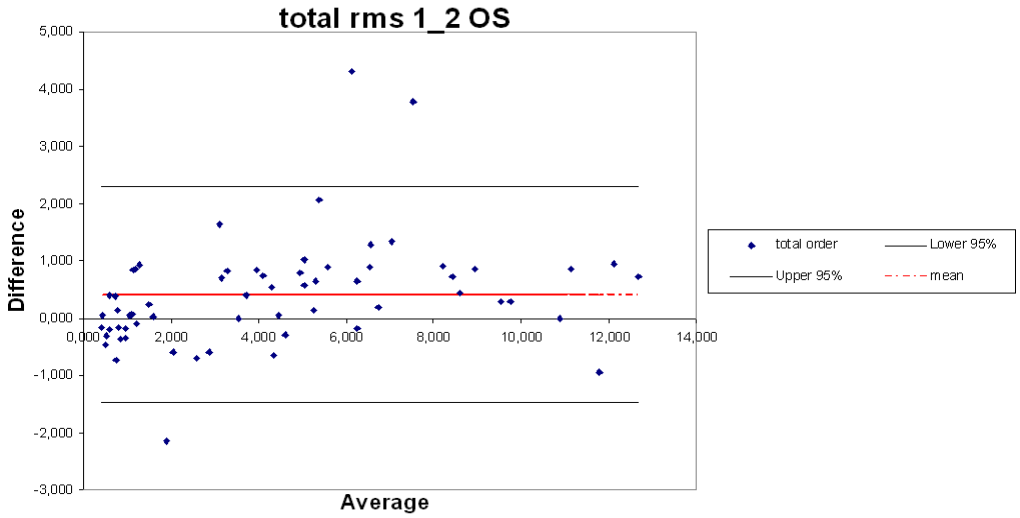
Γράφημα 70: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



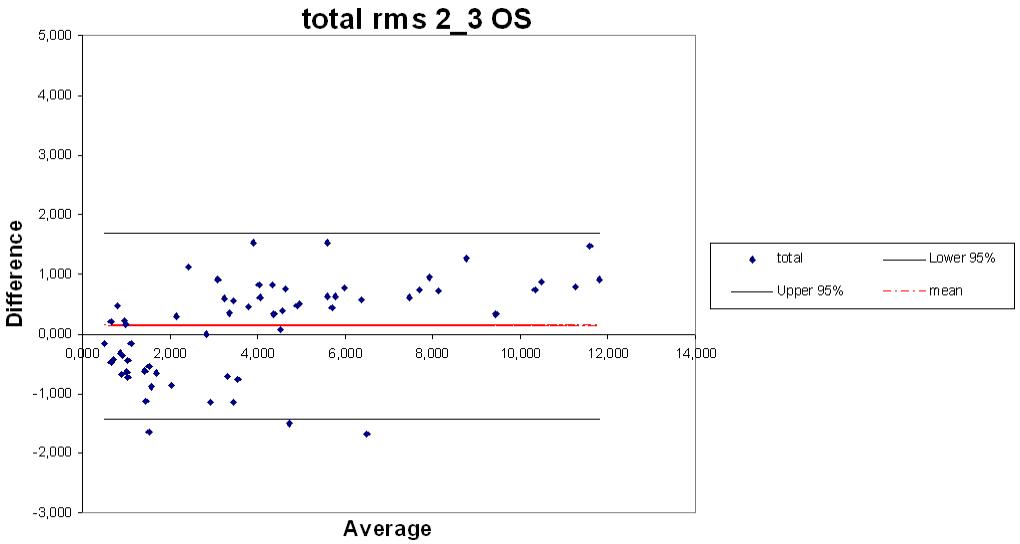
Γράφημα 71: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



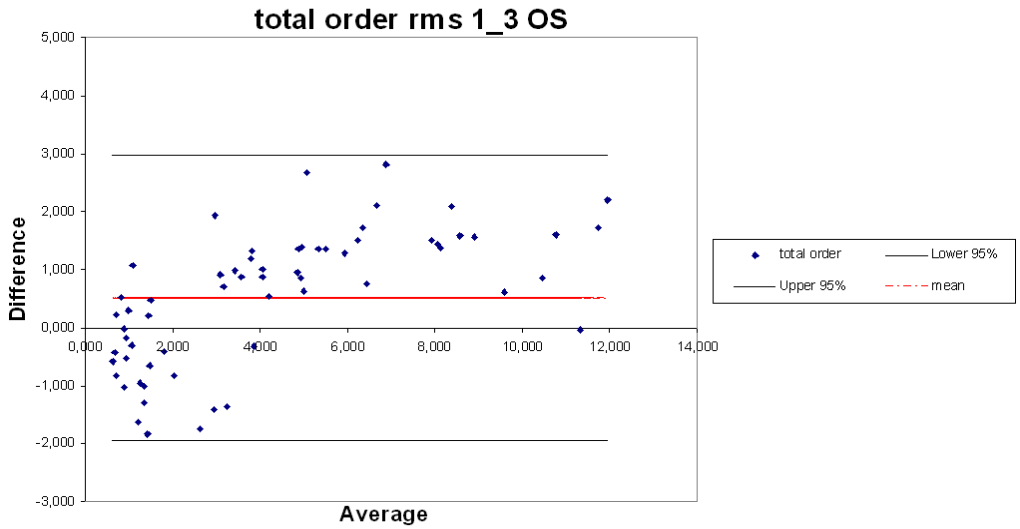
Γράφημα 72: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



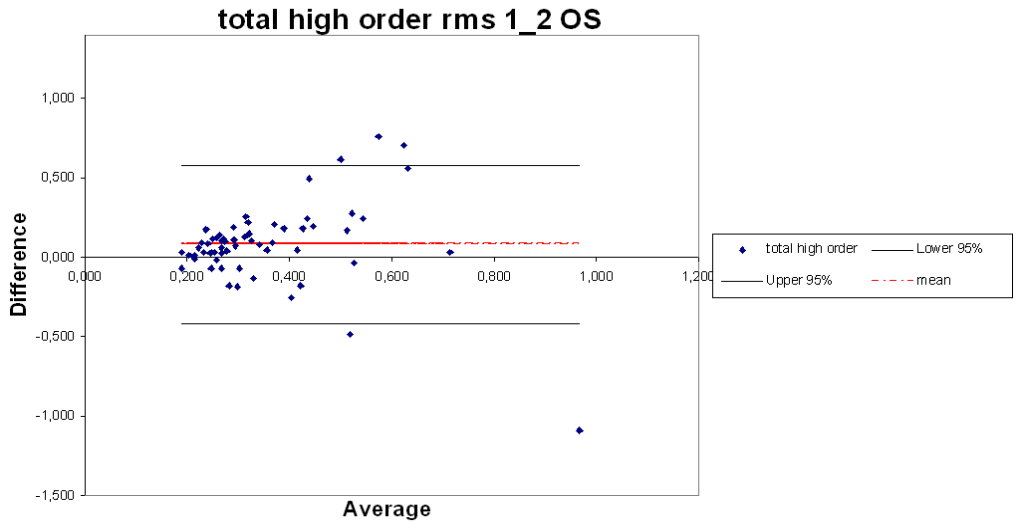
Γράφημα 73: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



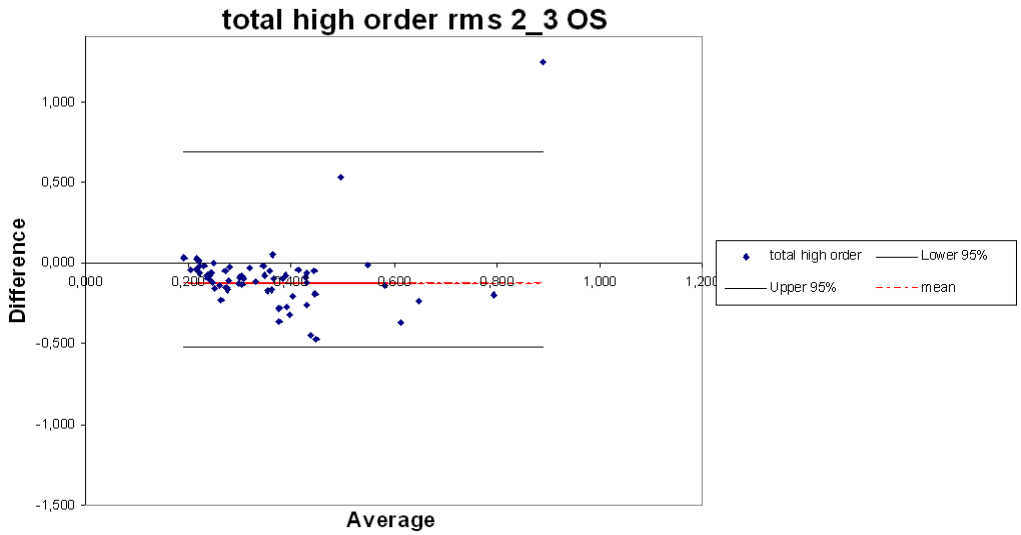
Γράφημα 74: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



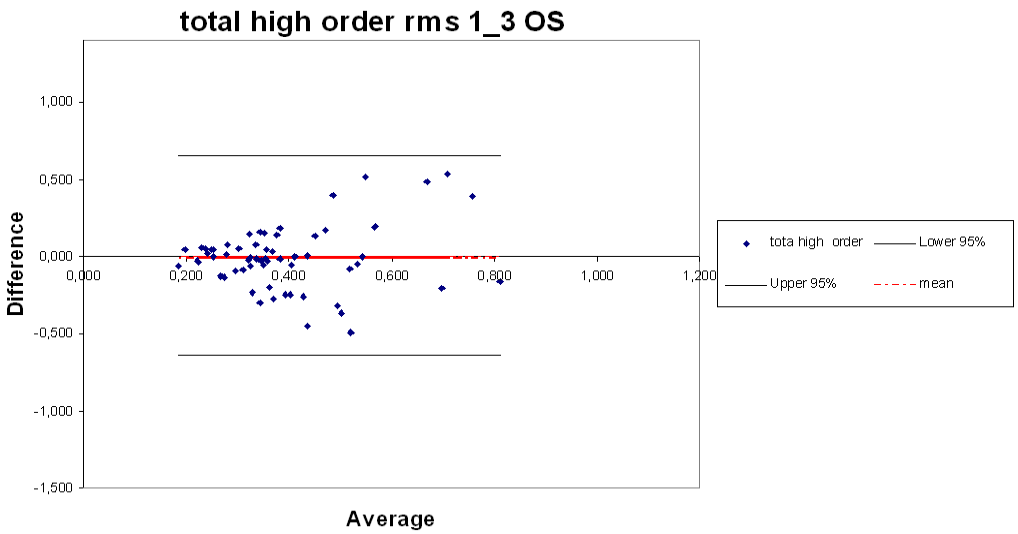
Γράφημα 75: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)



Γράφημα 76: Σύγκριση Wasca (1) με Allegretto (2).



Γράφημα 77: Σύγκριση Allegretto(2) με iTrace (3).



Γράφημα 78: Σύγκριση Wasca (1) με iTrace (3)

5.9) Σχολιασμός γραφημάτων για την σύγκριση των τριών εκτροπομέτρων

Εκτροπές 2ης τάξης

- ***Δεξιός οφθαλμός***

Αρχικά, από τα γραφήματα 13, 14, 15 παρατηρείται ότι οι συγκρίσεις των μηχανημάτων 1-2 και 2-3 έχουν καλύτερα όρια συμφωνίας (σε σχέση με τη μέση τιμή του average rms) από την σύγκριση των μηχανημάτων 1-3 (πίνακες 12,14,16). Αυτό, φαίνεται και από το ποσοστό διαφωνίας το οποίο για τα μηχανήματα 1-3 έχει τιμή 61,3% ενώ για τα μηχανήματα 1-2 και 2-3 43,3% και 40,5% αντίστοιχα. Από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή (πίνακες 12,14,16) σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα μηχανήματα 1-2 και 1-3. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανήματα 1-2 και 1-3 διαφέρουν συστηματικά με ποσοστό 43,3% και 61,3% αντίστοιχα. Συνολικά, καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 1-2 (καλή συμφωνία), ακολουθούν τα 2-3 (καλή συμφωνία) και τέλος τα 1-3 (μέτρια συμφωνία).

- ***Αριστερός οφθαλμός***

Εξετάζοντας τον αριστερό οφθαλμό παρατηρήθηκε ότι υπάρχει πλήρης συμφωνία αριστερού με δεξιό οφθαλμό.

Εκτροπές 3ης τάξης

- ***Δεξιός οφθαλμός***

Αρχικά, από τα γραφήματα 16, 17, 18 παρατηρείται ότι η σύγκριση των μηχανημάτων 1-3 έχει καλύτερα όρια συμφωνίας (σε σχέση με τη μέση τιμή του average rms) από την σύγκριση των μηχανημάτων 1-2 και 2-3 (πίνακες 12,14,16). Αυτό, φαίνεται και από το ποσοστό διαφωνίας το οποίο για τα μηχανήματα 1-2 και 2-3 έχει τιμή 142% και 141% αντίστοιχα ενώ για τα μηχανήματα 1-3, 131%. Από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή (πίνακες 12,14,16) σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα μηχανήματα 1-2, 2-3 και 1-3. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανήματα 1-2, 2-3 και 1-3 διαφέρουν συστηματικά με ποσοστό 142%, 141% και 131% αντίστοιχα. Συνολικά, καλύτερη συμφωνία

έχουν τα μηχανήματα 1-3 (κακή συμφωνία), ακολουθούν τα 2-3 (κακή συμφωνία) και τέλος τα 1-3 (κακή συμφωνία).

- ***Αριστερός οφθαλμός***

Εξετάζοντας τον αριστερό οφθαλμό παρατηρήθηκε ότι υπάρχει πλήρης συμφωνία αριστερού με δεξιό οφθαλμό.

Coma

- ***Δεξιός οφθαλμός***

Αρχικά, από τα γραφήματα 19, 20, 21 παρατηρείται ότι η σύγκριση των μηχανημάτων 2-3 έχει καλύτερα όρια συμφωνίας (σε σχέση με τη μέση τιμή του average rms) από την σύγκριση των μηχανημάτων 1-2 και 1-3 (πίνακες 12,14,16). Αυτό, φαίνεται και από το ποσοστό διαφωνίας το οποίο για τα μηχανήματα 1-2 και 1-3 έχει τιμή 223% και 203% αντίστοιχα ενώ για τα μηχανήματα 2-3, 176%. Από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή (πίνακες 12,14,16) σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα μηχανήματα 1-2 και 2-3. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανήματα 1-2 και 2-3 διαφέρουν συστηματικά με ποσοστό 223% και 176% αντίστοιχα. Συνολικά, καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 2-3 (κακή συμφωνία), ακολουθούν τα 1-3 (κακή συμφωνία) και τέλος τα 1-2 (κακή συμφωνία).

- ***Αριστερός οφθαλμός***

Εξετάζοντας τον αριστερό οφθαλμό παρατηρήθηκε ότι υπάρχει πλήρης συμφωνία αριστερού με δεξιό οφθαλμό.

Κάθετο Coma Z(3,-1)

- ***Δεξιός οφθαλμός***

Αρχικά, από τα γραφήματα 22, 23, 24 παρατηρείται ότι η σύγκριση των μηχανημάτων 2-3 έχει καλύτερα όρια συμφωνίας (σε σχέση με τη μέση τιμή του average rms) από την σύγκριση των μηχανημάτων 1-2 και 1-3 (πίνακες 12,14,16). Αυτό, φαίνεται και από το ποσοστό διαφωνίας το οποίο για τα μηχανήματα 1-2 και 1-3 έχει τιμή 293% και 269% αντίστοιχα ενώ για τα μηχανήματα 2-3, 196%. Από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή (πίνακες 12,14,16) σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα μηχανήματα 1-2 και 2-3. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανήματα 1-2 και 2-3 διαφέρουν συστηματικά με ποσοστό 293% και 196% αντίστοιχα. Συνολικά, καλύτερη συμφωνία έχουν τα

μηχανήματα 2-3 (κακή συμφωνία), ακολουθούν τα 1-3 (κακή συμφωνία) και τέλος τα 1-2 (κακή συμφωνία).

- ***Αριστερός οφθαλμός***

Εξετάζοντας τον αριστερό οφθαλμό παρατηρήθηκε ότι υπάρχει πλήρης συμφωνία αριστερού με δεξιό οφθαλμό.

<u>Οριζόντιο Coma Z(3,1)</u>

- ***Δεξιός οφθαλμός***

Αρχικά, από τα γραφήματα 25, 26, 27 παρατηρείται ότι η σύγκριση των μηχανημάτων 1-2 έχει καλύτερα όρια συμφωνίας (σε σχέση με τη μέση τιμή του average rms) από την σύγκριση των μηχανημάτων 2-3 και 1-3 (πίνακες 12,14,16). Αυτό, φαίνεται και από το ποσοστό διαφωνίας το οποίο για τα μηχανήματα 2-3 και 1-3 έχει τιμή 293% και 269% αντίστοιχα ενώ για τα μηχανήματα 2-3, 196%. Από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή (πίνακες 12,14,16) παρατηρείται ότι δεν σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα μηχανήματα 1-2 και 2-3. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανήματα 1-2, 2-3 και 1-3 δεν διαφέρουν συστηματικά. Συνολικά, καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 1-2 (κακή συμφωνία), ακολουθούν τα 1-3 (κακή συμφωνία) και τέλος τα 2-3 (κακή συμφωνία).

- ***Αριστερός οφθαλμός***

Εξετάζοντας τον αριστερό οφθαλμό παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει συμφωνία αριστερού με δεξιό οφθαλμό καθώς καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 1-3 ακολουθούν τα μηχανήματα 1-2 και τέλος τα 2-3.

<u>Εκτροπές 4^{ης} τάξης</u>

- ***Δεξιός οφθαλμός***

Αρχικά, από τα γραφήματα 28, 29, 30 παρατηρείται ότι η σύγκριση των μηχανημάτων 1-3 έχει καλύτερα όρια συμφωνίας (σε σχέση με τη μέση τιμή του average rms) από την σύγκριση των μηχανημάτων 1-2 και 2-3 (πίνακες 12,14,16). Αυτό, φαίνεται και από το ποσοστό διαφωνίας το οποίο για τα μηχανήματα 1-2 και 2-3 έχει τιμή 189% και 183% αντίστοιχα ενώ για τα μηχανήματα 1-3, 134%. Από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή (πίνακες 12,14,16) σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα μηχανήματα 1-2 και 2-3. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανήματα 1-2 και 2-3 διαφέρουν συστηματικά με

ποσοστό 189% και 183% αντίστοιχα. Συνολικά, καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 1-3 (κακή συμφωνία), ακολουθούν τα 2-3 (κακή συμφωνία) και τέλος τα 1-2 (κακή συμφωνία).

- ***Αριστερός οφθαλμός***

Εξετάζοντας τον αριστερό οφθαλμό παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει συμφωνία αριστερού με δεξιό οφθαλμό καθώς καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 1-3 ακολουθούν τα μηχανήματα 2-3 και τέλος τα 1-2.

<u>Σφαιρική εκτροπή</u>

- ***Δεξιός οφθαλμός***

Αρχικά, από τα γραφήματα 31, 32, 33 παρατηρείται ότι η σύγκριση των μηχανημάτων 1-3 έχει καλύτερα όρια συμφωνίας (σε σχέση με τη μέση τιμή του average rms) από την σύγκριση των μηχανημάτων 1-2 και 2-3 (πίνακες 12,14,16). Αυτό, φαίνεται και από το ποσοστό διαφωνίας το οποίο για τα μηχανήματα 1-2 και 2-3 έχει τιμή 251% ενώ για τα μηχανήματα 1-3, 142%. Από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή (πίνακες 12,14,16) σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα μηχανήματα 1-2 και 2-3. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανήματα 1-2 και 2-3 διαφέρουν συστηματικά με ποσοστό 251%. Συνολικά, καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 1-3 (κακή συμφωνία), ακολουθούν τα 2-3 (κακή συμφωνία) και 1-2 (κακή συμφωνία).

- ***Αριστερός οφθαλμός***

Εξετάζοντας τον αριστερό οφθαλμό παρατηρήθηκε ότι υπάρχει πλήρης συμφωνία αριστερού με δεξιό οφθαλμό.

<u>Εκτροπές 5^{ης} τάξης</u>

Αρχικά, από τα γραφήματα 34, 35, 36 παρατηρείται ότι η σύγκριση των μηχανημάτων 2-3 έχει καλύτερα όρια συμφωνίας (σε σχέση με τη μέση τιμή του average rms) από την σύγκριση των μηχανημάτων 1-3 και 1-2 (πίνακες 12,14,16). Αυτό, φαίνεται και από το ποσοστό διαφωνίας το οποίο για τα μηχανήματα 1-2 και 1-3 έχει τιμή 150% και 136 % αντίστοιχα ενώ για τα μηχανήματα 1-3, 121%. Από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή (πίνακες 12,14,16) παρατηρείται ότι δεν σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα μηχανήματα 1-2 , 2-3 και 1-3. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανήματα 1-2, 2-3 και 1-3 δεν διαφέρουν συστηματικά. Συνολικά, καλύτερη συμφωνία έχουν τα

μηχανήματα 2-3 (κακή συμφωνία), ακολουθούν τα 1-3 (κακή συμφωνία) και τέλος τα 1-2 (κακή συμφωνία).

- ***Αριστερός οφθαλμός***

Εξετάζοντας τον αριστερό οφθαλμό παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει συμφωνία αριστερού με δεξιό οφθαλμό καθώς καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 1-3 ακολουθούν τα μηχανήματα 2-3 και τέλος τα 1-2.

Εκτροπές 6ης τάξης

Αρχικά, από τα γραφήματα 37, 38, 39 παρατηρείται ότι η σύγκριση των μηχανημάτων 1-2 έχει καλύτερα όρια συμφωνίας (σε σχέση με τη μέση τιμή του average rms) από την σύγκριση των μηχανημάτων 2-3 και 1-3 (πίνακες 12,14,16). Αυτό, φαίνεται και από το ποσοστό διαφωνίας το οποίο για τα μηχανήματα 2-3 και 1-3 έχει τιμή 142% και 140 % αντίστοιχα ενώ για τα μηχανήματα 1-3, 124%. Από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή (πίνακες 12,14,16) παρατηρείται ότι δεν σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα μηχανήματα 1-2 , 2-3 και 1-3. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανήματα 1-2, 2-3 και 1-3 δεν διαφέρουν συστηματικά. Συνολικά, καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 1-2 (κακή συμφωνία), ακολουθούν τα 1-3 (κακή συμφωνία) και τέλος τα 2-3 (κακή συμφωνία).

- ***Αριστερός οφθαλμός***

Εξετάζοντας τον αριστερό οφθαλμό παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει συμφωνία αριστερού με δεξιό οφθαλμό καθώς καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 1-3 ακολουθούν τα μηχανήματα 1-2 και τέλος τα 2-3.

Total

Αρχικά, από τα γραφήματα 40, 41, 42 παρατηρείται ότι η σύγκριση των μηχανημάτων 2-3 έχει καλύτερα όρια συμφωνίας (σε σχέση με τη μέση τιμή του average rms) από την σύγκριση των μηχανημάτων 1-2 και 1-3 (πίνακες 12,14,16). Αυτό, φαίνεται και από το ποσοστό διαφωνίας το οποίο για τα μηχανήματα 1-2 και 1-3 έχει τιμή 43% και 62,5% αντίστοιχα ενώ για τα μηχανήματα 2-3 40%. Από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή (πίνακες 12,14,16) σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα μηχανήματα 1-2 και 2-3. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανήματα 1-2 και 2-3 διαφέρουν συστηματικά με ποσοστό 43% και 40% αντίστοιχα. Συνολικά, καλύτερη συμφωνία έχουν τα

μηχανήματα 2-3 (καλή συμφωνία), ακολουθούν τα 1-2 (καλή συμφωνία) και τέλος τα 1-3 (μέτρια συμφωνία).

- ***Αριστερός οφθαλμός***

Εξετάζοντας τον αριστερό οφθαλμό παρατηρήθηκε ότι υπάρχει πλήρης συμφωνία αριστερού με δεξιό οφθαλμό.

Total HO

Αρχικά, από τα γραφήματα 43, 44, 45 παρατηρείται ότι η σύγκριση των μηχανημάτων 1-2 έχει καλύτερα όρια συμφωνίας (σε σχέση με τη μέση τιμή του average rms) από την σύγκριση των μηχανημάτων 2-3 και 1-3 (πίνακες 12,14,16). Αυτό, φαίνεται και από το ποσοστό διαφωνίας το οποίο για τα μηχανήματα 2-3 και 1-3 έχει τιμή 132% και 170% αντίστοιχα ενώ για τα μηχανήματα 1-2, 128%. Από το διάστημα εμπιστοσύνης και την μέση τιμή (πίνακες 12,14,16) σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα μηχανήματα 1-2 και 2-3. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανήματα 1-2 και 2-3 διαφέρουν συστηματικά με ποσοστό 128% και 132% αντίστοιχα. Συνολικά, καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 1-2 (κακή συμφωνία), ακολουθούν τα 2-3 (κακή συμφωνία) και 1-3 (κακή συμφωνία).

- ***Αριστερός οφθαλμός***

Εξετάζοντας τον αριστερό οφθαλμό παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει συμφωνία αριστερού με δεξιό οφθαλμό καθώς καλύτερη συμφωνία έχουν τα μηχανήματα 2-3 ακολουθούν τα μηχανήματα 1-2 και τέλος τα 1-3.

5.10)Συμπεράσματα γραφημάτων για την σύγκριση των τριών εκτροπομέτρων.

1) Καλή συμφωνία παρουσιάζουν τα μηχανήματα 1-2 και 2-3 για τις εκτροπές δεύτερης τάξης και για τις συνολικές εκτροπές.

2) Μέτρια συμφωνία παρουσιάζουν τα μηχανήματα 1-2 για τις εκτροπές δεύτερης τάξης και για τις συνολικές εκτροπές.

3) Κακή συμφωνία παρουσιάζουν όλες οι συγκρίσεις των μηχανημάτων για τις εκτροπές υψηλής τάξης.

4) Παρατηρείται ότι το Wave Analyzer υποεκτιμά τα rms σε σχέση με το Wasca και το iTrace.

5) Ενδεχομένως η κακή επαναληψιμότητα είναι βασικός παράγοντας τόσο για τις μεγάλες διαφορές των μηχανημάτων όσο και για τις ασυμφωνίες ανάμεσα στον δεξιό και αριστερό οφθαλμό.

6) Γενικά, καλύτερη συμφωνία παρατηρείται στα μηχανήματα 2-3 και 1-3.

Βιβλιογραφία

1. Hogan MJ AJ, Wedell JE: Histology of the Human Eye. Philadephia, WB Saunders Co, 1971, 60-62. 1971. Histology of the Human Eye. *Philadephia, WB Saunders Co*: 60-2.

2. Daxer A, Misof K, Grabner B, et al. 1998. Collagen fibrils in the human corneal stroma: structure and aging. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 39: 644-8.

3. Thibos LN, Hong X, Bradley A, Cheng X. 2002. Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 19: 2329-48.

4. Charman WN. 1991. Wavefront aberration of the eye: a review. *Optom Vis Sci* 68: 574-83.

5. Larry N. Thribos, School of Optometry, Indiana University. Wavefront Data Reporting and Terminology. 2008.

6. Douthwaite WA. 2003. The asphericity, curvature and tilt of the human cornea measured using a videokeratoscope. *Ophthalmic Physiol Opt* 23: 141-50.

7. Charman, WN. and Heron, G. Flunctuations in accommodation: a renew Opthal. Physiol. Ppt. 8, 153-164.

8. Charman, WN. Restoring accommodation to the presbyopic eye: How do we measure success? J Catar Refr Surgery, 29, 2251-4.

9. Kapany NS, Peppers NA, Zweng HC, Flocks M. 1963. Retinal Photocoagulation by Lasers. *Nature* 199: 146-9.

10. Zweng HC, Flocks M, Kapany NS, et al. 1964. Experimental Laser Photocoagulation.*Am J Ophthalmol* 58: 353-62.

11. Nancy Tripoli, MA. Department of Ophthalmology, University of North Carolina at Chapel Hill, NC, U.S.A.

12. Liang J, Grimm B, Goelz S, Bille JF. 1994. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 11: 1949-57.

13. N. Lindlein, J. Pfund, and J. Schwider, "Algorithm for expanding the dynamic range of a Shack-Hartmann sensor by using a spatial light modulator array," *Opt. Eng.* 40 (5), 837–840 2001.

14. L. Lundstron and P. Unsbo, "Unwrapping Hartmann-shack image from highly aberrated eyes using an iterative B-splice based extrapolation method," *Optom. Vision Sci.* 81 (5), 383–388 2004.

15.Geunyoung Yoon,* Seth Pantanelli, and Lana J. Nagy University of Rochester Department of Ophthalmology, Biomedical Engineering and Center for Visual Scien. Large-dynamic-range Shack-Hartmann Wavefront sensor for highly aberrated eyes. Rochester, New York 14627.

16. Kaemmerer M, Mrochen M, Mierdel P, et al. Clinical experience with the Tscherning aberrometer. J Refract Surg 2000; 16:S584–S587.

17. Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, et al. Principles of Tscherning aberrometry. J Refract Surg 2000; 16:S570–S571.

18. Thibos LN. Principles of Hartmann-Shack aberrometry. J Refract Surg 2000; 16:S563–S565.

19. Molebny VV, Panagopoulou SI, Molebny SV, et al. Principles of ray tracing aberrometry. J Refract Surg 2000; 16:S572–S575.

20. Liang J, Grimm B, Goelz S, Bille JF. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor. J Opt Soc Am A 1994; 11:1949–1957.

21. Chung-Ling Liang, MD, Suh-Hang Hank Juo, MD, PhD, Cheng-Jong Chang, MD, PhD, Comparison of higher-order Wavefront aberrations with 3 aberrometers, 2005.

22. Mirshahi A, Bu¨ hren J, Gerhardt D, Kohnen T. In vivo and in vitro repeatability of Hartmann-Shack aberrometry. J Cataract Refract Surg 2003; 29:2295–2301.

23. Cheng X, Himebaugh NL, Kollbaum PS, et al. Test-retest reliability of clinical Shack-Hartmann measurements. Invest Ophthalmol Vis Sc 2004; 45:351–360.

24. Jos J. Rozema, MSc, Dirk E.M. Van Dyck, PhD, Marie-Jose´ Tassignon, MD, PhD, Clinical comparison of 6 aberrometers,2005.

25. Wang L, Wang N, Koch DD. Evaluation of refractive error measurements of the WaveScan WaveFront system and the Tracey wavefront aberrometer. J Cataract Refract Surg 2003; 29:970–979.

26. W.N. Charman .Department Optometry and Neuroscience, Faculty of Life Sciences, University of Manchester, Wavefront technology: Past, present and future, 2004.

27. Col Thomas O. Salmon, O.D., Ph.D. Ltc Corina van de Pol, O.D., Ph.D. *College of Optometry, Northeastern State University, Tahlequah, Oklahoma; and US Army Aeromedical Research Laboratory, Fort Rucker, Alabama,* Evaluation of a clinical aberrometer for lower-order accuracy and repeatability, higher-order repeatability, and instrument myopia, 2005.

28. Shady T. Awwad, MD, Mohamed El-Kateb, MD, James P. McCulley, MD, Comparative higher-order aberration measurement of the LADARWave and Visx

WaveScan aberrometers at varying pupil sizes and after pharmacologic dilation and cycloplegia, 2006.

29. Willem J. Hament, MD, Vaisjaly A. Nabar, MD, Rudy M.M.A. Nuijts, MD, PhD, Repeatability and validity of Zywave aberrometer measurements,2002.

30. J Martin Bland Department of Public Health Sciences, St George's Hospital Medical School, London, UK and Douglas G Altman ICRF Medical Statistics Group, Centre for Statistics in Medicine, Institute of Health Sciences, Oxford, UK, Measuring agreement in method comparison studies, 1999.

31. J. Martin Bland a; Douglas G. Altman b, a Department of Health Sciences, University of York, York, UK, b Centre for Statistics in Medicine, Oxford, UK, Agreement Between Methods of Measurement with Multiple Observations Per Individual.2007.

32. Bland JM, Altman DG, Statistical methods for assessing agreement two methods of clinical measurement. Lancet 1986; 1:307-310.

Βιβλια:

33. Σ. Παναγοπούλου. 'Εκτροπομετρία', Σημειώσεις Γ εξάμηνο Όραση και φυσιολογική οπτική.

34. Χ.Γκίνης 'Το οπτικό σύστημα του οφθαλμού', Σημειώσεις Α εξάμηνο Όραση και φυσιολογική οπτική.

35. Δημ.Παπάζογλου 'Οπτική Ι' Σημειώσεις Α εξάμηνο Όραση και φυσιολογική οπτική.

36. Αλέξανδρος Γ.Δαμανάκης 'Διάθλαση'.

37. Daniel Vaughan, Taylor Asbury, Paul Riordan 'General Opthalmology'.

38. Bennet and Rabbett's ,'Clinical Visual Optics'.

39. David A.Atchison and George Smith 'Optics of the Human eye'.

40. Young Hugh ‘Πανεπιστημιακή Φυσική (Τόμος Β) Ηλεκτρομαγνητισμός, Οπτική Φυσική, Σύγχρονη Φυσική’

41. Manual για το μηχάνημα Wasca Coas 1.41.05

42. Manual για το μηχάνημα Allegretto

43. Manual για το μηχάνημα iTrace 3.1

Πηγές internet:

44. www.Wikipedia.com

45. www.opticsexpress.com

46. www.sciencedirect.com

.