

Evaluation of Corneal Higher- Order Aberrations in Adults with Different Refractive Status

Omar Khaled Yaseer

Taym Darwish

Najwa Kurdogly

Faculty of Medicine || Tishreen University || Syria

Abstract: Purpose: The aim of this study is to evaluate the root mean square error (RMS) of corneal higher- order aberrations in Syrian adult population in different refractive status (emmetropia, myopia, hyperopia and simple myopic astigmatism).

Methods: This cross- sectional study was conducted at Tishreen University Hospital in Latakia, Syrian Arab Republic. A total of 420 patients (840 eyes), ages 18- 40 years, participated in the study. Refraction was measured with an autorefractor keratometer and expressed as a spherical equivalent. Total corneal higher- order aberrations (Coma, Spherical Aberration, Trefoil) were measured using Sirius Corneal Topography at a pupil diameter of 5 mm.

Results: RMS of Coma and Spherical aberrations peaked in the hyperopia group (0.18 ± 0.08 , 0.11 ± 0.02) respectively. Whereas, Trefoil was higher in the severe myopia and simple myopic astigmatism groups (0.25 ± 0.05 , 0.25 ± 0.08) respectively.

Conclusions: Among a Syrian population, some types of refractive status were associated with certain types of higher- order aberrations, with a significant increase in trefoil in severe myopia and simple myopic astigmatism.

Keywords: Corneal higher- order aberrations, Coma, Spherical aberration, Trefoil, Refractive errors.

تقييم الزوغانات القرنية عالية الترتيب عند البالغين في مختلف الحالات الانكسارية

عمر خالد ياسير

تيم درويش

نجوى كردغلي

كلية الطب البشري || جامعة تشرين || اللاذقية || سوريا

المستخلص: الهدف: تقييم متوسط خطأ الجذر التربيعي (RMS) للزوغانات القرنية عالية الترتيب عند البالغين السوريين في حالة (السواء البصري، والحسر، والمد، والأبورية الحسرية البسيطة).

الطرائق: تم إجراء هذه الدراسة المقطعية المستعرضة في مستشفى تشرين الجامعي في اللاذقية، بالجمهورية العربية السورية. شارك في الدراسة 420 مريضاً (840 عيناً) بأعمار تتراوح بين 18- 40 سنة. تم قياس أسوء الانكسار بواسطة جهاز قياس أسوء الانكسار الآلي وتم التعبير عنها بالمكافئ الكروي. تم قياس الزوغانات القرنية الكلية عالية الترتيب من نوع (الفاصلة Coma، والزوغان الكروي Spherical Aberration، والزوغان ثلاثي الوريقات Trefoil) باستخدام جهاز قياس طبوغرافيا القرنية Sirius Corneal Topography عند قطر حدقة 5 ملم.

النتائج: بلغت ذروة خطأ الجذر التربيعي (RMS) في الزوغانات القرنية الكليّة عالية الترتيب من نوع الفاصلة (Coma) والزوغان الكروي (Spherical Aberration) لدى مجموعة مدّ البصر (0.18±0.08, 0.11±0.02) بالترتيب. بينما كانت قيم الزوغان ثلاثي الوريقات (Trefoil) أعلى لدى مجموعتي الحسر الشديدي واللابؤريّة الحسريّة البسيطة (0.25±0.08, 0.25±0.05) بالترتيب. الاستنتاج: لدى عيّنة من السورين فإنّ بعض الحالات الانكساريّة كانت مرتبطة بأنماط معيّنة من الزوغانات القرنية عالية الترتيب مع زيادة مهمّة في الزوغان ثلاثي الوريقات (Trefoil) في حالة الحسر الشديدي واللابؤريّة الحسريّة البسيطة. الكلمات المفتاحية: الزوغانات القرنية عالية الترتيب، زوغان الفاصلة، الزوغان الكروي، الزوغان ثلاثي الوريقات، أسوء الانكسار.

1. المقدمة.

العين البشريّة هي نظام بصريّ معقدّ لديه زوغانات مختلفة، وهذه الزوغانات تعدّ من العوامل المحدّدة للجودة البصريّة^[1]. حيث إنّ الجودة البصريّة للعين محدودة بعوامل مختلفة بما في ذلك الزوغانات البصريّة والحيود والانتثار^[2]. ويعدّ السطح هواء- قرنيّة أول وأهمّ واجهة انكساريّة للعين مع تأثير كبير على الانكسار الكليّ بسبب الاختلاف الكبير في مشعر الانكسار^[3].

إنّ صعود جراحة القرنية الانكساريّة الموجهة بالجهة الموجية wavefront-guided^[4]، والعدسات اللاصقة المصحّحة للزوغان aberration-correcting contact lenses^[5]، والعدسات داخل العين المصمّمة بالاعتماد على الجهة الموجية wavefront-based custom intraocular lenses^[6] ألقى مزيداً من الضوء على الزوغانات عالية الترتيب (Higher- Order Aberrations (HOAs)).

تشكّل HOAs جزءاً صغيراً من الزوغانات العينيّة، حيث تشكّل الزوغانات منخفضة الترتيب (حسر البصر، ومدّ البصر، واللابؤريّة المنتظمة) أكثر من 90٪ من الزوغانات الموجية جميعها^[7]. على الرّغم من ذلك فإنّ الزوغانات عالية الترتيب HOAs تضعف جودة الصّورة الشبكيّة وتسبّب وهيجاً وهالات، ولكن لا يمكن تصحيحها باستخدام عدسات كرويّة وأسطوانيّة^[8].

توفّر أجهزة طبوغرافيا القرنية قياس الزوغانات القرنية باستخدام خوارزميات خاصّة تعتمد على بيانات الارتفاع؛ ومع ذلك، فقد تمّ تحديد الزوغانات العينيّة المختلفة مؤخراً باستخدام بيانات من مقاييس الزوغانات^[9]. يجمع جهاز طبوغرافيا Placido - Sirius Scheimpflug بين كاميرا شيمبلغ Scheimpflug الدّوّارة وتقنيّة قرص بلاسيديو Placido-disk. في مسح واحد يوفّر التصوير والقياسات للقسم الأمامي وتضاريس القرنية الأماميّة والخلفيّة وتحليل الجهة الموجية وقياس ثخانة القرنية^[10].

مؤخراً أصبح الانتباه إلى الزوغانات عالية الترتيب HOAs بعد الجراحة الانكساريّة للقرنية بالليزر واحداً من المسائل الحاسمة عند تقييم جودة أنظمة الجراحة الانكساريّة الليزرية^[11].

2. مشكلة البحث:

تقييم متوسط خطأ الجذر التربيعي (RMS) للزوغانات القرنية الكليّة عالية الترتيب من نوع (الفاصلة Coma، والزوغان الكروي Spherical Aberration، والزوغان ثلاثي الوريقات Trefoil) عند البالغين السورين في حالة (السّوء البصريّ، والحسر، والمد، واللابؤريّة الحسريّة البسيطة) وذلك عند قطر حدقة 5 ملم.

3. أهمية البحث

بما أنّ الجراحة الانكسارية تعتمد على تغيير شكل القرنية لإصلاح أسوء الانكسار، لذلك من الضروري تحديد الزوغانات القرنية ونوعها قبل إجراء الجراحة الانكسارية وتحري وجود علاقة بين الزوغانات القرنية وبين أسوء الانكسار.

قد تساعد معرفة توزع الزوغانات عالية الترتيب HOAs المرتبطة بأسوء الانكسار في إنتاج تصحيحات مثالية وأكثر دقة عند استخدام تقنيات جديدة في العمليات الجراحية الانكسارية وكذلك في عمليات السّاد وزرع العدسات داخل العين المصمّمة بالاعتماد على الجبهة الموجية wavefront-based custom intraocular lenses.

4. مواد البحث وطرائقه:

تم أخذ قصّة مرضيّة مفصّلة للمرضى بما فيها السّوابق المرضيّة والجراحية، وتمّ تسجيل معلومات العمر والجنس، وبعد أخذ الموافقة المستنيرة* تمّ إجراء فحص عينيّ شامل يتضمّن:

- فحص القدرة البصريّة وأفضل قدرة بصريّة بعد التصحيح.
- قياس أسوء الانكسار بعد شلّ المطابقة بواسطة جهاز قياس أسوء الانكسار الألي. حيث تمّ التعبير عن أسوء الانكسار بالمكافئ الكرويّ.
- فحص شامل لأقسام العين باستخدام المصباح الشقي وتنظير قعر العين بواسطة عدسة 90D.
- قياس ضغط العين.
- إجراء طبوغرافيا قرنية لكلا العينين باستخدام جهاز Sirius (CSO) وتسجيل قيم خطأ الجذر التربيعي RMS للزوغانات القرنية عالية الترتيب الكليّة عند قطر حدقة 5 ملم وتشمل زوغان الفاصلة Coma والزوغان الكرويّ Spherical Aberration والزوغان ثلاثيّ الوريقات Trefoil.
- تمّ إخبار المرضى بأن يرمشوا بين اللقطات للحفاظ على فيلم الدّمع سليماً.
- تمّ اعتماد الصّورة الطبوغرافية بعد التأكّد من أنّ:
 - ❖ التثبيت مركزيّ.
 - ❖ وجود 14 حلقة مستمرة لقرص بلاسيدو.
 - ❖ جودة الصّورة مقبولة Acquisition is ok.
 - ❖ المعايير جميعها (Centration, Coverage) فوق 90%.
- تمّ تقسيم المرضى إلى خمس مجموعات رئيسيّة حسب قيم المكافئ الكرويّ بعد شلّ المطابقة:

- 1- سديد البصر [0.25, +0.25] كسيرة
- 2- حسر خفيف إلى متوسّط [-0.50, -6.00] كسيرة
- 3- حسر شديد أكثر من -6.00 كسيرة
- 4- مدّ البصر +0.50 كسيرة فما فوق
- 5- الألبوريّة الحسريّة البسيطة (1 - كسيرة أسطوانيّة فما فوق)

*تم الحصول على موافقة مستنيرة خطيّة من قبل جميع المرضى المشاركين بالبحث (النموذج المعتمد في كلية الطب البشري بجامعة تشرين) كما تمت الموافقة على إجراء البحث من قبل لجنة أخلاقيات البحث العلمي في كلية الطب البشري بجامعة تشرين ومن قبل مجلس جامعة تشرين.

5. معايير الإدخال في الدراسة:

- 1- المرضى الذين تتراوح أعمارهم بين 18 سنة و40 سنة.
- 2- القدرة البصريّة المصحّحة 10/10 أو أفضل.

6. معايير الاستبعاد في الدراسة:

- 1- مرضى القرنيّة المخروطيّة (شك)
- 2- كثافة بالعدسة تؤثر على القدرة البصريّة
- 3- ارتفاع ضغط العين <21 مم زئبقي
- 4- أيّ رضّ عينيّ سابق أو جراحة عينيّة سابقة
- 5- وجود ندبة قرنيّة أو تنكّس أو حثل قرنيّ
- 6- الإرضاع والحمل
- 7- أيّ مرض جهازيّ يؤثر على القدرة البصريّة
- 8- استخدام العدسات اللاصقة

7. الدراسة الإحصائية:

وتضمّنت في دراستنا ما يأتي:

- 1- إحصاء وصفيّ Description Statistical
متغيّرات كمّيّة quantitative بالمتوسّط الحسابي والانحراف المعياري.
متغيّرات نوعيّة qualitative بالتكرارات والنسب المئويّة.
- 2- إحصاء استدلالّي Inferential Statistical بالاعتماد على قوانين الإحصاء
اختبار One Way Anova لدراسة الفرق بين متوسّط أكثر من مجموعتين.
تعدّ النتائج هامّة إحصائيّاً مع $p\text{-value} < 5\%$
تمّ اعتماد البرنامج IBM SPSS statistics (version20) لحساب المعاملات الإحصائيّة وتحليل النتائج.

8. النتائج:

8.1. توزع العينة:

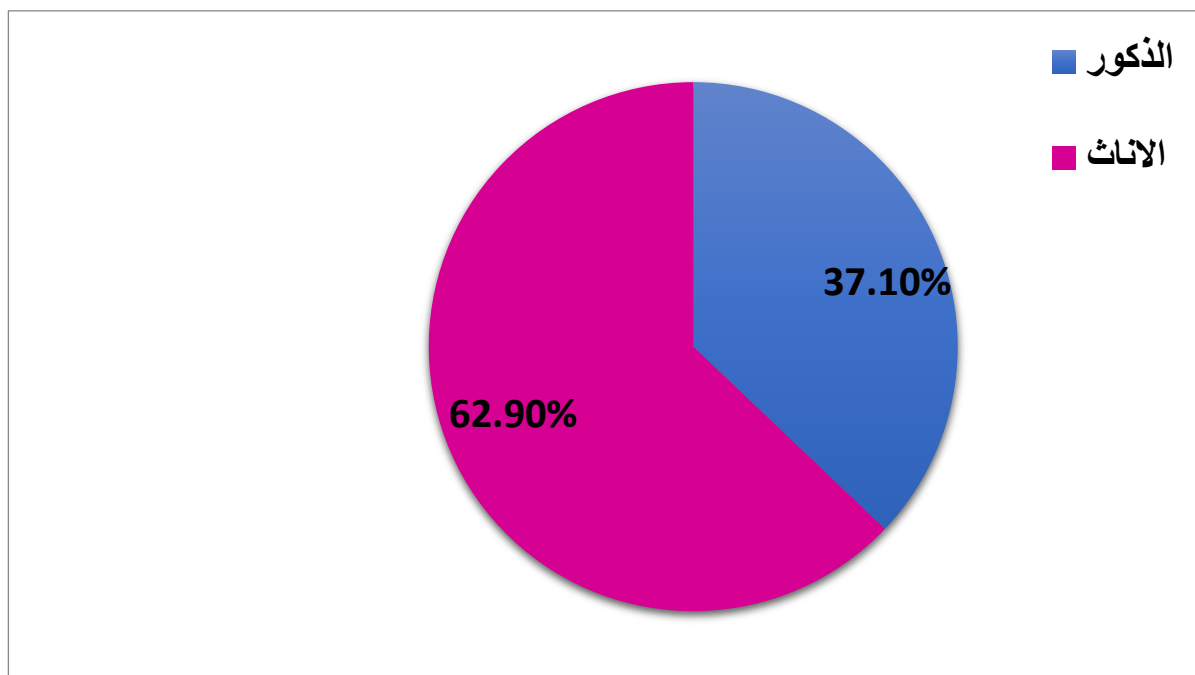
شملت عيّنة البحث (840 عيناً) 420 مريضاً (156 ذكراً، 264 أنثى) من مراجعي العيادة العينيّة في مستشفى تشرين الجامعي في اللاذقيّة خلال الفترة 2020-2021 والمحقّقين معايير الاشتمال في الدّراسة:
تراوحت أعمار العيّنة بين 18 إلى 40 سنة وبلغ متوسّط العمر 24.2 ± 5.2 سنة.
تراوحت قيم المكافئ الكرويّ بين -8.5 إلى +5 كسيرة وبلغ المتوسّط - 0.8 ± 1.8 كسيرة.

جدول (1) توزع عيّنة 420 مريضاً (840 عيناً) حسب الحالة الانكساريّة

النسبة المئويّة	العدد (عين)	عيّنة البحث
38.1%	320	سديد البصر
34.5%	290	حسر خفيف إلى متوسّط
2.1%	18	حسر شديد

النسبة المئوية	العدد (عين)	عيّنة البحث
15.5%	130	مدّ البصر
9.8%	82	لابؤريّة حشريّة بسيطة

نلاحظ من الجدول السابق (1) أنّ 38.1% من عيّنة البحث المدروسة كانوا ضمن فئة السّديدين بصريًا و34.5% ضمن فئة الحسر الخفيف إلى متوسّط.



الرسم البياني (1) توزّع عيّنة 420 مريضًا (840 عيّنًا) حسب الجنس مع Sex Ratio(F:M)=1.7:1. يوضح الرسم البياني السابق (1) نسبة الإناث مقارنة بالذكور في الدراسة والتي تصل للضعف تقريبًا. جدول (2): القيم المتوسطة للأعمار والمكافئ الكروي في عيّنة 420 مريضًا (840 عيّنًا) وتبعًا للحالة الانكساريّة

عيّنة البحث	العمر (سنة)	
	المتوسّط الحسابي ± الانحراف المعياري	المتوسّط الحسابي ± الانحراف المعياري
سديد البصر	24.3±5.3	0.04 ±0.2
حسر خفيف إلى متوسّط	24.6±5.3	- 2.25±1.2
حسر شديد	24.8±2.3	- 6.96±0.9
مدّ البصر	22.2±3.6	2.48±1.1
لابؤرية حشريّة بسيطة	25.7±6.1	- 1.7±0.6

يوضّح الجدول السابق (2) القيم المتوسطة للمكافئ الكروي والعمر تبعًا للحالة الانكساريّة للمرضى.

8.2. العلاقة بين الحالة الانكساريّة والقيم المتوسطة للزّوغانات القرنيّة الكلّيّة (Coma): جدول (3) تمّت دراسة العلاقة بين الحالة الانكساريّة والقيم المتوسطة للزّوغانات القرنيّة الكلّيّة (Coma) باستخدام اختبار One Way ANOVA تبين وجود فروقات ذات دلالة إحصائيّة مع p-value=0.0001 حيث كانت القيم أعلى لدى مجموعة المديد ولدى دراستها مع باقي المجموعات كانت الفروقات هامة إحصائيًا مع السّديد p-value=0.008 ومع الحسر الخفيف إلى المتوسّط p-value=0.001 وكذلك مع اللّابؤريّة الحشريّة البسيطة p-value=0.0001.

جدول (3) القيم المتوسطة للزوغانات القرنية الكليّة (Coma) في عيّنة 420 مريضاً (840 عيناً) وتبعاً للحالة الانكسارية

عيّنة البحث	الزوغانات القرنية الكليّة (ميكرون)	
	Coma	المتوسط الحسابي ± الانحراف المعياري
سديد البصر	0.16±0.06	0.09 – 0.34
حسر خفيف إلى متوسط	0.14±0.06	0.02 – 0.25
حسر شديد	0.15±0.05	0.06 – 0.19
مدّ البصر	0.18±0.08	0.10 – 0.32
لابؤرية حسرية بسيطة	0.13±0.05	0.01 – 0.34

8.3. العلاقة بين الحالة الانكسارية والقيم المتوسطة للزوغانات القرنية الكليّة (Spherical Aberration): جدول (4)

تمت دراسة العلاقة بين الحالة الانكسارية والقيم المتوسطة للزوغانات القرنية الكليّة (Spherical Aberration) باستخدام اختبار One Way ANOVA تبين وجود فروقات ذات دلالة إحصائية مع $p\text{-value}=0.003$ حيث كانت القيم أعلى لدى مجموعة المديد ولدى دراستها مع باقي المجموعات كانت الفروقات هامة إحصائياً مع $p\text{-value}=0.0001$ ومع اللابؤرية الحسرية البسيطة $p\text{-value}=0.005$.

جدول (4) القيم المتوسطة للزوغانات القرنية الكليّة (Spherical Aberration) في عيّنة 420 مريضاً (840 عيناً) وتبعاً للحالة الانكسارية

عيّنة البحث	الزوغانات القرنية الكليّة (ميكرون)	
	Spherical Aberration	المتوسط الحسابي ± الانحراف المعياري
سديد البصر	0.09±0.03	0.06 – 0.15
حسر خفيف إلى متوسط	0.10±0.04	0.04 – 0.16
حسر شديد	0.09±0.02	0.05 – 0.11
مدّ البصر	0.11±0.02	0.08 – 0.15
لابؤرية حسرية بسيطة	0.08±0.04	0.04 – 0.17

8.4. العلاقة بين الحالة الانكسارية والقيم المتوسطة للزوغانات القرنية الكليّة (Trefoil): جدول (5)

تمت دراسة العلاقة بين الحالة الانكسارية والقيم المتوسطة للزوغانات القرنية الكليّة (Trefoil) باستخدام اختبار One Way ANOVA تبين وجود فروقات ذات دلالة إحصائية مع $p\text{-value}=0.0001$ حيث كانت القيم أعلى لدى مجموعتي الحسر الشديد واللابؤرية الحسرية البسيطة ولدى دراستها مع باقي المجموعات كانت الفروقات هامة إحصائياً ما بين الحسر الشديد والمجموعات كافة ماعدا اللابؤرية الحسرية البسيطة $p\text{-value}=0.9$ وكذلك الأمر في اللابؤرية الحسرية البسيطة مع المجموعات كافة ماعدا الحسر الشديد $p\text{-value}=0.9$.

جدول (5) القيم المتوسطة للزوغانات القرنية الكليّة (Trefoil) في عينة 420 مريضاً (840 عيناً) وتبعاً للحالة الانكسارية

عينة البحث	الزوغانات القرنية الكليّة (ميكرون) Trefoil	
	المتوسط الحسابي ± الانحراف المعياري	المدى
سديد البصر	0.14±0.05	0.03 – 0.23
حسر خفيف إلى متوسط	0.14±0.06	0.03 – 0.24
حسر شديد	0.25±0.05	0.17 – 0.30
مدّ البصر	0.16±0.07	0.10 – 0.27
لابؤرية حسرية بسيطة	0.25±0.08	0.05 – 0.40

9. المناقشة:

قيمت هذه الدراسة القرنية بوصفها أحد العوامل المشاركة في تحريض الزوغانات عالية الترتيب HOAs في المرضى الذين يعانون من أسوأ انكسار مختلفة. بحثت معظم الدراسات في الزوغانات عالية الترتيب العينية Ocular HOAs، لكننا نهدف إلى معرفة مساهمة القرنية في هذه الزوغانات.

أظهرت بعض الدراسات عدم وجود علاقة هامة بين الزوغانات عالية الترتيب HOAs وكمية أو نوع أسوأ الانكسار^[12-14]، بينما خلص بعضهم إلى وجود علاقة قوية بين الزوغانات عالية الترتيب HOAs وحسر البصر. ولاحظ آخرون أن مدّ البصر لديه مستويات أعلى من الزوغانات^[9]. حيث نجد أن النتائج متضاربة في هذا الصدد.

بحثت الدراسات السابقة في الزوغانات عالية الترتيب HOAs للجهة الموجية باستخدام أنواع مختلفة من مقاييس الزوغان. لم يجد <نيتو وآخرون>^[15] أي ارتباط بين درجة أسوأ الانكسار والزوغانات عالية الترتيب HOAs. اتفق <خان وآخرون>^[16] و<هاشميان وآخرون>^[17] و<بيسنيتو وآخرون>^[18] على أن مدّ البصر لديه مستويات أعلى من الزوغان الكروي. وهذا يتفق مع نتائج هذه الدراسة حيث تمت دراسة العلاقة بين الحالة الانكسارية والقيم المتوسطة للزوغانات القرنية الكليّة من نوع الزوغان الكروي (Spherical Aberration) وتبين وجود فروقات ذات دلالة إحصائية مع p-value=0.003 حيث كانت القيم أعلى لدى مجموعة المديد ولدى دراستها مع باقي المجموعات كانت الفروقات هامة إحصائياً مع السديد ومع اللابؤرية الحسرية البسيطة.

فيما يتعلّق بالزوغانات القرنية الكليّة من نوع الفاصلة (Coma) كانت القيم أعلى لدى مجموعة المديد في هذه الدراسة حيث تبين وجود فروقات ذات دلالة إحصائية مع p-value=0.0001 وهذا يتفق مع ما توصل إليه <عنبر وآخرون>^[19].

أشار الباحثون إلى أن الزيادة في قيم الزوغانات في مجموعات المدّ في الدراسات السابقة قد تكون بسبب ارتفاع متوسط العمر بشكل ملحوظ مقارنة بمجموعات الحسر. وعلى الرغم من أن متوسط العمر في مجموعة المدّ في هذه الدراسة أقل من المجموعات الأخرى (22 سنة) فقد تم الوصول إلى نتائج مماثلة، وربما يعود ذلك إلى عدد العيون غير المتجانس بين المجموعات (290 في مجموعة الحسر الخفيف إلى المتوسط مقابل 130 في مجموعة المدّ).

أما الزوغانات القرنية الكليّة من نوع الزوغان ثلاثي الوريقات (Trefoil) تبين في هذه الدراسة وجود فروقات ذات دلالة إحصائية مع p-value=0.0001 حيث كانت القيم أعلى لدى مجموعتي الحسر الشديد واللابؤرية الحسرية البسيطة. وبالمقارنة مع دراسة <عنبر وآخرون>^[19] فقد كانت قيم الزوغان ثلاثي الوريقات أعلى لدى مجموعة اللابؤرية الحسرية لكن دون أن تكون الفروقات ذات دلالة إحصائية.

وتتمثل العوائق الرئيسية لمقارنة نتائج الدراسات الأخرى فيما يتعلق بهذه المسألة في استخدام مقاييس زوغانات مختلفة، اختلاف قطر الحدقة في العيون المدروسة، والفئات العمرية المختلفة، والحالات البصرية والانكسارية المختلفة للمشاركين. هذه العوامل كلها تؤثر على موثوقية المقارنة وتتطلب أخذها بعين الاعتبار.

10. الخلاصة والاستنتاجات:

- القيم المتوسطة لخطأ الجذر التربيعي RMS للزوغان ثلاثي الوريقات (Trefoil) أعلى لدى مجموعتي الحسر الشديد واللابؤرية الحسرية البسيطة.
- القيم المتوسطة لخطأ الجذر التربيعي RMS لزوغان الفاصلة (Coma) والزوغان الكروي (Spherical Aberration) أعلى لدى مجموعة المديد.

11. التوصيات والمقترحات.

1. تحري العلاقة بين الزوغانات القرنية عالية الترتيب ومتغيرات عينية أخرى مثل ثخانة القرنية.
2. القيام بمزيد من الدراسات المماثلة باستخدام حجم عينة أكبر وقطر حدقة مختلف.
3. إجراء دراسات لتقييم الزوغانات العينية عالية الترتيب في مختلف الحالات الانكسارية.

12. قائمة المراجع.

- 1- Schwiegerling J. (2011). Scaling pseudo- Zernike expansion coefficients to different pupil sizes. *Optics letters*, 36(16), 3076–3078.
- 2- Cerviño, A., Hosking, S. L., Montes- Mico, R., & Bates, K. (2007). Clinical ocular wavefront analyzers. *Journal of refractive surgery (Thorofare, N.J.)*, 23(6), 603–616.
- 3- Piñero, D. P., Alió, J. L., Alesón, A., Escaf, M., & Miranda, M. (2009). Pentacam posterior and anterior corneal aberrations in normal and keratoconic eyes. *Clinical & experimental optometry*, 92(3), 297–303.
- 4- Kim, A., & Chuck, R. S. (2008). Wavefront- guided customized corneal ablation. *Current opinion in ophthalmology*, 19(4), 314–320.
- 5- Marsack, J. D., Parker, K. E., & Applegate, R. A. (2008). Performance of wavefront- guided soft lenses in three keratoconus subjects. *Optometry and vision science: official publication of the American Academy of Optometry*, 85(12), E1172–E1178.
- 6- Nochez, Y., Favard, A., Majzoub, S., & Pisella, P. J. (2010). Measurement of corneal aberrations for customisation of intraocular lens asphericity: impact on quality of vision after micro- incision cataract surgery. *The British journal of ophthalmology*, 94(4), 440–444.
- 7- Lombardo, M., & Lombardo, G. (2010). Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance. *Journal of cataract and refractive surgery*, 36(2), 313–331.
- 8- Thibos L. N. (2009). Retinal image quality for virtual eyes generated by a statistical model of ocular wavefront aberrations. *Ophthalmic & physiological optics: the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 29(3), 288–291.

- 9- Xu, Z., Hua, Y., Qiu, W., Li, G., & Wu, Q. (2018). Precision and agreement of higher order aberrations measured with ray tracing and Hartmann- Shack aberrometers. *BMC ophthalmology*, 18(1), 18.
- 10- Bayhan, H. A., Aslan Bayhan, S., Muhafiz, E., & Can, I. (2014). Repeatability of aberrometric measurements in normal and keratoconus eyes using a new Scheimpflug- Placido topographer. *Journal of cataract and refractive surgery*, 40(2), 269–275.
- 11- Bühren, J., Martin, T., Kühne, A., & Kohnen, T. (2009). Correlation of aberrometry, contrast sensitivity, and subjective symptoms with quality of vision after LASIK. *Journal of refractive surgery (Thorofare, N.J.: 1995)*, 25(7), 559–568.
- 12- Porter, J., Guirao, A., Cox, I. G., & Williams, D. R. (2001). Monochromatic aberrations of the human eye in a large population. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 18(8), 1793–1803.
- 13- Cheng, X., Bradley, A., Hong, X., & Thibos, L. N. (2003). Relationship between refractive error and monochromatic aberrations of the eye. *Optometry and vision science: official publication of the American Academy of Optometry*, 80(1), 43–49.
- 14- Cheng, H. M., Singh, O. S., Kwong, K. K., Xiong, J., Woods, B. T., & Brady, T. J. (1992). Shape of the myopic eye as seen with high- resolution magnetic resonance imaging. *Optometry and vision science: official publication of the American Academy of Optometry*, 69(9), 698–701.
- 15- Netto, M. V., Ambrósio, R., Jr, Shen, T. T., & Wilson, S. E. (2005). Wavefront analysis in normal refractive surgery candidates. *Journal of refractive surgery (Thorofare, N.J.: 1995)*, 21(4), 332–338.
- 16- Khan, M. S., Humayun, S., Fawad, A., Ishaq, M., Arzoo, S., & Mashhadi, F. (2015). Comparison of higher order aberrations in patients with various refractive errors. *Pakistan journal of medical sciences*, 31(4), 812–815.
- 17- Hashemian, S. J., Soleimani, M., Foroutan, A., Joshaghani, M., Ghaempanah, M. J., Jafari, M. E., & Yaseri, M. (2012). Ocular higher- order aberrations and mesopic pupil size in individuals screened for refractive surgery. *International journal of ophthalmology*, 5(2), 222–225.
- 18- Bisneto, O. S., Temporini, E. R., Arieta, C. E., & Moreira, H. (2007). Aberrações de alta ordem: associação com a idade e erros de refração [Relationship between high- order aberrations and age and between high- order aberrations and refraction errors]. *Arquivos brasileiros de oftalmologia*, 70(2), 290–297.
- 19- Anbar, M., Mohamed Mostafa, E., Elhawary, A. M., Awny, I., Farouk, M. M., & Mounir, A. (2019). Evaluation of Corneal Higher- Order Aberrations by Scheimpflug- Placido Topography in Patients with Different Refractive Errors: A Retrospective Observational Study. *Journal of ophthalmology*, 2019, 5640356.