

الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
علوم وهندسة البصريات

رسالة ماجستير في هندسة النظم البصرية

دراسة أثر التسمحات الميكانيكية وتغيرات درجة الحرارة على دقة
المحور البصري في الجسميات الحرارية المصممة حديثاً

تقديم

أحمد يامن يحيى سمكري

إشراف

د. رضوان اللحام

د. حسان ابراهيم

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

Higher Institute for Applied Sciences and Technology

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا مؤسسة حكومية للتعليم العالي أحدثت بموجب المرسوم التشريعي رقم 24/ لعام 1983، وذلك بهدف إعداد كوادر علمية متميزة من مهندسين وباحثين للإسهام الفاعل في عملية التطوير العلمي والتنمية في الجمهورية العربية السورية.

يمنح المعهد العالي درجة الإجازة في الهندسة في الاتصالات والمعلوماتية والنظم الإلكترونية والميكاترونيكس وعلوم وهندسة المواد وهندسة الطيران. يقبل المعهد العالي لدراسة هذه الاختصاصات شريحة منتقاة من المتفوقين في الشهادة الثانوية من الفرع العلمي. يتيح المعهد العالي أيضاً برامج ماجستير أكاديمي في نظم الاتصالات وفي التحكم والروبوتيك وفي نظم المعطيات الكبيرة ونظم المعلومات ودعم القرار وفي علوم وهندسة المواد وعلوم وهندسة البصريات. وأخيراً، يمنح المعهد العالي درجة الدكتوراه في الاتصالات والمعلوماتية ونظم التحكم والفيزياء التطبيقية. تُحدث في المعهد العالي اختصاصات جديدة بحسب متطلبات سوق العمل وتوجهات البحث والتطوير المحلية والعالمية.

إلى جانب النشاط التعليمي، يمارس المعهد العالي عبر جهود أطره وفعالياته العلمية المختلفة نشاطاً حثيثاً في البحث والتطوير، إذ ينفذ مشاريع ودراسات واستشارات متنوعة لصالح الجهات العامة والخاصة في القطر، كما يتعاون مع جهات خارج القطر في بعض المشاريع البحثية والتطويرية. يسعى المعهد أيضاً، عبر دورات تدريبية نظرية وعملية متاحة للقطاعين العام والخاص وللأفراد، إلى إفادة أوسع فئة من المهتمين من إمكانيات أطره العلمية ومختبراته. واستكمالاً لدوره الرائد في مجال التعليم ونشر العلم، ينشر المعهد العالي كتباً علمية عالية المستوى من نتاج أطره، منها ما هو تدريسي يوافق المناهج في المعهد العالي ويفيد شريحة واسعة من الطلاب الجامعيين عموماً، ومنها ما هو علمي ثقافي. يتيح المعهد العالي بعضاً من منشوراته على موقعه على الشبكة، كما يتيح إمكانية الاطلاع على رسائل الماجستير والدكتوراه المنفذة في المعهد العالي وعلى بعض منشورات طلابه وأطره من المقالات العلمية.

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، الجمهورية العربية السورية، دمشق، ص.ب 31983

Higher Institute for Applied Sciences and Technology – HIAST

P. O. Box 31983, Damascus, Syrian Arab Republic

هاتف 00963115123819 - فاكس 00963115140761

بريد إلكتروني contact@hiast.edu.sy

موقع إلكتروني www.hiast.edu.sy

رَكِبْتُ الْمَنَى وَنَسِيتُ الْحَدَرَ
وَلَا كُتِبَةَ اللَّهَبِ الْمُسْتَعَرُ
يَعِشُ أَبَدَ الدَّهْرِ بَيْنَ الْخَفَرِ

إِذَا مَا طَمَحْتُ إِلَى غَايَةٍ
وَلَمْ أَجَنَّبْ عُورَ الشُّعَابِ
وَمَنْ يَتَهَيَّبُ صُعُودَ الْجِبَالِ

أبو القاسم الشابي

إلى أمي وأبي، زوجتي وابنتي وإنحوتي، وإلى الشاخة ما بقي قاسيون شامخاً

إلى سورية الأعلى أهدي هذا الجهد

كلمة شكر

كل الشكر والتقدير لكل من ساهم أو ترك أثراً في إنجاز هذا العمل، وأخص بالذكر:

- د. حسان إبراهيم المعطاء الذي يفيض علماً ومعرفة، ود. رضوان اللحام المساند والناصح بإخلاص في جميع مراحل العمل، ود. نوفل إبراهيم أول من قدم لي المعرفة والخبرة في هذا المجال، ود. يوسف الخطيب الذي زودني بكثير من المعنويات، كما أتقدم بالشكر والعرفان لجميع الدكاترة في هذا الماجستير على ما قدموه من علم:
- د. عقيل سلوم، د. أشرف قطننة، د. لؤي منصور، د. مازن حسن، د. فواز موصللي، د. أيمن عبيد، د. أنس وبي، د. مازن صبح، مع كل التقدير والاحترام.

الخلاصة

إن استقرار خط النظر في العديد من تطبيقات الأنظمة الحرارية يعد مسألة حدية، يهدف هذا البحث إلى دراسة أثر التسامحات الميكانيكية وتغيرات درجة الحرارة على خط النظر، تقسم هذه الدراسة إلى قسمين رئيسين: في القسم التحليلي قمنا باستخراج علاقات رياضية تعطي قيم انزياح خط النظر بدلالة التغيرات التي تطرأ على العدسة في جسمية حرارية نتيجة للتسامحات الميكانيكية، وفي القسم التجريبي تأكدنا من صحة هذه العلاقات مخبرياً وقدمنا توضيحاً لمسار خط النظر نتيجة للتعويض الميكانيكي لأثر تغير درجة الحرارة على الجملة البصرية، ولدعم هذه الدراسة بمنتج قمنا بكتابة برنامج حاسوبي يقوم بالحسابات البصرية وحسابات خط النظر بناء على هذه الدراسة وتحليلها إحصائياً ليتمكن المصمم البصري والميكانيكي من التنبؤ بقيم انحراف خط النظر الممكنة في أي جسمية حرارية مشابهة نتيجة للتسامحات الميكانيكية.

Abstract

In many applications of thermal systems, line of sight (LOS) stability is a critical issue. This research aims to find out the effect of mechanical tolerances and temperature changes on the line of sight, this study is divided into two main sections. In the analytical study, equations were derived to calculate LOS deviation as a function of lens perturbation in a thermal system resulting from mechanical tolerances. In the practical section, experimental setups were designed in order to validate these equations experimentally providing clear demonstration of LOS movement during mechanical compensation of temperature change effect. To boost this study with a product a computer software was written to carry out the optical and LOS calculations based on this study on the one hand and to provide statistical analysis on the other hand, so the optical and mechanical designers can predict the potential LOS deviation values resulting from mechanical tolerances in any similar thermal objective.

جدول المحتويات

I.....	الخلاصة
1	هدف البحث
1	أهمية البحث
5	الدراسة النظرية
5	1.1. مقدمة
5	2.1. الدراسة المرجعية
6	3.1. أنظمة التصوير الحرارية Thermal Imaging Systems
7	1.3.1. المشهد الحراري Thermal scene
7	2.3.1. النظام البصري Optical System
10.....	1.2.3.1. قرينة الانكسار Refractive index
11.....	3.3.1. الحساس الحراري Infrared Detector
12.....	4.1. التصنيع والتجميع الميكانيكي البصري
12.....	1.4.1. التسامحات الميكانيكية
14.....	2.4.1. تجميع العدسات
18.....	5.1. تأثير تغير درجة الحرارة
20.....	1.5.1. طرق التعويض الحراري Athermalization
20.....	1.1.5.1. بصرية غير فعالة (Optically Passive)
21.....	2.1.5.1. ميكانيكية غير فعالة (Mechanically Passive)
22.....	3.1.5.1. ميكانيكية فعالة (Mechanically Active)
22.....	4.1.5.1. إلكتروميكانيكية فعالة (Electromechanically Active)
25.....	الدراسة التحليلية
25.....	1.2. مقدمة
27.....	2.2. ميلان العدسة Lens Tilt
30.....	3.2. انزياح العدسة عرضانياً Lens Decenter
32.....	3.2. دوران العدسة Lens Rotation
37.....	تصميم جسمية حرارية باستخدام Zemax

37.....	1.3. مقدمة
37.....	2.3. خطوات التصميم باستخدام Zemax
47.....	العمل التجريبي
47.....	1.4. مقدمة
47.....	2.4. تحضير التجربة
48.....	1.2.4. الصورة المقيسة
48.....	2.2.4. تحصيل الصورة
49.....	3.2.4. معالجة الصورة
50.....	4.2.4. تحديد مركز ثقل الصورة وحساب الانزياح فيها
51.....	3.4. تحويل الأبعاد بين الحساس الحراري والصورة الملتقطة
53.....	1.3.4. دراسة الارتبايات
54.....	4.4. اختبار الانزياح العرضاني للعدسة الثانية
57.....	1.4.4. دراسة الارتبايات
57.....	1.1.4.4. ارتبايات القيم النظرية
58.....	2.1.4.4. ارتبايات القيم المقيسة
60.....	5.4. اختبار دوران العدسة الثانية
62.....	1.5.4. دراسة الارتبايات
62.....	1.1.5.4. ارتبايات القيم النظرية
63.....	2.1.5.4. ارتبايات القيم المقيسة
64.....	6.4. اختبار تدوير العدسة الثانية حول محور حاضنها
69.....	العمل البرمجي
69.....	1.5. مقدمة
69.....	2.5. برنامج حساب وتحليل الأنظمة موضع الدراسة
73.....	1.2.5. التحقق من صلاحية الحسابات بالاستعانة ببرنامج Zemax
76.....	3.5. برنامج معالجة الصورة
76.....	1.3.5. المبدأ النظري:

83.....	الملحق A – تقدير الارتياح في حساب مركز ثقل البقعة.....
87.....	الملحق B – حساب الدائرة الأفضل مطابقة لمجموعة من النقاط.....
89.....	الملحق C – نصوص برامج دراسة الارتياحات بطريقة عددية باستخدام MATLAB.....
95.....	المراجع.....

قائمة الأشكال

- الشكل 1.1 1 انحراف خط النظر الناتج عن حركة عنصر حسب [1] Burge 5
- الشكل 1.1 2 النفوذية الجوية بدلالة طول الموجة..... 6
- الشكل 1.1 3 البنية العامة للأنظمة الحرارية..... 7
- الشكل 1.1 4 الخلوص الميكانيكي الناجم عن التسامحات في عنصرين متداخلين 13
- الشكل 1.1 5 تعريف بمقادير التسامحات لعنصرين متداخلين..... 13
- الشكل 1.1 6 استناد حاد للعدسة..... 15
- الشكل 1.1 7 استناد مماسي للعدسة..... 15
- الشكل 1.1 8 استناد كروي للعدسة..... 16
- الشكل 1.1 9 انزياح عرضاني في العدسة ناتج عن خطأ تصنيعي في العدسة [15] 16
- الشكل 1.1 10 انزياح عرضاني في العدسة ناتج عن خطأ تصنيعي في الحاضن [15] 17
- الشكل 1.1 11 انزياح عرضاني في العدسة ناتج عن وجود خلوص بين الحاضن والعدسة..... 17
- الشكل 1.1 12 ميلان في العدسة ناتج عن خطأ تصنيعي في العدسة [15] 17
- الشكل 1.1 13 ميلان في العدسة ناتج عن خطأ تصنيعي في الحاضن [15] 18
- الشكل 1.1 14 ميلان في العدسة ناتج عن وجود خلوص بين الحاضن والعدسة..... 18
- الشكل 1.1 15 تعويض ابتعاد المحرق بالطريقة الميكانيكية غير الفعالة [19] 21
- الشكل 1.1 16 زاوية الدوران الحاصل في العدسة نتيجة التعويض الميكانيكي بحركة انسحابية..... 22
- الشكل 2.1 1 مقطع ثنائي البعد للجملة البصرية في النظام الحراري قيد الدراسة..... 25
- الشكل 2.2 2 تعقب الشعاع الرئيسي في حالة ميلان العدسة..... 27
- الشكل 2.2 3 شكل مكبر لتوضيح الارتفاعات في الشكل 2.2..... 28
- الشكل 2.2 4 تعقب الشعاع الرئيسي في حالة انزياح العدسة عرضانياً..... 30
- الشكل 2.2 5 أثر دوران العدسة..... 32
- الشكل 3.1 1 نافذة General في برنامج Zemax 39
- الشكل 3.2 1 نافذة Wavelength data في برنامج Zemax 39
- الشكل 3.3 1 نافذة Field data في برنامج Zemax 39
- الشكل 3.4 1 نافذة Lens data editor في برنامج Zemax 40
- الشكل 3.5 1 نافذة Prescription data في برنامج Zemax 40
- الشكل 3.6 1 القيم التصميمية للنظام البصري المراد دراسته كنظام مرجعي 41
- الشكل 3.7 1 بيانات النظام البصري المراد دراسته كنظام مرجعي..... 41
- الشكل 3.8 1 تابع نقل التعديل للنظام المصمم 42
- الشكل 3.9 1 بقعة التشتت في النظام المصمم..... 43
- الشكل 3.10 1 توزيع الطاقة حول مركز بقعة التشتت الناتجة عن النظام المصمم 43

- الشكل 4. 1 النموذج العام للعمل التجريبي..... 47
- الشكل 4. 2 الصورة التي تشكلها الجملة البصرية قيد الاختبار لخرج المحقق الحراري على الحساس..... 49
- الشكل 4. 3.c صورة خرج الحساس (الشكل 2.4) بعد المعالجة..... 50
- الشكل 4. 4 علاقة انزياح الصورة على الحساس S_{FPA} بدلالة الانزياح المقيس S_{Im} 52
- الشكل 4. 5 صورة المونتاج المخبري لاختبار الانزياح العرضاني للعدسة الثانية..... 54
- الشكل 4. 6 شكل توضيحي لضبط المسافات في اختبارات العمل التجريبي..... 55
- الشكل 4. 7 علاقة انزياح الصورة على الحساس بدلالة الانزياح العرضاني للعدسة الثانية..... 56
- الشكل 4. 8 التوزيع الإحصائي لقيم ميل مجموعة نقاط اختبار الانزياح العرضاني المحسوبة من العلاقة التحليلية..... 58
- الشكل 4. 9 صورة المونتاج المخبري لاختبار دوران العدسة الثانية..... 60
- الشكل 4. 10 صورة شبكة المحقق المستخدم لقياس زوايا دوران العدسة..... 61
- الشكل 4. 11 علاقة انزياح الصورة على الحساس بدلالة دوران العدسة الثانية..... 62
- الشكل 4. 12 التوزيع الإحصائي لقيم ميل مجموعة نقاط اختبار دوران العدسة الثانية المحسوبة من العلاقة التحليلية... 63
- الشكل 4. 13 صورة المونتاج المخبري لاختبار تدوير العدسة الثانية حول محور حاضنها..... 65
- الشكل 4. 14 توزع نقاط احداثيات مركز ثقل البقعة في اختبار تدوير العدسة الثانية حول محور حاضنها..... 66
- الشكل 4. 15 توزع نقاط احداثيات مركز ثقل البقعة في اختبار تدوير العدسة وأفضل دائرة تمر منها..... 66
- الشكل 5. 1 الواجهة الرئيسية لبرنامج حساب وتحليل الأنظمة موضع الدراسة..... 69
- الشكل 5. 2 نافذة رسم المخطط البصري للجملة في برنامج حساب وتحليل الأنظمة موضع الدراسة..... 71
- الشكل 5. 3 الجزء الذي يظهر حسابات أثر التسامحات على خط النظر من واجهة برنامج حساب وتحليل الأنظمة... 71
- الشكل 5. 4 نافذة التحليل الإحصائي لقيم انحراف خط النظر في برنامج حساب وتحليل الأنظمة موضع الدراسة..... 72
- الشكل 5. 5 نافذة محاكاة التعويض الميكانيكي الفعال وتوضيح مسار خط النظر على الحساس خلال هذا التعويض.. 73
- الشكل 5. 6 حسابات انحراف خط النظر على تصميم الجسمية الاختبارية في برنامج حساب وتحليل الأنظمة..... 74
- الشكل 5. 7 إجراء كسر إحداثيات على العدسة الثانية باستخدام Zemax..... 74
- الشكل 5. 8 قيمة انحراف خط النظر نتيجة ميلان العدسة كما تظهر في نافذة Layout في Zemax..... 75
- الشكل 5. 9 قيمة انحراف خط النظر نتيجة الانزياح العرضاني للعدسة كما تظهر في نافذة Layout في Zemax... 75
- الشكل 5. 10 قيمة انحراف خط النظر نتيجة دوران العدسة كما تظهر في نافذة Layout في Zemax..... 75
- الشكل 5. 11 الواجهة الرئيسية لبرنامج معالجة الصورة..... 77
- الشكل 5. 12 صورة تبين حذف إضاءة بيكسلات تقل عن عتبة محددة باستخدام برنامج معالجة الصورة..... 78
- الشكل 5. 13 صورة محولة إلى تدرج الرمادي باستخدام برنامج معالجة الصورة..... 78
- الشكل 5. 14 حساب احداثيات مركز ثقل صورة باستخدام برنامج معالجة الصورة..... 78

قائمة الجداول

- جدول 1.1 .1 مقارنة بين بعض المواد البصرية المستخدمة في الأنظمة الحرارية..... 11
- جدول 1.3 .3 المواصفات الفنية للجسمية الحرارية قيد التصميم..... 37
- جدول 1.4 .4 نتائج قياسات اختبار تحويل الأبعاد بين الحساس والصورة الملتقطة..... 51
- جدول 2.4 .4 قيم الارتياح المحسوبة من أجل القياسات في اختبار تحويل الأبعاد بين الحساس والصورة..... 53
- جدول 3.4 .4 نتائج قياسات اختبار الانزياح العرضاني للعدسة الثانية..... 56
- جدول 4.4 .4 قيم الارتياح المحسوبة من أجل القياسات في اختبار الانزياح العرضاني للعدسة الثانية..... 59
- جدول 5.4 .4 نتائج قياسات اختبار دوران العدسة الثانية..... 61
- جدول 6.4 .4 قيم الارتياح المحسوبة من أجل القياسات في اختبار دوران العدسة الثانية..... 64
- جدول 7.4 .4 إحدائيات مركز ثقل البقعة الناتجة عن القياسات في اختبار تدوير العدسة الثانية حول محور حاضنها.... 65
- جدول 1.5 .5 نتائج التحقق من صلاحية الحسابات باستخدام Zemax..... 76

قائمة الاختصارات

BFL	Back Focal Length
DVR	Digital Video Recorder
EFFL	Effective Focal Length
FOV	Field of View
FPA	Focal Plane Array
ISO	International Organization for Standardization
LOS	Line of Sight
LWIR	Long Wave Infrared
MTF	Modulation Transfer Function
MWIR	Mid Wave Infrared
NIR	Near Infrared
TCE	Thermal Expansion Coefficient

قائمة الرموز

B	Back focal length
D	Decenter
f	Effective focal length
n	Refractive index
R	Curvature radius
α	Tilt angle
γ	Thermal glass constant
ε	Image Deviation
λ	Wavelength
θ	LOS Deviation

قائمة المصطلحات

Aperture stop	فتحة التوقف
Bandgap	فجوة طاقة
Clearance	خلوص
Curvature	تقوس
Decenter	انزياح عرضاني
Defocus	ابتعاد المحرق
Dispersion	تشتيت ضوئي
Emittance	إصدارية
Exitance	إضاءة
Field of view	حقل الرؤية
Greyscale	تدرج الرمادي
Image forming	تشكيل الصورة
Imaging system	نظام تصوير
Interchangeability	التبادلية
Lens Vertex	ذروة العدسة
Long Wave Infrared	المجال تحت الأحمر الطويل
Mid Wave Infrared	المجال تحت الأحمر المتوسط
Optical system	نظام بصري، جملة بصرية
Optimization	أمثلة
Paraxial	محوري
Photoexciting	تحريض ضوئي
Raytrace	تعقب الأشعة
Refractive Index	قرينة الانكسار
Retainer	حلقة تثبيت
Reticle	شبكة
Spatial frequency	التردد المكاني
Thermal expansion coefficient	معامل التمدد الحراري الخطي
Aperture stop	فتحة التوقف

هدف البحث

دراسة أثر التسامحات الميكانيكية وتغيرات درجة الحرارة على دقة المحور البصري في الجسميات الحرارية، واستخراج النماذج الرياضية لحساب انحراف المحور البصري، وكتابة برنامج حاسوبي يستخدم هذه النماذج الرياضية لحساب قيم الانحراف الناجمة عن التسامحات الميكانيكية، ولإجراء دراسة إحصائية للانحرافات الممكنة للمحور البصري ضمن ظروف ميكانيكية وحرارية محددة، ما يسمح بالتنبؤ بقيم الانحراف منذ المرحلة التصميمية بدلالة التسامحات الميكانيكية للتصميم الميكانيكي-البصري.

أهمية البحث

إن استقرار وتحديد المحور البصري هو أحد المسائل الحدية في العديد من الأنظمة البصرية في تطبيقات مختلفة، ونظراً لأهمية ثبات المحور البصري في تلك الأنظمة البصرية فإن المصممين والمصنّعين يميلون إلى فرض قيود كبيرة على التسامحات الميكانيكية وعلى العمليات الإنتاجية للحد من تغير المحور البصري ولكن التشدد في فرض تسامحات وقيود ميكانيكية قاسية على النظام البصري يزيد من التكاليف التصنيعية والإنتاجية بنسب كبيرة.

تأتي أهمية هذا البحث في حساب مقدار التغيرات التي يمكن أن تطرأ على المحور البصري نتيجة لعمليات التصنيع والتجميع الميكانيكي البصري، والتي يمكن التعامل معها من خلال عمليات الضبط، ومن ناحية أخرى في تقييم انحرافات المحور البصري التي تنجم عن التعويض الميكانيكي الفعال للأثر الحراري على الجسميات الحرارية والتي لا تكون عمليات الضبط مجدبة في التعامل معها، وبالتالي يتم تحديد التسامحات بناء على هذا التقييم بحيث يبقى المحور البصري ضمن مجال الدقة المسموح لوظيفة النظام.

أيضاً، يقدم هذا البحث نقطة استناد للعاملين في تصميم وتصنيع وإدارة العمليات الإنتاجية للأنظمة البصرية لمساعدتهم في تقدير إمكانية زيادة التسامحات الميكانيكية للحد الذي يضمن البقاء ضمن الحدود الوظيفية المقبولة الأمر الذي ينعكس انخفاضاً في التكاليف الإنتاجية وسرعة في الإنتاج.

إضافة لما سبق، فإن الأدبيات العلمية بشكل عام تفتقر إلى هذا النوع من الدراسات، ويمكن تبرير ذلك بأن فروع البحث الملحقه بالمؤسسات والشركات التي تعمل على إنتاج هذه الأنواع من الأنظمة تسعى إلى عدم نشر هذا النوع من المعرفة للمحافظة على ميزتها التنافسية في هذا المجال.

1

“Success depends upon
previous preparation, and
without such preparation
there is sure to be failure”

- Confucius

الدراسة النظرية

الدراسة النظرية

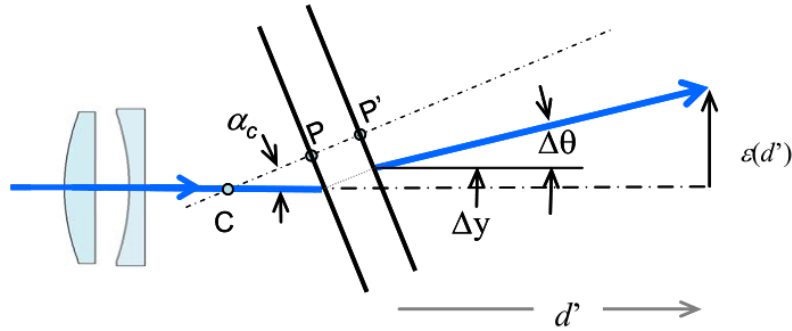
1.1. مقدمة

تنتشر أنظمة التصوير الحراري على نطاق واسع وتتزايد أهميتها بشكل كبير. تهدف هذه الدراسة النظرية إلى التعريف بأنظمة التصوير الحراري وأهم المفاهيم المرتبطة بها والمتصلة بهدف هذا البحث، واستعراض بعض المفاهيم المرتبطة بتصميم وتصنيع وتجميع الأنظمة البصرية، كما سيتم التعريف بالتسامحات الميكانيكية وكيفية توصيفها، وسيتم عرض تأثير درجة الحرارة على الأنظمة الحرارية وأهم طرق التعويض الحراري في الأنظمة البصرية.

2.1. الدراسة المرجعية

في ورقة بحثية تم عرضها في مؤتمر SPIE Optics + Photonics, 2006 بعنوان "An easy way to relate optical element motion to system pointing stability" توصل Burge^[1] إلى العلاقة التالية:

$$\varepsilon \cong \alpha_c \cdot PP' + \alpha_c \cdot \frac{CP}{f} d'$$



الشكل 1.1 انحراف خط النظر الناتج عن حركة عنصر حسب [1] Burge

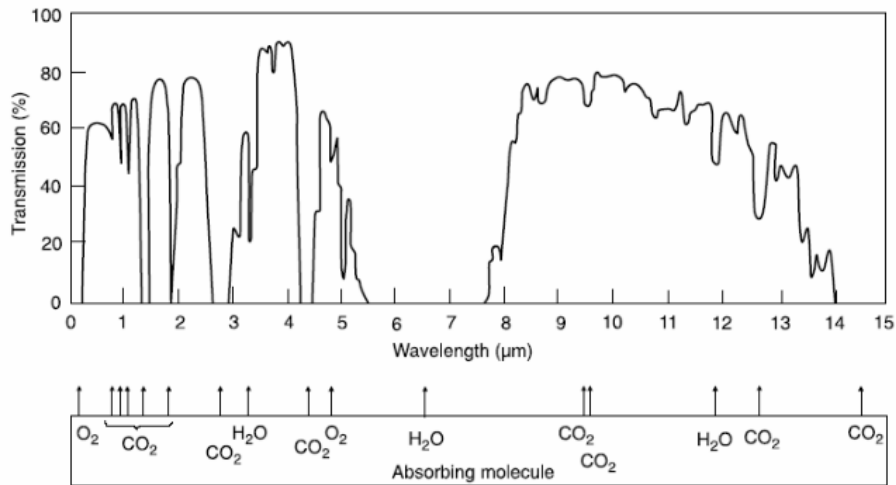
والتي تربط انزياح صورة ناتجة عن جملة بصرية في موقع يبعد d' عن النقطة الأساسية P' لعنصر بصري بدلالة دوران هذا العنصر بزاوية α_c حول نقطة C تبعد مسافة CP عن النقطة الأساسية P لهذا العنصر، كما عرض مجموعة من العلاقات التي تعطي انزياح الشعاع الرئيسي المحوري

الوارد على عنصر بصري نتيجة حركة هذا العنصر، ونشرت نفس العلاقات الواردة في هذه الورقة في كتاب لنفس الباحث [2] Schwertz and Burge.

كما وردت الإشارة إلى انحراف خط النظر في بعض المراجع كتعريف بالمقصود بهذا الانحراف Fischer et al. [3] أو ضمن سياق التسامحات على أنه من الممكن إيجاده من خلال تعقب الأشعة Bass [4].

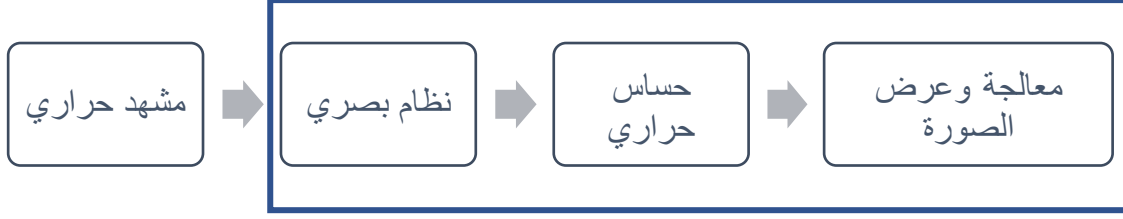
3.1. أنظمة التصوير الحرارية Thermal Imaging Systems

يقصد بأنظمة التصوير الحرارية، الأنظمة البصرية التي تعمل في المجالين الطيفيين تحت الأحمر المتوسط (MWIR) الذي تقع أطواله الموجية ضمن المجال (3-5 μm) وتحت الأحمر الطويل (LWIR) الذي تقع أطواله الموجية ضمن المجال (8-14 μm)، والسبب في استخدام هذين المجالين هو وجود النوافذ الجوية للغلاف الجوي للأرض والذي يسمح بمرور الأطوال الموجية الواقعة في هذين المجالين ويمتص بخار الماء بشكل أساسي الإصدارات الواقعة ضمن المجال (6-7 μm) ويمتص غاز ثاني أكسيد الكربون الإصدار عند الطول الموجي 4.2 μm وببين (الشكل 2.1) منحنى النفوذ الجوية بدلالة طول الموجة على مسافة 1 km مع تحديد أهم جزيئات الغاز التي تساهم في امتصاص الإصدار الحراري، وتكون المنابع بالنسبة لهذه الأنظمة منابع حرارية بدلاً من أن تكون منابع ضوئية مرئية [3]، وتتنوع تطبيقات الأنظمة الحرارية سواء أكانت مبردة أم غير مبردة ويمكن حصر تطبيقاتها في أربعة مجالات عريضة هي أنظمة المراقبة وأنظمة التصوير الشعاعي وأنظمة القياس الطيفي، وأنظمة دعم الرؤية في المركبات ويقصد بالأنظمة غير المبردة تلك الأنظمة التي تعمل في درجة الحرارة المحيطة (22°C) دون الحاجة إلى تزويدها بأنظمة تبريد [5].



الشكل 2.1 النفوذ الجوية بدلالة طول الموجة

يبين (الشكل 3.1) البنية العامة للأنظمة الحرارية



الشكل 3.1. البنية العامة للأنظمة الحرارية من الجيل الثالث

1.3.1. المشهد الحراري Thermal scene

تتعامل الأنظمة الحرارية مع منابع حرارية تصدر في المجال تحت الأحمر، وبشكل عام فإن كل جسم درجة حرارته أعلى من الصفر المطلق يشع إضاءة في المجال تحت الأحمر وفي تقريـب إصدار الجسم الأسود يعطي قانون انزياح فين Wien displacement law طول موجة الإصدار الطيفي الأعظمي لجسم درجة حرارته T مقدرة بالـ $6 \mu\text{m}$.

$$\lambda_{max} = 2898/T \quad (1.1)$$

وينتج هذا القانون من خلال إيجاد النهاية المحلية العظمى لقانون بلانك لإصدار الجسم الأسود بالنسبة لطول الموجة، حيث يعطى قانون بلانك بالشكل:

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \right) [W/m^2\mu\text{m}] \quad (2.1)$$

وفيه

$$c_1 = 3.7411 \times 10^8 [W \mu\text{m}^4/m^2]$$

$$c_2 = 1.4388 \times 10^4 [\mu\text{m} K]$$

λ : طول الموجة [μm]

T: درجة الحرارة المطلقة [K]

2.3.1. النظام البصري Optical System

يعرف النظام البصري بأنه مجموعة من المكونات التي تعمل مجتمعة لتأدية وظيفة محددة والتي تكون بأبسط حالاتها تشكيل صورة في موقع محدد، ويحدد النظام البصري في أنظمة التصوير

الحراري كلاً من حقل الرؤية وكمية الطاقة المجمعة وجودة الصورة، وبشكل عام تتشابه الجمل البصرية في أنظمة التصوير الحرارية والأنظمة المرئية من حيث الوظيفة وطريقة التصميم، وتختلف فيما بينها في بعض القضايا التصميمية ومنها أن عدد المواد المستخدمة في الأنظمة الحرارية أقل بكثير منها في الأنظمة المرئية، ونظراً لارتفاع تكاليف موادها وتميرها المنخفض نسبياً فإن هناك حاجة لتصميم العدسات بأقل سماكة ممكنة [7] [8] [9] [10].

وفيما يلي بعض المواد المستخدمة في تصنيع العناصر البصرية للأنظمة الحرارية:

• الجرمانيوم Germanium

يعتبر الجرمانيوم أكثر المواد استخداماً من بين المواد الحرارية على الرغم من تكلفته العالية، يستخدم في كل من المجالين تحت الأحمر المتوسط والطويل، ومن أهم الخصائص البصرية للجرمانيوم:

- قرينة الانكسار العالية: يتميز الجرمانيوم بقرينة انكسار كبيرة نسبياً ($n > 4$)، وتسمح هذه القيمة العالية باستخدام أنصاف أقطار كبيرة لتصنيع عناصر الجرمانيوم ما يساعد على تخفيض الزيوغ.
- تغير قرينة الانكسار مع تغير درجة الحرارة dn/dt : تتغير قرينة انكسار الجرمانيوم بشكل كبير مع تغير درجة الحرارة ($dn/dt = 0.000396 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) وهذه القيمة كبيرة جداً مثلاً عند مقارنتها بالزجاج ($0.0000036 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ من أجل زجاج BK7) وهذا التغير يسبب ابتعاداً كبيراً في المحرق مع تغير درجة الحرارة الأمر الذي يستدعي وجود حاجة تصميمية لتعويض هذه الابتعاد [3].

• السيليكون Silicon

يستخدم السيليكون في المجال تحت الأحمر المتوسط نظراً لأن امتصاصه عال بشكل كبير في المجال تحت الأحمر الطويل وبالرغم من أن قرينة انكساره أقل من الجرمانيوم إلا أنه من الممكن التحكم بالزيوغ عند استخدامه في العناصر البصرية، إضافة إلى أن تشتيته الضوئي منخفض نسبياً [3].

- كبريت التوتياء Zinc Sulfide

من المواد الشائعة التي تستخدم في كل من المجالين تحت الأحمر المتوسط والطويل، ويظهر في الطبيعة بلون أصفر محمر نصف شفاف، ومن أكثر المواد الشائعة تجارياً لكبريت التوتياء مادة تسمى Cleartran والتي تستخدم لعدسات في عدة مجالات طيفية بدءاً من المجال المرئي وصولاً إلى المجال تحت الأحمر الطويل [3].

- سيلينيد التوتياء Zinc Selenide

مشابه إلى حد ما لكبريت التوتياء، إلا أن قرينة انكساره أعلى بقليل وبنيته أضعف، ولذلك يتم في بعض الأحيان ترسيب طبقة رقيقة من كبريت التوتياء على طبقة أسماك من سيلينيد التوتياء للزيادة في مقاومة العنصر للظروف المحيطة، ومن أهم الميزات التي تميز سيلينيد التوتياء عن كبريت التوتياء هو أن امتصاصه أقل [3].

- AMTIR I and AMTIR III

وهي مواد زجاجية تصنع من الجرمانيوم والزرنيخ والسيلينيوم بنسب 55:12:33 تقريباً [3] ويبدأ التمرير في عائلة AMTIR من المجال تحت الأحمر القريب، وتبلغ قيمة تغير قرينة الانكسار مع تغير درجة الحرارة لمادة AMTIR I حوالي 25% من قيمتها في الجرمانيوم ما يجعلها أكثر جاذبية للاستخدام بالنظر إلى ابتعاد المحرق الناجم عن تغير درجة الحرارة [3].

- أكسيد الألمنيوم Sapphire

وهي مادة شديدة القساوة تمرر من المجال فوق البنفسجي وحتى المجال تحت الأحمر المتوسط، ومن الصفات الفريدة لهذه المادة النفوذية المرتفعة عند درجات الحرارة العالية نتيجة لإصداريتها الحرارية المنخفضة جداً في هذه الظروف، وبالتالي يمكن على سبيل المثال استخدامها في نوافذ الحجرات التي تتعرض لدرجات حرارة عالية [3].

يعرف المحور البصري لعدسة بأنه المستقيم المار من مركزي السطحين البصريين الكرويين [5]، ويعرف خط النظر بأنه الخط الوهمي الذي يحدد مسار انتشار الأشعة في النظام البصري وهو

يصل بين نقطة على سطح الحساس واتجاه نظر معين مقابل في المشهد. عند انتقاء نقطة على الصورة التي يشكلها الحساس كمرجع فهذا يحدد خط النظر الذي ينظر إليه هذا المرجع. ويعنى هذه البحث بدراسة التغيرات الناشئة على خط النظر المختار نتيجة للتسامحات الميكانيكية والبصرية.

1.2.3.1. قرينة الانكسار Refractive index

تعطى قرينة الانكسار لمادة بالعلاقة:

$$n = \frac{c}{V} \quad (3.1)$$

حيث c: سرعة الضوء في الخلاء

V: سرعة الضوء في المادة

وتبلغ قرينة انكسار الهواء تقريباً في الشروط الجوية الأرضية 1.0003 وقرينة انكسار الخلاء 1 تماماً وتسمى قيم قرينة الانكسار هذه بقرينة الانكسار المطلقة.

لأسباب تاريخية وعملية فإن مصممي العدسات نادراً ما يستخدمون قرينة الانكسار المطلقة، وبما أن معظم العدسات تستخدم في الهواء، وقبل وجود الحواسيب كان من الصعب استخدام قرينة انكسار الهواء أكبر من الواحد لذلك عمد مصممو العدسات إلى إعادة تعريف قرينة انكسار الهواء في الظروف الجوية العادية بحيث تساوي الواحد تماماً وللمحافظة على صلاحية قانون Snell قاموا بتقسيم كل من طرفي العلاقة على قرينة انكسار الهواء المطلقة وبالتالي استخدموا قرينة الانكسار النسبية والتي تساوي نسبة قرينة الانكسار المطلقة للمادة إلى قرينة الانكسار المطلقة للهواء، اليوم وبوجود الحواسيب وبالرغم من عدم وجود حاجة إلى هذه المناورة إلى أن التطبيق هذا مازال مستمراً والقيم المنشورة لقرائن الانكسار هي القيم النسبية، ويمكن أن يسبب استخدام قرائن الانكسار النسبية بعض الأخطاء في تحليل الأنظمة وخصوصاً عندما يكون هناك تغيرات محيطية (درجة حرارة، ضغط)، ولذلك تقوم بعض البرامج الحاسوبية بتحويل جميع قيم قرائن الانكسار إلى القيم المطلقة [13].

في (الجدول 1.1) مقارنة بين عدد من المواد البصرية المستخدمة في الأنظمة الحرارية من حيث قرينة الانكسار عند الطولين الموجيين (4, 10 μ m) وقيمة تغير قرينة الانكسار مع تغير درجة الحرارة درجة مئوية واحدة [3].

جدول 1.1 مقارنة بين بعض المواد البصرية المستخدمة في الأنظمة الحرارية

المادة	قرينة الانكسار (4 μ m)	قرينة الانكسار (10 μ m)	dn/dt
الجرمانيوم	4.0243	4.0032	0.000396
السيليكون	3.4255	3.4179	0.000150
كبريتيد الزنك	2.2520	2.2005	0.0000433
سيلينيد الزنك	2.4331	2.4065	0.000060
AMTIR I	2.5141	2.4976	0.000072
أكسيد الألمنيوم	1.6753	لا يمرر	0.000010

3.3.1 الحساس الحراري Infrared Detector

الحساسات الحرارية هي مبدلات إشارة تحول الأشعة تحت الحمراء إلى إشارة كهربائية تتناسب مع الطاقة الكلية الواردة على سطح الحساس، وتصنف هذه الحساسات بحسب آلية العمل إلى نوعين رئيسيين [3] [11]:

- الحساسات الكمومية (الفوتونية) Photon detectors
تحول الفوتونات إلى حوامل حرة للتيار من خلال التحريض الضوئي للإلكترونات ونقلها عبر الفجوة الطاقية إلى عصابة الناقلية في نصف الناقل، ما ينجم عنه تغير في تيار أو جهد أو مقاومة الحساس [11].
- الحساسات الطاقية (الحرارية) Thermal detectors
تقوم آلية العمل فيها على تسخين العناصر الحساسة من خلال امتصاص طاقة الأشعة تحت الحمراء ما يسبب تغيراً في خصائصها الفيزيائية والتي يتم كشفها عبر آلية خارجية، يعمل هذا النوع من الحساسات في درجة الحرارة الطبيعية وبالتالي لا يحتاج إلى تبريد ويمتلك مجال استجابة طيفية واسع، إلا أن استجابته أبطأ مقارنة بالحساسات الفوتونية [11].

ويمكن أن تكون الحساسات الحرارية أحادية العنصر أو على شكل مصفوفة عناصر أحادية أو ثنائية وتسمى الأخيرة بالحساسات المصفوفية (FPA) Focal plane arrays [8]، وتزود الأنظمة التي تستخدم الحساسات أحادية العنصر أو ذات المصفوفة الأحادية بأنظمة مسح للحصول على صورة المشهد ضمن حقل الرؤية كاملاً.

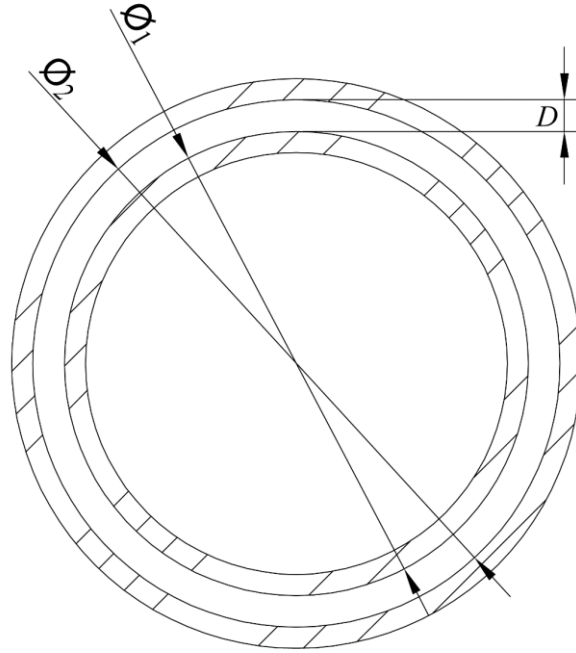
4.1. التصنيع والتجميع الميكانيكي البصري

يُمر تصميم الأنظمة البصرية سواء كان هذا التصميم بغرض الإنتاج الإفرادي أم الكمي للأنظمة بثلاث مراحل رئيسية متداخلة في عملها للوصول إلى الشكل النهائي للنظام البصري، هذه المراحل هي تصميم النظام وتصميم العناصر البصرية والهندسة البصرية للنظام، وتقع على عاتق مصمم النظام المسؤولية الكبرى لكامل المشروع والذي يجب أن يحقق الوظيفة المطلوبة وبأقل تكلفة ممكنة. بعد أن تكون بنية النظام بالكامل قد تم تحديدها يأتي دور تصميم العناصر البصرية لتحديد المعلومات التفصيلية لتصنيع كل عنصر بصري في النظام، وفي المرحلة الأخيرة يهتم المهندس البصري بتصميم الأجزاء الميكانيكية وتحديد ضوابط عمليات التصنيع والتجميع والاختبار حتى وصول النظام البصري للاستثمار محققاً وثوقية أداء الوظيفة المطلوبة للنظام [11]. ويعتبر تحديد التسامحات في الأنظمة البصرية أحد أهم المواضيع التي يعنى بها التصميم البصري، فعلى اعتبار أنه من غير الممكن تصنيع أي مكون بشكل مثالي يبقى تحديد مجال مقبول من الأبعاد والمواصفات أمراً مهماً لضمان تحقيق الوظيفة المطلوبة [4].

1.4.1.1. التسامحات الميكانيكية

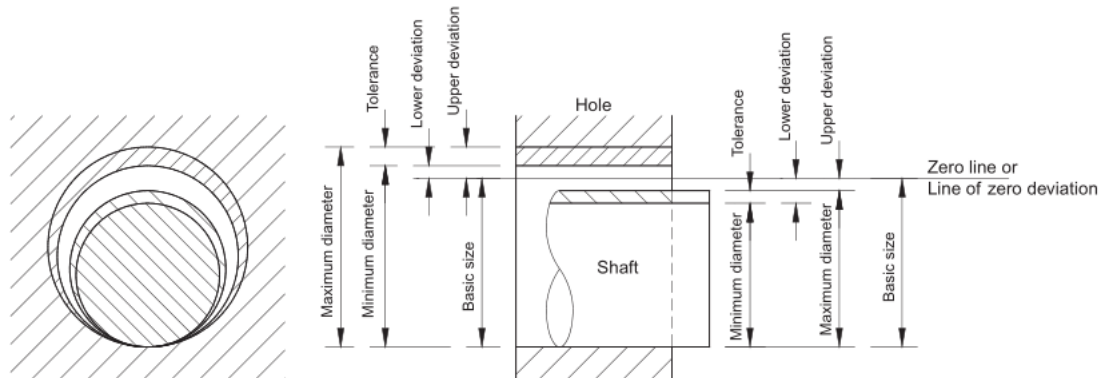
تعرف التسامحات الميكانيكية بأنها التغير المسموح في أبعاد عنصر ميكانيكي خلال عملية تصنيع العنصر، وتأتي أهمية ضبط أبعاد العناصر الميكانيكية لضمان التبادلية بين العناصر المختلفة وإمكانية تجميعها، وتحدد التسامحات بالنتيجة مقدار الخلوص بين العناصر المتداخلة (الشكل 4.1)، وتعرف التسامحات على شكل مجالات وقد حددت المنظمة العالمية للمعايرة ISO القيم القياسية أو ما يعرف بالتسامحات العامة بناء على نوع التطبيق وفيها يتم ترميز من خلال رموز مثل H9/d9 يدل هذا الترميز على مجال التسامح للعنصرين المتداخلين حيث يستخدم الحرف الإنكليزي الكبير للدلالة على تسامح العنصر الخارجي (الثقب) والحرف الصغير على تسامح

العنصر الداخلي (المحور) ويستخدم عادة هذا التسامح بحسب دليل ISO من أجل الخلوصات لعدة عناصر متداخلة وتعرف قيم مجالات التسامحات العامة في جداول خاصة، مثلا يمكن الحصول على H9/d9 من الجدول BS4500 4500A [12].



الشكل 4.1 الخلوص الميكانيكي الناتج عن التسامحات في عنصرين متداخلين

نعرف عند تحديد تسامحات لعنصرين متداخلين مجموعة من المقادير المرتبطة بأبعاد العنصرين والتي يوضحها (الشكل 5.1) [12].



الشكل 5.1 تعريف بمقادير التسامحات لعنصرين متداخلين

هذه المقادير هي:

- البعد: تعبير عددي عن بعد محدد في العنصر.
- الحجم الفعلي: بعد العنصر نتيجة القياس.
- حدود البعد: الأبعاد العظمى والصغرى المسموحة.
- الحد الأعظمي للبعد: القيمة الأكبر بين حدي البعد.
- الحد الأصغر للبعد: القيمة الأصغر بين حدي البعد.
- البعد الأساسي: القيمة المرجعية للبعد والتي تضاف إليها حدود البعد.
- الانحراف: الفرق الجبري بين البعد والبعد الأساسي.
- الانحراف الفعلي: الفرق الجبري بين البعد الفعلي والبعد الأساسي.
- الانحراف الأعلى: الفرق الجبري بين الحد الأعظمي للبعد والبعد الأساسي.
- الانحراف الأدنى: الفرق الجبري بين الحد الأصغر للبعد والبعد الأساسي.
- التسامح: الفرق بين الحد الأعظمي للبعد والحد الأصغر للبعد.
- المحور Shaft: اصطلاح يستخدم للتعبير عن المواصفات الخارجية لجزء.
- الثقب Hole: اصطلاح يستخدم للتعبير عن المواصفات الداخلية لجزء.

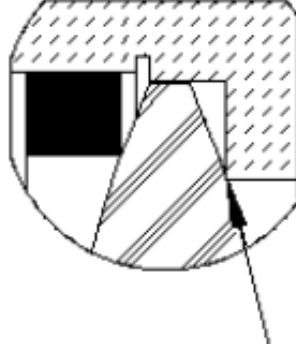
2.4.1. تجميع العدسات

يقصد بعملية تجميع العدسات تركيب العدسة ضمن حاضنها أو ضمن الهيكل المعدني للنظام، مع تحقيق هدفين رئيسيين هما مركزة العدسة وتحقيق المسافات الهوائية ضمن الجملة البصرية، وتشمل عملية التجميع استخدام عناصر ربط وتثبيت ميكانيكية إضافة إلى استخدام اللواصق، ويمكن حصر نقاط الاستناد بين عدسة متناظرة دورانياً والحاضن أو الهيكل الميكانيكي في ثلاث مناطق هي: الإطار الاسطواني للعدسة أو سطح العدسة أو منطقة مستوية (شطفة) على محيط العدسة [4]، وتراعي عملية تجميع العدسات ما يلي:

- تثبيت العدسة في موضعها بالدقة المطلوبة.
- المحافظة على شكل العدسة وعدم التأثير في خصائصها البصرية من خلال الإجهاد الميكانيكي.
- تحقيق الضبط المطلوب للعناصر البصرية.

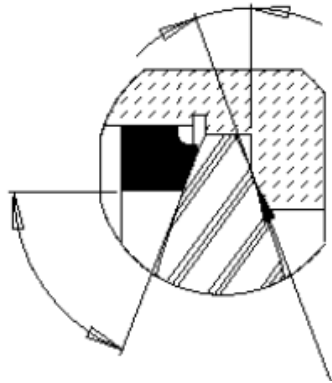
- حماية العناصر البصرية من تأثير الصدم المتوقع على النظام.
 - ضمان محافظة النظام على تآدية وظيفته في مختلف التغيرات البيئية (درجة حرارة، هز)
- وتتلخص أنواع استناد العدسة مع الحاضن عندما يكون الاستناد على سطح العدسة بالحالات التالية [14]:

- استناد حاد:
- في هذه الحالة يستند سطح العدسة على زاوية حادة في كتف الاستناد أو حلقة التثبيت (الشكل 6.1)، ويتميز هذا النوع من الاستناد بأنه يؤمن أكبر دقة في تحديد موضع العدسة، إلا إنه يعرض العدسة لإجهاد ميكانيكي كبير نسبياً.



الشكل 6.1 استناد حاد للعدسة

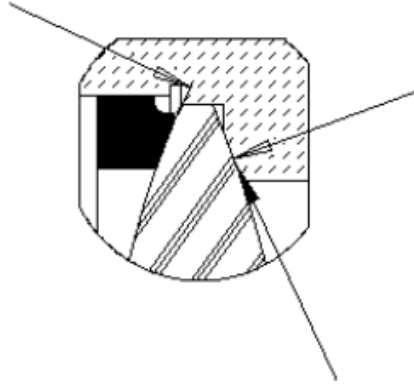
- استناد مخروطي أو مماسي
- في هذه الحالة يستند سطح العدسة على سطح مستوي في كتف الاستناد أو حلقة التثبيت (الشكل 7.1)، ويخفف هذه النوع من الاستناد الإجهاد الميكانيكي على العدسة، في المقابل تزداد صعوبة ضبط مسافة العدسة.



الشكل 7.1 استناد مماسي للعدسة

- استناد كروي

في هذه الحالة يستند سطح العدسة على سطح كروي في كتف الاستناد أو حلقة التثبيت نصف قطر تقوسه يساوي إلى نصف قطر تقوس سطح العدسة (الشكل 8.1)، وينخفض الإجهاد الميكانيكي على العدسة في هذه النوع من الاستناد للحد الأدنى، ويصعب قياس موقع العدسة في هذا النوع من الاستناد، إضافة إلى صعوبة تصنيعه.



الشكل 8.1 استناد كروي للعدسة

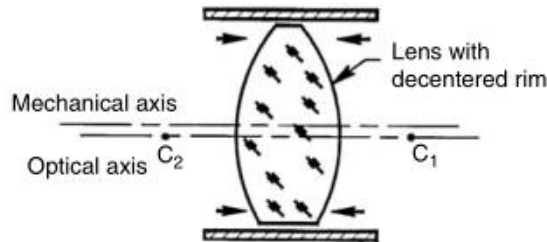
تسبب الخلوصات والأخطاء الناتجة عن التسامحات الميكانيكية والتسامحات التصنيعية للعدسات اختلافاً في مواقع العدسات عن الحالة التصميمية، ويمكن أن تظهر هذه الاختلافات في مرحلة تجميع النظام أو أن تطرأ نتيجة تفاعل النظام مع الظروف المحيطة وما يتعرض له خلالها من صدم أو هز أو رج، وتتخلص التغيرات التي تطرأ على العدسات في النظام بالحالات التالية:

- ابتعاد طولاني وفق محور النظام (Despace)

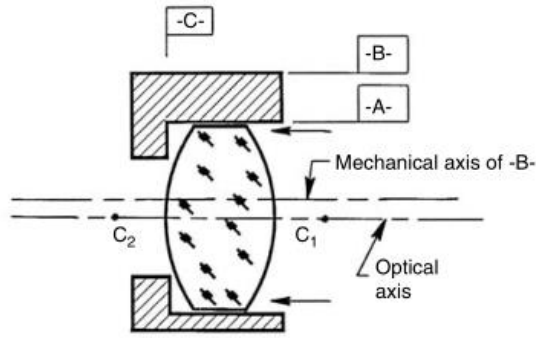
- انزياح عرضاني حول محور النظام (Decenter)

ينتج عن وجود انزياح تصنيعي في المحور البصري للعدسة عن محورها الميكانيكي (الشكل 9.1)، أو عن وجود خطأ تصنيعي في حاضن العدسة (الشكل 10.1)، أو عن

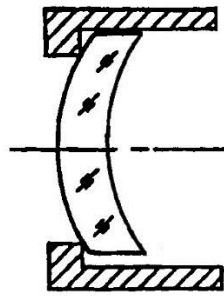
وجود خلوص بين العدسة والحاضن (الشكل 11.1)



الشكل 9.1 انزياح عرضاني في العدسة ناتج عن خطأ تصنيعي في العدسة [15]



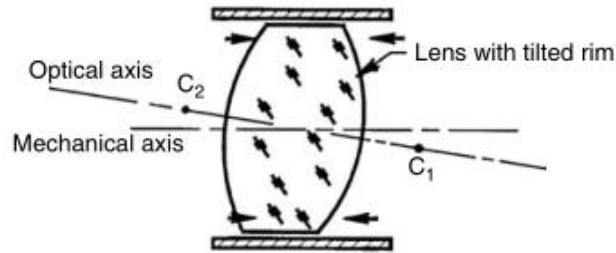
الشكل 10.1 انزياح عرضاني في العدسة ناتج عن خطأ تصنيعي في الحاضن [15]



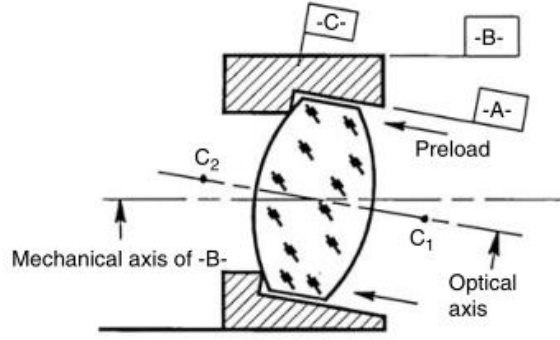
الشكل 11.1 انزياح عرضاني في العدسة ناتج عن وجود خلوص بين الحاضن والعدسة

• ميلان العدسة (Tilt)

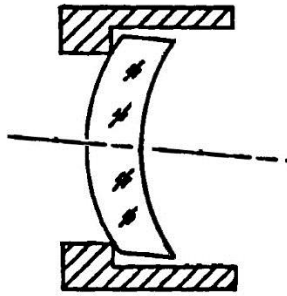
ينتج عن وجود انحراف تصنيعي في المحور البصري للعدسة عن محورها الميكانيكي (الشكل 12.1)، أو عن وجود خطأ تصنيعي في حاضن العدسة (الشكل 13.1)، أو عن وجود خلوص بين العدسة والحاضن (الشكل 14.1)



الشكل 12.1 ميلان في العدسة ناتج عن خطأ تصنيعي في العدسة [15]



الشكل 13.1 ميلان في العدسة ناتج عن خطأ تصنيعي في الحاضن [15]



الشكل 14.1 ميلان في العدسة ناتج عن وجود خلوص بين الحاضن والعدسة

يضاف إلى التغيرات السابقة دوران العدسة والذي يقصد به دوران العدسة حول نقطة بعيدة عن ذروتها، وهذا الدوران في تقريب الزوايا الصغيرة يكافئ انزياحاً عرضانياً مضافاً إليه ميلان.

وبشكل عام تحدد طبيعة الاستناد وقيمة التسامح والأبعاد الهندسية مقدار التغير من بين التغيرات المذكورة، ويكون تأثير التغير الناتج على شكل خطأ في خط النظر، ويقاس هذا الخطأ في فضاء الصورة على شكل انزياح عرضاني في مستوي الصورة وإذا قيس في فضاء الجسم فإنه يظهر على شكل انزياح زاوي للجسم [2].

5.1. تأثير تغير درجة الحرارة

عند تغير درجة الحرارة التي يتعرض لها أي نظام بصري فإن هذا التغير ينعكس تمدداً أو تقلصاً في العناصر البصرية وفي الحواضن الميكانيكية وتغيراً في قرينة انكسار مادة العدسات، وتكمن المشكلة الرئيسية في الأنظمة الحرارية في التغير الكبير لقرينة الانكسار مع درجة الحرارة، ينعكس التأثير الحراري في الأنظمة البصرية ابتعاداً في المحرق بمقدار يقدر بأضعاف الحد المسموح وفق معيار ريليه (العلاقة 4.1) [1]، الأمر الذي يستدعي تعويض هذا الابتعاد بإحدى طرق التعويض.

$$\Delta Z = \pm 2\lambda \left(\frac{f}{\#}\right)^2 \quad (4.1)$$

تخضع جميع الأبعاد الهندسية في النظام للتمدد وفق علاقة التمدد الخطي:

$$L = L_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (5.1)$$

حيث

L_0 : البعد عند درجة الحرارة T_0

α : معامل التمدد الحراري الخطي

ΔT : مقدار التغير في درجة الحرارة

وكما ذكر آنفاً فإن تغير درجة الحرارة يسبب تغيراً في قرينة الانكسار يعطى بالعلاقة [16]:

$$\Delta n_{abs}(\lambda, T) = \frac{n^2(\lambda, T_0) - 1}{2n(\lambda, T_0)} \left(D_0 \cdot \Delta T + D_1 \cdot \Delta T^2 + D_2 \cdot \Delta T^3 + \frac{E_0 \cdot \Delta T + E_1 \cdot \Delta T^2}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2} \right) \quad (6.1)$$

حيث

$D_0, D_1, D_2, E_0, E_1, \lambda_{TK}$: ثوابت تعتمد على نوع الزجاج

T_0 : درجة الحرارة المرجعية (20°C)

T : درجة الحرارة [$^\circ\text{C}$]

λ : طول الموجة [μm]

فتكون قرينة الانكسار المطلقة

$$n_{abs}(\lambda, T) = n_{abs}(\lambda, T_0) + \Delta n_{abs}(\lambda, T) \quad (7.1)$$

وتعطي علاقة Sellmeier4 قرينة الانكسار النسبية للجرمانيوم [17]:

$$n^2 = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E} \quad (8.1)$$

حيث تعطى الثوابت A, B, C, D, E عند درجة حرارة محددة ويمكن الحصول على قيم هذه الثوابت

بالإضافة إلى D_0 الوارد في العلاقة (6.1) من خلال كتالوج Infrared في برنامج Zemax.

وتعطي قرينة انكسار الهواء

$$n_{air} = 1 + \frac{(n_{ref} - 1)P}{1 + (T - 15)(3.4785 \times 10^{-3})} \quad (9.1)$$

حيث

$$n_{ref}(15^\circ C, P_0) = 1 + \left(6432.8 + \frac{2949810\lambda^2}{146\lambda^2 - 1} + \frac{25540\lambda^2}{41\lambda^2 - 1} \right) 10^{-8} \quad (10.1)$$

λ : طول الموجة [μm]

وتساوي قرينة انكسار الهواء في المجال تحت الأحمر الطويل عند درجة حرارة 20°C وضغط جوي 1 atm وطول موجة 10 μm:

$$n_{air} = 1.000268$$

وبالتالي لحساب قرينة الانكسار النسبية نكتب (العلاقة 7.1) بالشكل:

$$n_{abs}(\lambda, T) = n_{rel}(\lambda, T_0) \times n_{air}(\lambda, T_0, P) + \Delta n_{abs}(\lambda, T) \quad (11.1)$$

ويقسمة طرفي العلاقة على $n_{air}(\lambda, T, P)$ تنتج قرينة الانكسار النسبية:

$$n_{rel}(\lambda, T) = \frac{n_{rel}(\lambda, T_0) \times n_{air}(\lambda, T_0, P) + \Delta n_{abs}(\lambda, T)}{n_{air}(\lambda, T, P)} \quad (12.1)$$

1.5.1 طرق التعويض الحراري Athermalization

يهدف التعويض الحراري إلى تعويض ابتعاد المحرق الناجم عن تغير درجة الحرارة، ويتم هذا التعويض بعدد من الطرق نذكر منها التعويض بالطرق البصرية والتعويض بالطرق الميكانيكية، وتعمل هذه الآليات على تعويض الابتعاد عن المحرقة الناجم عن تغير درجة الحرارة، ومن الجدير بالذكر أن الآلية المستخدمة للمحافظة على المحرقة تعتمد بشكل أساسي على التطبيق الذي يستخدم فيه النظام الحراري المطلوب، وتندرج هذه الآليات ضمن عدة فئات:

1.1.5.1 بصرية غير فعالة (Optically Passive)

تعتمد هذه الآلية على تعويض ابتعاد المحرق من خلال الاختيار المناسب لمواد العدسات التي تعمل على تعويض الانزياح الحراري للمحرق بحيث تحقق الشرط [18] [4]:

$$\sum_{i=1}^j (\gamma_i \phi_i) + \phi \alpha_h = 0 \quad (13.1)$$

حيث: γ_i : الثابت الحراري لمادة العدسة i .

ϕ_i : قوة العدسة i .

α_h : معامل التمدد الحراري الخطي لهيكل الجملة.

ومن ميزات هذه الطريقة: عدم الحاجة لعناصر متحركة وبالتالي زيادة الوثوقية، وإمكانية تبسيط بناء النظام الأمر الذي يؤدي إلى الحصول على تصميمات تتميز بصغر الحجم وخفة الوزن، أما أهم عيوب هذه الطريقة، هي الحاجة الملزمة لوجود عدة عدسات في التصميم من مواد ذات ثمن مرتفع [19].

2.1.5.1. ميكانيكية غير فعالة (Mechanically Passive)

تبنى هذه الآلية على تحريك عدسة أو أكثر بمقدار يعوض ابتعاد المحرق الناجم عن تغير درجة الحرارة اعتماداً على معامل التمدد الحراري للمواد الميكانيكية المستخدمة في بناء التصميم كفواصل مسافة وحواضن، ومن ميزات هذه الطريقة: البساطة وإمكانية الحصول على دقة عالية وسهولة التجميع، أما عيوبها فهي: أن التصميمات المبنية وفق هذه الطريقة من أجل بعض التطبيقات تكون ذات حجم ووزن كبيرين إضافة إلى صعوبة تكتيمها ومعاناتها من العطالة الحرارية كما أنها ميكانيكياً ذات وثوقية أقل [19].

عند استخدام مادتين مختلفتين ذات معاملي تمدد حراري مختلفين في تشكيل بنى ميكانيكية على شكل أعواد أو أسطوانات يمكن تحريك عنصر التعويض بشكل مباشر مع ملاحظة أن هذه البنى يجب أن تكون بطول كاف للحصول على التحريك المطلوب.

بفرض أنه تم دمج فواصل مسافة أطوالها L_1 و L_2 موادها ذات معامل تمدد حراري α_1 و α_2 فإن المحافظة على المحرق تتطلب أن تتحقق العلاقة (الشكل 15.1):

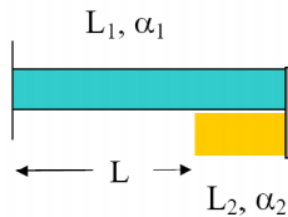
$$\alpha_1 L_1 + \alpha_2 L_2 = 0 \quad (14.1)$$

$$L_1 + L_2 = L \quad (15.1)$$

وبفرض استخدمنا مواد ذات معامل تمدد أكبر من الصفر فإن ذلك يتحقق كما هو مبين فيما يلي:

$$\alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2 = 0 \quad (16.1)$$

$$L_1 - L_2 = L \quad (17.1)$$



الشكل 15.1. تعويض ابتعاد المحرق بالطريقة الميكانيكية غير الفعالة [19]

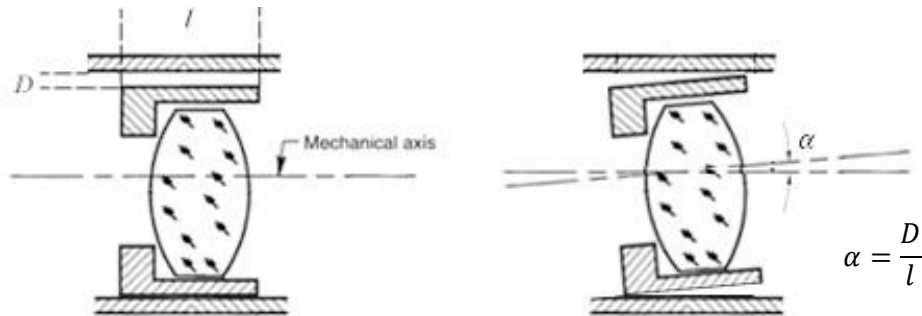
3.1.5.1 ميكانيكية فعالة (Mechanically Active)

تعتبر هذه الطريقة من أبسط طرق تعويض الابتعاد الحراري للمحرك، وتعتمد على تحريك عنصر بصري أو أكثر من خلال آلية ميكانيكية تسمح بتحريك العنصر وفق محور النظام [4]، وعادة ما يكون تحريك العدسة وفق حركة دورانية أو حركة انسحابية، ويبقى تصميم آلية ميكانيكية لتحريك العدسة وفق حركة دورانية أقل تعقيداً.

4.1.5.1 إلكتروميكانيكية فعالة (Electromechanically Active)

تعتمد هذه الآلية على قيادة عناصر التعويض (محرك كهربائي) اعتماداً على إشارات معلومات واردة من حساسات حرارية وتتناسب هذه الآلية مع الأنظمة المعقدة مثل عدسات التكبير ومن أهم ميزات استخدام هذه الآلية: التغلب على التغيرات الحرارية ضمن النظام وخطأ أقل باعتبار أن الحساس يمكن أن يوضع على عنصر التعويض مباشرة، أما عيوبها فهي: التعقيد وانخفاض الوثوقية [4] [19].

التعويض الميكانيكي الفعال هو أكثر طرق التعويض الحراري شيوعاً، ويسبب هذا التعويض انحرافاً في خط النظر نتيجة للاضطراب الحاصل في موقع العنصر البصري الذي يتم تحريكه، فإذا كان التعويض وفق حركة دورانية فإن التغيرات الموجودة أصلاً في موقع العدسة سيتغير اتجاهها مع تدوير العدسة، وإذا كان التعويض وفق حركة انسحابية فإن هذا التعويض ممكن أن يضيف دوراناً بزاوية تتعلق بطول الحاضن ومقدار الخلوص بين الحاضن والهيكل (الشكل 16.1)، وبالتالي فإن السيطرة على انحراف خط النظر تقتضي دراسة تأثير هذا الاضطراب على خط النظر بهدف تقييم أثر التسامحات الميكانيكية عليه وبالنتيجة تحديد قيم هذه التسامحات بما يحافظ على الدقة المطلوبة للنظام البصري.



الشكل 16.1 زاوية الدوران الحاصل في العدسة نتيجة التعويض الميكانيكي بحركة انسحابية

2

“However difficult life may seem, there is always something you can do and succeed at”

- Stephen Hawking

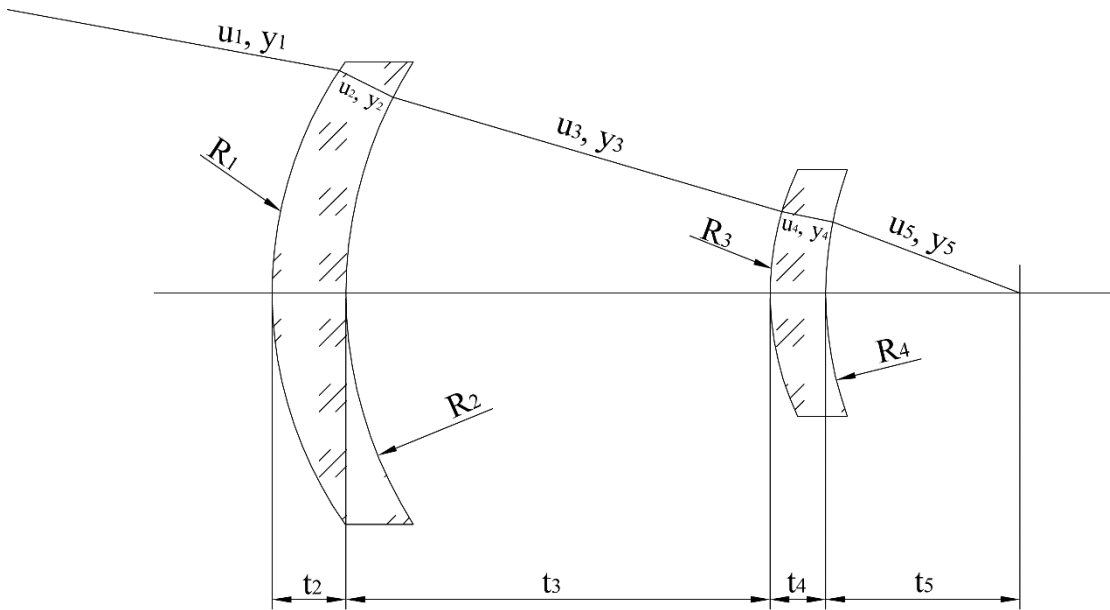
الدراسة التحليلية

الدراسة التحليلية

1.2. مقدمة

سنقوم في هذا الفصل باستخراج علاقات تحليلية لحساب مقدار الانزياح في خط النظر بتأثير التسامحات الميكانيكية في النظام، ويتكون النموذج الذي سيتم إجراء الدراسة التحليلية عليه من عدستين، وهو النموذج الشائع في تصميم الجسميات الحرارية غير المبردة بشكل عام، وستبنى الدراسة على فرضية أن النقاط والمحاور للعدسة الأمامية أو الأولى هي المرجعية وبالتالي فإن جميع الأخطاء في العدسة الخلفية أو الثانية ستكون منسوبة إلى العدسة الأولى ولكونها ثابتة يمكن تعويض انحراف خط النظر الناتج عن تسامحاتها.

يبين (الشكل 1.2) النموذج قيد الدراسة والذي هو عبارة عن مقطع ثنائي البعد في المستوي $y-z$ للجملة البصرية موضع الدراسة مع الأخذ بعين الاعتبار فرضية التناظر الدوراني للجملة مع تحديد مواصفاتها الهندسية والمقادير التحليلية لمنهجية تعقب الأشعة (ynu raytrace) التي سيتم اعتمادها في إجراء هذه الدراسة ضمن المنطقة المحورية.



الشكل 1.2. مقطع ثنائي البعد للجملة البصرية في النظام الحراري قيد الدراسة

ويعتمد اصطلاح الإشارات في عملية تعقب الأشعة الوارد في Smith,^[20] كما يلي:

- أنصاف أقطار التقوس موجبة عندما يكون مركز السطح إلى يمين قمته
- المسافات إلى يمين السطح موجبة وإلى يسار السطح سالبة

- زوايا الورود والانكسار موجبة إذا دار الشعاع مع عقارب الساعة للوصول إلى الناظم
- زوايا الميل موجبة إذا دار الشعاع مع عقارب الساعة للوصول إلى المحور
- ينتقل الضوء من اليسار إلى اليمين

انطلاقاً من علاقات تعقب الأشعة

$$n_k u_k = n_{k-1} u_{k-1} - y_{k-1} (n_k - n_{k-1}) C_{k-1} \quad (1.2)$$

$$y_k = y_{k-1} + t_k u_k \quad (2.2)$$

حيث:

n_k : قرينة انكسار الوسط قبل السطح k.

u_k : زاوية ورود الشعاع مع المحور إلى السطح k [Rad].

y_k : ارتفاع الشعاع عن المحور عند السطح k [mm].

C_k : تقوس السطح k [mm].

t_k : المسافة المحورية بين السطح k والسطح السابق [mm].

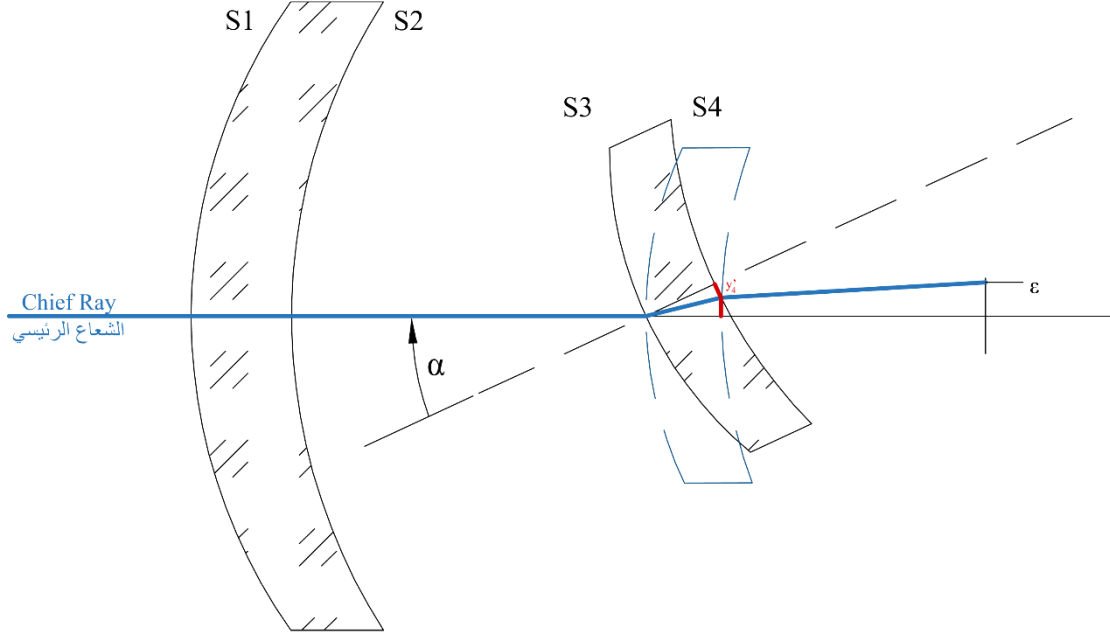
وبالانتقال عبر السطوح البصرية وصولاً إلى موقع الحساس فإن قيمة ارتفاع الشعاع عن المحور ستعني مقدار الانزياح ε الذي يمثل انحراف خط النظر نتيجة الأخطاء الميكانيكية، وكما ذكرنا فإن جميع أخطاء التصنيع والتجميع الميكانيكي البصري يمكن أن تتعكس على العناصر البصرية بأحد الحالات التالية:

- ميلان العدسة Lens Tilt
- انزياح العدسة طولياً Lens Despace (لا يسبب بمفرده انحرافاً في خط النظر)
- انزياح العدسة عرضياً Lens Decenter
- دوران العدسة Lens Rotation

وفيما يلي استعراض تأثير كل حالة من الحالات السابقة على المحور البصري في الجمل البصرية.

2.2. ميلان العدسة Lens Tilt

يقصد بميلان العدسة الحالة التي تدور فيها العدسة حول ذروة السطح الأول في أحد الاتجاهات، فإذا دارت العدسة حول ذروة السطح الأول بزاوية α يتشكل لهذه العدسة محور جديد يميل عن محور الجملة بنفس الزاوية (الشكل 2.2).



الشكل 2.2. تعقب الشعاع الرئيسي في حالة ميلان العدسة

من خلال تعقب الشعاع الرئيسي الوارد على محور الجملة البصرية بزاوية $u_1 = 0$ ، ينتقل الشعاع عبر الجملة دون انحراف حتى السطح S3.

وتكون قيم مقادير تعقب الأشعة عند السطحين S3, S4 منسوبة إلى المحور الجديد كما يلي:

$$u'_3 = \alpha, \quad y'_3 = 0 \quad (3.2)$$

وبمتابعة الحساب اعتماداً على العلاقات (1.2)، (2.2)

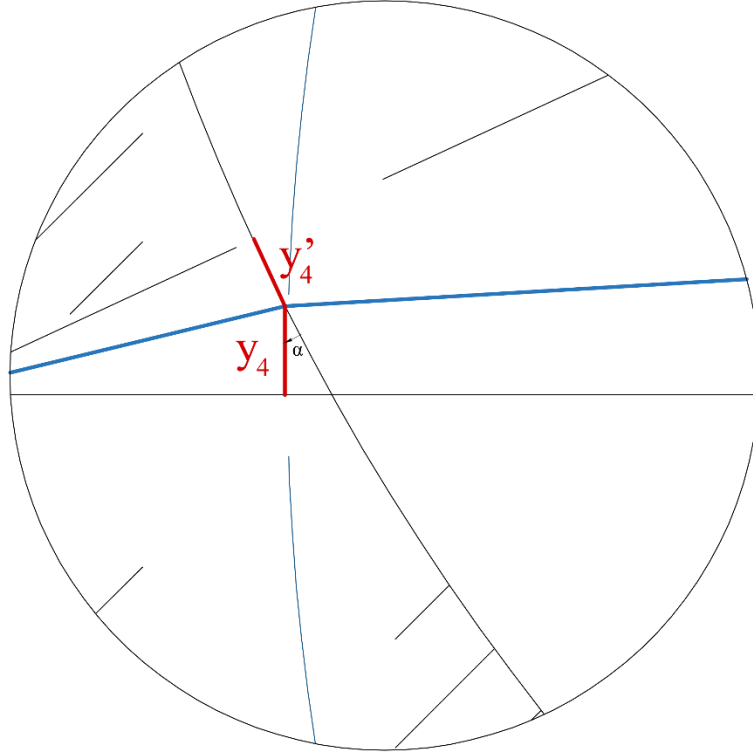
$$u'_4 = \frac{\alpha}{n_4}, \quad y'_4 = \frac{\alpha t_4}{n_4} \quad (4.2)$$

$$u'_5 = \alpha + \alpha t_4 \frac{n_4 - 1}{n_4} \quad (5.2)$$

وبإرجاع قيم هذه المقادير لتكون منسوبة إلى محور الجملة

$$y_4 = \alpha t_4 - y'_4 = \alpha t_4 \frac{n_4 - 1}{n_4} \quad (6.2)$$

وذلك بإهمال المقدار $\left[\alpha t_4 \frac{n_4 - 1}{n_4} (1 - \cos \alpha) \right]$ لأنه من المرتبة الثالثة في α (الشكل 3.2)



الشكل 2. 3 شكل مكبر لتوضيح الارتفاعات في الشكل 2.2

$$u_5 = \alpha - u'_5 = -\alpha t_4 \frac{n_4 - 1}{n_4} \quad (7.2)$$

وبالنتيجة يكون ارتفاع الشعاع عند مستوي تشكل الصورة

$$y_5 = \frac{n_4 - 1}{n_4} \alpha t_4 (1 - t_5 C_4) \quad (8.2)$$

وبما أن t_5 تمثل البعد المحرق الخلفي للجملة البصرية B_s و C_4 تمثل تقوس السطح الحر للعدسة على اعتبار أن السطح الأول هو السطح المقيد بالدوران، نكتب قيمة انزياح الصورة على الحساس الحراري والممثلة لانحراف خط النظر بنتيجة ميلان العدسة بالعلاقة:

$$\varepsilon_T = \frac{n - 1}{n} \alpha t \left(\frac{R_F - B_s}{R_F} \right) \quad (9.2)$$

حيث:

n : قرينة انكسار مادة العدسة التي تخضع للميلان.

α : زاوية دوران العدسة حول ذروة السطح الأول [Rad].

t : السماكة المركزية للعدسة التي تخضع للميلان [mm].

R_F : نصف قطر تقوس السطح الحر للعدسة التي تخضع للميلان [mm].

B_s : البعد المحرقي الخلفي للجملة البصرية [mm].

ومن الواضح أنه يمكن استخدام العلاقة (9.2) في أي جملة بصرية بمعزل عن عدد ونوع العناصر البصرية عند دراسة أثر ميلان العدسة الأخيرة، حيث تختزن جميع المواصفات والمقادير الهندسية في قيمة B_s الداخلة في العلاقة.

ونكتب انحراف خط النظر θ_T في جملة بصرية بتأثير ميلان العدسة الأخيرة بالعلاقة:

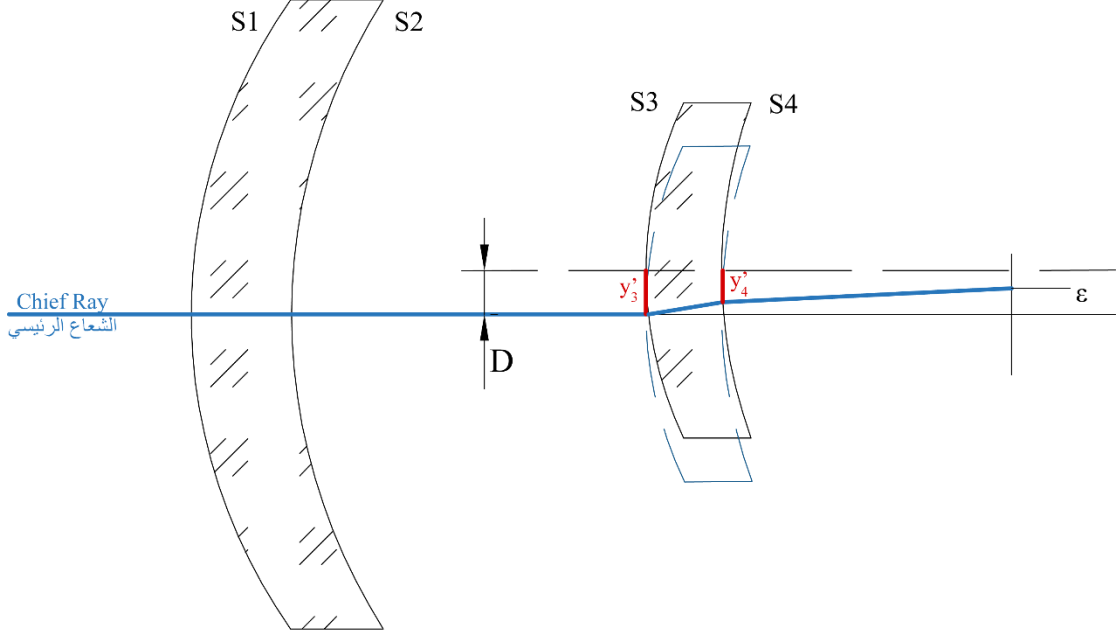
$$\theta_T = \frac{(n - 1) \alpha t}{n} \frac{1}{f_s} \left(\frac{R_F - B_s}{R_F} \right) \quad (10.2)$$

حيث:

f_s : البعد المحرقي الفعال للجملة البصرية.

3.2. انزياح العدسة عرضانياً Lens Decenter

يقصد بهذا الانزياح الحالة التي تتزاح فيها العدسة عمودياً عن محور الجملة البصرية في أحد الاتجاهات، فإذا انزاحت العدسة عن المحور البصري بمقدار D يتشكل لهذه العدسة محور جديد منزاح عن محور الجملة بنفس المقدار (الشكل 4.2).



الشكل 4.2. 4. تعقب الشعاع الرئيسي في حالة انزياح العدسة عرضانياً

من خلال تعقب الشعاع الرئيسي الوارد على محور الجملة البصرية بزواوية $u_1 = 0$ ، ينتقل الشعاع عبر الجملة دون انحراف حتى السطح S_3 .

وتكون قيم مقادير تعقب الأشعة عند السطحين S_3, S_4 منسوبة إلى المحور الجديد كما يلي:

$$u'_3 = 0, \quad y'_3 = D \quad (11.2)$$

وبمتابعة الحساب

$$u'_4 = -D \frac{n_4 - 1}{n_4} C_3, \quad y'_4 = D - t_4 D \frac{n_4 - 1}{n_4} C_3 \quad (12.2)$$

$$u'_5 = -D(n_4 - 1) \left[C_3 - C_4 + \frac{n_4 - 1}{n_4} t_4 C_3 C_4 \right] \quad (13.2)$$

$$u'_5 = -\frac{D}{f} \quad (14.2)$$

وبإرجاع قيم هذه المقادير لتكون منسوبة إلى محور الجملة

$$y_4 = -D - y'_4 = t_4 D \frac{n_4 - 1}{n_4} C_3 \quad (15.2)$$

$$u_5 = u'_5 = -\frac{D}{f} \quad (16.2)$$

وبالنتيجة يكون ارتفاع الشعاع عند مستوي تشكل الصورة

$$y_5 = D \left(\frac{n_4 - 1}{n_4} t_4 C_3 + \frac{t_5}{f} \right) \quad (17.2)$$

ويعطى البعد المحرقى الخلفى لعدسة بالشكل [20]:

$$bfl = f - \frac{ft(n-1)}{nR_1} \quad (18.2)$$

وبالتعويض في العلاقة (17.2):

$$y_5 = D \left(1 - \frac{B_L}{f_L} + \frac{t_5}{f_L} \right) \quad (19.2)$$

وبما أن t_5 تمثل البعد المحرقى الخلفى للجملة البصرية، نكتب قيمة انزياح الصورة على الحساس الحراري والممثلة لانحراف خط النظر بنتيجة انزياح العدسة بالعلاقة:

$$\varepsilon_D = D \left(\frac{B_s - B_L}{f_L} + 1 \right) \quad (20.2)$$

حيث:

D : مقدار انزياح العدسة عن محور الجملة البصرية [mm].

B_L : البعد المحرقى الخلفى للعدسة التي تخضع للميلان [mm].

f_L : البعد المحرقى الفعال للعدسة التي تخضع للميلان [mm].

B_s : البعد المحرقى الخلفى للجملة البصرية [mm].

ومن الواضح أنه يمكن استخدام العلاقة (20.2) في أي جملة بصرية بمعزل عن عدد ونوع العناصر البصرية عند دراسة أثر انزياح العدسة الأخيرة، حيث تختزن جميع المواصفات والمقادير الهندسية في قيمة B_s الداخلة في العلاقة.

ونكتب انحراف خط النظر θ_D في جملة بصرية بتأثير انزياح العدسة الأخيرة عرضياً بالعلاقة:

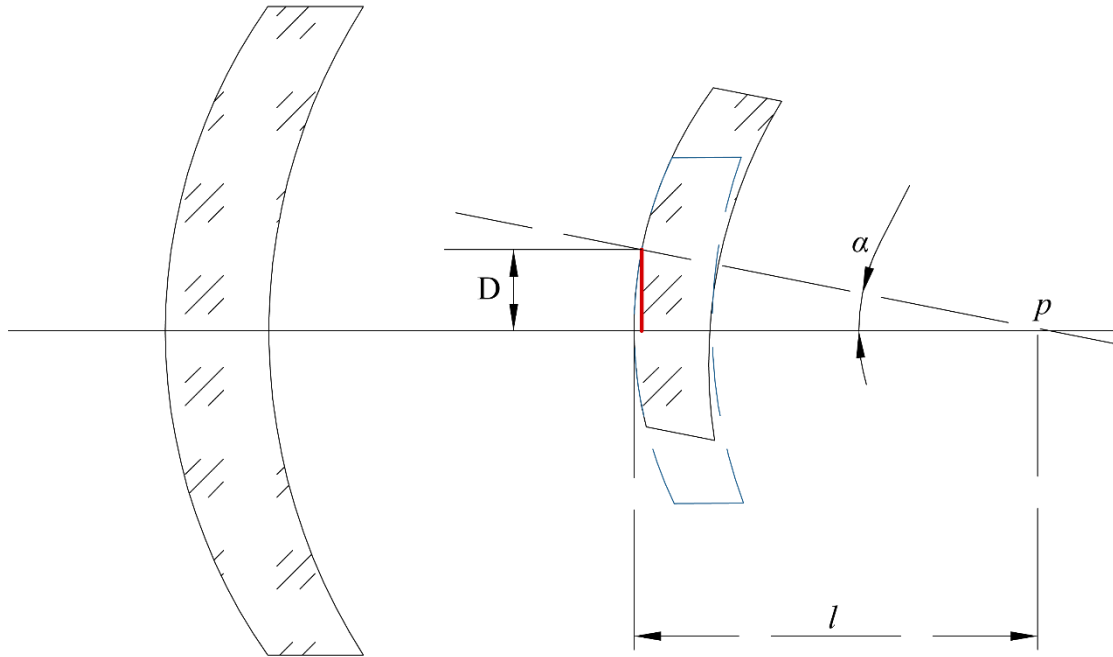
$$\theta_D = \frac{D}{f_s} \left(\frac{B_s - B_L}{f_L} + 1 \right) \quad (21.2)$$

حيث:

f_s : البعد المحرقي الفعال للجملة البصرية.

3.2. دوران العدسة Lens Rotation

يقصد بهذا الدوران الحالة التي تدور فيها العدسة حول نقطة واقعة على محور الجملة وتبعد مسافة l عن ذروة سطحها الأول في أحد الاتجاهات (الشكل 5.2).



الشكل 5.2 أثر دوران العدسة

فإذا دارت العدسة حول نقطة p تبعد مسافة l عن ذروة سطحها الأول بزواوية قدرها α فإن هذا الدوران يمكن تحليله هندسياً إلى ثلاثة انزياحات تقع في مستو واحد واضحة من (الشكل 5.2).

- ميلان قيمته مساوية إلى قيمة زاوية الدوران α
- انزياح طولاني يكتب بالعلاقة:

$$\zeta = l[1 - \cos(\alpha)] \quad (22.2)$$

وهو مهمل ضمن تقريب الزوايا الصغيرة لأنه من الدرجة الثانية في α .

• انزياح عرضاني يكتب بالعلاقة:

$$D = -\alpha l \quad (23.2)$$

وبالتالي تكون قيمة انزياح الصورة على الحساس الحراري والممثلة لانحراف خط النظر بنتيجة دوران العدسة:

$$\varepsilon_R = \varepsilon_T + \varepsilon_D \quad (24.2)$$

$$\varepsilon_R = \alpha \left[\frac{n-1}{n} t \left(\frac{R_F - B_S}{R_F} \right) - l \left(\frac{B_S - B_L}{f_L} + 1 \right) \right] \quad (25.2)$$

حيث:

n : قرينة انكسار مادة العدسة التي تخضع للدوران.

α : زاوية دوران العدسة حول النقطة p [Rad].

t : السماكة المركزية للعدسة التي تخضع للدوران [mm].

R_F : نصف قطر تقوس السطح الحر للعدسة التي تخضع للدوران [mm].

B_S : البعد المحرقي الخلفي للجملية البصرية [mm].

l : المسافة بين ذروة العدسة الخاضعة للدوران والنقطة p [mm].

B_L : البعد المحرقي الخلفي للعدسة التي تخضع للدوران [mm].

f_L : البعد المحرقي الفعال للعدسة التي تخضع للدوران [mm].

ونكتب انحراف خط النظر θ_R في جملة بصرية بتأثير دوران العدسة الأخيرة بالعلاقة:

$$\theta_R = \frac{\alpha}{f_S} \left[\frac{n-1}{n} t \left(\frac{R_F - B_S}{R_F} \right) - l \left(\frac{B_S - B_L}{f_L} + 1 \right) \right] \quad (26.2)$$

حيث:

f_S : البعد المحرقي الفعال للجملية البصرية.

في الحالة الخاصة التي تكون فيها $l = RD$ وهي الحالة التي تمثل استناد السطح الأول للعدسة على كتف الحاضن الميكانيكي، نعوض في العلاقة السابقة:

$$\varepsilon_R = \alpha \left[\frac{n-1}{n} t \left(1 - \frac{B_s}{R_F} \right) - R_D \left(\frac{B_s}{f} + \frac{n-1}{n} \frac{t}{R_D} \right) \right] \quad (27.2)$$

$$\varepsilon_R = \alpha B_s \left[-\frac{n-1}{n} \frac{t}{R_F} - \frac{R_D}{f} \right] \quad (28.2)$$

وبما أن

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{R_D} - \frac{1}{R_F} + \frac{n-1}{n} \frac{t}{R_D R_F} \right] \quad (29.2)$$

وبالتعويض

$$\varepsilon_R = \alpha B_s (n-1) \left(\frac{R_D - R_F - t}{R_F} \right) \quad (30.2)$$

حيث:

R_D : نصف قطر تقوس السطح المستند للعدسة الخاضعة للدوران.

من خلال هذه الدراسة يمكن القول إن أخطاء التصنيع والتجميع الميكانيكي البصري تنتج واحدة أو أكثر من هذه الحالات في اتجاه واحد أو عدة اتجاهات، وفي حالة تراكم أكثر من حالة وفي أكثر من اتجاه فإن الانزياح الناتج في الصورة عند الحساس يساوي إلى المجموع الشعاعي للانزياحات الحاصلة.

3

“Design is a funny word.
Some people think design
means how it looks. But of
course, if you dig deeper, it's
really how it works”

- Steve Jobs

تصميم جسمية حرارية باستخدام Zemax

تصميم جسمية حرارية باستخدام Zemax

1.3. مقدمة

بهدف التحقق من أداء برنامج التحليل الذي تمت كتابته في سياق هذه الدراسة، سنعتمد المقارنة مع برنامج Zemax من خلال تصميم جسمية اختيارية باستخدام Zemax واختبار النماذج الرياضية عددياً عليها ومقارنة مخرجات التحليل مع النتائج التي يعطيها Zemax.

يتشابه أسلوب تصميم الجسيمات المستخدمة في كاميرات التصوير الحرارية مع تصميم الأنظمة البصرية المرئية، وعادة ما يكون أسهل نسبياً لجهة أن المواد البصرية المستخدمة تمتلك قرائن انكسار مرتفعة ما ينعكس انخفاضاً في الزيوغ الرئيسية إلا أنه بالمقابل أصعب على اعتبار أن خيارات الاستبدال للمواد البصرية المستخدمة أقل بكثير.

2.3. خطوات التصميم باستخدام Zemax

فيما يلي الخطوات التي تم اتباعها لتصميم جسمية حرارية تتكون من عدستين من الجرمانيوم باستخدام برنامج Zemax، يبين (الجدول 1.3) المواصفات الفنية لهذه الجسمية:

جدول 1.3 المواصفات الفنية للجسمية الحرارية قيد التصميم

8-12 μ m	المجال الطيفي
75mm	البعد المحرقي الفعال
1	العدد المحرقي f/number
384 \times 288	أبعاد الحساس
25 μ m	خطوة الحساس

أولاً- حساب حقل الرؤية بالاتجاهين الأفقي والشاقولي

$$EFFL = 75 \text{ mm}$$

$$H_{fpa} = 384 \times 0.025 = 9.6 \text{ mm}$$

$$V_{fpa} = 288 \times 0.025 = 7.2 \text{ mm}$$

$$FOV = 2 \tan^{-1} \left(\frac{fpa/2}{EFFL} \right) \quad (1.3)$$

$$H_{FOV} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{9.6}{2 \times 75} \right) = 7.324^\circ$$

$$V_{FOV} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{7.2}{2 \times 75} \right) = 5.496^\circ$$

ثانياً - حساب تردد القطع

$$v_c = \frac{1}{2 \times p} \quad (2.3)$$

$$v_c = \frac{1}{2 \times 0.025} = 20 \text{ lp/mm}$$

ثالثاً - حساب بؤبؤ الدخل Entrance pupil للنظام

$$D = \frac{f}{f\#} \quad (3.3)$$

$$D = \frac{75}{1} = 75 \text{ mm}$$

رابعاً - حساب قيم ابتدائية لنظام مكون من عدستين تحققان البعد المحرقي المطلوب

نفرض أن النظام مكون من عدستين متطابقتين تفصل بينهما مسافة ولتكن $d = 30 \text{ mm}$

وبحل العلاقة:

$$\Phi_{ab} = \Phi_a + \Phi_b - d\Phi_a\Phi_b \quad (4.3)$$

من أجل $d = 30$ ، و $\Phi_a = \Phi_b$

ينتج لدينا حل:

$$\Phi_a = 0.008 \text{ dp}$$

أصبح لدينا عدستان قوة كل منهما 0.008 ديوبتر وتفصل بينهما مسافة 30mm.

نفرض أن كل عدسة من العدستين هلالية موجبة، أنصاف أقطار سطحها متساويين وسماكتها

مفترضة ولتكن 5mm، ونحل علاقة صانع العدسات من أجل هذه المعطيات

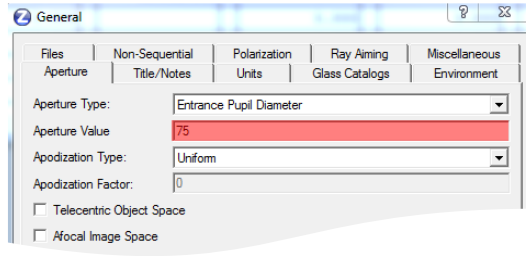
$$\Phi_a = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{t(n - 1)}{R_1 R_2 n} \right] \quad (5.3)$$

فينتج لدينا حل $R = 37.5 \text{ mm}$

خامساً- إدخال البيانات في Zemax

تمثل البيانات التي حصلنا عليها حتى الآن القيم الابتدائية للنظام المراد تصميمه ويتم إدخالها كما يلي:

- إدخال قيمة بؤبؤ الدخل باعتبار فتحة التوقف Aperture stop عند أول سطح من النافذة General (الشكل 1.3)



الشكل 1.3 نافذة General في برنامج Zemax

- إدخال المجال الطيفي لعمل النظام في نافذة Wavelength data وتحديد طول الموجة الرئيسي لإظهار الحسابات الافتراضية عنده (الشكل 2.3)

Use	Wavelength (μm)	Weight	Use	Wavelength (μm)	Weight
<input checked="" type="checkbox"/>	8	1	<input type="checkbox"/>	13	0.55
<input checked="" type="checkbox"/>	10	1	<input type="checkbox"/>	14	0.55
<input checked="" type="checkbox"/>	12	1	<input type="checkbox"/>	15	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	16	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	17	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	18	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	19	0.55

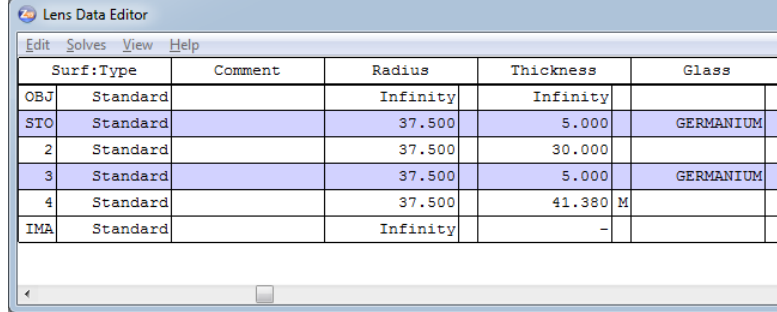
الشكل 2.3 نافذة Wavelength data في برنامج Zemax

- إدخال حقل الرؤية في نافذة Field data، وعادة يتم إدخال أكثر من قيمة ضمن مجال حقل الرؤية للحصول على الحسابات عند هذه القيم (الشكل 3.3)

Use	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	0	2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	0	3.2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	0	4.7	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

الشكل 3.3 نافذة Field data في برنامج Zemax

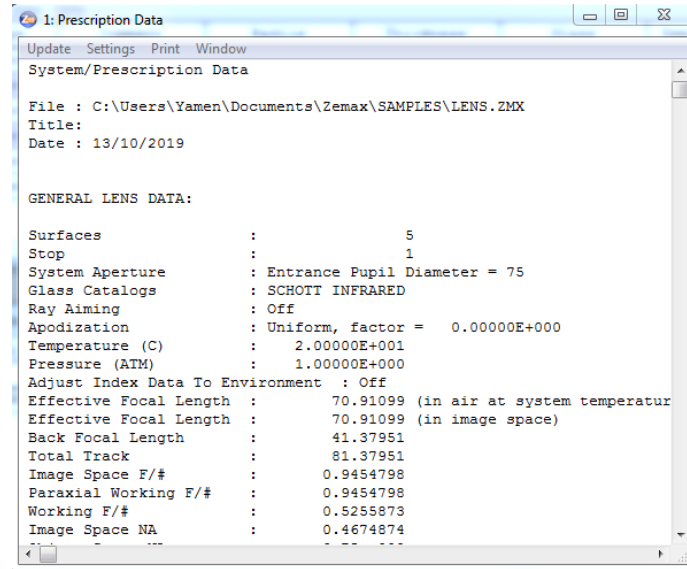
- إدخال القيم الابتدائية للأبعاد الهندسية للنظام كما تم حسابها في نافذة Lens data editor واختيار طريقة حل السماكة للسطح الأخير Marginal ray height لإظهار المسافة حتى وصول الشعاع إلى المحور والتي تساوي إلى البعد المحرقي الخلفي للنظام (الشكل 4.3)



Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass
OBJ	Standard		Infinity	Infinity	
STO	Standard		37.500	5.000	GERMANIUM
2	Standard		37.500	30.000	
3	Standard		37.500	5.000	GERMANIUM
4	Standard		37.500	41.380	M
IMA	Standard		Infinity	-	

الشكل 4.3 نافذة Lens data editor في برنامج Zemax

- عند هذه النقطة اكتمل النظام الابتدائي ويبين (الشكل 5.3) بيانات هذا النظام من نافذة Prescription data، ويلاحظ من هذه البيانات أن البعد المحرقي الفعال 70.91099 وليس 75 وهذا مبرر على اعتبار أننا استخدمنا المسافة $d=30\text{mm}$ في حساب القوة البصرية للنظام وهذه المسافة بين المستويات الأساسية للعدستين في حين أن هذه المسافة عندما تم إدخالها في البرنامج هي المسافة بين سطحي العدستين.



```

1: Prescription Data
Update Settings Print Window
System/Prescription Data

File : C:\Users\Yamen\Documents\Zemax\SAMPLES\LENS.ZMX
Title:
Date : 13/10/2019

GENERAL LENS DATA:

Surfaces          :          5
Stop              :          1
System Aperture   : Entrance Pupil Diameter = 75
Glass Catalogs    : SCHOTT INFRARED
Ray Aiming        : Off
Apodization       : Uniform, factor = 0.00000E+000
Temperature (C)   : 2.00000E+001
Pressure (ATM)    : 1.00000E+000
Adjust Index Data To Environment : Off
Effective Focal Length : 70.91099 (in air at system temperatur
Effective Focal Length : 70.91099 (in image space)
Back Focal Length  : 41.37951
Total Track       : 81.37951
Image Space F/#    : 0.9454798
Paraxial Working F/# : 0.9454798
Working F/#       : 0.5255873
Image Space NA     : 0.4674874
  
```

الشكل 5.3 نافذة Prescription data في برنامج Zemax

- توليد تابع الجودة الافتراضي وإدخال القيود على النظام مع توزيعها بأوزان مناسبة ليتم أخذها بعين الاعتبار عند إجراء الأمثلة التلقائية للنظام وفيما يلي توصيف القيود المستخدمة:

- البعد المحرقي الفعال EFFL
 - المسافة الهوائية الدنيا MNCA
 - المسافة الهوائية العظمى MXCA
 - المسافة الزجاجية الدنيا MNCG
 - المسافة الزجاجية العظمى MXCG
 - سماكة حافة الزجاج الدنيا MNEG
- تحديد الأبعاد التي نقبل أن تكون كمتغيرات في عملية الأمثلة والتي هي الأبعاد الهندسية بالإضافة إلى الثابت المخروطي للسطح الأول، وإجراء عملية أمثلة تلقائية باستخدام الأمر Hammer Optimization للوصول إلى نظام مقبول.
 - بعد عدة دورات أمثلة تم الوصول إلى النظام المبينة أبعاده في (الشكل 6.3)، وقد قبلنا هذا التصميم البصري كتصميم يحقق المواصفات البصرية المطلوبة (الشكل 7.3) ويمكن اعتماده كتصميم مرجعي لمقارنة الحسابات التي تنتج عن هذه الدراسة مع الحسابات التي سينتجها برنامج Zemax لهذا التصميم.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000
STO	Standard		67.800 V	7.000 V	GERMANIUM	38.228	-0.074 V
2	Standard		71.700 V	100.000 V		35.915	0.000
3	Standard		27.200 V	7.000 V	GERMANIUM	18.723	0.000
4	Standard		26.300 V	20.897 M		15.465	0.000
IMA	Standard		Infinity	-		4.670	0.000

الشكل 6.3 القيم التصميمية للنظام البصري المراد دراسته كنظام مرجعي

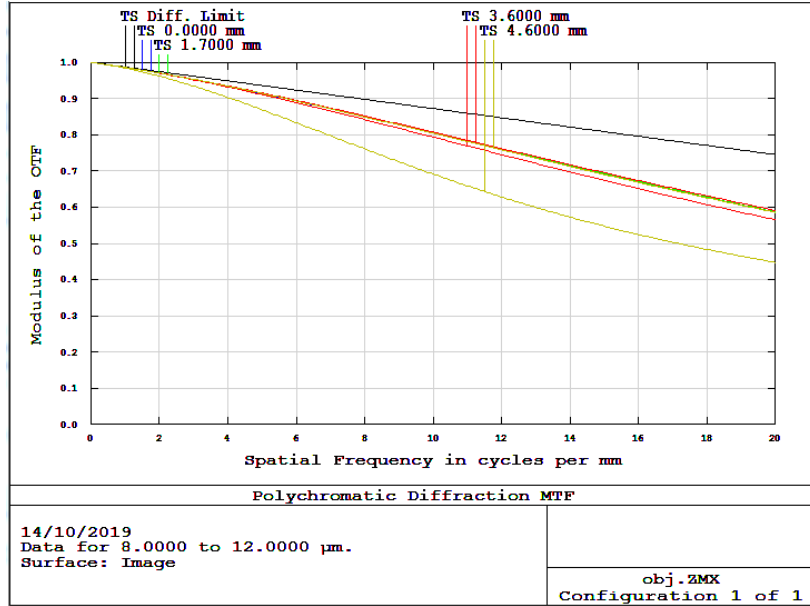
4: Prescription Data	
Update Settings Print Window	
System/Prescription Data	
File : D:\Master Files\Project\Work\Zemax\2018.07.04 Att\obj.ZMX	
Title :	
Date : 13/10/2019	
GENERAL LENS DATA:	
Surfaces	: 5
Stop	: 1
System Aperture	: Entrance Pupil Diameter = 75
Glass Catalogs	: SCHOTT INFRARED
Ray Aiming	: Off
Apodization	: Uniform, factor = 0.00000E+000
Temperature (C)	: 2.00000E+001
Pressure (ATM)	: 1.00000E+000
Adjust Index Data To Environment	: Off
Effective Focal Length	: 75.13577 (in air at system temperatur
Effective Focal Length	: 75.13577 (in image space)
Back Focal Length	: 20.89702
Total Track	: 134.8971
Image Space F/#	: 1.00181
Paraxial Working F/#	: 1.00181
Working F/#	: 1.000405
Image Space NA	: 0.4465667

الشكل 7.3 بيانات النظام البصري المراد دراسته كنظام مرجعي

• تقييم أداء النظام البصري من خلال الأدوات التالية:

○ تابع نقل التعديل MTF

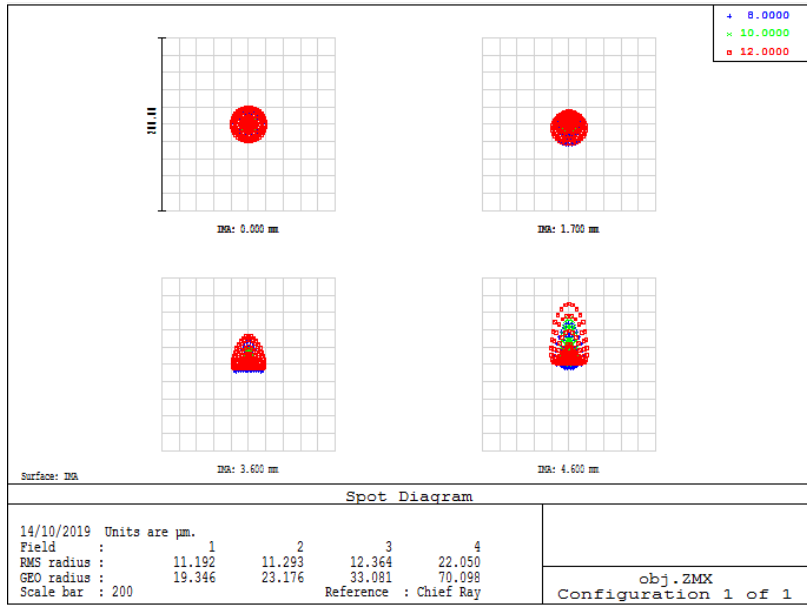
يقيم تابع نقل التعديل قدرة النظام البصري على نقل التباين من فضاء الجسم إلى فضاء الصورة، تتراوح قيمته بين الصفر والواحد حيث يدل الواحد على نقل كامل التباين إلى فضاء الصورة، ونسعى عادة خلال عملية التصميم أن تكون قيم هذا التابع عند مختلف نقاط التردد المكاني وصولاً إلى تردد القطع أقرب ما تكون إلى حد الانعراج، ونقبل بأن النظام جيد الأداء إذا ما كانت قيمته بحدود 0.5 عند تردد القطع، ويبين (الشكل 8.3) تابع نقل التعديل للنظام المصمم، ونلاحظ من الشكل أن قيمة تابع نقل التعديل عند التردد 20 lp/mm تساوي 0.6 من أجل الحقل الصفري.



الشكل 8.3. 8 تابع نقل التعديل للنظام المصمم

○ شكل بقعة التشتت Spot diagram

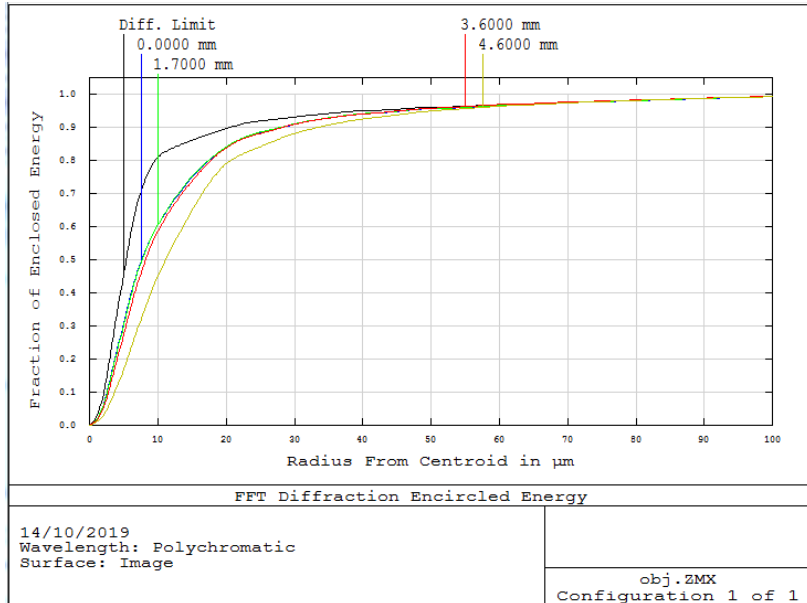
تعتبر عن كثافة الأشعة الواردة من نقطة في فضاء الجسم إلى مستوي تشكل الصورة، ونسعى لأن تكون قيمة جذر الانحرافات التربيعية RMS للبقعة أصغر من بيكسل الحساس، ويبين (الشكل 9.3) بقعة التشتت في النظام المصمم، حيث نلاحظ من الشكل أن نصف قطر بقعة التشتت RMS من أجل الحقل الصفري يساوي $11.19 \mu\text{m}$ ونصف قطر بقعة التشتت الهندسي يساوي $19.53 \mu\text{m}$.



الشكل 9.3 بقعة التشتت في النظام المصمم

○ نسبة الطاقة حول مركز بقعة التشتت Encircled energy

وتشير إلى نسبة الطاقة المحتواة في دائرة حول مركز بقعة التشتت إلى الطاقة الكلية الواردة من نقطة، ويبين (الشكل 10.3) منحنى توزيع الطاقة في بقعة التشتت الناتجة عن النظام المصمم، ونلاحظ من الشكل أن 80% من الطاقة موجودة ضمن بقعة نصف قطرها بحدود $20 \mu\text{m}$.



الشكل 10.3 توزيع الطاقة حول مركز بقعة التشتت الناتجة عن النظام المصمم

4

"Testing leads to failure, and failure leads to understanding"

- Burt Rutan

العمل التجريبي

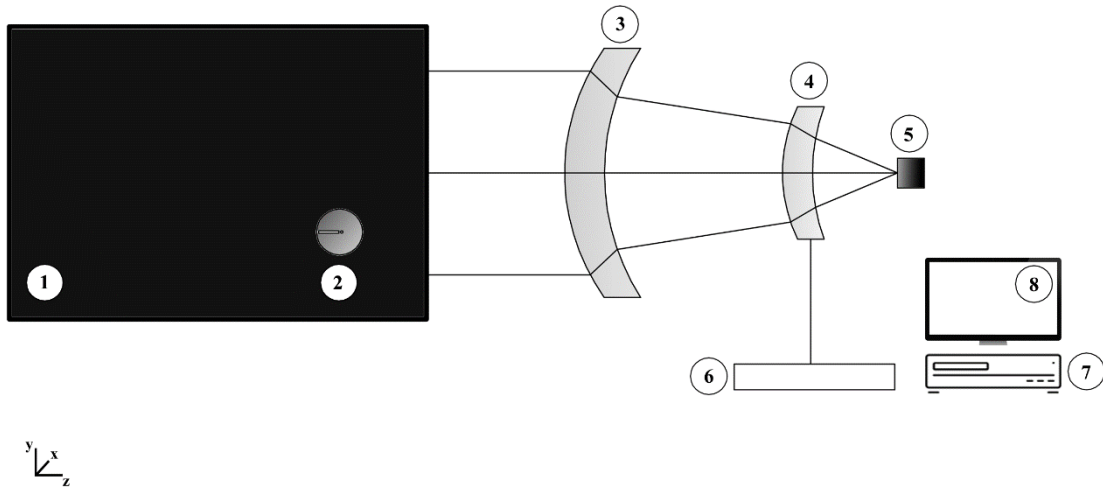
العمل التجريبي

1.4. مقدمة

يهدف هذا العمل إلى التحقق من صحة العلاقات المستخرجة في الدراسة التحليلية من خلال القياسات المخبرية لمقدار انزياح صورة بقعة نتيجة حدوث تغير في الجملة البصرية على اعتبار أن تسامحات الجملة البصرية لا تؤثر في الزيوغ (أي في شكل البقعة) لكون هذه التسامحات صغيرة جداً ولكنها مع ذلك تؤثر على انحراف خط النظر. وقد اعتمدنا على إيجاد مركز البقعة على خوارزمية مركز الثقل لكونها تعطي دقة أصغر من البيكسل (الملحق A).

2.4. تحضير التجربة

يبين (الشكل 1.4) النموذج العام للتجارب التي تم إجراؤها لاختبار صلاحية العلاقات التي تم استخراجها في الدراسة التحليلية للبحث.



الشكل 1.4. النموذج العام للعمل التجريبي

حيث:

1. محقق حراري بعده المحرقي $f = 1700\text{mm}$ يعكس إصدار الجسم على شكل أشعة متوازية.
2. مكان توضع الجسم في المحقق الحراري
3. العدسة الأمامية للجسمية موضع الاختبار

4. العدسة الخلفية للجسمية موضع الاختبار
5. حساس حراري يعمل في المجال (8-12 μ m) أبعاده (384 \times 288) خطوته 25 μ m
6. مسند قابل للحركة في المستوي x-z بواسطة محور مدرج أصغر تدريجة فيه مقدارها 10 μ m
7. مسجل فيديو رقمي DVR
8. شاشة عرض

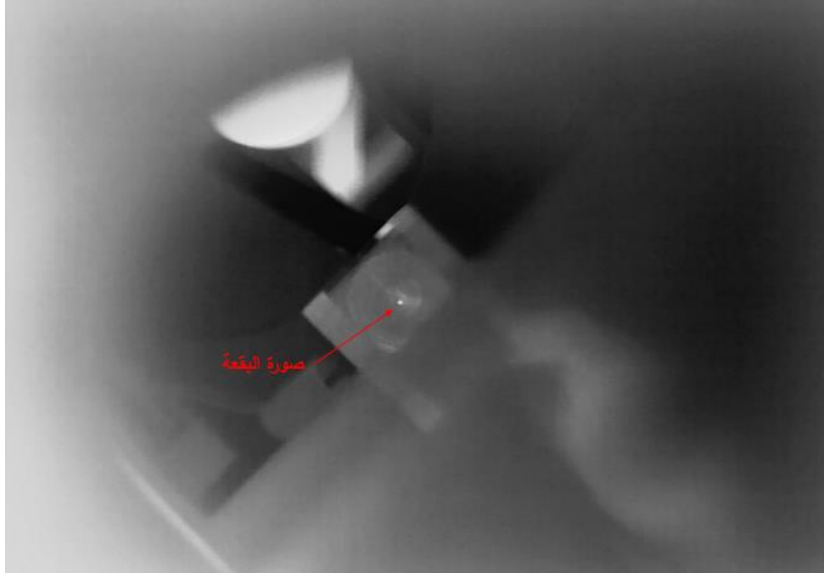
الهدف من إجراء العمل التجريبي هو الحصول على قياس لقيمة الانزياح الحاصل في الصورة بنتيجة تطبيقنا لأحد الأخطاء المذكورة على العدسة الثانية للجسمية موضع الاختبار، وقيمة هذا الانزياح تمثل انحراف خط النظر قيد الدراسة، وفيما يلي شرح لطريقة الحصول على قيمة هذا القياس.

1.2.4. الصورة المقيسة

يعطي المحقق الحراري أشعة متوازية للجسم الموجود في محرقه، والجسم هذا في التجربة عبارة عن ثقب تمر من خلاله الأشعة الصادرة عن جسم قريب منه، وباعتبار أن جسم الانسان عند درجة الحرارة الطبيعية يصدر إشعاعاً حرارياً يتركز طيفه حول طول الموجة 10 μ m فإن اقتراب المجرب من الثقب كاف للحصول على صورة متوازية للثقب خارجة من المحقق، تمر هذه الأشعة عبر الجملة البصرية وترد إلى الحساس الحراري الذي يعطي صورة لهذا الثقب على شكل بقعة.

2.2.4. تحصيل الصورة

تم تحصيل الصورة بواسطة مسجل فيديو رقمي DVR موصول إلى مدخله إشارة خرج الحساس، يسمح هذا المسجل بالحصول على لقطات Snapshots بدقة (720 \times 576 Pixel)، ويتم نقل الصور الملتقطة لتجربة ما إلى الحاسب لمعالجتها بهدف الحصول على القياسات المطلوبة، ويبين (الشكل 2.4) عينة لإحدى اللقطات المأخوذة خلال التجارب.

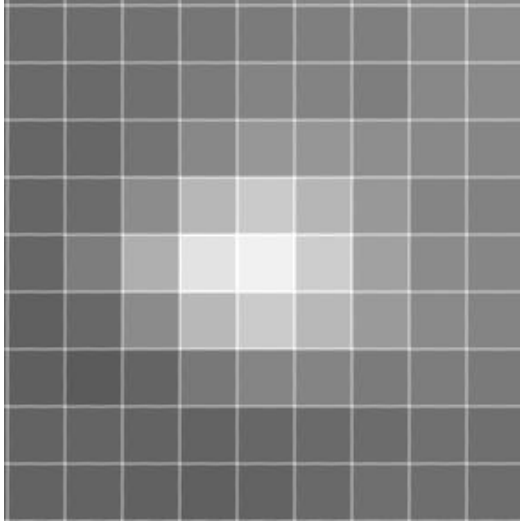


الشكل 2.4. الصورة التي تشكلها الجملة البصرية قيد الاختبار لخرج المحقق الحراري على الحساس

3.2.4. معالجة الصورة

كما هو واضح من (الشكل 2.4) وبسبب أن الأدوات والتجهيزات في حيز التجربة تصدر إشعاعاً حرارياً فإن الصورة المحصلة تحوي الكثير من التفاصيل غير المرغوبة ولذلك استلزم عملية معالجة تلغي هذه التفاصيل وتحافظ على صورة البقعة المضيئة الناتجة عن الثقب في المحقق دون التغيير في أبعاد الصورة وبالتالي في الموقع النسبي للبقعة داخل الصورة، وقد تمت هذه المعالجة من خلال برنامج حاسوبي تمت كتابته لتنفيذ المعالجة المطلوبة في هذا العمل التجريبي، وتشمل هذه المعالجة:

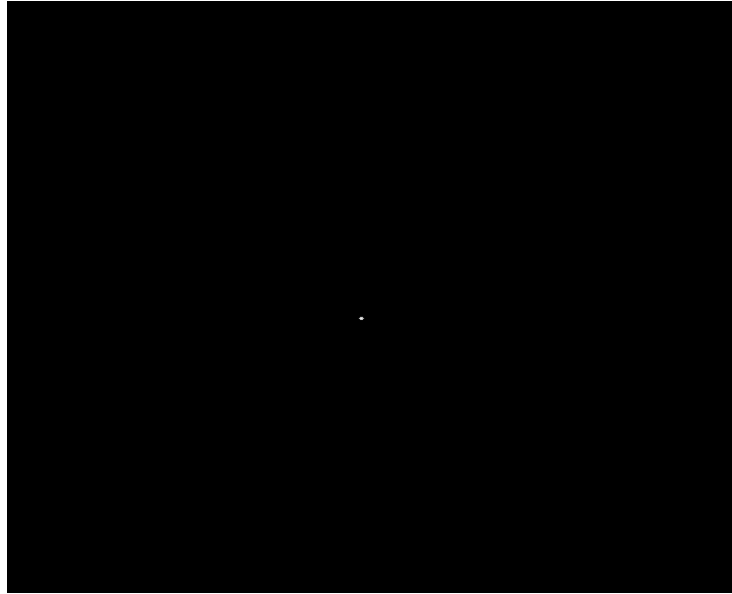
- تحويل الصورة إلى تدرج الرمادي Greyscale للانتقال من الترميز اللوني RGB لكل بيكسل في الصورة إلى ترميزه من خلال الشدة الضوئية فيه فقط وسيتم تفصيل ذلك في فصل العمل البرمجي.
- الإبقاء على البقعة المضيئة وحذف بقية التفاصيل، ولتوضيح ذلك يبين (الشكل a.3.4) نفس البقعة في (الشكل 2.4) مع المنطقة المحيطة بها مكبرة 3200 مرة مع ذكر قيمة إضاءة كل بيكسل فيها (الشكل b.3.4)، في هذه الحالة على سبيل المثال عند تحديد عتبة إضاءة مقدارها 160 وحذف كل ما هو أقل منها ستصبح الصورة النهائية الملتقطتة كما في (الشكل c.3.4) وهي صورة البقعة التي سندرس مقدار انزياحها نتيجة حدوث تغيرات في الجملة البصرية.



الشكل 4.0.a صورة البقعة المضوية مكبرة 3200 مرة

107	109	113	118	123	127	127	136	139
106	106	112	123	132	131	126	136	137
102	103	116	136	151	150	142	137	134
102	108	140	183	202	182	152	133	130
102	125	175	227	241	205	161	139	134
96	104	139	184	203	184	154	138	132
95	91	100	120	133	132	123	125	122
99	100	99	99	103	106	108	112	111
99	99	97	96	99	105	111	110	109

الشكل 4.0.b صورة البقعة المضوية مع شدة الإضاءة في كل بيكسل



الشكل 4.3.c صورة خرج الحساس (الشكل 2.4) بعد المعالجة

4.2.4. تحديد مركز ثقل الصورة وحساب الانزياح فيها

اعتمدنا في تحديد مركز البقعة على إيجاد مركز ثقل الصورة الملتقطة بواسطة نفس البرنامج الحاسوبي الذي يجري عمليات المعالجة عليها، وعليه فإذا كان مركز ثقل صورة ملتقطة في الموقع (i_1, j_1) ، ومركز ثقل صورة أخرى ملتقطة بعد إجراء تغيير في الجملة البصرية في الموقع (i_2, j_2) فإن الانزياح الحاصل في الصورة نتيجة هذا التغيير مقدراً بالبيكسل:

$$s = \sqrt{(i_2 - i_1)^2 + (j_2 - j_1)^2} \quad (1.4)$$

3.4. تحويل الأبعاد بين الحساس الحراري والصورة الملتقطة

يستخدم تعبير البيكسل Pixel في أكثر من سياق، فهو يعبر في مجال الرسومات الحاسوبية Computer graphics للتعبير عن أصغر عنصر يمكن التحكم به وجدولته في صورة مرئية كما هو الحال في تنسيق bmp للصور المستخدمة خلال هذا العمل والتي تنتمي إلى عائلة الصور النقطية Raster images، ويمكن أن يمثل البيكسل كياناً صلباً Hardware، ففي شاشات العرض يمثل البيكسل أصغر عنصر إظهار في الشاشة، وفي الحساسات المصفوفية سواء للكاميرات المرئية أو الحرارية يعبر البيكسل عن أصغر عنصر حساس في المصفوفة.

إن قيمة انزياح الصورة s التي حصلنا عليها حتى الآن هي مسافة مقدرة بالبيكسل للصورة الملتقطة، ولكن في الحقيقة فإن هذه المسافة تنتقل من حساس أبعاده (384×288 Pixel) إلى مسجل فيديو رقمي لتظهر في النهاية ضمن صورة رقمية أبعادها (720×576 Pixel).

ولحساب نسبة تحويل الأبعاد بين الحساس الحراري والصورة الملتقطة تم تنفيذ التجربة التالية وفقاً للنموذج المبين في (الشكل 1.4)، حيث تم قياس مقدار الانزياح في الصورة نتيجة تحريك الحساس مع ثبات العدسات وفق المحور x بخطوات متساوية مقدارها 1mm باستخدام المسند المتحرك المذكور، دون إجراء أي تأثير في الجملة البصرية. إن تحريك الحساس مع ثبات العناصر البصرية لا يغير من شكل البقعة على الإطلاق وبالتالي لا يرتب أي ترتيب إضافي على مركز البقعة. وكانت النتائج كما هو مبين في (الجدول 1.4).

جدول 1.4 نتائج قياسات اختبار تحويل الأبعاد بين الحساس والصورة الملتقطة

مقدار الخطوة [Pixel] _{Im}	مقدار الانزياح S _{Im} [Pixel] _{Im}	احداثيات مركز الثقل		إزاحة الحساس S _{FPA}	
		j	i	[Pixel] _{FPA}	[mm]
0	0	343.40	153.60	0	0
66.44	66.44	343.04	220.04	40	1
65.56	132.00	342.81	285.60	80	2
67.91	199.91	342.49	353.51	120	3
66.98	266.90	341.51	420.49	160	4
65.78	332.67	340.45	486.26	200	5
66.94	399.61	339.94	553.20	240	6
66.99	466.61	339.25	620.19	280	7

وبتطبيق تحليل الانحدار الخطي البسيط لإيجاد العلاقة الخطية بين إزاحة الحساس ومقدار الانزياح المحسوب على الصورة الناتجة وفق طريقة المربعات الصغرى، يمكن الحصول على أنسب تقدير لنسبة التحويل بين الانزياح المقيس من الصور الملتقطة والانزياح الفعلي على الحساس كما يلي:

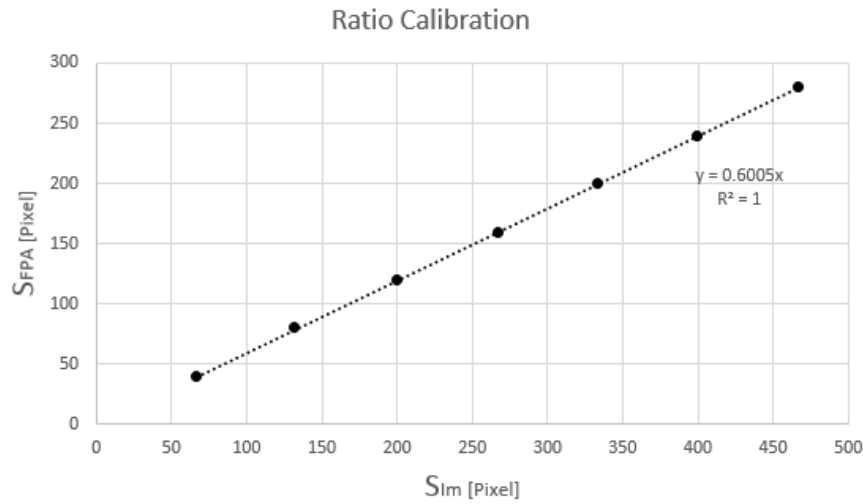
$$S_{FPA} = AS_{Im} + B \quad (2.4)$$

حيث تعطى ثوابت معادلة المستقيم بالعلاقات

$$A = \frac{n \sum S_{Im} S_{FPA} - (\sum S_{Im})(\sum S_{FPA})}{n \sum S_{Im}^2 - (\sum S_{Im})^2} \quad (3.4)$$

$$B = \frac{\sum (S_{FPA} - A) \sum S_{Im}}{n} \quad (4.4)$$

وبالاستعانة ببرنامج الجداول الإلكترونية M.S. Excel يمكن الحصول على هذه العلاقة الخطية بشكل مباشر وسريع دون الحاجة لحسابها، ويبين (الشكل 4.4) علاقة انزياح الصورة على الحساس S_{FPA} بدلالة الانزياح المقيس S_{Im} للقيم المبينة في (الجدول 1.4)



الشكل 4.4. علاقة انزياح الصورة على الحساس S_{FPA} بدلالة الانزياح المقيس S_{Im}

وبتقبيد الخط الأفضل مطابقة Line of best fit للمرور من مبدأ الاحداثيات نحصل على العلاقة الخطية:

$$S_{FPA} = 0.601 \times S_{Im} \quad (5.4)$$

فتكون قيمة انزياح الصورة على الحساس باعتبار p أبعاد البيكسل للحساس المستخدم:

$$\varepsilon = 0.601 \times p \times S_{Im} \quad (6.4)$$

1.3.4. دراسة الارتياحات

إن مصادر خطأ القياس في هذا الاختبار هي الخطأ في تحديد مركز ثقل البقعة على الصورة المحصلة إضافة إلى خطأ قراءة إزاحة الحساس ΔS_{FPA} والذي يساوي 0.005 mm إي 0.2 Pixel، ونفرض أن خطأ تحديد إحداثيات مركز الثقل (الملحق A) $\Delta i = \Delta j = 0.4$ Pixel.

وبالتالي يكون لدينا من العلاقة (1.4)

$$\Delta S_{im} = 2S_{im} \frac{(i - i_0)\Delta i + (j - j_0)\Delta j}{(i - i_0)^2 + (j - j_0)^2} \quad (7.4)$$

ولدينا العلاقة (5.4) والتي تمثل علاقة مستقيم نكتبها بالشكل:

$$S_{FPA} = mS_{Im} \quad (8.4)$$

$$m = \frac{S_{FPA}}{S_{Im}}$$

وبالتالي

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta S_{FPA}}{S_{FPA}} + \frac{\Delta S_{Im}}{S_{Im}} \quad (9.4)$$

$$\Delta m = \frac{\Delta S_{FPA}}{S_{Im}} + \frac{\Delta S_{Im} S_{FPA}}{S_{Im}^2} \quad (10.4)$$

وبيين (الجدول 2.4) قيم الارتياح المحسوبة من أجل القياسات الواردة في (الجدول 1.4)

جدول 2.4. قيم الارتياح المحسوبة من أجل القياسات في اختبار تحويل الأبعاد بين الحساس والصورة

Δm	ΔS_{im} [mm]	S_{im} [Pixel]	إزاحة الحساس [mm]
0.000	0.000	0	0
0.0031	0.006	66.44	1
0.0015	0.003	132.00	2
0.0010	0.002	199.91	3
0.0008	0.001	266.90	4
0.0006	0.001	332.67	5
0.0005	0.001	399.61	6
0.0004	0.001	466.61	7

وبالتالي يكون لدينا

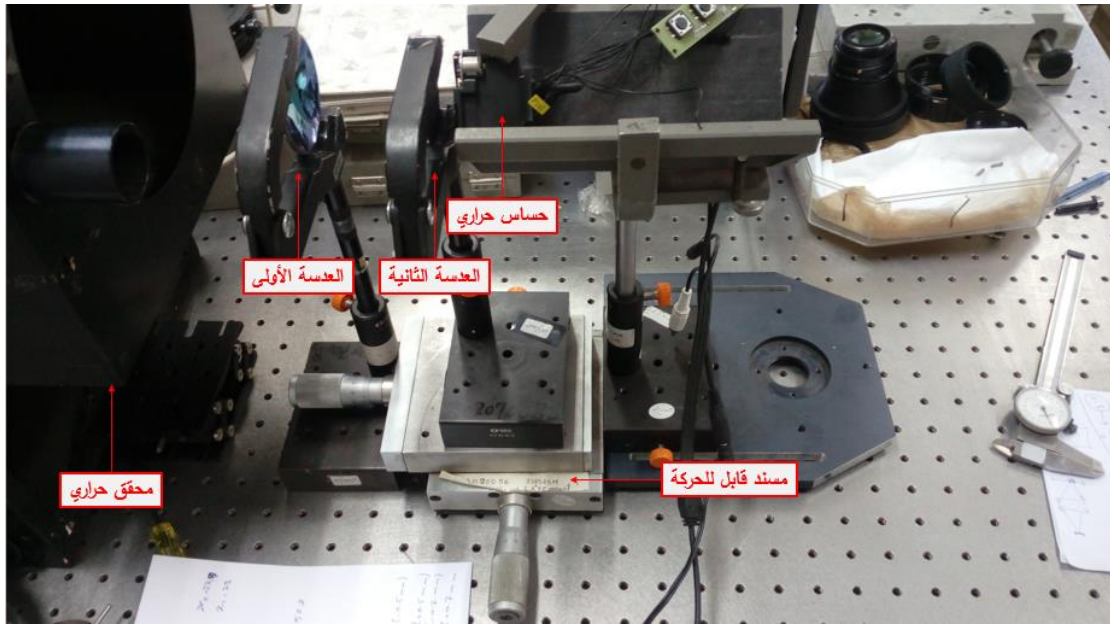
$$m_{max} = m + \overline{\Delta m} = 0.601 + 0.001$$

$$m_{min} = m - \overline{\Delta m} = 0.601 - 0.001$$

وبالنتيجة معامل ارتباط القيم المقيسة $R^2 = 1$ وارتياح نسبة التحويل بحدود 0.1% وبالتالي يمكن استخدام النسبة 0.601 لتحويل القيم المقيسة من الصورة الملتقطة إلى القيمة الفعلية على الحساس بشكل آمن.

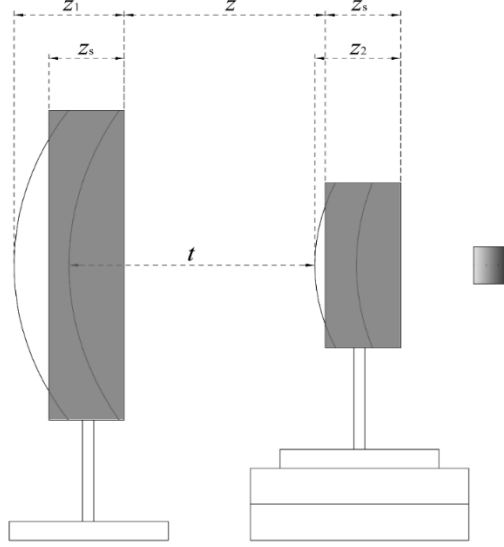
4.4. اختبار الانزياح العرضي للعدسة الثانية

يهدف هذا الاختبار إلى التأكد من صلاحية العلاقة (20.2) تجريبياً، من خلال تحصيل قياسات تجريبية ومقارنتها مع القيم المحسوبة عند نفس الانزياح، وقد تم إجراء هذه التجربة وفق النموذج المبين في (الشكل 1.4): كل من العدستين محمولة ضمن حامل، الحامل بالكامل حر الحركة وفيه محور مواز للمحور y يسمح بدوران حامل العدسة حوله، حامل العدسة الثانية موضوع على مسند قابل للحركة في المستوي $x-z$ ، تشمل عملية الاختبار قياس انزياح الصورة على الحساس نتيجة تحريك العدسة الثانية وفق المحور x خطوات متساوية قدرها 0.1mm (الشكل 5.4).



الشكل 4.5. صورة المونتاج المخبري لاختبار الانزياح العرضي للعدسة الثانية

ويبين (الشكل 6.4) المسافات الهوائية لضبط الجملة، وفيه المسافة z (المسافة بين حاملي العدستين) هي مسافة الضبط.



الشكل 6.4 شكل توضيحي لضبط المسافات في اختبارات العمل التجريبي

وكما هو واضح من (الشكل 6.4)، المسافة الهوائية بين العدستين t تساوي:

$$t = z_1 + z + z_s - t_1 - z_2 \quad (11.4)$$

حيث t_1 : سماكة العدسة الأولى

العلاقة المراد التأكد من صلاحيتها:

$$\varepsilon_D = D \left(\frac{B_s - B_L}{f_L} + 1 \right)$$

$$\frac{B_s [mm]}{25.227} \quad \frac{B_L [mm]}{42.737} \quad \frac{f_L [mm]}{46.467}$$

قيم المسافات كما تم قياسها كانت كما يلي:

$$\frac{z_1 [mm]}{23} \quad \frac{z_2 [mm]}{23.9} \quad \frac{z [mm]}{52.5} \quad \frac{t_1 [mm]}{4} \quad \frac{z_s [mm]}{16}$$

والأبعاد الهندسية للنظام قيد الاختبار:

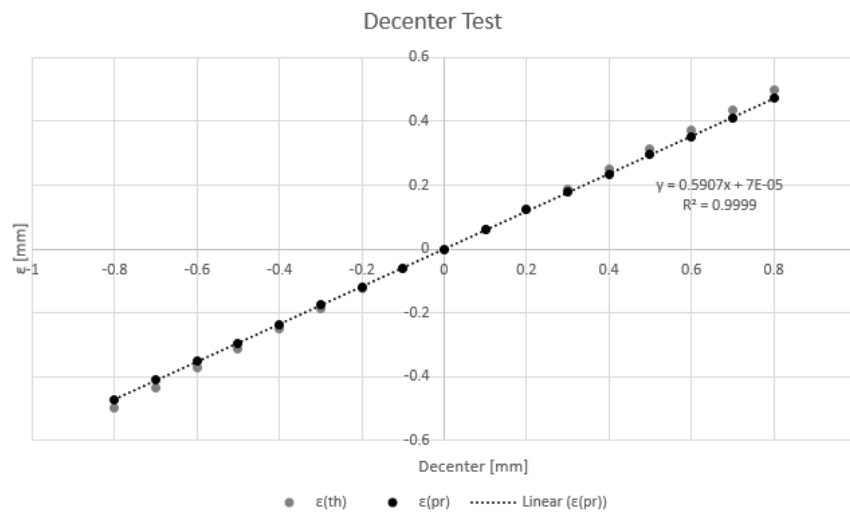
$$\frac{R_1 [mm]}{52.16} \quad \frac{t_1 [mm]}{4} \quad \frac{R_2 [mm]}{55.8} \quad \frac{t [mm]}{63.6} \quad \frac{R_3 [mm]}{37.38} \quad \frac{t_2 [mm]}{4} \quad \frac{R_4 [mm]}{46.95}$$

بحساب قيمة انزياح الصورة النظرية من العلاقة (20.2) وانزياح الصورة تجريبياً من العلاقتين (1.4) و (6.4) تتلخص نتائج القياسات التي تم تحصيلها في (الجدول 3.4).

جدول 3.4. نتائج قياسات اختبار الانزياح العرضاني للعدسة الثانية

الارتياح النسبي	ϵ_{pr} [mm]	S_{Im} [Pixel _{Im}]	ϵ_{th} [mm]	إحداثيات مركز الثقل		إزاحة العدسة [mm]
				j	i	
-5.07	-0.473	-31.55	-0.499	290.74	326.62	-0.8
-5.85	-0.411	-27.38	-0.436	293.73	329.53	-0.7
-5.46	-0.354	-23.57	-0.374	296.34	332.31	-0.6
-4.59	-0.297	-19.82	-0.312	299.00	334.95	-0.5
-3.87	-0.240	-15.98	-0.249	301.86	337.53	-0.4
-5.54	-0.177	-11.77	-0.187	304.63	340.70	-0.3
-4.26	-0.119	-7.95	-0.125	307.38	343.35	-0.2
-0.08	-0.062	-4.15	-0.062	310.11	346.00	-0.1
0.00	0.000	0.00	0.000	313.00	348.98	0
-1.40	0.061	4.10	0.062	315.99	351.78	0.1
0.42	0.125	8.34	0.125	318.98	354.80	0.2
-4.12	0.179	11.95	0.187	321.36	357.52	0.3
-5.45	0.236	15.71	0.249	324.02	360.18	0.4
-4.55	0.297	19.83	0.312	327.02	363.00	0.5
-5.90	0.352	23.46	0.374	329.81	365.34	0.6
-5.80	0.411	27.39	0.436	332.24	368.48	0.7
-5.33	0.472	31.47	0.499	335.12	371.36	0.8

ويبين (الشكل 7.4) علاقة انزياح الصورة على الحساس بدلالة الانزياح العرضاني للعدسة الثانية للقيم المبينة في (الجدول 3.4)



الشكل 7.4. علاقة انزياح الصورة على الحساس بدلالة الانزياح العرضاني للعدسة الثانية

1.4.4. دراسة الارتيايات

1.1.4.4. ارتيايات القيم النظرية

بالنظر إلى أن القيم التي تم استخدامها للأبعاد الهندسية للنظام موضع الدراسة هي القيم الاسمية الواردة في المخططات التصميمية، فإن العلاقة التحليلية (20.2) تخضع للارتيايات التصميمية الواردة في تلك المخططات وقد تم إجراء دراسة الارتيايات على هذه العلاقة بطريقة عددية نظراً لتعقيد دراستها بالطريقة التحليلية، وفيما يلي تفصيل المنهجية المتبعة لحساب الارتيايات باستخدام برنامج MATLAB (الملحق C).

تمثل العلاقة (20.2) معادلة مستقيم ميله:

$$m = \left(\frac{B_s - B_L}{f_L} + 1 \right) \quad (12.4)$$

ولحساب الارتيايات في قيمة انزياح الصورة على الحساس سنحسب مجال الارتيايات لهذا الميل كما يلي:

- استخدام ارتيايات الأبعاد الهندسية كما وردت في المخططات التصميمية:

○ نصف قطر تقوس السطح، بالاعتماد على حلقات نيوتن

$$N = 10$$

وبما أن [20]:

$$\Delta R = \left(\frac{2R}{d} \right)^2 \lambda_{HeNe} N \quad (13.4)$$

حيث: d قطر أكبر حلقة ونفرض بأنها مساوية إلى فتحة العدسة

λ_{HeNe} طول موجة ليزر الهيليوم نيون المستخدم في القياس

$$\Delta t = 0.1 \text{ mm} \quad \circ$$

- توليد عينة من ni عنصر لكل مقدار من المقادير (R, t) تحوي قيم عشوائية، حيث

$$R_i \in R \pm \Delta R$$

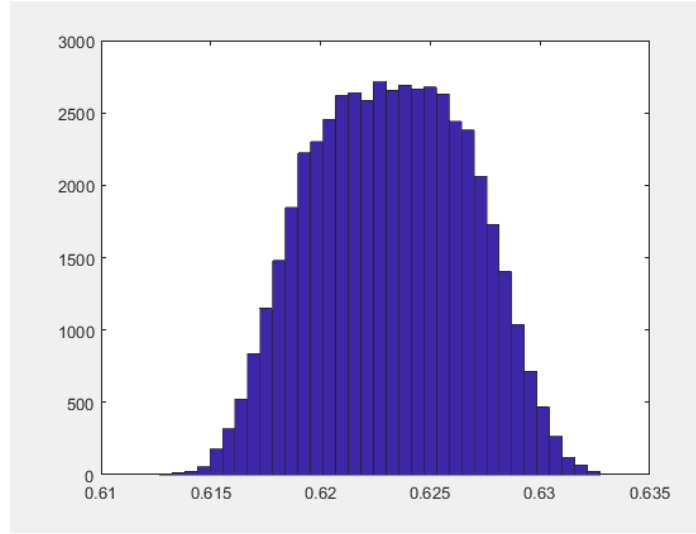
$$t_i \in t \pm \Delta t$$

- حساب قيم $B_{si}, B_{Li}, f_{Li}, m_i$ من أجل كل مقدار في العينة

- في عينة $n_i=50000$ من أجل النظام موضع الاختبار كانت النتائج الإحصائية لعينة m الناتجة كما يلي:

$$\begin{aligned}
 m_{max} &= 0.633 \\
 m_{min} &= 0.613 \\
 m_{mean} &= 0.623 \\
 \sigma_m &= 0.004 \\
 RSD &= \frac{\sigma_m}{m_{mean}} = 0.006
 \end{aligned}$$

والتوزع الإحصائي لهذه العينة (الشكل 8.4)



الشكل 8.4 التوزع الإحصائي لقيم ميل مجموعة نقاط اختبار الانزياح العرضاني للعدسة الثانية المحسوبة من العلاقة التحليلية

2.1.4.4. ارتيابات القيم المقيسة

مصادر خطأ القياس في هذا الاختبار هي الخطأ في تحديد مركز ثقل البقعة على الصورة المحصلة إضافة إلى خطأ ضبط الانزياح العرضاني ΔD والذي يساوي 0.005 mm، ونفرض أن خطأ تحديد إحداثيات مركز الثقل $\Delta i = \Delta j = 0.4$ Pixel.

وبالتالي يكون لدينا من العلاقة (1.4)

$$\Delta s = 2s \frac{(i - i_0)\Delta i + (j - j_0)\Delta j}{(i - i_0)^2 + (j - j_0)^2} \quad (14.4)$$

ولدينا العلاقة (20.2) والتي تمثل علاقة مستقيم نكتبها بالشكل:

$$s = mD \quad (15.4)$$

$$m = \frac{s}{D} \quad (16.4)$$

وبالتالي

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta D}{D} \quad (17.4)$$

$$\Delta m = \frac{\Delta s}{D} + \frac{\Delta D \cdot s}{D^2} \quad (18.4)$$

وبالتالي يكون الارتياح على ميل المستقيم الأفضل مطابقة للنقاط المقيسة:

$$\Delta m = \frac{2s}{D} \frac{(i - i_0)\Delta i + (j - j_0)\Delta j}{(i - i_0)^2 + (j - j_0)^2} + \frac{\Delta D \cdot s}{D^2} \quad (19.4)$$

وبين (الجدول 4.4) قيم الارتياح المحسوبة من أجل القياسات الواردة في (الجدول 3.4)

جدول 4.4 قيم الارتياح المحسوبة من أجل القياسات في اختبار الانزياح العرضاني للعدسة الثانية

Δm	s [mm]	إزاحة العدسة [mm]
0.025	0.473	-0.8
0.028	0.411	-0.7
0.033	0.354	-0.6
0.040	0.297	-0.5
0.050	0.240	-0.4
0.066	0.177	-0.3
0.100	0.119	-0.2
0.201	0.062	-0.1
0.000	0.000	0
0.200	0.061	0.1
0.100	0.125	0.2
0.067	0.179	0.3
0.050	0.236	0.4
0.040	0.297	0.5
0.033	0.352	0.6
0.028	0.411	0.7
0.025	0.472	0.8

وبما أن ميل المستقيم الأفضل مطابقة للنقاط النظرية $m = 0.623$ نكتب النتائج:

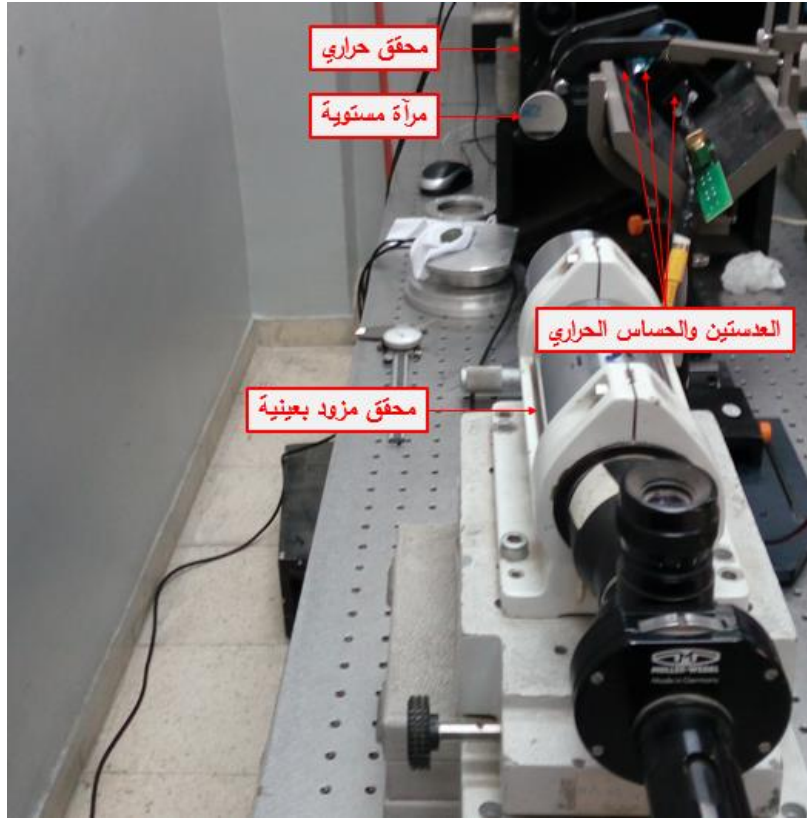
$$m_{max} = m + \overline{\Delta m} = 0.623 + 0.064 = 0.687$$

$$m_{min} = m - \overline{\Delta m} = 0.623 - 0.064 = 0.559$$

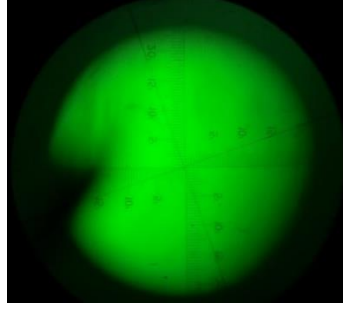
من خلال النتائج السابقة نجد أن الاختبارات التجريبية تدعم النموذج الرياضي المستخرج وأن العلاقة صالحة من خلال النتائج التجريبية.

5.4. اختبار دوران العدسة الثانية

يهدف هذا الاختبار إلى التأكد من صلاحية العلاقة (25.2) تجريبياً، من خلال تحصيل قياسات تجريبية ومقارنتها مع القيم المحسوبة عند نفس زاوية الدوران، وقد تم إجراء هذه التجربة وفق النموذج المبين في (الشكل 1.4): كل من العدستين محمولة ضمن حامل، الحامل بالكامل حر الحركة وفيه محور موازي للمحور y يسمح بدوران حامل العدسة حوله، حامل العدسة الثانية موضوع على مسند قابل للحركة في المستوي $x-z$ ، تشمل عملية الاختبار قياس انزياح الصورة على الحساس نتيجة دوران العدسة الثانية حول محور حاملها بخطوات متساوية قدرها $5'$ ، لقياس زاوية الدوران بدقة تم تركيب مرآة مستوية على حامل العدسة التي سندورها واستخدام محقق مزود بعينية Autocollimator في محرقه شبكة مدرجة يرى انعكاس صورتها على المرآة عبر العينية (الشكل 9.4)، وفي محرق العينية شبكة على شكل تصالب يتم ضبط تصالب العينية على صفر شبكة المحقق وعند تدوير حامل العدسة الثانية تدور المرآة بزاوية فيتغير الوضع النسبي لشبكتي المحقق والعينية ويتم قراءة قيمة الزاوية من خلال موقع تصالب العينية الجديد مع التتويه أن التدرجة المقروءة على شبكة المحقق هي زاوية الانعكاس الفعلية والمساوية إلى زاوية دوران المرآة وإلى نصف الزاوية التي تتحرك وفقها هذه الشبكة (الشكل 10.4).



الشكل 4. 9 صورة المونتاج المخبري لاختبار دوران العدسة الثانية



الشكل 4. 10 صورة شبكة المحقق المستخدم لقياس زوايا دوران العدسة

العلاقة المراد التأكد من صلاحيتها:

$$\varepsilon_R = \alpha \left[\frac{n-1}{n} t \left(\frac{R_F - B_S}{R_F} \right) - l \left(\frac{B_S - B_L}{f_L} + 1 \right) \right]$$

$$\frac{B_S[\text{mm}]}{25.270} \quad \frac{B_L[\text{mm}]}{42.737} \quad \frac{f_L[\text{mm}]}{46.467}$$

قيم المسافات كما تم قياسها حسب (الشكل 6.4) كانت كما يلي:

$$\frac{z_1[\text{mm}]}{23} \quad \frac{z_2[\text{mm}]}{23.9} \quad \frac{z[\text{mm}]}{57.9} \quad \frac{t_1[\text{mm}]}{4} \quad \frac{z_s[\text{mm}]}{16} \quad \frac{l[\text{mm}]}{15.9}$$

والأبعاد الهندسية للنظام موضع الاختبار:

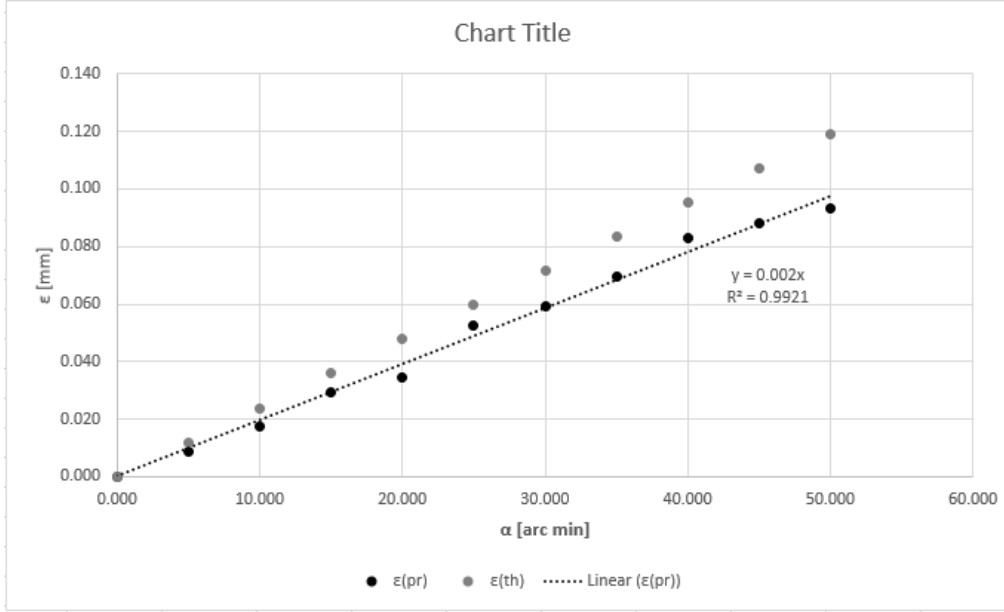
$$\frac{R_1[\text{mm}]}{52.16} \quad \frac{t_1[\text{mm}]}{4} \quad \frac{R_2[\text{mm}]}{55.8} \quad \frac{t[\text{mm}]}{63.3} \quad \frac{R_3[\text{mm}]}{37.38} \quad \frac{t_2[\text{mm}]}{4} \quad \frac{R_4[\text{mm}]}{46.95}$$

بحساب قيمة انزياح الصورة النظرية من العلاقة (25.2) وانزياح الصورة تجريبياً من العلاقتين (1.4) و (6.4) تتلخص نتائج القياسات التي تم تحصيلها في (الجدول 5.4).

جدول 5.4 نتائج قياسات اختبار دوران العدسة الثانية

الارتياح النسبي	ε_{pr} [mm]	S_{Im} [Pixel _{Im}]	$ \varepsilon_{th} $ [mm]	إحداثيات مركز الثقل		α [']
				j	i	
26.786	0.000	0.000	0.000	326.00	383.99	0
26.140	0.009	0.582	0.012	326.28	384.50	5
17.467	0.018	1.174	0.024	326.84	384.81	10
27.744	0.030	1.968	0.036	327.45	385.32	15
12.166	0.034	2.296	0.048	327.73	385.50	20
16.950	0.052	3.489	0.060	329.34	385.00	25
16.437	0.059	3.959	0.072	329.66	385.50	30
12.990	0.070	4.648	0.083	330.36	385.60	35
17.640	0.083	5.531	0.095	331.03	386.29	40
21.874	0.088	5.890	0.107	331.27	386.62	45
26.786	0.093	6.208	0.119	331.66	386.54	50

ويبين (الشكل 11.4) علاقة انزياح الصورة على الحساس بدلالة زاوية دوران العدسة الثانية حول محور يبعد مسافة l عن ذروتها للقيم المبينة في (الجدول 5.4)



الشكل 11.4 علاقة انزياح الصورة على الحساس بدلالة دوران العدسة الثانية

1.5.4 دراسة الارتياحات

1.1.5.4 ارتياحات القيم النظرية

بالنظر إلى أن القيم التي تم استخدامها للأبعاد الهندسية للنظام موضع الدراسة هي القيم الاسمية الواردة في المخططات التصميمية، فإن العلاقة التحليلية (25.2) تخضع للارتياحات التصميمية الواردة في تلك المخططات قد وقد تم إجراء دراسة الارتياحات على هذه العلاقة بطريقة عددية نظراً لتعقيد دراستها بالطريقة التحليلية كما في سبق، تمثل العلاقة (25.2) معادلة مستقيم ميله:

$$m = \left[\frac{n-1}{n} t \left(\frac{R_F - B_S}{R_F} \right) - l \left(\frac{B_S - B_L}{f_L} + 1 \right) \right] \quad (20.4)$$

وباتباع نفس المنهجية المذكورة سابقاً لحساب قيمة الارتياح في قيمة انزياح الصورة على الحساس من خلال حساب مجال الارتياح على الميل باستخدام نفس الارتياحات التصميمية المذكورة في

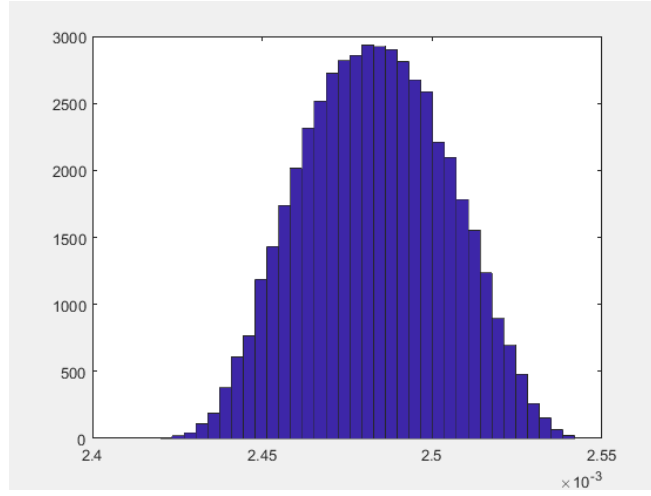
الاختبار السابق مع $\Delta l = 0.1 \text{ mm}$

- حساب قيم $B_{Si}, B_{Li}, f_{Li}, m_i$ من أجل كل مقدار في العينة

- في عينة $n_i=50000$ من أجل النظام موضع الاختبار كانت النتائج الإحصائية لعينة m الناتجة كما يلي:

$$\begin{aligned}
 m_{max} &= 0.0025 \text{ mm} \\
 m_{min} &= 0.0024 \text{ mm} \\
 m_{mean} &= 0.0025 \text{ mm} \\
 \sigma_m &= 0.00002 \text{ mm} \\
 RSD &= \frac{\sigma_m}{m_{mean}} = 0.009
 \end{aligned}$$

والتوزع الإحصائي لهذه العينة (الشكل 12.4)



الشكل 12.4. التوزع الإحصائي لقيم ميل مجموعة نقاط اختبار دوران العدسة الثانية المحسوبة من العلاقة التحليلية

2.1.5.4. ترتيبات القيم المقيسة

مصادر خطأ القياس في هذا الاختبار هي الخطأ في تحديد مركز ثقل البقعة على الصورة المحصلة إضافة إلى خطأ قراءة زاوية الدوران $\Delta\alpha$ والذي يساوي '0.25، ونفرض أن خطأ تحديد إحداثيات مركز الثقل $\Delta i = \Delta j = 0.4\text{Pixel}$.

من العلاقة (16.4)، ولدينا العلاقة (20.2) والتي تمثل علاقة مستقيم نكتبها بالشكل:

$$s = m\alpha \quad (21.4)$$

$$m = \frac{s}{\alpha} \quad (22.4)$$

وبالتالي

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \quad (23.4)$$

$$\Delta m = \frac{\Delta s}{\alpha} + \frac{\Delta \alpha \cdot s}{\alpha^2} \quad (24.4)$$

وبالتالي يكون الارتياح على ميل المستقيم الأفضل مطابقة للنقاط المقيسة:

$$\Delta m = \frac{2s(i - i_0)\Delta i + (j - j_0)\Delta j}{\alpha((i - i_0)^2 + (j - j_0)^2)} + \frac{\Delta\alpha \cdot s}{\alpha^2} \quad (25.4)$$

ويبين (الجدول 6.4) قيم الارتياح المحسوبة من أجل القياسات الواردة في (الجدول 5.4)

جدول 6.4 قيم الارتياح المحسوبة من أجل القياسات في اختبار دوران العدسة الثانية

Δm [mm]	s [mm]	α [arc min]
0.0000	0.000	0
0.0033	0.0087	5
0.0017	0.0176	10
0.0011	0.0295	15
0.0008	0.0344	20
0.0006	0.0523	25
0.0005	0.0594	30
0.0004	0.0697	35
0.0004	0.0830	40
0.0004	0.0883	45
0.0003	0.0931	50

وبما أن ميل المستقيم الأفضل مطابقة للنقاط النظرية $m = 0.0025 \text{ mm}$

نكتب النتائج

$$m_{max} = m + \overline{\Delta m} = 0.0025 + 0.0010 = 0.0035 \text{ mm}$$

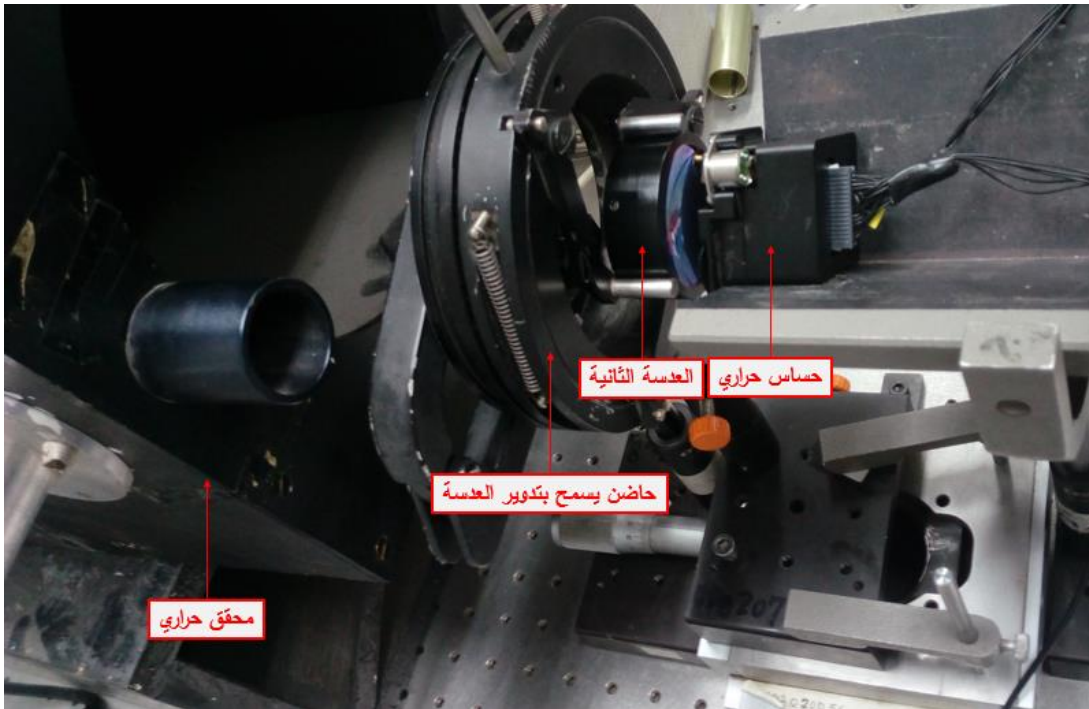
$$m_{min} = m - \overline{\Delta m} = 0.0025 - 0.0010 = 0.0015 \text{ mm}$$

من خلال النتائج السابقة نجد أن الاختبارات التجريبية تدعم النموذج الرياضي المستخرج وأن العلاقة صالحة من خلال النتائج التجريبية.

6.4. اختبار تدوير العدسة الثانية حول محور حاضنها

يهدف هذا الاختبار إلى التأكد من صحة فرضية أنه إذا دارت العدسة الثانية في جسمية حرارية حول المحور الميكانيكي لحاضنها وكانت هذه العدسة خاضعة لأحد الأخطاء المذكورة فإن المحل الهندسي لمسار خط النظر على الحساس هو دائرة نصف قطرها يساوي إلى قيمة الانزياح الناجم

عن هذا الخطأ، تحاكي هذه الحالة تقريباً أحد أنواع التعويض الميكانيكي لابتعاد المحرق الناجم عن تغيرات درجة الحرارة والتي يتم تعويض ابتعاد المحرق فيها من خلال تحريك العدسة وفق المحور z من خلال آلية ميكانيكية تدور العدسة حول محور حاضنها، وقد تم إجراء هذه التجربة وفق النموذج المبين في (الشكل 1.4)، كل من العدستين محمولة ضمن حامل، الحامل بالكامل حر الحركة وفيه محور موازي للمحور y يسمح بدوران حامل العدسة حوله، حامل العدسة الثانية يمس حاضن العدسة الثانية في ثلاث نقاط، وتشمل عملية الاختبار قياس انزياح الصورة على الحساس نتيجة تدوير العدسة الثانية بزوايا تساوي كل منها تقريباً 60° (الشكل 13.4).



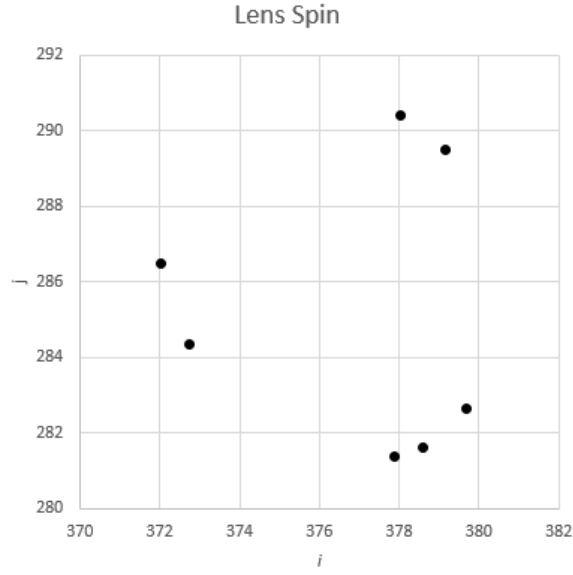
الشكل 13.4 صورة المونتاج المخبري لاختبار تدوير العدسة الثانية حول محور حاضنها

يبين (الجدول 7.4) إحداثيات مركز ثقل البقعة الناتجة عند كل قياس

جدول 7.4 إحداثيات مركز ثقل البقعة الناتجة عن القياسات في اختبار تدوير العدسة الثانية حول محور حاضنها

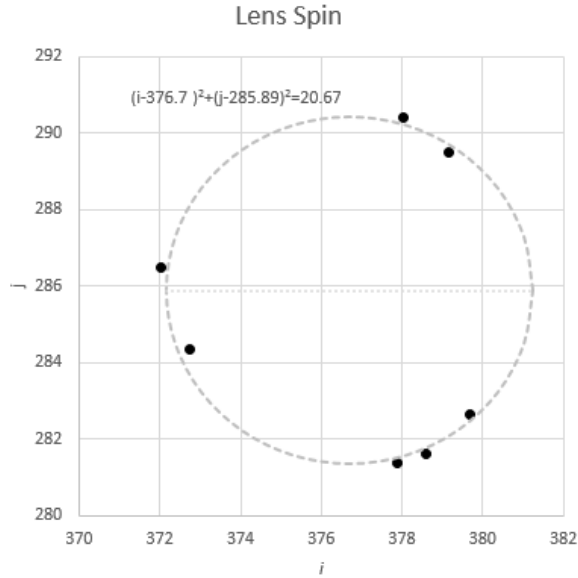
إحداثيات مركز الثقل	
j	i
281.63	378.59
282.64	379.67
289.49	379.17
290.41	378.02
286.48	372.02
284.33	372.73
281.36	377.88

ويبين (الشكل 14.4) توزيع النقاط الواردة في (الجدول 7.4)



الشكل 14.4. توزيع نقاط احداثيات مركز ثقل البقعة في اختبار تدوير العدسة الثانية حول محور حاضنها

وباستخدام طريقة المربعات الصغرى (الملحق B) لحساب أفضل دائرة تمر بهذه النقاط، ويرسم الدائرة الناتجة على نفس الشكل الذي يحوي توزيع هذه النقاط ينتج (الشكل 15.4)



الشكل 15.4. توزيع نقاط احداثيات مركز ثقل البقعة في اختبار تدوير العدسة الثانية حول محور حاضنها وأفضل دائرة تمر منها

نلاحظ أن (الشكل 15.4) يدعم فرضية هذا الاختبار وأن خط النظر ينتقل على محيط دائرة عند تعويض الأثر الحراري بالطريقة الميكانيكية الفعالة بشكل دوراني.

5

“if you can write "hello world"
you can change the world”

- Raghv Venkatesh

العمل البرمجي

العمل البرمجي

1.5. مقدمة

تم بناء واجهات برمجية بهدف الحصول على الحسابات النظرية للدراسة التحليلية والحسابات البصرية للأنظمة المراد دراستها وتحليلها، للاستفادة من مخرجاتها في العمل التجريبي وفي الحصول على القيم النهائية التي تمثل هدف البحث.

2.5. برنامج حساب وتحليل الأنظمة موضع الدراسة

تم بناء هذا البرنامج باستخدام لغة C#، وقد كان الهدف الأولي له الحصول على الحسابات البصرية والهندسية المطلوبة في البحث بسرعة وفعالية وبساطة لمقارنة النتائج النظرية مع النتائج التي تنتج عن التجارب العملية، لاحقاً تم السعي ليكون هذا البرنامج بمثابة أداة فعالة وبسيطة تمكن المصمم البصري والمصمم الميكانيكي من الحصول على نتائج سريعة لأثر التسامحات الميكانيكية وأثر درجة الحرارة على الأنظمة البصرية التي تتشكل عدساتها من مادة الجرمانيوم بالإضافة إلى الحصول على الحسابات البصرية لهذه الأنظمة وبيبين (الشكل 5.1) الواجهة الرئيسية للبرنامج.

Surf. No	Radius [mm]	Thick [mm]	Glass	TCE [PPM]
Surf. 1	57.8	7	Ge	-5.9
Surf. 2	71.7	100	Air	23
Surf. 3	27.2	7	Ge	-5.9
Surf. 4	26.3	20.89695	Air	23

Ray Tracing at 20.15C				
No.	n	U[rad]	Y[rad]	
1	1	0	1	
2	4.00438	-0.01107	0.92254	
3	1	-0.00566	0.35693	
4	4.00438	-0.01126	0.27812	
5	1	-0.01331	0	

Ray Tracing at -20C				
No.	n	U[rad]	Y[rad]	
1	1	0	1	
2	3.9878	-0.01105	0.9227	
3	1	-0.00562	0.36088	
4	3.9878	-0.01135	0.28149	
5	1	-0.01328	0	

EFL: 75.13581, 75.27852
BFL: 20.89695, 21.18988
Last lens EFL: 54.71287, 55.14123
Last Lens BFL: 44.14863, 44.51632

الشكل 5.1 الواجهة الرئيسية لبرنامج حساب وتحليل الأنظمة موضع الدراسة

وفيما يلي تفصيل عناصر الواجهة (الشكل 1.5)

1. المدخلات الرئيسية للجملة

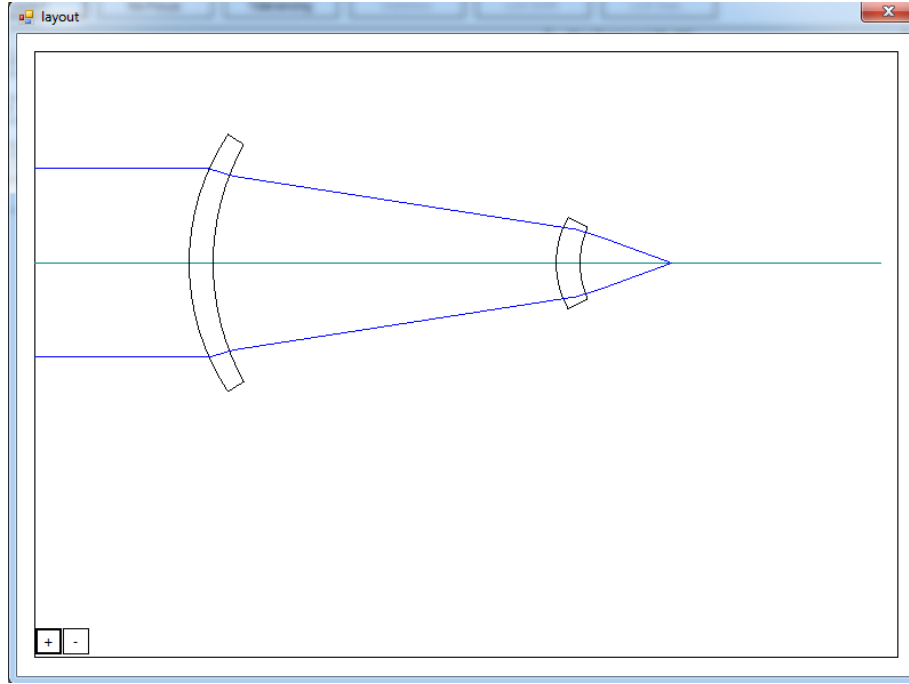
- طول الموجة: يقبل ثلاثة أطوال موجية هي (8, 10, 12 μ m).
- فتحة التوقف: يتعامل مع حالة وحيدة تكون فيها فتحة التوقف موجودة عند السطح الأول في الجملة البصرية.
- عدد السطوح البصرية: يقبل عدد غير محدد من السطوح البصرية.

2. الأبعاد الهندسية ودرجة الحرارة

- الأبعاد الهندسية للجملة البصرية: يتم إدخال الأبعاد الهندسية بطريقة مشابهة لإدخالها في برنامج Zemax والتي تعتبر طريقة مألوفة لأي مختص في تصميم وتحليل الأنظمة البصرية.
- درجة الحرارة: إدخال درجة الحرارة اختياري وتكون الحسابات في الحالة الافتراضية عند درجة حرارة (20.15°C) وعند إدخال درجة حرارة يطلب إدخال معاملات التمدد الحراري الخطي، ويدخل أثر درجة الحرارة على قرينة انكسار مادة العدسة وعلى التغيرات الطولية للمسافات الهوائية والزجاجية وفق المحور Z وعلى أنصاف أقطار تقوسات السطوح البصرية.

3. شريط الأوامر ويحوي المهام التي يؤديها البرنامج

- إجراء الحسابات الأولية: يقوم هذا الأمر بحساب وإظهار قيم مقادير تعقب الأشعة عند درجة الحرارة الافتراضية ودرجة الحرارة المدروسة، بالإضافة لحساب وإظهار قيم الأبعاد المحرقة الفعالة والخلفية لكل من الجملة والعدسة الأخيرة عند درجتَي الحرارة المذكورتين (الشكل 5.1) المناطق (4, 5, 6).
- رسم المخطط البصري للجملة (الشكل 2.5)



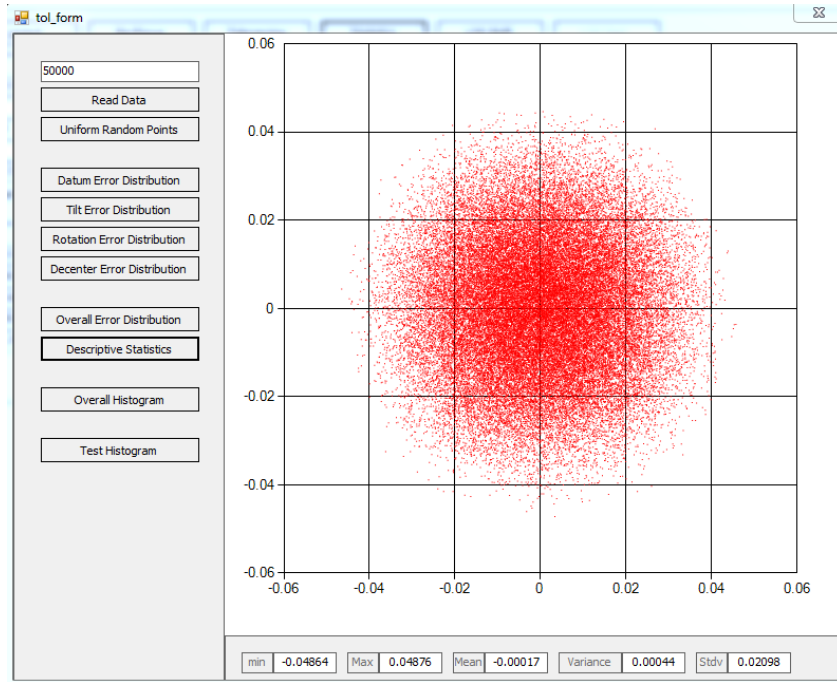
الشكل 5. 2 نافذة رسم المخطط البصري للجملة في برنامج حساب وتحليل الأنظمة موضع الدراسة

- ضبط محرقة الجملة مع درجة الحرارة: يتعامل هذا الأمر مع جسمية حرارية مكونة من عدستين من الجرمانيوم ويحسب المسافات الهوائية الجديدة (مقدار إزاحة العدسة الثانية طولياً) عند درجة الحرارة التي تم إدخالها بحيث تتمحرق الأشعة القادمة من اللانهاية على سطح الحساس في الحالة التي يكون فيها كل من الحساس والعدسة الأولى ثابتين ضمن هيكل الجسمية والعدسة الثانية قابلة للحركة ويظهر مقادير تعقب الأشعة في هذه الحالة.
- حسابات أثر التسامحات على خط النظر: يقوم هذا الأمر بحساب قيمة انزياح موقع خط النظر على الحساس في حالات الميلان والانزياح العرضاني والدوران للعدسة الثانية (الشكل 3.5).

Displacement calculations according to tolerancing data			
Tilt [°]	5		
Decenter [mm]	0.2		
datum [°]	5	27.2	
Rot [°][mm]	5	16	
<input type="button" value="Calc. Displacement"/>			
		At 20.15C	At -20C
		0.00157	0.00146
		0.115	0.1156
		-0.02118	-0.0214
		-0.01181	-0.01199

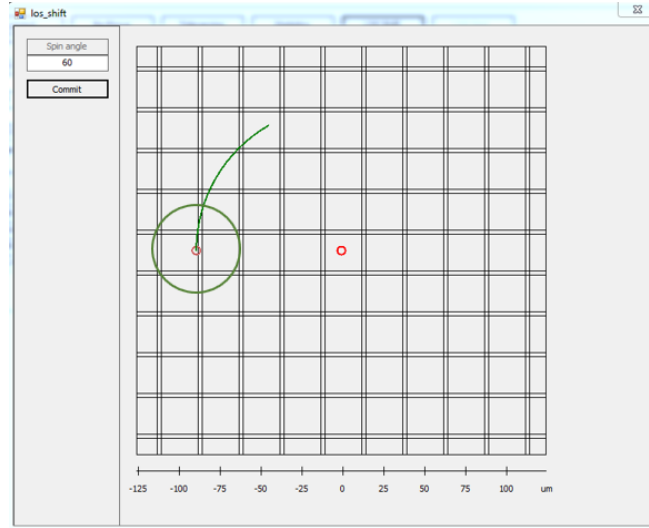
الشكل 5. 3 الجزء الذي يظهر حسابات أثر التسامحات على خط النظر من واجهة برنامج حساب وتحليل الأنظمة موضع الدراسة

- التحليل الإحصائي للنتائج وفيه يتم تنفيذ المهام التالية (الشكل 4.5):
 - إظهار مخططات التبعثر لتوزع الانزياحات الناجمة عن كل خطأ من الأخطاء المدروسة في عينة عشوائية.
 - إظهار مخطط التبعثر لمجموع هذه الأخطاء بافتراضها متغيرات مستقلة عشوائياً.
 - إظهار مخطط التوزع الإحصائي Histogram للتوزيع السابق
 - حساب مقادير الإحصاء الوصفي للتوزيع السابق



الشكل 5. 4 نافذة التحليل الإحصائي لقيم انحراف خط النظر في برنامج حساب وتحليل الأنظمة موضع الدراسة

- انزياح موقع خط النظر بنتيجة التصحيح الدوراني للعدسة الثانية: حيث يعتبر هذا الأمر أن التعويض الحراري يتم من خلال التدوير الميكانيكي لحاكن العدسة الثانية، وبناء عليه يظهر هذا الأمر شكلاً تقريبياً كبيراً لعدد من بيكسلات الحساس يتضمن موقع خط النظر في الحالة المثالية الخالية من أخطاء التسامحات ويتضمن موقع خط النظر الناجم عن أكبر خطأ ممكن لمجموع الأخطاء كما يتضمن أيضاً مسار موقع خط النظر على الحساس خلال تدوير العدسة بقيمة يتم تحديدها، مع ملاحظة أن قيمة الزاوية التي ستدورها العدسة تتعلق بالطريقة الميكانيكية المستخدمة لتدوير العدسة وبقية الإزاحة الطولية المحسوبة لتعويض الأثر الحراري (الشكل 5.5).



الشكل 5.5. نافذة محاكاة التعويض الميكانيكي الفعال وتوضيح مسار خط النظر على الحساس خلال هذا التعويض

كما يظهر (الشكل 5.5) الأثر الناجم عن التعويض الحراري وفق حركة انسحابية للحاضن والذي يضيف خطأ دوران عشوائي في أحد الاتجاهات زاويته كما في (الشكل 16.1) يسبب هذا الدوران انحرافاً إضافياً في خط النظر ما يعني انتقاله ضمن دائرة نصف قطرها يساوي قيمة الانحراف الأعظمي الناتج عن هذا الدوران.

1.2.5. التحقق من صلاحية الحسابات بالاستعانة ببرنامج Zemax

يهدف هذا الإجراء إلى التحقق من صلاحية كلاً من النموذج الرياضي والعمل البرمجي من خلال المقارنة مع الحسابات التي يجريها برنامج Zemax بوصفه تطبيق مرجعي في تصميم وتحليل الأنظمة البصرية.

عند إجراء الحسابات باستخدام البرنامج لحساب قيم انزياح الصورة الناتجة عن التغيرات التي تطرأ على العدسة الثانية في الجسمية الاختبارية التي تم تصميمها وفق ما يلي:

- ميلان بمقدار 5'
- انزياح عرضاني بمقدار 0.1mm
- دوران حول مركز تقوس السطح الأول للعدسة الثانية بمقدار 5'

كانت النتائج حسب البرنامج كما في (الشكل 6.5)

Displacement calculations according to tolerancing data

Tilt [']	5		
Decenter [mm]	0.1		
datum [']	5	27.2	
Rot ['][mm]	0	0	

At 20.15C

0.00157
0.0575
-0.02118
0

Calc. Displacement

الشكل 6.5 حسابات انحراف خط النظر على تصميم الجسمية الاختبارية في برنامج حساب وتحليل الأنظمة موضع الدراسة

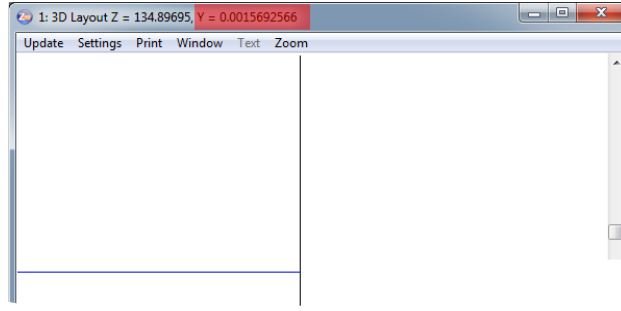
وبإدخال نفس هذه التغيرات على العدسة الثانية في تصميم الجسمية الاختبارية باستخدام برنامج Zemax وفق الطريقة التالية:

- إجراء كسر إحداثيات (Coordinate break) للعدسة الثانية كما في (الشكل 7.5)، ويتم هذا الإجراء في Zemax من خلال تغيير نوع السطح Surface type حيث يسمح هذا الكسر بإزاحة أو ميلان المحور حول أحد المحاور الاحداثية.

Lens Data Editor								
Edit Solves View Help								
		Glass	Semi-Diameter	Conic	Par 0 (unused)	Decenter X	Decenter Y	Tilt About X
OBJ	Standard		0.000	0.000				
*	Standard	GERMANIUM	38.061 U	-0.073				
2*	Standard		35.740 U	0.000				
3	Coordinat..	-	0.000			0.000	0.100	0.000
4*	Standard	GERMANIUM	17.538 U	0.000				
5*	Standard		14.370 U	0.000				
6	Coordinat..	-	0.000			0.000 P	-0.100 P	0.000 P
7	Standard	P	12.025	0.000				
IMA	Standard		0.108	0.000				

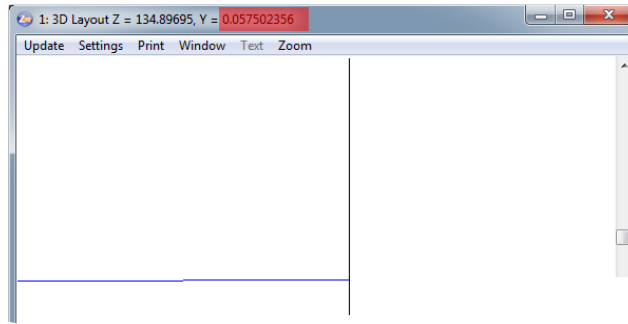
الشكل 7.5 إجراء كسر إحداثيات على العدسة الثانية باستخدام Zemax

- إدخال قيم التغيرات السابقة
 - انزياح الصورة الناتج عن ميلان العدسة بمقدار 5' (الشكل 8.5) من خلال نافذة Layout وتكبير الشكل إلى حد كبير للحصول على دقة كافية في قراءة إحداثيات نقطة تقاطع الشعاع الصفري مع مستوي الصورة، ونجد من خلال الشكل التتابع بين القيمة المحسوبة في هذه الدراسة والقيمة الناتجة عن برنامج Zemax.



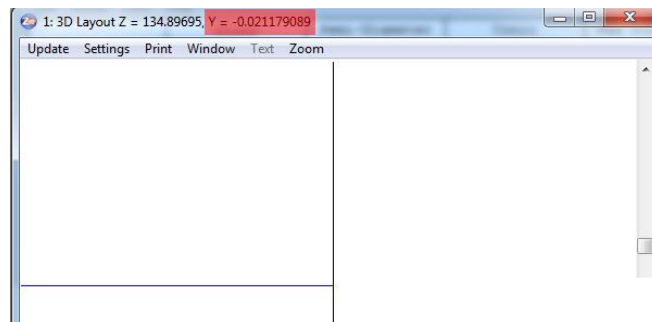
الشكل 5. 8 قيمة انحراف خط النظر نتيجة ميلان العدسة كما تظهر في نافذة Layout في Zemax

- انزياح الصورة الناتج عن الانزياح العرضاني للعدسة بمقدار 0.1 mm (الشكل 9.5)، ونجد من خلال الشكل التطابق بين القيمة المحسوبة في هذه الدراسة والقيمة الناتجة عن برنامج Zemax.



الشكل 5. 9 قيمة انحراف خط النظر نتيجة الانزياح العرضاني للعدسة كما تظهر في نافذة Layout في Zemax

- انزياح الصورة الناتج عن دوران العدسة حول مركز السطح الأول (الشكل 10.5)، ونجد من خلال الشكل التطابق بين القيمة المحسوبة في هذه الدراسة والقيمة الناتجة عن برنامج Zemax.



الشكل 5. 10 قيمة انحراف خط النظر نتيجة دوران العدسة كما تظهر في نافذة Layout في Zemax

وبالنتيجة، فقد تطابقت قيم انحراف خط النظر المحسوبة باستخدام العلاقات التحليلية المستخرجة لحساب هذا الانحراف مع قيمه بحسب برنامج Zemax، ويلخص (الجدول 1.5) هذه النتائج، مع التنويه بأن القيم المحسوبة والتي تظهر في البرنامج المكتوب مقربة إلى خمسة أرقام عشرية.

جدول 1.5 نتائج التحقق من صلاحية الحسابات باستخدام Zemax

نوع الخطأ	قيمة الخطأ	القيمة المحسوبة	القيمة بحسب Zemax
ميلان	$\alpha = 5'$	0.00157	0.0015692566
انزياح عرضاني	$D = 0.1 \text{ mm}$	0.05750	0.057502356
دوران	$\alpha = 5' \quad l = 27.2 \text{ mm}$	-0.02118	-0.021179089

3.5. برنامج معالجة الصورة

تم بناء هذا البرنامج باستخدام Delphi 7 للمساعدة في حساب القيم الناتجة عن العمل التجريبي، حيث يهدف هذا البرنامج بشكل رئيسي إلى حساب مركز ثقل صورة وتحديد إحداثياتها وفق محورين مقدره بالبيكسل، ويتم هذا الإجراء من خلال تحويل الصورة إلى تدرج الرمادي أولاً ومن ثم إيجاد مركزها اعتماداً على شدة إضاءة كل بكسل فيها وفيما يلي المبدأ النظري لهذه الإجراءية.

1.3.5. المبدأ النظري:

بشكل مشابه لمفهوم مركز ثقل جسم يمكن حساب مركز البقعة الضوئية من خلال إيجاد النقطة الوسطى فيها متقلة بالشدة الضوئية وبالتالي تكتب بالعلاقة:

$$(C_i, C_j) = \frac{\sum [I(i, j) \times (i, j)]}{\sum I(i, j)} \quad (1.5)$$

حيث I الشدة الضوئية في بيكسل (i, j) .

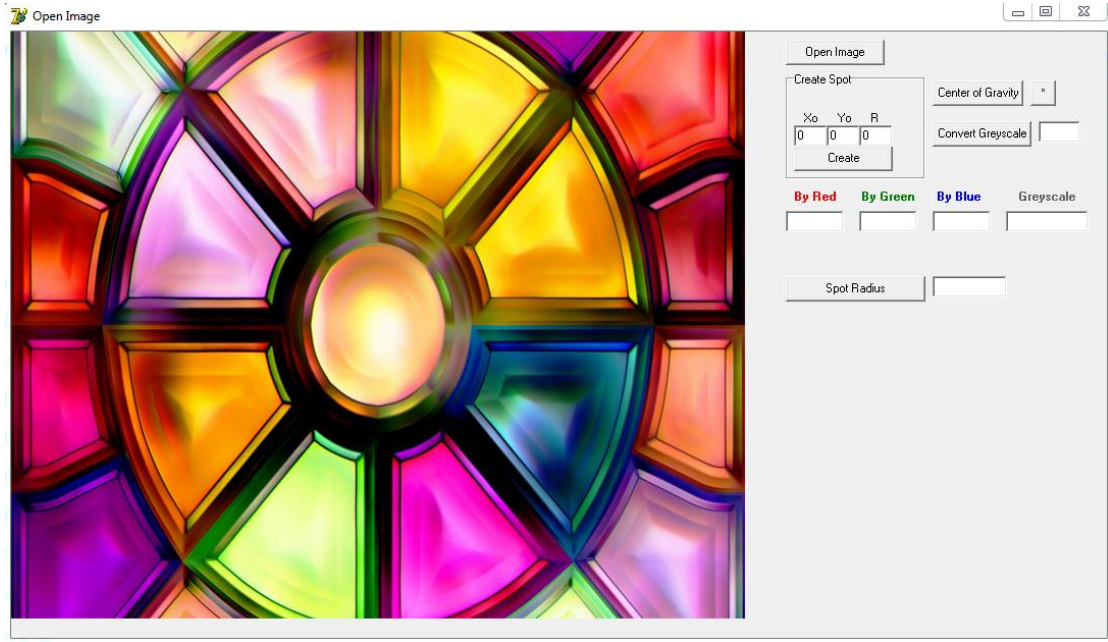
في التمثيل اللوني 24-bit للصور يتم ترميز كل بيكسل في الصورة بثلاثة مكونات لونية هي الأحمر والأخضر والأزرق (RGB) ويمثل كل مكون بمقدار 8-bit (256 قيمة) وبالمحصلة يمكن أن تحوي الصورة 2^{24} لون، ولإيجاد الشدة الضوئية في الصورة يتم تحويلها إلى تدرج الرمادي Greyscale حيث يتم ترميز كل بيكسل فيها بقيم تتراوح بين 0 للون الأسود و 255 للون الأبيض (256 قيمة فقط) أو ما يعرف بتحويل الصورة من الفضاء (RGB) إلى الفضاء (YIQ) حيث يمثل

المقدار Y الإنارة أو الشدة الضوئية ويحوي معلومات التدرج الرمادي وينسبة تصل إلى 93% من الإشارة في الصورة فيما تمثل المقادير IQ التفاصيل اللونية ولا تتجاوز نسبة مساهمتها من الإشارة 7%، وتعطى علاقة التحويل بين الفضاءين (RGB) و (YIQ):

$$\begin{bmatrix} Y(m,n) \\ I(m,n) \\ Q(m,n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(m,n) \\ G(m,n) \\ B(m,n) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

وللحصول على صورة رمادية يتم تحويل كل بيكسل بترميز RGB إلى بيكسل YIQ والاحتفاظ بالمقدار Y وإهمال المقدارين IQ مع ملاحظة أن قيم هذه المقادير هي أعداد صحيحة وبالتالي يتم تقريب الناتج إلى أقرب عدد صحيح [21].

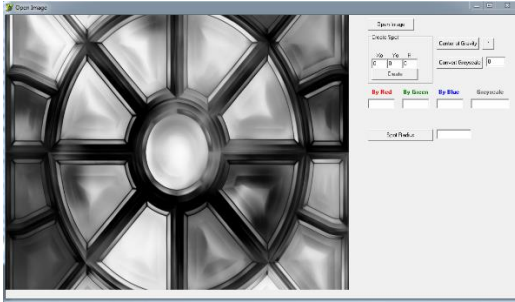
يبين (الشكل 11.5) الواجهة الرئيسية لهذا البرنامج وفيه صورة تجريبية لتوضيح عمل البرنامج.



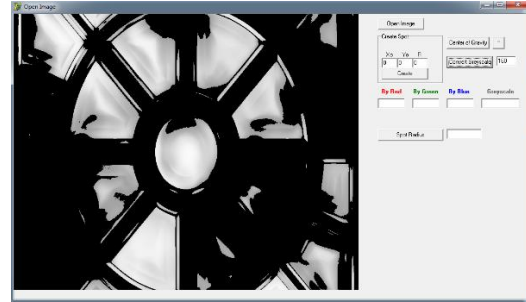
الشكل 11.5. الواجهة الرئيسية لبرنامج معالجة الصورة

ويقوم هذا البرنامج بالمهام التالية:

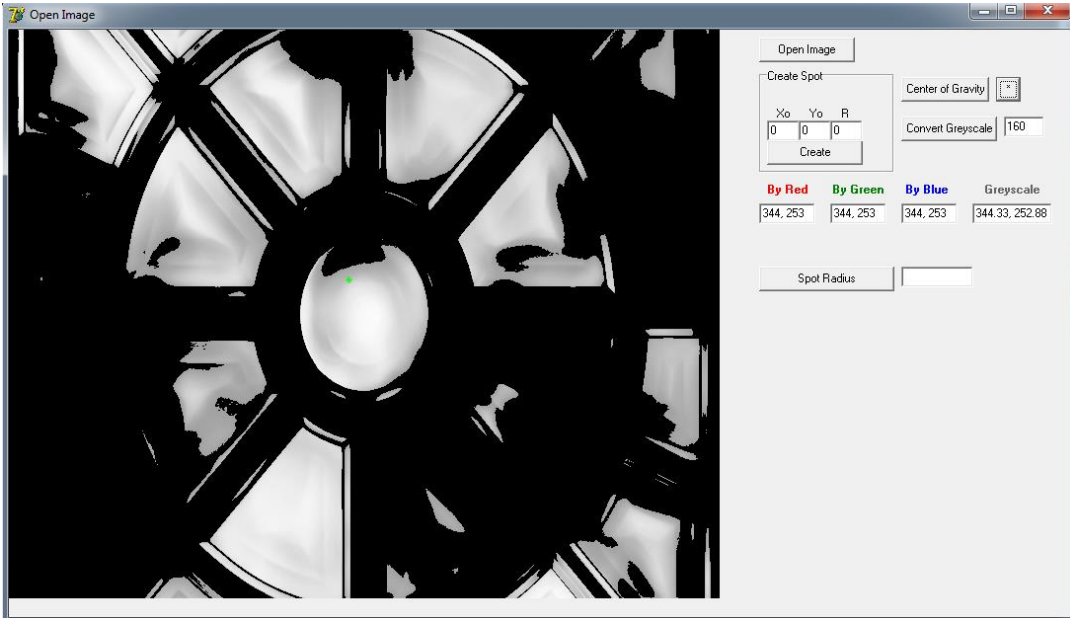
- تحويل صورة بتنسيق bmp إلى تدرج الرمادي (الشكل 12.5).
- تحديد عتبة إضاءة (عتبة رمادية) وحذف إضاءة البيكسلات (تحويلها للون الأسود) التي تقل إضاءتها عن هذه العتبة (الشكل 13.5) ويفيد هذا الإجراء خلال العمل التجريبي كما وجدنا في المحافظة على البقعة المراد دراسة انزياحها وحذف بقية التفاصيل من صورة الحساس الحراري.
- تحديد مركز ثقل الصورة (الشكل 14.5).
- حساب نصف قطر البقعة المضاءة ضمن الصورة.



الشكل 5. 13 صورة محولة إلى تدرج الرمادي باستخدام برنامج معالجة الصورة



الشكل 5. 12 صورة تبين حذف إضاءة بيكسلات تقل عن عتبة محددة باستخدام برنامج معالجة الصورة



الشكل 5. 14 حساب إحداثيات مركز ثقل صورة وتحديدها بواسطة تصالب صغير على الصورة باستخدام برنامج معالجة الصورة

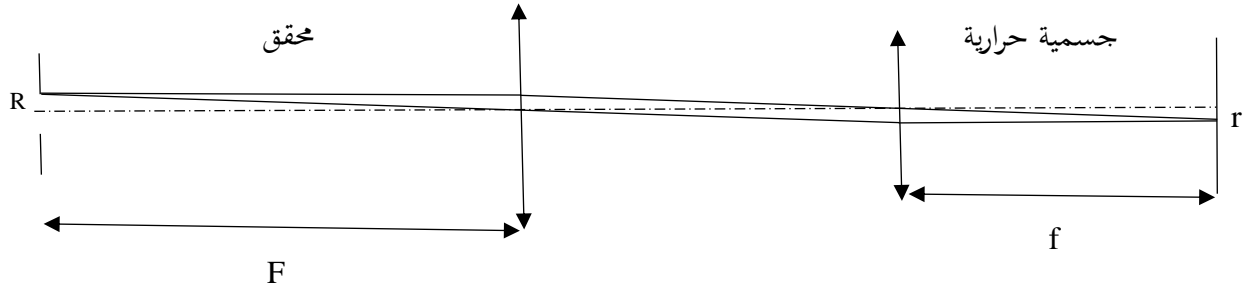
وجدنا من خلال هذا البحث أن خط النظر في الأنظمة الحرارية يتأثر بشكل ملحوظ بقيم التسامحات الميكانيكية، كما تبين أن تأثير الانزياح العرضاني ودوران العدسة أكبر من تأثير ميلانها، وقد أيدت الاختبارات التجريبية الدراسة التحليلية والنماذج الرياضية المستخرجة، وبناءً عليه فإن الاختلاف في تموضع العدسات ضمن الجملة البصرية عن الحالة التصميمية سينتج عنه انحراف في خط النظر يتناسب مع قيم التسامحات الميكانيكية، وبالرغم من أن التعامل مع انحراف خط النظر ممكن عندما يظهر هذا الانحراف خلال مراحل التصنيع والتجميع من خلال عمليات الضبط، إلا أن التغيرات التي تطرأ على مواضع العدسات سواءً نتجت هذه التغيرات عن التعويض الميكانيكي للأثر الحراري أم نتجت عن تفاعل الأنظمة مع البيئة المحيطة من خلال ظروف الصدم والهز، فإن هذه التغيرات تفرض على المصمم معرفة مسبقة بتأثيرها على خط النظر، وعلى اعتبار أن أهمية استقرار خط النظر في الأنظمة الحرارية تعتمد على طبيعة التطبيق الذي يستخدم هذا النوع من الأنظمة، بالتالي فإن مسألة تضيق أو زيادة قيم التسامحات الميكانيكية يمكن أن تحسم منذ المرحلة التصميمية بناءً على طبيعة التطبيق من خلال قيم الانحراف المحسوبة حسب التصميم البصري والتصميم الميكانيكي للنظام، ويمكن استخدام البرنامج الذي قمنا بكتابته للحصول على التوزع الاحصائي للانحرافات الناتجة عن هذه القيم التصميمية.

من الممكن في الدراسات المستقبلية التوسع في هذه الدراسة لتشمل أثر التغيرات الناتجة عن عدة عدسات في أنظمة تحوي أكثر من عدستين، وإيجاد خوارزمية موسعة قابلة للبرمجة لإجراء هذه الحسابات، كما يمكن توسيع عمل البرنامج للتعامل مع قوالب تصميمية واستخدامها لتحديد قيم التسامحات الميكانيكية الممكنة للحصول على قيم انحرافات ضمن مجال مسموح.

الملحقات

الملحق A - تقدير الارتياب في حساب مركز ثقل البقعة

نضع ثقباً دائرياً مضاء في محرق المحقق فنتشكل صورته في المستوي المحرقي للجسمية الحرارية حيث نضع حساساً مصفوفياً ويكون نصف قطر صورة الثقب كما يلي:



$$\frac{R}{F} = \frac{r}{f}$$

حيث:

R: نصف قطر الثقب الموجود في محرق المحقق

r: نصف قطر صورة الثقب على الحساس الحراري

f: البعد المحرقي للجسمية الحرارية

F: البعد المحرقي للمحقق

$$r = \frac{f}{F} R$$

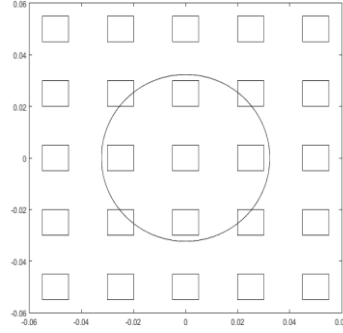
$$f = 55 \text{ mm}$$

$$F = 1700 \text{ mm}$$

$$R = 1 \text{ mm}$$

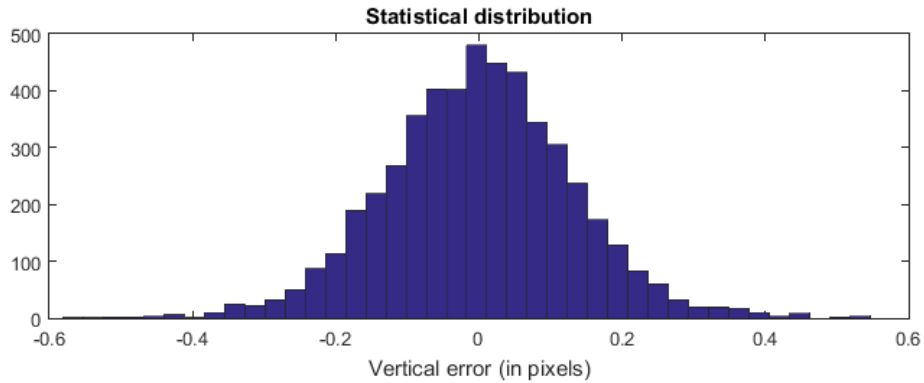
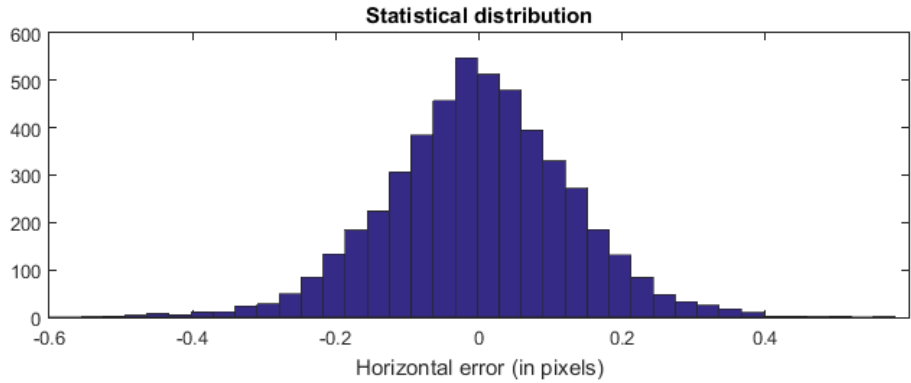
$$r = \frac{55}{1700} = 0.032 \text{ mm}$$

صورة الثقب فوق الحساس تكون كما يلي:



منهجية تقدير الارتياح:

نأخذ بقعة دائرية نصف قطرها يساوي 0.032 mm ويساوي نصف قطر الثقب المحسوب أعلاه. ونحسب شدة إضاءة كل بكسل بحسب تقاطع مساحتي البيكسل المعتبر مع البقعة الدائرية وننسب هذه الإضاءة إلى مركز البيكسل ثم نحسب مركز الثقل بـتثقيل كل بكسل بالإضاءة الواردة عليه ثم نأخذ الفرق بين المركز المحسوب وبين مركز البقعة الدائرية. ثم نقوم بتغيير مركز البقعة عشوائياً أفقياً وعمودياً ضمن مجال ضعفي البيكسل ونعيد الكرة 5000 مرة ونضيف ضعيفاً غوصياً بنسبة إشارة إلى الضجيج متدنية تساوي 2. ثم نقوم باحتساب الارتياح إحصائياً فنحصل على النتائج التالية:



من التوزيع الإحصائي للارتياح أعلاه نرى أننا نستطيع بشكل آمن اعتباره مساوياً 0.4 بكسل في كلا الاتجاهين الأفقي والعمودي وهذا أمر جيد إذ أن هذه المنهجية تؤمن دقة أصغر من بكسل في حساب مركز الثقل.

نص البرنامج المكتوب في Matlab:

```
R=1/1.7*55/1000;
p=0.025; ps=0.015;
xx0=0; yy0=0.0;
R2=R^2;
np=3;
dx=ps/50; dy=ps/50;
x0=xx0; y0=yy0;
kmax=fix((x0+R)/p+ps/2/p);
lmax=fix((y0+R)/p+ps/2/p);
kmin=fix((x0-R)/p-ps/2/p);
lmin=fix((y0-R)/p-ps/2/p);

fi=0:pi/100:2*pi;
qqx=x0+R*cos(fi);
qqy=y0+R*sin(fi);
plot(qqx,qqy,'k')
hold on

for k=kmin-1:kmax+1
    for l=lmin-1:lmax+1

        qqx=[k*p-ps/2 k*p+ps/2 k*p+ps/2 k*p-ps/2 k*p-ps/2];
        qqy=[l*p-ps/2 l*p-ps/2 l*p+ps/2 l*p+ps/2 l*p-ps/2];
        plot(qqx,qqy,'k')
        hold on

    end
end

kk=0; ni=5000;
qxc=[]; qyc=[];
s_n=2;
for i=1:ni
x0=xx0+(2*rand-1)*np*p; y0=yy0+(2*rand-1)*np*p;
xc=0; yc=0; q=0; stot=0; s=[];

for k=kmin-1-np:kmax+1+np
    for l=lmin-1-np:lmax+1+np
        q=q+1;
        s(q)=0;
```

```

    for x=k*p-ps/2:dx:k*p+ps/2
        qx=(x-x0)^2;
        for y=l*p-ps/2:dy:l*p+ps/2
            if (y-y0)^2+qx<=R2
                s(q)=s(q)+1;
            end
        end
    end
    sn=s(q)*(1+randn/s_n);
    xc=xc+k*sn;
    yc=yc+l*sn;
    stot=stot+sn;
end
end
if stot~=0
    xc=xc/stot;
    yc=yc/stot;

    kk=kk+1;
    qxc(kk)=xc-x0/p;
    qyc(kk)=yc-y0/p;
end
disp([num2str(i/ni*100) '% done'])
end
figure(1)
plot(1:kk,qxc,1:kk,qyc)

figure(2)
subplot(2,1,1)
hist(qxc,40)
xlabel('Horizontal error (in pixels)')
title('Statistical distribution')

subplot(2,1,2)
hist(qyc,40)
xlabel('Vertical error (in pixels)')
title('Statistical distribution')

disp(['dx: ' num2str(mean(qxc)) '+-' ' num2str(std(qxc))])
disp(['dy: ' num2str(mean(qyc)) '+-' ' num2str(std(qyc))])

```

الملحق B - حساب الدائرة الأفضل مطابقة لمجموعة من النقاط

تعطى معادلة الدائرة في الإحداثيات الديكارتية:

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (B.1)$$

كما تكتب بالشكل:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (B.2)$$

$$x^2 + y^2 - 2xx_0 - 2yy_0 + x_0^2 + y_0^2 - R^2 = 0 \quad (B.3)$$

وبالمطابقة مع العلاقة (B.1):

$$x_0 = -\frac{a}{2} \quad (B.4)$$

$$y_0 = -\frac{b}{2} \quad (B.5)$$

$$R = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - c} \quad (B.6)$$

وبتطبيق طريقة المربعات الصغرى على المعادلة (B.1) من أجل مجموعة النقاط:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2 \quad (B.7)$$

$$\frac{\partial \Delta}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2x_i(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c) = 0 \quad (B.8)$$

$$\frac{\partial \Delta}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2y_i(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c) = 0 \quad (B.9)$$

$$\frac{\partial \Delta}{\partial c} = \sum_{i=1}^n 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c) = 0 \quad (B.10)$$

وبأخذ المتوسطات ينتج لدينا

$$\overline{x^3} + \overline{xy^2} + a\overline{x^2} + b\overline{xy} + c\overline{x} = 0 \quad (B.11)$$

$$\overline{yx^2} + \overline{y^3} + a\overline{xy} + b\overline{y^2} + c\overline{y} = 0 \quad (B.12)$$

$$\overline{x^2} + \overline{y^2} + a\overline{x} + b\overline{y} + c = 0 \quad (B.13)$$

$$\begin{bmatrix} \overline{x^2} & \overline{xy} & \overline{x} \\ \overline{xy} & \overline{y^2} & \overline{y} \\ \overline{x} & \overline{y} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\overline{x^3} - \overline{xy^2} \\ -\overline{yx^2} - \overline{y^3} \\ -\overline{x^2} - \overline{y^2} \end{bmatrix} \quad (B.14)$$

بحل جملة المعادلات (B.11) (B.12) (B.13) من أجل (a, b, c) والتعويض في المعادلات (B.4)
(B.5) (B.6) تنتج معادلة الدائرة الأفضل مطابقة لمجموعة النقاط.

الملحق C - نصوص برامج دراسة الارتياحات بطريقة عددية باستخدام MATLAB

أولاً: نص برنامج دراسة ارتياحات علاقة انزياح الصورة مع انزياح العدسة عرضانياً

```
ni = 50000;
sur = 4;
Nn = 10;
lamda = 0.0006328;
m = zeros(size(ni));
B = zeros(size(ni));
fil = zeros(size(ni));
f1 = zeros(size(ni));
fi2 = zeros(size(ni));
f2 = zeros(size(ni));
B1 = zeros(size(ni));
B2 = zeros(size(ni));

R(1, 1) = 52.16; C(1, 1) = 1 / R(1, 1);
R(1, 2) = 55.8; C(1, 2) = 1 / R(1, 2);
R(1, 3) = 37.38; C(1, 3) = 1 / R(1, 3);
R(1, 4) = 46.95; C(1, 4) = 1 / R(1, 4);

t(1, 2) = 4;
t(1, 3) = 63.6;
t(1, 4) = 4;
t(1, 5) = 0;

n(1, 1) = 1;
n(1, 2) = 4.0043799419502;
n(1, 3) = 1;
n(1, 4) = 4.0043799419502;
n(1, 5) = 1;

h(1, 1) = 32;
h(1, 2) = 30;
h(1, 3) = 23;
h(1, 4) = 22;

dR1 = ((R(1, 1)*R(1, 1))/(h(1, 1)*h(1, 1)))*Nn*lamda;
dR2 = ((R(1, 2)*R(1, 2))/(h(1, 2)*h(1, 2)))*Nn*lamda;
dR3 = ((R(1, 3)*R(1, 3))/(h(1, 3)*h(1, 3)))*Nn*lamda;
dR4 = ((R(1, 4)*R(1, 4))/(h(1, 4)*h(1, 4)))*Nn*lamda;

dt = 0.1;

u = [0 0 0 0 0];
y = [1 0 0 0 0];

for i = 2:5
    u(i) = (n(1, i-1)*u(i-1))/n(1, i) - (y(i-1)*(n(1, i)-n(1, i-1)))*C(1, i-1)/n(1, i);
    y(i) = y(i-1) + t(1, i)*u(i);
end
t(1, 5) = -y(4)/u(5);
for i = 2:5
    u(i) = (n(1, i-1)*u(i-1))/n(1, i) - (y(i-1)*(n(1, i)-n(1, i-1)))*C(1, i-1)/n(1, i);
```

```

    y(i) = y(i-1) + t(1, i)*u(i);
end

B(1) = t(1, 5);
fi1(1) = (n(1, 2) - 1)*(C(1, 1) - C(1, 2) + ((n(1, 2)-1)/n(1,
2))*t(1, 2)*C(1, 1)*C(1, 2));
f1(1) = 1/fi1(1);
fi2(1) = (n(1, 4) - 1)*(C(1, 3) - C(1, 4) + ((n(1, 2)-1)/n(1,
2))*t(1, 4)*C(1, 3)*C(1, 4));
f2(1) = 1/fi2(1);
B1(1) = f1(1) - (f1(1)*t(1, 2)*(n(1, 2)-1)/(n(1, 2)*R(1, 1)));
B2(1) = f2(1) - (f2(1)*t(1, 4)*(n(1, 4)-1)/(n(1, 4)*R(1, 3)));

m(1) = (B(1)-B2(1))/f2(1) + 1;

for k = 2:ni+1
    R(k, 1) = R(1, 1) + dR1*(2*rand - 1); C(k, 1) = 1/R(k, 1);
    R(k, 2) = R(1, 2) + dR2*(2*rand - 1); C(k, 2) = 1/R(k, 2);
    R(k, 3) = R(1, 3) + dR3*(2*rand - 1); C(k, 3) = 1/R(k, 3);
    R(k, 4) = R(1, 4) + dR4*(2*rand - 1); C(k, 4) = 1/R(k, 4);

    t(k, 2) = t(1, 2) + dt*(2*rand - 1);
    t(k, 3) = t(1, 3) + 5*dt*(2*rand - 1);
    t(k, 4) = t(1, 4) + dt*(2*rand - 1);

    for i = 2:5
        u(i) = (n(1, i-1)*u(i-1))/n(1, i) - (y(i-1)*(n(1, i)-n(1, i-
1))*C(k, i-1))/n(1, i);
        y(i) = y(i-1) + t(k, i)*u(i);
    end
    t(k, 5) = y(1, 4)/-u(1, 5);
    for i = 2:5
        u(1, i) = (n(1, i-1)*u(1, i-1))/n(1, i) - (y(1, i-1)*(n(1, i)-
n(1, i-1))*C(k, i-1))/n(1, i);
        y(1, i) = y(1, i-1) + t(k, i)*u(1, i);
    end

    B(k) = t(k, 5);
fi1(k) = (n(1, 2) - 1)*(C(k, 1) - C(k, 2) + ((n(1, 2)-1)/n(1,
2))*t(k, 2)*C(k, 1)*C(k, 2));
f1(k) = 1/fi1(k);
fi2(k) = (n(1, 4) - 1)*(C(k, 3) - C(k, 4) + ((n(1, 2)-1)/n(1,
2))*t(k, 4)*C(k, 3)*C(k, 4));
f2(k) = 1/fi2(k);
B1(k) = f1(k) - (f1(k)*t(k, 2)*(n(1, 2)-1)/(n(1, 2)*R(k, 1)));
B2(k) = f2(k) - (f2(k)*t(k, 4)*(n(1, 4)-1)/(n(1, 4)*R(k, 3)));

    m(k) = (B(k)-B2(k))/f2(k) + 1;

end

max_m = max(m);
min_m = min(m);
mean_m = mean(m);
hist(m, 35);
stdiv = std(m);
rel_prec = std(m)/mean_m;

```

ثانياً: نص برنامج دراسة ارتيابات علاقة انزياح الصورة مع دوران العدسة حول نقطة

```
ni = 50000;
sur = 4;
Nn = 10;
lamda = 0.0006328;
m = zeros(size(ni));
B = zeros(size(ni));
fil = zeros(size(ni));
f1 = zeros(size(ni));
fi2 = zeros(size(ni));
f2 = zeros(size(ni));
B1 = zeros(size(ni));
B2 = zeros(size(ni));
l = zeros(size(ni));

R(1, 1) = 52.16; C(1, 1) = 1 / R(1, 1);
R(1, 2) = 55.8; C(1, 2) = 1 / R(1, 2);
R(1, 3) = 37.38; C(1, 3) = 1 / R(1, 3);
R(1, 4) = 46.95; C(1, 4) = 1 / R(1, 4);

t(1, 2) = 4;
t(1, 3) = 60.4;
t(1, 4) = 4;
t(1, 5) = 0;

n(1, 1) = 1;
n(1, 2) = 4.0043799419502;
n(1, 3) = 1;
n(1, 4) = 4.0043799419502;
n(1, 5) = 1;

h(1, 1) = 32;
h(1, 2) = 30;
h(1, 3) = 23;
h(1, 4) = 22;

l(1) = 15.9;

dR1 = ((R(1, 1)*R(1, 1))/(h(1, 1)*h(1, 1)))*Nn*lamda;
dR2 = ((R(1, 2)*R(1, 2))/(h(1, 2)*h(1, 2)))*Nn*lamda;
dR3 = ((R(1, 3)*R(1, 3))/(h(1, 3)*h(1, 3)))*Nn*lamda;
dR4 = ((R(1, 4)*R(1, 4))/(h(1, 4)*h(1, 4)))*Nn*lamda;

dt = 0.1;
dl = 0.1;

u = [0 0 0 0 0];
y = [1 0 0 0 0];

for i = 2:5
    u(i) = (n(1, i-1)*u(i-1))/n(1, i) - (y(i-1)*(n(1, i)-n(1, i-1)))*C(1, i-1)/n(1, i);
    y(i) = y(i-1) + t(1, i)*u(i);
end
t(1, 5) = -y(4)/u(5);
for i = 2:5
```

```

    u(i) = (n(1, i-1)*u(i-1))/n(1, i) - (y(i-1)*(n(1, i)-n(1, i-1)))*C(1, i-1)/n(1, i);
    y(i) = y(i-1) + t(1, i)*u(i);
end

B(1) = t(1, 5);
fi1(1) = (n(1, 2) - 1)*(C(1, 1) - C(1, 2) + ((n(1, 2)-1)/n(1, 2))*t(1, 2)*C(1, 1)*C(1, 2));
f1(1) = 1/fi1(1);
fi2(1) = (n(1, 4) - 1)*(C(1, 3) - C(1, 4) + ((n(1, 2)-1)/n(1, 2))*t(1, 4)*C(1, 3)*C(1, 4));
f2(1) = 1/fi2(1);
B1(1) = f1(1) - (f1(1)*t(1, 2)*(n(1, 2)-1)/(n(1, 2)*R(1, 1)));
B2(1) = f2(1) - (f2(1)*t(1, 4)*(n(1, 4)-1)/(n(1, 4)*R(1, 3)));

m(1) = abs((((n(1,4) - 1)/n(1,4))*t(1, 4)*((R(1, 4)-B(1))/R(1, 4)))-((B(1)-B2(1))/f2(1) + 1)*l(1)))*(pi/10800));

for k = 2:ni+1
    R(k, 1) = R(1, 1) + dR1*(2*rand - 1); C(k, 1) = 1/R(k, 1);
    R(k, 2) = R(1, 2) + dR2*(2*rand - 1); C(k, 2) = 1/R(k, 2);
    R(k, 3) = R(1, 3) + dR3*(2*rand - 1); C(k, 3) = 1/R(k, 3);
    R(k, 4) = R(1, 4) + dR4*(2*rand - 1); C(k, 4) = 1/R(k, 4);

    t(k, 2) = t(1, 2) + dt*(2*rand - 1);
    t(k, 3) = t(1, 3) + dt*(2*rand - 1);
    t(k, 4) = t(1, 4) + dt*(2*rand - 1);

    l(k) = l(1) + dl*(2*rand - 1);

    for i = 2:5
        u(i) = (n(1, i-1)*u(i-1))/n(1, i) - (y(i-1)*(n(1, i)-n(1, i-1)))*C(k, i-1)/n(1, i);
        y(i) = y(i-1) + t(k, i)*u(i);
    end
    t(k, 5) = y(1, 4)/-u(1, 5);
    for i = 2:5
        u(1, i) = (n(1, i-1)*u(1, i-1))/n(1, i) - (y(1, i-1)*(n(1, i)-n(1, i-1)))*C(k, i-1)/n(1, i);
        y(1, i) = y(1, i-1) + t(k, i)*u(1, i);
    end

    B(k) = t(k, 5);
    fi1(k) = (n(1, 2) - 1)*(C(k, 1) - C(k, 2) + ((n(1, 2)-1)/n(1, 2))*t(k, 2)*C(k, 1)*C(k, 2));
    f1(k) = 1/fi1(k);
    fi2(k) = (n(1, 4) - 1)*(C(k, 3) - C(k, 4) + ((n(1, 2)-1)/n(1, 2))*t(k, 4)*C(k, 3)*C(k, 4));
    f2(k) = 1/fi2(k);
    B1(k) = f1(k) - (f1(k)*t(k, 2)*(n(1, 2)-1)/(n(1, 2)*R(k, 1)));
    B2(k) = f2(k) - (f2(k)*t(k, 4)*(n(1, 4)-1)/(n(1, 4)*R(k, 3)));

    m(k) = abs((((n(1,4) - 1)/n(1,4))*t(k, 4)*((R(k, 4)-B(k))/R(k, 4)))-((B(k)-B2(k))/f2(k) + 1)*l(k)))*(pi/10800));

end

max_m = max(m);

```

```
min_m = min(m);  
mean_m = mean(m);  
hist(m, 35);  
stdiv = std(m);  
rel_prec = std(m)/mean_m;
```


المراجع

- [1] Burge JH. An easy way to relate optical element motion to system pointing stability. Proc. SPIE 6288, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering VII, 62880I. 2006
- [2] Schwertz K, Burge JH. Field guide to optomechanical design and analysis. Washington:SPIE Press; 2012. 154 p.
- [3] Fischer RE, Tadic-Galeb B, Yoder PR. Optical system design. 2nd ed. New York:McGraw Hill; 2008. 809 p.
- [4] Bass M. (Editor). Handbook of optics fundamentals, techniques, and design. 2nd ed. New York:McGraw Hill; 1995.
- [5] Kruse PW. Uncooled thermal imaging arrays, systems and applications. Washington:SPIE Press; 2001. 91 p.
- [6] Havens KJ, Sharp EJ. Thermal imaging techniques to survey and monitor animals in the wild, a methodology. London:Elsevier; 2016. 354 p.
- [7] Kingslake R. Optical system design. Florida:Academic prss; 1983. 323 p.
- [8] Daniels A. Field guide to infrared systems, detectors and FPAs. 2nd ed. Washington:SPIE Press; 2010. 174 p.
- [9] Williams TL. Thermal imaging cameras caharacteristics and performance. Boca Raton:CRC Press; 2009. 212 p.
- [10] Laikin M. Lens design. 4th ed. Boca Raton:CRC Press; 2007. 463 p.
- [11] Sharma UC. Infrared detectors. M. Tech Credit Seminar Report, Electronic Systems Group, EE Dept. 2004.
- [12] Childs PRN. Mechanical Design Engineering Handbook. 2nd ed. London:Elsevier; 2019. 982 p.
- [13] Smith GH. Practical computer aided lens design. Virginia:Willmann-Bell; 1998.
- [14] Burge JH. Mounting of optical components, mounting of lenses. University of Arizona; 2011.
- [15] Yoder PR. Opto-mechanical systems design, 3rd ed. Boca Raton:CRC Press; 2006. 835 p.
- [16] Bach H, Neuroth N. The properties of optical glass. 2nd ed. Berlin:Springer; 1998. 414 p.

- [17] Zemax LLC. Optical design program user's manual. 2014
- [18] Rayces JL, Lebich L. Thermal compensation of infrared achromatic objectives with three optical materials. International lens design conference. 1990; SPIE Vol.1354. pp. 752-759.
- [19] Daiker J. Athermalization techniques in infrared systems. OPTI 521 Introductory optomechanical engineering class, University of Arizona. 2010.
- [20] Smith WJ. Modern optical engineering. 4th ed. New York:McGraw Hill; 2008. 754 p.
- [21] Tan L, Jiang J. Digital signal processing, fundamentals and applications. 3rd ed. London:Elsevier; 2019. 903 p.