جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة بابل

كلية التربية للعلوم الصرفة

قسم الفيزياء

التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء

(دراسة فيزيائية وتطبيقية)

بحث مقدم الى مجلس كلية التربية للعلوم الصرفة – جامعة بابل وهو جزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في قسم الفيزياء.

بحث مقدم من قبل الطالبة

نوره جواد كاظم

بإشراف

م. د هبة كامل جعفر

2026م 1447هـ

الآية القرآنية

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ ﴾

صدق الله العلي العظيم

[المجادلة: 11]

الإهداء

﴿فَرِحِينَ بِمَا آتَاهُمُ اللَّهُ مِن فَضْلِهِ﴾

الحمد لله حباً وشكراً وامتناناً، الحمد لله الذي بفضله أدركتُ أسمى الغايات.

بكل فخر أهدي تخرجي وفرحتي التي انتظرتها طويلاً إلى من كانوا الدعم والعطاء دائماً.

إلى من دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل، إلى العزيز الذي أحمل اسمه بكل فخر، إلى من علمني أن الدنيا كفاح وسلاحه العلم والمعرفة، داعمي الأول في مسيرتي وسندي وقوتي بعد الله.

فخري واعتزازي أبي الغالي.

إلى من جعل الجنة تحت أقدامها واحتضني قلبها قبل يدها، وسهلت لي الشدائد بدعائها، إلى القلب الحنون والشمعة التي كانت لي في الليالي المظلمات، سر قوتي ونجاحي أمي الغالية.

إلى من ينبض القلب دائماً بذكره، إلى من رحل إلى مثواه الأخير لكنه دائماً موجود في القلب، إلى روح جدو الشيخ الجليل (كاظم طالب).

أهديكم هذا الإنجاز وثمرة نجاحي الذي لطالما تمنيته، ها أنا اليوم أُكملت وأتممت أول ثمراته بفضله سبحانه وتعالى.

الشكر والتقدير

الحمد لله الذي هدانا لهذا وما كنا لنهتدي لولا أن هدانا الله

إلى أصحاب الفضل الأول... الشهداء جميعاً لولاكم لما كنا هنا

لا يسعني وأنا أنهي هذا الجهد العلمي إلا أن أتقدم بخالص الشكر والامتنان إلى المشرفة في إنجاز هذا البحث (م. د هبه كامل جعفر)

التي أشرفت بعناية فائقة على البحث، وما قدمته من توجيهات سديدة لإخراج البحث بالمستوى المطلوب، جزاها الله خير الجزاء وحفظها من كل مكروه.

شكراً لأساتذتنا ما بذلوه من جهد خلال رحلة الأربع سنوات

كما أتقدم بالشكر والتقدير والاحترام للسادة الأفاضل في لجنة المناقشة على ما بذلوه من جهد في قراءة البحث..

وأخيراً أود أن أشكر نفسي على كل هذا الجهد والعزيمة والإصرار، الحمد لله من قبل ومن بعد، راجيه من الله تعالى أن ينفعني بما علمني وأن يعلمني ما أجهل ويجعله حجة لي لا علي.

قائمة المحتويات

العنوان	رقم الصفحة
الآية القرآنية	أ
الاهداء	ب
الشكر والتقدير	ت
قائمة المحتويات	ث
قائمة الاشكال	ج
الخلاصة	ح
الفصل الأول	1-14
المقدمة	2-3
تاريخ اكتشاف الأشعة تحت الحمراء	3
الأشعة تحت الحمراء (Infrared Radiation)	4-5
استخدامات الأشعة تحت الحمراء	5-7
تقنية التصوير الحراري (Thermal Imaging (Technology	7-8
مفهوم التصوير الحراري	8-9
مزايا التصوير الحراري	10-11
مكونات التصوير الحراري	11-12
انواع التصوير الحراري	13-14
أهمية التصوير الحراري	14
الفصل الثاني	15-32
الاشعاع الحراري	16
القوانين الفيزيائية المنظمة لعمل التصوير الحراري	17-22
البنية الفيزيائية لأنظمة التصوير الحراري	23-27
التقنيات المتقدمة في كاميرات التصوير الحراري	27-29
مجالات التوظيف العلمي والتطبيقي للتصوير الحراري	29-32
المصادر	33-37

قائمة الاشكال

رقم الشكل	عنوان الشكل	رقم الصفحة
(1-1)	**تجربة هيرشل التي أثبتت وجود طاقة حرارية غير مرئية خارج نطاق الطيف الأحمر.**	**3**
(2-1)	**مخطط توضيحي للطيف الكهرومغناطيسي يوضح موقع الأشعة تحت الحمراء بالنسبة للضوء المرئي.**	**5**
(3-1)	**مثال على كاميرا التصوير الحراري واستخداماتها في قياس درجات الحرارة وتوزيعها على الأجسام.**	**9**
(4-1)	**المخطط الكتلي لمكونات نظام الكاميرا الحرارية.**	**11**
(1-2)	**منحنيات إشعاع الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة.**	**19**
(2-2)	**العلاقة بين القدرة الإشعاعية ودرجة الحرارة لعدة قيم من الانبعاثية.**	**20**
(3-2)	**إزاحة فين: العلاقة بين الطول الموجي لذروة الانبعاث ودرجة الحرارة.**	**23**

الخلاصة

يتناول هذا البحث دراسة تقنية التصوير الحراري (Thermal Imaging)، وهي تقنية فيزيائية متطورة تعتمد على رصد الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من الأجسام وتحويلها إلى صور حرارية مرئية تتيح قياس درجات الحرارة بدقة دون تلامس.

تم تقسيم البحث إلى فصول تناولت المبادئ الفيزيائية الأساسية، بدءاً من اكتشاف الأشعة تحت الحمراء وتصنيفاتها الطيفية، وصولاً إلى القوانين الحاكمة للإشعاع الحراري مثل قانون بلانك، وقانون ستيفان-بولتزمان، وقانون إزاحة فين. كما استعرض البحث البنية الفيزيائية لأنظمة التصوير الحراري، والفرق الجوهري بين الأنظمة المبردة (عالية الحساسية) والأنظمة غير المبردة (الأكثر شيوعاً واستخداماً).

سلط البحث الضوء على التطبيقات المتعددة لهذه التقنية في المجالات الطبية (كالتشخيص المبكر للالتهابات والأورام)، والصناعية (كصيانة المعدات الكهربائية وكشف الفقد الحراري)، والأمنية والعسكرية، بالإضافة إلى تطبيقاتها في الزراعة والبيئة. وخلص البحث إلى أن التصوير الحراري يمثل أداة استراتيجية في البحث العلمي الحديث لكونه وسيلة آمنة، دقيقة، وفعالة في الكشف عن الظواهر الحرارية غير المرئية.

الفصل الاول

المبادئ الفيزيائية للتصوير الحراري

1-1 المقدمة

يُعدّ التصوير الحراري (Thermal Imaging) من التقنيات الحديثة التي شهدت تطورًا ملحوظًا في السنوات الأخيرة، لما يمتلكه من قدرة عالية على قياس درجات الحرارة وتحليل التوزيع الحراري للأجسام دون الحاجة إلى التلامس المباشر معها، إذ يعتمد على التقاط الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من الأجسام وتحويلها إلى صور حرارية دقيقة تُظهر الفروق الحرارية بوضوح [1].

وقد أسهم التصوير الحراري في إحداث تطور مهم في المجالات الصناعية والهندسية، ولا سيما في الكشف المبكر عن الأعطال المحتملة في الأنظمة الكهربائية والميكانيكية، من خلال رصد الارتفاع غير الطبيعي في درجات الحرارة، مما يساعد على تجنب التوقف المفاجئ للمعدات وتقليل الخسائر المادية ومخاطر الحرائق، فضلًا عن دوره في تطبيقات الصيانة الوقائية للمصانع والمنشآت المختلفة [1].

ولا يقتصر استخدام التصوير الحراري على المجال الصناعي فحسب، بل يمتد ليشمل الصناعات البتروكيميائية والمعدنية، حيث يُستخدم في الكشف عن تسرب السوائل والغازات، ومراقبة كفاءة العزل الحراري لخطوط الأنابيب، وتحليل التوزيع الحراري داخل الأفران الصناعية والمنشآت الكبرى، الأمر الذي يعزز من كفاءة التشغيل وسلامة المعدات [2].

ومع التطور التقني المتسارع، انتقلت تطبيقات التصوير الحراري من الاستخدامات العسكرية والأكاديمية المتخصصة إلى المجالات المدنية والاستهلاكية، ولا سيما بعد دمجها مع الأجهزة الذكية، مما وسّع من نطاق استخدامها ليشمل المجالات الأمنية ومراقبة الحياة البرية والكشف عن التسربات الحرارية [3].

تعتمد أنظمة التصوير الحراري على مبادئ فيزيائية دقيقة، حيث تقوم الكواشف بتحويل الطاقة الحرارية المنبعثة إلى إشارات كهربائية، ثم تُحوّل إلى صور رقمية قابلة للتحليل. ويتيح هذا الأسلوب تقييم الحالة الحرارية للأجسام بشكل غير تلامسي، مع دقة قياس مرتفعة، ما يجعل التصوير الحراري أداة فعالة في البحث العلمي والصناعة والهندسة [4].

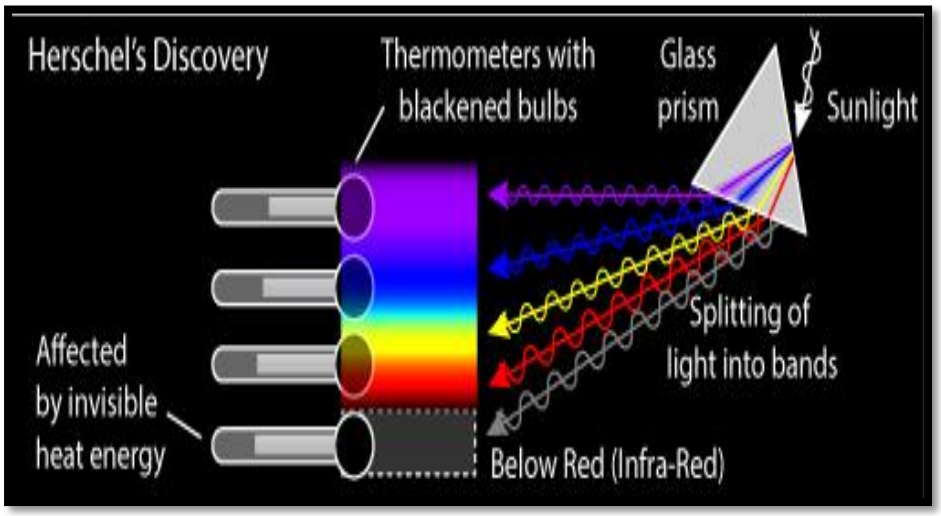
ويهدف هذا البحث إلى تقديم دراسة مفصلة للأسس الفيزيائية للتصوير الحراري، مع التركيز على القوانين العلمية الحاكمة وأنواع الكواشف والأنظمة المختلفة، واستعراض التطبيقات المتقدمة لهذه التقنية.

2-1 تاريخ اكتشاف الأشعة تحت الحمراء

يعود اكتشاف الأشعة تحت الحمراء إلى العالم الفلكي البريطاني (William Herschel)

في عام 1800م، أثناء إجرائه تجارب لقياس درجات حرارة ألوان الطيف المرئي باستخدام مقياس حرارة [5].

لاحظ هيرشل أن درجة الحرارة تزداد تدريجيًا عند الانتقال من اللون البنفسجي نحو اللون الأحمر، كما في الشكل (1-1) وتستمر بالارتفاع حتى في المنطقة الواقعة بعد اللون الأحمر، وهي منطقة غير مرئية للعين البشرية. واستنتج من ذلك وجود نوع غير مرئي من الإشعاع قادر على نقل الطاقة الحرارية، وأُطلق عليه لاحقًا اسم الأشعة تحت الحمراء [6].



الشكل (1-1)، تجربة هيرشل التي أثبتت وجود طاقة حرارية غير مرئية خارج نطاق الطيف الأحمر [6].

3-1 الأشعة تحت الحمراء (Infrared Radiation)

تُعد الأشعة تحت الحمراء أحد أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي، وتشترك في طبيعتها الفيزيائية مع موجات الراديو، والضوء المرئي، والأشعة فوق البنفسجية، والأشعة السينية، وأشعة غاما، حيث تنتقل جميعها بسرعة الضوء في الفراغ [6].

حيث تنتقل جميعها بسرعة الضوء في الفراغ. ويقع طيف الأشعة تحت الحمراء بعد الضوء المرئي مباشرة كما في الشكل (1-1) ، إذ يتراوح طول موجة الضوء المرئي بين (390–750) نانومتر، بينما تمتد الأشعة تحت الحمراء من حوالي (0.78) ميكرومتر إلى (1000) ميكرومتر، أي بطول موجي أكبر من الضوء المرئي [7].

ويربط بين الطول الموجي والتردد العلاقة التالية (1-1):

$$C = \lambda . \nu \dots \dots \dots (1-1)$$

حيث إن:

C=(m/s) سرعة الضوء في الفراغ

λ=الطول الموجي

ν =التردد

يمتد نطاق الأشعة تحت الحمراء تقريبًا من:

$$0.78\ \mu m \leq \lambda \leq 1000\ \mu m \dots \dots \dots (2-1)$$

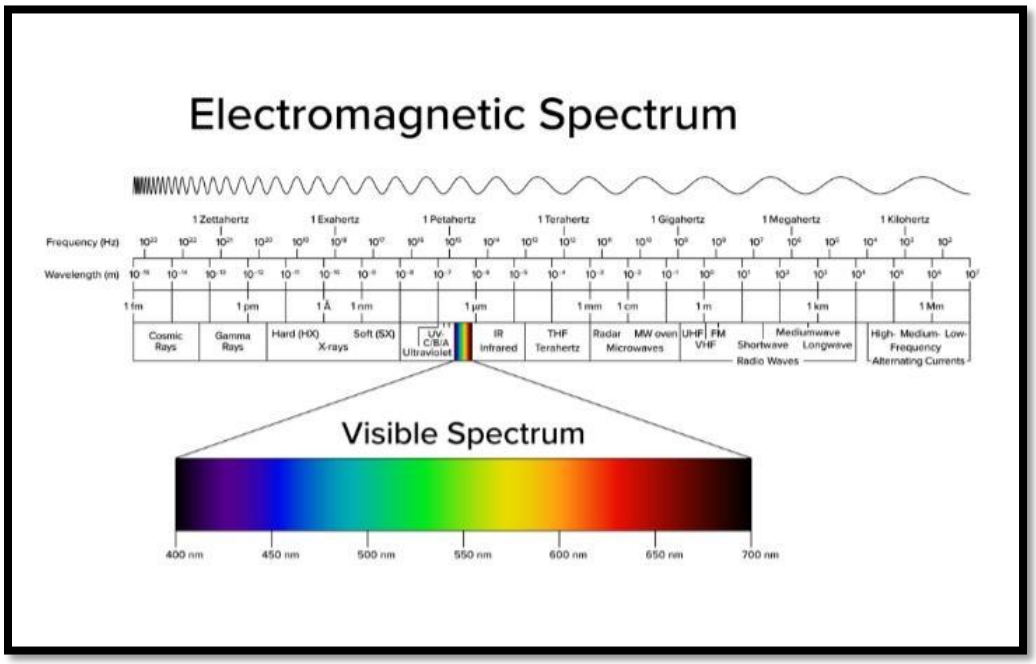
وتُصنّف إلى:

NIR= الأشعة تحت الحمراء القريبة

MIR= المتوسطة

FIR= البعيدة

وترتبط هذه الأشعة ارتباطًا مباشرًا بالإشعاع الحراري، إذ إن جميع الأجسام التي تفوق درجة حرارتها الصفر المطلق تشع طاقة حرارية نتيجة الحركة العشوائية للذرات والجزيئات [7].



الشكل (1-2)، مخطط توضيحي للطيف الكهرومغناطيسي يوضح موقع الأشعة تحت الحمراء بالنسبة للضوء المرئي[6].

4-1 استخدامات الأشعة تحت الحمراء

تُستخدم الأشعة تحت الحمراء على نطاق واسع في التطبيقات العلمية والتقنية والحياتية، نظرًا لقدرتها على نقل الطاقة الحرارية وخصائصها الطيفية المميزة [8]:

1- أجهزة التحكم عن بُعد

تُعد الأشعة تحت الحمراء الأساس في عمل أجهزة التحكم عن بُعد المستخدمة في الأجهزة الإلكترونية المنزلية، حيث تُرسل إشارات قصيرة المدى للتحكم بالمعدات المختلفة، وتمتاز هذه التقنية بقلة استهلاك الطاقة وسهولة التطبيق[8]

2- التصوير الطبي

تُستخدم الأشعة تحت الحمراء في التصوير الطبي، ولاسيما التصوير الحراري، للكشف عن أنماط توزيع الحرارة وتدفق الدم في أنسجة الجسم، مما يساعد في تشخيص بعض الحالات المرضية مثل اضطرابات الأوعية الدموية وسرطان الثدي، مع كونها تقنية غير جراحية وآمنة [9].

3- أنظمة التدفئة

تُستخدم الأشعة تحت الحمراء في أنظمة التدفئة الحديثة، حيث تعمل على تسخين الأجسام مباشرة دون تسخين الهواء المحيط، مما يؤدي إلى كفاءة أعلى في استهلاك الطاقة وسرعة أكبر في التدفئة [10].

4- الرؤية الليلية

تُعد الرؤية الليلية من أبرز تطبيقات الأشعة تحت الحمراء، إذ تعتمد على رصد الإشعاع الحراري المنبعث من الأجسام في الظلام، وتُستخدم هذه التقنية في المجالات الأمنية والعسكرية وأنظمة المراقبة [11].

5- تحضير الطعام

تُستخدم الأشعة تحت الحمراء في عمليات الطهي والشواء، حيث تؤدي إلى تسخين مباشر للطعام، مما يساهم في تسريع عملية الطهي والحفاظ على القيمة الغذائية مع تقليل استهلاك الطاقة [12].

6- الاتصالات اللاسلكية قصيرة المدى

تُستخدم الأشعة تحت الحمراء في بعض أنظمة الاتصالات اللاسلكية قصيرة المدى، مثل بعض الأجهزة الطرفية، وتمتاز بانخفاض التداخل وقلة استهلاك الطاقة [8].

7- ترميم وتحليل الأعمال الفنية

تُستخدم الأشعة تحت الحمراء في تحليل وترميم الأعمال الفنية للكشف عن الطبقات الخفية تحت سطح اللوحات دون إتلافها، مما يساعد في دراسة التقنيات الفنية والتحقق من أصالة الأعمال [13].

8- الساونا والعلاج الحراري

تُستخدم الأشعة تحت الحمراء في أجهزة الساونا والعلاج الحراري، حيث تمتصها أنسجة الجسم مباشرة، مما يسهم في تحسين الدورة الدموية وتخفيف آلام العضلات والمفاصل [14].

5-1 تقنية التصوير الحراري (Thermal Imaging Technology)

تقنية التصوير الحراري هي تقنية لرصد الإشعاع الحراري المنبعث من الأجسام وتحويله إلى صورة مرئية يمكن تحليلها. تعتمد هذه التقنية على قدرة جميع الأجسام على إصدار إشعاع تحت أحمر يتناسب مع درجة حرارتها، مما يسمح بقياس الحرارة عن بُعد دون الحاجة للاتصال المباشر مع الجسم [9].

كما موضح في العلاقة الاتية (1-3) (قانون ستيفان- بولتزمان):

$$\mathrm{Wb} = \epsilon.\sigma.A.T^4 \ldots\ldots\ldots (3-1)$$

Wb= القدرة الإشعاعية W/m^2

$\sigma = 5.76 \times 10^{-8}, \frac{W}{m^2 k^4}$

T= درجة الحرارة المطلقة (K)

يوضح هذا القانون ان القدرة الإشعاعية (Wb) تعتمد بشكل اساسي على درجة الحرارة (T) مرفوعة للقوة الرابعة وهو ما يفسر حساسية الكاميرات الحرارية لأي تغير بسيط في الحرارة.

تعتمد كاميرات التصوير الحراري على جمع الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من الأجسام وتحويلها إلى إشارات كهربائية، ثم تُحوّل هذه الإشارات إلى صورة حرارية ملونة أو رمادية تُظهر توزيع درجات الحرارة بدقة [9].

وتمكّن هذه التقنية من تحديد مناطق السخونة أو البرودة بسرعة وسهولة، وهو أمر مفيد في التطبيقات الصناعية والطبية والأمنية [8].

تمتاز تقنية التصوير الحراري بقدرتها على العمل في الظلام التام أو ظروف ضعف الإضاءة، لأنها لا تعتمد على الضوء المرئي بل على الحرارة المنبعثة من الأجسام. وبذلك تُستخدم في الأمن والمراقبة، والرؤية الليلية، والبحث والإنقاذ، دون التأثر بالإضاءة المحيطة [9].

بالإضافة إلى التطبيقات الأمنية، تُستخدم التقنية في المجال الطبي لتشخيص الحالات المرضية عن طريق مراقبة توزيع الحرارة على سطح الجسم، مثل اضطرابات الدورة الدموية أو الالتهابات. وتتميز الطريقة بأنها غير جراحية وآمنة تمامًا [15].

كما تُستخدم تقنية التصوير الحراري في الصناعة لمراقبة الأجهزة الكهربائية والآلات الميكانيكية، إذ يمكنها الكشف المبكر عن ارتفاع درجة الحرارة الذي قد يشير إلى أعطال أو احتكاكات داخل المعدات، مما يُسهم في الوقاية من الحوادث وتحسين كفاءة التشغيل [16].

6-1 مفهوم التصوير الحراري

يُعرَّف التصوير الحراري بأنه تقنية تصوير غير تلامسيه تعتمد على التقاط الأشعة تحت الحمراء المنبعثة طبيعيًا من الأجسام التي تكون درجة حرارتها أعلى من الصفر المطلق، وتحويلها إلى صور حرارية تُظهر التوزيع المكاني لدرجات الحرارة على سطح الجسم المدروس [2].

كما في العلاقة الاتية (1-4) (قانون طاقة الفوتون):

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \dots\dots (4-1)$$

حيث ان:

E= طاقة الاشعاع

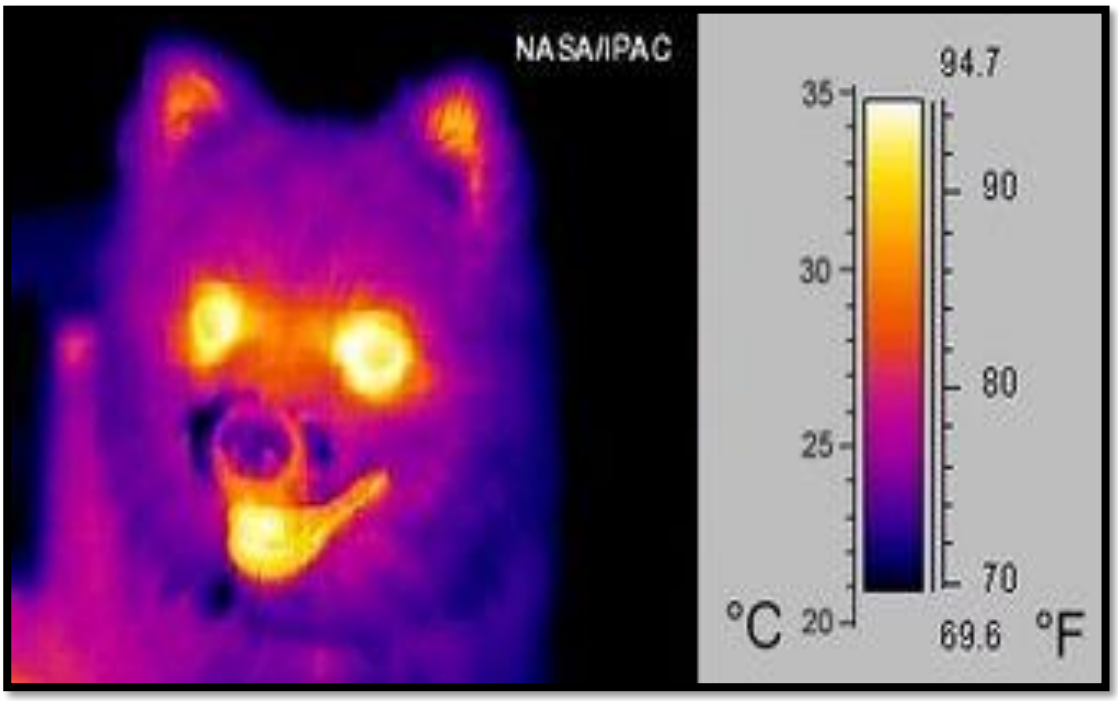
h= ثابت بلانك

C= سرعة الضوء في الفراغ

λ= الطول الموجي

ويتيح تحليل هذه الصور تقييم الحالة الفيزيائية والوظيفية للأجسام والكائنات الحية كما في الشكل

(1-2)، لما توفره من معلومات دقيقة لا يمكن الحصول عليها بوسائل التصوير التقليدية. وتُستخدم هذه التقنية على نطاق واسع في مجالات متعددة، مثل التطبيقات العسكرية، والصناعية، والبنائية، والخدمات المدنية، إضافةً إلى العلوم الطبيعية والطبية، حيث تُمكّن من إجراء قياسات آمنة وغير جراحية، ودراسة التنظيم الحراري، والكشف عن الالتهابات والأمراض، وتحليل تأثير العوامل البيئية على سلوك الكائنات الحية، مع الأخذ بنظر الاعتبار وجود بعض القيود التقنية التي تؤثر في دقة النتائج تبعًا لطبيعة الهدف والوسط المحيط به [8].



الشكل (1-3)، مثال على كاميرا التصوير الحراري واستخداماتها في قياس درجات الحرارة وتوزيعها على الأجسام[5].

7-1 مزايا التصوير الحراري

يمتاز التصوير الحراري بعدد من الخصائص التقنية التي جعلته أداة فعّالة في مجالات متعددة، ومن أبرز هذه المزايا ما يأتي:

1- تحديد أوجه القصور في استخدام الطاقة:

يمكن للتصوير الحراري تحديد المناطق التي تتسرب منها الحرارة من المباني، مما يمكّن مديري المباني من اتخاذ التدابير اللازمة لتحسين كفاءة الطاقة وتقليل الانبعاثات الكربونية [8].

2- كشف الأعطال الكهربائية:

يتيح التصوير الحراري اكتشاف الأعطال الكهربائية مثل الأحمال الزائدة أو التوصيلات الفضفاضة، بما يساعد على منع الحرائق وتعطل المعدات [8].

3- فعّالة من حيث التكلفة:

تعتبر هذه التقنية وسيلة اقتصادية لتحديد الأعطال والمخاطر المحتملة، إذ يسمح الكشف المبكر بتقليل التكاليف الناجمة عن الإصلاحات الطارئة وإهدار الطاقة [8].

4- غير غازية / لا تتطلب توقف النظام:

يمكن استخدام التصوير الحراري دون الحاجة لإيقاف الطاقة أو العمليات أثناء الفحص، ما يقلل وقت التوقف ويزيد الإنتاجية [8].

5- إمكانية تكيّف بيئي عالية:

لا تتأثر جودة الصور بظروف الإضاءة أو العوامل الجوية مثل الضباب، الدخان، المطر، أو الثلج، مما يسمح باستخدامها في أي بيئة وفي أي وقت [4].

6- تحليل محتوى الفيديو (VCA):

يوفر التصوير الحراري إمكانية اكتشاف الحركة والتسلل عبر إعداد قواعد تحليل المحتوى، ويبرز الأجسام بوضوح مقابل الخلفية حتى على مسافات بعيدة [4].

7- قياس درجة الحرارة بدون تلامس:

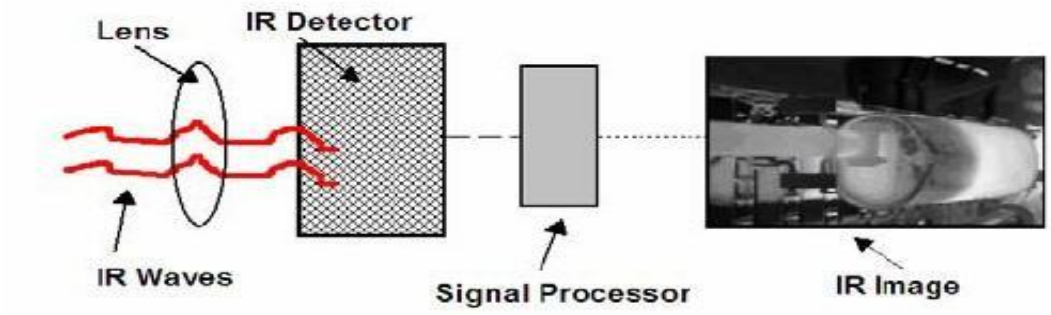
يسمح بتقييم شدة الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من الأجسام وتحويلها إلى خرائط توزيع حراري في الوقت الفعلي، ما يزيد من سلامة الفنيين وكفاءة التفتيش [4].

8- كشف الحرائق مبكرًا:

يمكن للتقنية رصد درجات الحرارة الشاذة وإطلاق إنذارات قبل تطور الحرائق، بما يسهم في تقليل الخسائر البشرية والمادية [4].

7-1 مكونات التصوير الحراري

يتكون التصوير الحراري من عدة مكونات كما في الشكل (1-4)، اهمها ما يأتي:



الشكل (1-4)، المخطط الكتلي لمكونات نظام الكاميرا الحرارية [8].

1- كاشف الأشعة تحت الحمراء (Infrared Detector):

يُعد كاشف الأشعة تحت الحمراء المكون الأساسي في كاميرات التصوير الحراري، حيث يقوم بتحويل الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من الأجسام إلى إشارات إلكترونية. ثم تُرسل هذه الإشارات إلى نظام معالجة الصور لتحليلها واستخلاص المعلومات الحرارية.

2- العدسة البصرية (Optical Lens):

تعمل العدسة البصرية على تركيز الإشارات التي يستقبلها كاشف الأشعة تحت الحمراء، مما يسمح للكاميرا بالتقاط صور حرارية عالية الجودة ووضوح دقيق للتوزيع الحراري على سطح الأجسام.

3- الكاميرا الضوئية المرئية (Visible Light Camera):

تُدمج بعض كاميرات التصوير الحراري مع كاميرات ضوئية مرئية، وذلك لتقييم وتحديد المظهر الخارجي للأجسام المدروسة، بما يعزز دقة المراقبة ويكمل المعلومات الحرارية.

4- نظام المعالجة الإلكترونية (Electronic Processing System):

يقوم هذا النظام بتحويل الإشارات الإلكترونية من الكاشف إلى صور حرارية يمكن تحليلها، كما يعالج البيانات ويستخرج الخصائص المطلوبة لتحديد درجة الحرارة وتوزيعها على الأجسام.

5- الشاشة (Display):

تُستخدم الشاشة لعرض الصور الحرارية الملتقطة بواسطة الكاميرا، ما يمكّن المستخدمين من مراقبة البيانات الحرارية بشكل مباشر وفهم توزيع درجات الحرارة بسهولة.

6- جهاز التخزين (Storage Device):

يقوم بتخزين الصور والبيانات الحرارية الملتقطة لمزيد من التحليل والمقارنة لاحقًا، ما يتيح الاحتفاظ بسجلات حرارية دقيقة لكل فحص أو تجربة.

7- نظام التشغيل / الطاقة (Power System):

يوفر الطاقة اللازمة لتشغيل كاميرا التصوير الحراري وضمان عمل جميع مكوناتها بكفاءة وسلاسة خلال فترة التشغيل.[8]

8-1 انواع التصوير الحراري

1- التصوير الحراري المحمول (Handheld Thermal Imaging):

يُعد هذا النوع من أكثر أجهزة التصوير الحراري استخدامًا، حيث يتميز بسهولة الحمل والاستخدام اليدوي، ويتيح مراقبة التغيرات في درجات الحرارة في الوقت الفعلي، وإنشاء صور حرارية محددة. ويُستخدم على نطاق واسع في مجالات الفحص الصناعي والبناء والتطبيقات الميكانيكية [8].

2- التصوير الحراري الثابت (Fixed Thermal Imaging):

يتميز هذا النوع بدقة عالية ويتم تثبيته في موقع محدد لمراقبة درجات الحرارة لفترة طويلة، وغالبًا ما يُستخدم مع أنظمة المراقبة عن بُعد لمتابعة المعلومات الحرارية وتحليلها في الوقت الفعلي [9].

3- التصوير الحراري المحمول الصغير الحجم (Portable Lightweight Thermal Imaging):

أجهزة صغيرة وخفيفة الوزن تُنقل بسهولة إلى المنطقة المراد فحصها، وتعد وسيلة فعّالة من حيث التكلفة لتشخيص عيوب البناء، والمعدات الميكانيكية، والأعطال الكهربائية بسرعة ودقة [8].

4- التصوير الحراري المتخصص لدرجات الحرارة العالية (High-Temperature Thermal Imaging):

يُستخدم لقياس درجات الحرارة العالية للغاية، مع توافر خصائص الحماية من الصواعق ووظائف خاصة للتعامل مع الأسطح المعدنية العاكسة والأجسام المحترقة، ما يسمح بقياس دقيق لمستويات الحرارة القصوى [10]

5- التصوير الحراري عن بُعد (Remote Thermal Imaging):

تم تصميم هذا النوع للاستخدام مع أنظمة التحكم والمراقبة عن بُعد، وغالبًا ما يُستخدم في مراقبة المناطق الكبيرة أو المحمية، مثل الفضاء الجوي، ومحطات الطاقة النووية، ومناطق تخزين المواد الخطرة [8].

6- التصوير الحراري الطبي (Medical Thermal Imaging):

يُستخدم لقياس درجة حرارة جسم الإنسان، ويُساعد في الكشف عن النقاط الساخنة غير الطبيعية داخل الجسم، ويُستفاد منه في مجالات طب الأعصاب، والجراحة التجميلية، والأمراض الجلدية، وغيرها من التطبيقات الطبية [8].

7- التصوير الحراري المرئي للأشعة فوق البنفسجية (UV-Visible Thermal Imaging):

يلتقط هذا النوع معلومات النقاط الساخنة باستخدام أطوال موجية محددة من الأشعة فوق البنفسجية أو الضوء المرئي، ويُستخدم في قياس درجة حرارة المكونات الإلكترونية، والترانزستورات، والأجهزة الدقيقة الأخرى بدقة عالية [9].

10-1 أهمية التصوير الحراري

يُعتبر التصوير الحراري من التقنيات الحديثة ذات الأهمية البالغة في مختلف المجالات العلمية والصناعية والطبية. فهو يوفر وسيلة دقيقة وغير تلامسيه لقياس درجات الحرارة وتحليل التوزيع الحراري للأجسام، مما يسهم في الكشف المبكر عن الأعطال الكهربائية والميكانيكية، وتحديد نقاط الفقد الحراري في المباني، وتحسين كفاءة استخدام الطاقة. كما يُعد أداة أساسية في التطبيقات الطبية لمراقبة حالة الجسم والكشف عن الالتهابات أو التغيرات غير الطبيعية في الأنسجة، إضافة إلى دوره في الدراسات البيئية ومراقبة الحياة البرية. ومن خلال هذه القدرات، يتيح التصوير الحراري تعزيز السلامة، تقليل المخاطر، وتحسين كفاءة العمليات الصناعية والهندسية، مما يجعله تقنية لا غنى عنها في العصر الحديث [2,4,8].

الفصل الثاني

الأسس الفيزيائية والتطبيقات المتقدمة للتصوير الحراري

1-2 الاشعاع الحراري

1-2-1 الإشعاع الحراري

يُعد الإشعاع الحراري جزءًا من نطاق الأشعة تحت الحمراء و هو الطاقة المنبعثة من جميع الأجسام نتيجة الحركة الداخلية لجزيئاتها. تتحرك جزيئات السوائل والغازات بحرية بينما تهتز جزيئات المواد الصلبة حول مواقعها الثابتة، وهذا التذبذب يولد طاقة تُشع على شكل إشعاع كهرومغناطيسي. تعتمد شدة هذا الإشعاع على درجة حرارة الجسم وخصائص سطحه، مثل معامل الانبعاثية، ويزداد الانبعاث مع زيادة درجة الحرارة [17].

يمكن استخدام هذا الإشعاع لدراسة العديد من الظواهر الطبيعية والصناعية، بما في ذلك مراقبة توزيع الحرارة على أسطح المباني، الأجهزة، والأنظمة الميكانيكية [18].

كما يوضح قانون بلانك كيفية حساب الطاقة المنبعثة لكل وحدة مساحة لكل طول موجي عند درجة حرارة معينة، ويبين العلاقة العكسية بين درجة الحرارة وطول موجة ذروة الإشعاع [19].

1-2-2 خصائص الإشعاع الحراري

1- **القياس غير التلامسي:** يمكن قياس الحرارة بأمان دون ملامسة الأجسام الساخنة أو الخطرة [20].
2- **العمل في الوقت الحقيقي:** يتيح الحصول على بيانات حرارية للأجسام الثابتة والمتحركة على حد سواء [20].
3- **دقة عالية:** الصور الحرارية ثنائية الأبعاد تساعد على دراسة توزيع الحرارة بدقة ومقارنة المناطق المختلفة [21].
4- **استخدام آمن في الطب والبيطرة:** يسمح بتقييم درجات الحرارة والتغيرات الحرارية دون تدخل جراحي أو تأثير على الكائن الحي [21].

2-2 القوانين الفيزيائية المنظمة لعمل التصوير الحراري

2-2-1 قانون بلانك وتوزيع الطاقة الاشعاعية

الإشعاع تحت الأحمر هو الطاقة المنبعثة من سطح جسم تزيد درجة حرارته عن الصفر المطلق، ويعتمد الإشعاع المنبعث على درجة حرارة المادة؛ فكلما ارتفعت درجة الحرارة، زادت شدة طاقة الأشعة تحت الحمراء المنبعثة [7].

توجد ثلاث طرق لتبديد الطاقة الإشعاعية الساقطة على جسم ما: الامتصاص، والنفاذية، والانعكاس تُعرف نسب الطاقة الإشعاعية الكلية المرتبطة بكل نمط من أنماط التبديد هذه بمعامل الامتصاص، ومعامل النفاذية، ومعامل الانعكاس للجسم [6].

تعتمد هذه المعايير الثلاثة على الطول الموجي، ويجب أن يكون مجموعها مساويًا للواحد عند أي طول موجي كما في معادلة رقم (2-1):

$$\alpha\lambda + \rho\lambda + \tau\lambda = 1 \dots\dots (1-2)$$

حيث أن:

$\alpha\lambda$= معامل الامتصاص

$\rho\lambda$= معامل الانعكاس

$\tau\lambda$= معامل النفاذية

λ= الطول الموجي

في حالة المواد المعتمة، تكون النفاذية معدومة ($\tau p\lambda = 0\ \lambda$) وبذلك تُبسط المعادلة (2-1) إلى المعادلة (2-2):

$$\alpha\lambda = 1 - \rho \dots\dots (2-2)$$

تُسمى المواد التي تكون فيها النفاذية والانعكاسية معدومة بالأجسام السوداء، حيث يتم امتصاص كل الطاقة الإشعاعية الساقطة اي ان معامل الامتصاص يساوي الواحد الصحيح ($\alpha\lambda = 1$) [15].

يمكن حساب الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من جسم أسود باستخدام قانون بلانك، والذي يعطي القدرة المنبعثة لكل وحدة مساحة لكل وحدة طول موجي عند درجة حرارة معينة كما في المعادلة رقم (3-2):

$$W\lambda b = \frac{C1}{\lambda^5}\left(\frac{1}{C2\backslash e\lambda \mathrm{T}-1)}\right).....(3\text{-}2)$$

حيث ان:

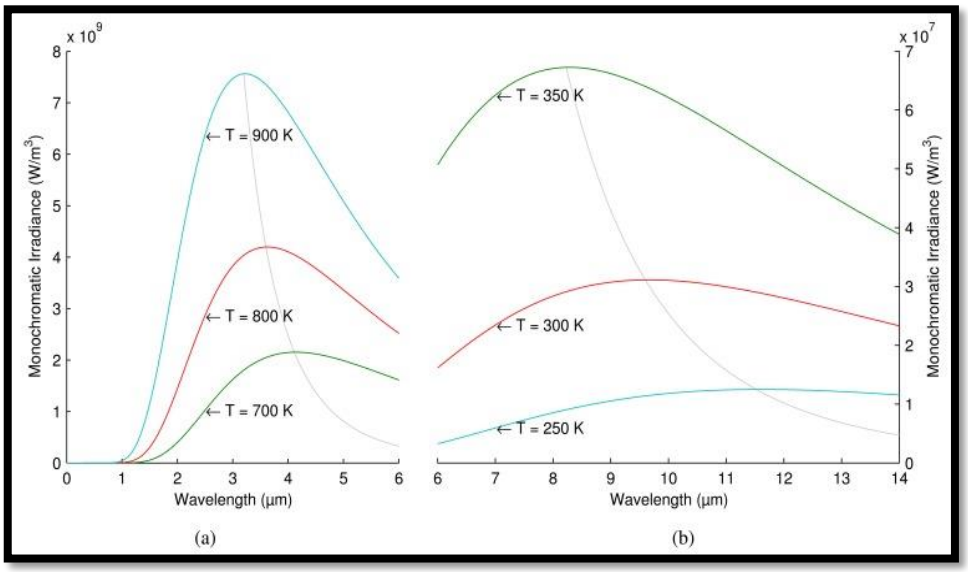
$W\lambda b =$ القدرة الاشعاعية الطيفية لتجسم الاسود

$\lambda =$ الطول الموجي

$T =$ درجة الحرارة المطلقة

$C1$و$C2 =$ ثوابت بلانك

يوضح قانون بلانك توزيع الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من جسم أسود عند درجات حرارة مختلفة، حيث تكون ذروة الانبعاث عند جسم أكثر سخونة أكبر وللطول الموجي أقصر، بينما الأجسام الأكثر برودة تصدر معظم الإشعاع عند أطوال موجية أطول يوضح شكل(2-1) توزيع الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من جسم أسود عند درجات حرارة مختلفة. تُظهر المنحنيات مقدار الطاقة المُشعّة عند كل طول موجي. وكما هو واضح، فإن ذروة المنحنى تكون أكبر بالنسبة للجسم الأكثر سخونة. بالإضافة إلى ذلك، توجد علاقة عكسية بين درجة الحرارة وطول موجة ذروة الانبعاث [17].



الشكل(2-1)، منحنيات إشعاع الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة [15].

2-2-2 قانون ستيفان-بولتزمان وعلاقته بدرجة الحرارة

الإشعاع الكلي المنبعث من جسم أسود عند درجة حرارة معينة يمكن حسابه باستخدام قانون ستيفان–بولتزمان، والذي ينص على أن القدرة الكلية W المنبعثة لكل وحدة مساحة تتناسب مع القوة الرابعة لدرجة حرارة الجسم المطلقة T كما في العلاقة (2-3):

$$Wb = \sigma T^4 \text{.....(3-2)}$$

حيث ان:

$wb =$ القدرة المشعة لكل وحدة مساحة w/m^2

$T =$ درجة حرارة الجسم المطلقة K

$\sigma =$ ثابت ستيفان–بولتزمان ويبلغ $5.670 \times 10^{-8}, w/m^2K^4$

إذا كان الجسم رماديًا بمعامل انبعاثية أقل من واحد، تصبح القدرة المشعة:

$$W = \epsilon\sigma \mathrm{T}^4 \text{.....(4-2)}$$

حيث أن:

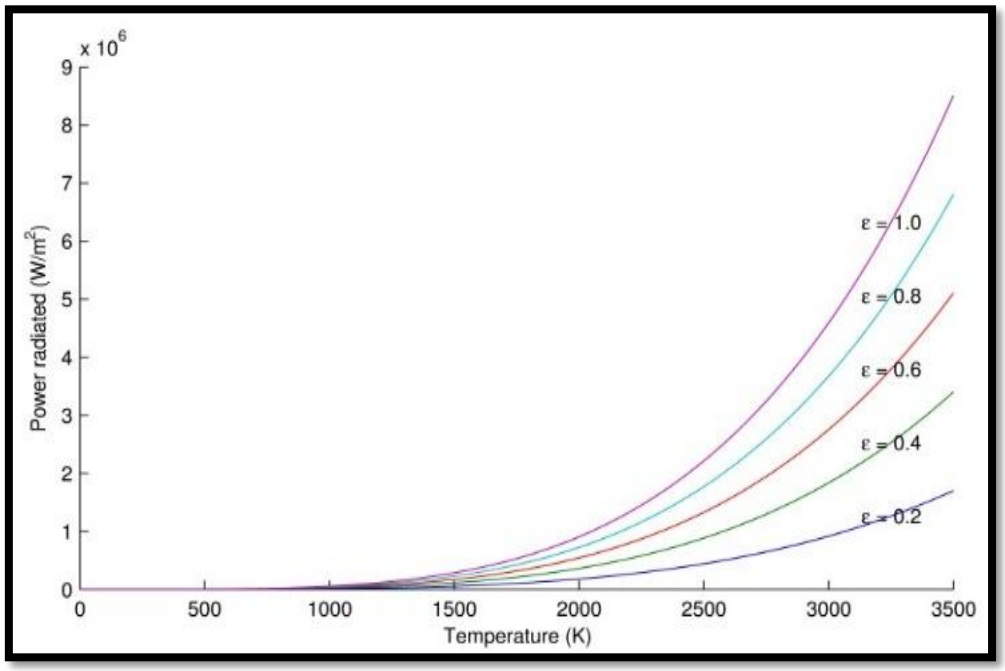
$W =$ القدرة المشعة

ϵ=معامل الانبعاثية

$\sigma =$ ثابت ستيفان-بولتزمان

$T =$ درجة الحرارة المطلقة

ويُظهر قانون ستيفان–بولتزمان أن الأجسام الأكثر سخونة تشع طاقة أكبر بكثير من الأجسام الباردة، ويكمل بذلك قانون بلانك الذي يحدد توزيع الإشعاع على الأطوال الموجية المختلفة [22]. يوضح الشكل (2-2) تمثيلاً بيانيًا لهذه الصيغة للعاملات انبعاث مختلف.



الشكل (2-2)، العلاقة بين القدرة الإشعاعية ودرجة الحرارة لعدة قيم من الانبعاثية [22].

2-2-3 إزاحة فين وانبعاثية الأجسام الرمادية

ينص قانون إزاحة فين على أن الطول الموجي الذي تنبعث عنده أقصى شدة إشعاع من جسم أسود عند درجة حرارة معينة يُحسب بالعلاقة (2-5):

$$\lambda max = \frac{2.9\times10^{-3}}{T} \ldots\ldots\ldots \textit{(5-2)}$$

حيث أن

$\lambda max =$ الطول الموجي لأقصى شدة إشعاع

$T =$ درجة الحرارة المطلقة K

لحساب شدة الإشعاع الكلية نصف الكروية لجسم أسود، يتم تكامل قدرة الإشعاع لكل وحدة طول موجي على جميع الأطوال الموجية (من الصفر إلى ما لا نهاية)، فنحصل على صيغة ستيفان–بولتزمان كما في العلاقة (2-6):

$$Wb = \sigma \mathrm{T}^4 \ldots\ldots\ldots (6-2)$$

حيث أن

$Wb =$ هي القدرة الكلية المنبعثة من جسم أسود لكل وحدة مساحة

$\sigma =$ ثابت ستيفان–بولتزمان

$T =$ درجة الحرارة المطلقة K

يُعرف معامل انبعاثية الجسم عند طول موجي معين λ على أنه نسبة الطاقة الإشعاعية المنبعثة من الجسم الحقيقي إلى الطاقة المنبعثة من جسم أسود عند نفس درجة الحرارة كما في العلاقة (2-7):

$$\epsilon\lambda = \frac{W\lambda}{W\lambda b} \ldots\ldots\ldots (7-2)$$

حيث أن:

$\epsilon\lambda$ =معامل الانبعاثية الطيفي

$W\lambda$ =.القدرة الإشعاعية المنبعثة من الجسم الحقيقي عند طول موجي معين

$W\lambda b$ = القدرة الإشعاعية المنبعثة من الجسم الأسود عند نفس الطول الموجي ونفس درجة الحرارة.

إذا كانت الانبعاثية مستقلة عن الطول الموجي، يُعتبر الجسم رماديًا، ويمكن التعبير عن ذلك بالعلاقة (8-2):

$$\epsilon = \frac{W}{Wb} \dots\dots\dots (8-2)$$

حيث أن

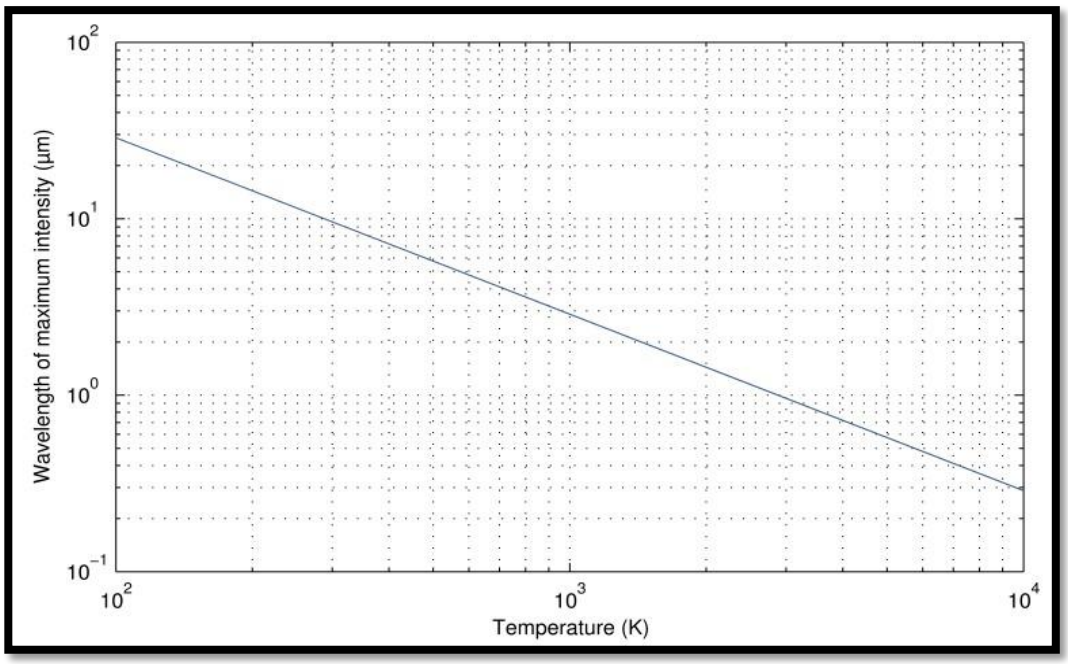
ϵ=معامل الانبعاثية الكلي

W =أجمالي الطاقة الإشعاعية المنبعثة من الجسم الرمادي (لجميع الأطوال الموجية)

Wb = إجمالي الطاقة الإشعاعية المنبعثة من الجسم الأسود عند نفس درجة الحرارة والتي تُحسب عادةً بقانون ستيفان-بولتزمان σT^4

يشير هذا إلى أن الجسم الرمادي يصدر جزءًا فقط من الطاقة الحرارية التي يصدرها الجسم الأسود عند نفس درجة الحرارة، ويفترض غالبًا أن الانبعاثية ثابتة ضمن نطاقات قصيرة من الطول الموجي لتسهيل حساب الإشعاع باستخدام أجهزة الاستشعار الحرارية [26].

يوضح الشكل (2-3) تمثيلاً بيانياً باستخدام قانون فين.



الشكل (2-3)، إزاحة فين: العلاقة بين الطول الموجي لذروة الانبعاث ودرجة الحرارة [22].

3-2 البنية الفيزيائية لأنظمة التصوير الحراري

3-2-1 الكواشف الحرارية آلية استجابتها

تُعدّ الكواشف الحرارية (Thermal Detectors) من أهم أنواع كواشف الإشعاع، إذ تعتمد في مبدأ عملها على تحويل الإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط إلى طاقة حرارية، ثم قياس الزيادة الناتجة في درجة الحرارة بواسطة مستشعرات حرارية مناسبة. وتُستخدم هذه الكواشف على نطاق واسع، ولا سيّما في نطاق الأشعة تحت الحمراء ذات الأطوال الموجية الطويلة التي يصعب كشفها باستخدام كواشف الفوتونات التقليدية، كما تُستخدم في التطبيقات التي لا تُشكّل فيها سرعة الاستجابة المنخفضة أو الحساسية المتوسطة عائقًا، مثل أجهزة قياس طاقة الليزر[27].

تتميّز الكواشف الحرارية بامتلاكها استجابة طيفية واسعة جدًا، حيث تُظهر استجابة شبه ثابتة عبر مدى كبير من الأطوال الموجية، ويعود ذلك إلى إمكانية تصنيع طبقات ماصّة سوداء ذات امتصاص عريض النطاق. وتُعدّ هذه الخاصية من أهم المزايا التي تجعل الكواشف الحرارية متفوّقة على الكواشف الضوئية في بعض التطبيقات الطيفية [28].

يتكوّن الكاشف الحراري بصورة عامة من ممتص ضوئي يكون معزولًا حراريًا نسبيًا عن الوسط المحيط، بحيث ترتفع درجة حرارته عند امتصاص الإشعاع الساقط. ويرتبط هذا الممتص بمستشعر حرارة يقوم بقياس إمّا درجة الحرارة المطلقة للممتص أو فرق درجة الحرارة بين الممتص والمشتت الحراري. وفي الحالة الأخيرة، يجب تثبيت درجة حرارة المشتت الحراري أو قياسها بشكل مستقل لضمان دقة القياس [27].

تُحوَّل الزيادة في درجة الحرارة إلى إشارة كهربائية باستخدام مواد حساسة للحرارة، مثل البوليمرات التي تعتمد على تغيّر المقاومة الكهربائية مع درجة الحرارة، حيث تُستخدم مواد مثل أكسيد الفاناديوم (VOx) أو السيليكون غير المتبلور (a-Si)، وتمتلك هذه المواد معامل مقاومة حرارية سالب (NTC)، أي أن مقاومتها تقل مع ارتفاع درجة الحرارة. كما تُستخدم المزدوجات الحرارية والمزدوجات الحرارية المتعددة التي تعتمد على تأثير سيبك، إذ يتولد جهد كهربائي يتناسب مع فرق درجة الحرارة بين الوصلات المعدنية المختلفة [28].

تعمل العديد من الكواشف الحرارية عند درجة حرارة الغرفة أو بالقرب منها، إلا أن الكواشف ذات الحساسية العالية تتطلب في الغالب التشغيل عند درجات حرارة منخفضة، باستخدام تقنيات التبريد الكهروحراري (تبريد بلتييه) أو مبردات ستيرلينغ، وفي بعض التطبيقات الخاصة قد يُستخدم التبريد بالهيليوم السائل للوصول إلى درجات حرارة منخفضة جدًا. ويسهم خفض درجة حرارة التشغيل في تقليل الضوضاء الحرارية وتحسين الحساسية، مما يؤدي إلى تقليل فرق درجة الحرارة المكافئ للضوضاء(NETD) [27].

تُستخدم الكواشف الحرارية في العديد من التطبيقات العملية، مثل كاميرات التصوير الحراري التي تعتمد على مصفوفات من الميكروبولومترات، إضافة إلى أجهزة قياس طاقة الليزر والمسعرات الحرارية المستخدمة في قياس طاقات النبضات الليزرية العالية. وبذلك تمثل الكواشف الحرارية عنصرًا أساسيًا في تقنيات القياس والتصوير في نطاق الأشعة تحت الحمراء[28].

3-2-2 معالجة البيانات والصور الحرارية

تُعدّ معالجة البيانات والصور الحرارية (Thermal Data and Image Processing) من المراحل الأساسية في أنظمة التصوير الحراري، إذ تهدف إلى تحسين جودة الصورة الحرارية،

واستخلاص المعلومات الفيزيائية الدقيقة المرتبطة بتوزيع درجات الحرارة، وتحويل البيانات الخام الخارجة من الكواشف الحرارية إلى صور قابلة للتحليل والتفسير العلمي. وتعتمد هذه المعالجة على مجموعة من الخوارزميات الرقمية والإجراءات البرمجية التي تُطبَّق قبل عملية العرض أو التحليل الكمي للصور[13].

1- تصحيح البيانات الحرارية

تخضع البيانات الحرارية الأولية إلى عمليات تصحيح متعددة تهدف إلى تقليل الأخطاء الناتجة عن خصائص الكاشف أو العوامل البيئية المحيطة، ومن أهمها تصحيح عدم تجانس الاستجابة لعناصر المصفوفة الكاشفة (Non-Uniformity Correction)، وتقليل الضوضاء الحرارية، إضافة إلى تعويض تأثير الانبعاثية للأجسام المصوَّرة، إذ تختلف الانبعاثية باختلاف نوع السطح وطبيعته الفيزيائية [6].

2- تحسين الصور الحرارية

تهدف عمليات تحسين الصور الحرارية إلى زيادة وضوح التفاصيل وإبراز الفروقات الحرارية الصغيرة، وتشمل تحسين التباين، وترشيح الصور لتقليل الضوضاء مع الحفاظ على الحواف الحرارية، فضلًا عن ضبط المدى الديناميكي للصورة بما يتناسب مع مجال درجات الحرارة المدروس، مما يسهم في رفع كفاءة التفسير البصري للصورة الحرارية [28].

3- تحليل الصور الحرارية

يُستخدم تحليل الصور الحرارية لاستخلاص المعلومات الكمية والكيفية المرتبطة بالتوزيع الحراري، مثل تحديد المناطق الساخنة والباردة، وتقسيم الصورة إلى مناطق ذات خصائص حرارية متشابهة، إضافة إلى إجراء التحليل الإحصائي لدرجات الحرارة، كحساب المتوسط والقيم العظمى والصغرى، وهو ما يجعل الصور الحرارية أداة فعالة في التطبيقات العلمية والطبية والصناعية [13].

4- عرض البيانات الحرارية

يتم عرض البيانات الحرارية باستخدام خرائط لونية خاصة تُحوّل القيم الحرارية غير المرئية إلى ألوان مرئية، حيث تُستخدم الألوان الدافئة لتمثيل درجات الحرارة المرتفعة، في حين تُعبّر الألوان الباردة عن درجات الحرارة المنخفضة، مما يساعد على فهم التوزيع الحراري وتحليل الظواهر المدروسة بصورة أكثر وضوحًا [6].

5- أهمية معالجة الصور الحرارية

تكمن أهمية معالجة البيانات والصور الحرارية في تحسين دقة القياسات، وتقليل نسبة الخطأ، وزيادة موثوقية النتائج المستخلصة، الأمر الذي يجعلها عنصرًا أساسيًا في تطبيقات متعددة مثل الفحص غير الإتلافي، والتشخيص الطبي، ومراقبة الأنظمة الصناعية والهندسية [28].

3-2-3 قياس الانبعاثية ودرجة الحرارة المنعكسة

يُعدّ معامل الانبعاثية (Emissivity) من أهم معايير المعايرة في قياس درجة الحرارة باستخدام التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء، إذ يُعبّر عن نسبة الإشعاع المنبعث من الجسم الحقيقي إلى الإشعاع المنبعث من جسم أسود عند نفس درجة الحرارة. وتُصدر المواد ذات الانبعاثية المنخفضة إشعاعًا أقل مقارنةً بالمواد ذات الانبعاثية العالية عند نفس درجة الحرارة. تُعدّ الدقة في تحديد قيمة الانبعاثية أمرًا بالغ الأهمية، لا سيّما عند التعامل مع المواد ذات الانبعاثية المنخفضة مثل الألومنيوم أو الفولاذ المصقول، إذ تؤدي التغيّرات الطفيفة في قيمة الانبعاثية إلى أخطاء كبيرة في درجة الحرارة المقاسة. في المقابل، تكون هذه التأثيرات محدودة نسبيًا في المواد ذات الانبعاثية العالية. توجد طريقتان شائعتان لقياس الانبعاثية عمليًا: طريقة التلامس باستخدام مزدوج حراري للحصول على درجة حرارة مرجعية، وطريقة مادة الانبعاثية المرجعية، والتي تعتمد على لصق شريط لاصق ذي انبعاثية معروفة على سطح العينة وقياس درجة الحرارة باستخدام كاميرا الأشعة تحت الحمراء. بعد تحديد درجة الحرارة الحقيقية، يتم تعديل إعداد الانبعاثية في الكاميرا حتى تتطابق درجة الحرارة المقاسة مع القيمة المرجعية، وتُعدّ القيمة الناتجة هي انبعاثية الجسم .تُعدّ درجة الحرارة المنعكسة معيارًا مكملًا مهمًا، خصوصًا في حالة الأجسام ذات الانعكاسية العالية. وتُستخدم طريقة العاكس على نطاق واسع لقياسها، حيث يوضع سطح عاكس مُعاير داخل مجال رؤية الكاميرا، وتُقاس درجة

حرارته بافتراض انبعاثية تساوي واحدًا. وتمثل القيمة الناتجة درجة الحرارة المنعكسة الفعلية التي يجب إدخالها في إعدادات القياس لضمان دقة النتائج [29].

4-2 التقنيات المتقدمة في كاميرات التصوير الحراري

4-2-1 الأنظمة المبردة ودقة القياس

تُعدّ أنظمة التصوير الحراري المبردة (Cooled Thermal Imaging Systems) من أكثر تقنيات التصوير الحراري تطورًا من حيث الحساسية ودقة القياس، إذ تعتمد على تبريد كاشف الأشعة تحت الحمراء إلى درجات حرارة منخفضة جدًا باستخدام مبردات خاصة مثل مبردات ستيرلنغ (Stirling Coolers). ويؤدي هذا التبريد إلى تقليل الضوضاء الحرارية الذاتية للكاشف بشكل كبير، مما يسمح باكتشاف فروقات حرارية صغيرة جدًا لا يمكن رصدها باستخدام الأنظمة غير المبردة [13].

تُستخدم في هذه الأنظمة كواشف عالية الأداء مصنوعة من مواد شبه موصلة مثل أنتيمونيد الإنديوم (InSb) أو تلورايد الكادميوم والزئبق (MCT)، والتي تتميز باستجابتها الطيفية الواسعة وحساسيتها العالية ضمن نطاق الأشعة تحت الحمراء المتوسطة والطويلة. ويسهم ذلك في تحسين نسبة الإشارة إلى الضوضاء وزيادة دقة القياس الحراري، لا سيّما في التطبيقات التي تتطلب قياسات دقيقة أو كشف أهداف بعيدة المدى [6].

ترتبط دقة القياس في الأنظمة الحرارية المبردة ارتباطًا مباشرًا بالحساسية الحرارية للمستشعر، والتي يُعبَّر عنها عادةً بقيمة NETD (Noise Equivalent Temperature Difference). فكلما انخفضت قيمة NETD، ازدادت قدرة النظام على التمييز بين الاختلافات الحرارية الصغيرة. وتتميز الأنظمة المبردة بقيم NETD منخفضة جدًا مقارنة بالأنظمة غير المبردة، مما يجعلها أكثر كفاءة في القياس الحراري عالي الدقة [13].

كما تسهم الدقة المكانية العالية وعدد البكسلات الكبير في تحسين دقة القياس، إذ تؤدي زيادة عدد البكسلات إلى تقليل المساحة الحرارية الممثلة لكل بكسل، مما يسمح بتحديد أدق لمواقع العيوب الحرارية أو النقاط الساخنة. وتُعد هذه الميزة ذات أهمية خاصة في تطبيقات الفحص غير الإتلافي، والتفتيش الصناعي، والبحث العلمي [6].

وبفضل الجمع بين التبريد العميق للكاشف، والحساسية الحرارية العالية، والدقة المكانية المتقدمة، توفّر الأنظمة الحرارية المبردة مستوىً متفوقًا من دقة القياس والموثوقية، الأمر الذي يجعلها الخيار الأمثل للتطبيقات الحرجة مثل الأنظمة العسكرية والفضائية وتطبيقات البحث والتطوير المتقدمة [13].

4-2-2 الانظمة غير المبردة وتطبيقاتها العملية

تعتمد الأنظمة الحرارية غير المبردة (Uncooled Thermal Imaging Systems) على كواشف تعمل عند درجة حرارة الغرفة دون الحاجة إلى نظم تبريد معقدة، مثل المستشعرات من نوع الميكروبولومتر التي تُحوّل الاشعاع تحت الحمراء الوارد إلى تغيّر في المقاومة الكهربائية وتُشكّل بذلك الصورة الحرارية. تعمل هذه الكواشف بكفاءة في نطاق الأشعة تحت الحمراء الطويلة (LWIR)، وتتميّز بصغر الحجم وخفة الوزن وانخفاض التكلفة مقارنة بالأنظمة المبردة، وذلك بفضل عدم وجود وحدات تبريد ثقيلة أو استهلاك طاقة مرتفع [30].

تُستخدم الأنظمة الحرارية غير المبردة في مجموعة واسعة من التطبيقات العملية بفضل مزاياها الفنية والاقتصادية؛ ومن أهم هذه التطبيقات :[30]

1- **المراقبة والأمن:** تُمكّن كاميرات الاستشعار الحراري غير المبردة من اكتشاف الأجسام الحية والمركبات في الظلام أو الظروف البيئية الصعبة، مما يدعم تطبيقات المراقبة المدنية والعسكرية.
2- **الفحص الصناعي:** تُستخدم في الصيانة الوقائية لمراقبة المعدات الكهربائية والميكانيكية للكشف المبكر عن ارتفاعات درجة الحرارة أو العيوب الحرارية قبل حدوث أعطال.
3- **الفحص غير التلامسي لدرجة الحرارة:** في التطبيقات البيئية والطبية والتجارية، تُستخدم لقياس درجات الحرارة دون التلامس مع الأجسام، مما يُعد مفيدًا في العديد من البيئات الحسية.
4- **الإنقاذ ومكافحة الحرائق:** تساعد هذه الأنظمة فرق الإسعاف والإطفاء في رؤية النقاط الساخنة عبر الدخان أو العوائق، وتسريع الوصول إلى الأفراد المحتاجين.

تتميّز الكواشف غير المبردة أيضًا بانخفاض تكلفة التصنيع والصيانة، مما يجعلها خيارًا عمليًا اقتصاديًا للعديد من الاستخدامات مقارنةً بالأنظمة الحرارية المبردة، رغم أن الأخيرة تبقى أكثر حساسية في التطبيقات التي تتطلب دقة قياس حراري عالية جدًا أو رصدًا لمسافات بعيدة.

5-2 مجالات التوظيف العلمي والتطبيقي للتصوير الحراري

5-2-1 التطبيقات الطبية والتشخيصية

يُستخدم التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء في العديد من التطبيقات الطبية والتشخيصية بفضل قدرته على رصد التغيرات الدقيقة في درجة حرارة سطح الجسم، وهو ما يمكن أن يُشير إلى حالات مرضية مختلفة [31].

1- **فحص سرطان الثدي:** يمكن استخدام التصوير الحراري كمكمل للفحوصات التقليدية للكشف عن التغيرات الحرارية المرتبطة بنمو الأورام في الثدي، إذ تظهر الأنسجة المصابة بزيادة في تدفق الدم وارتفاع في الحرارة مقارنة بالأنسجة السليمة [31].
2- **اضطرابات الأوعية الدموية:** يساعد التصوير الحراري في تقييم تدفق الدم وتشخيص اضطرابات الدورة الدموية، مثل مرض الشرايين المحيطية والتجلط الوريدي العميق، من خلال تصوير أنماط الحرارة غير الطبيعية في الأطراف [31].
3- **الحالات الالتهابية:** تُعدّ التقنية فعّالة في رصد الالتهابات مثل التهاب المفاصل والأمراض الالتهابية الأخرى، إذ تُظهر المناطق الملتهبة ارتفاعًا في درجة الحرارة مقارنة بالمناطق غير الملتهبة، مما يساعد في التشخيص والمتابعة [32].
4- **إدارة الألم:** يُستخدم التصوير الحراري لتحديد مصادر الألم المرتبطة بالنشاط العصبي أو الالتهاب، إذ تكشف الصور الحرارية اختلافات الحرارة التي تُشير إلى مناطق الألم، ما يُساعد الأطباء في تقييم شدة الحالة ومتابعة فعالية العلاج [32].

عمومًا، يوفّر التصوير الحراري وسيلة غير تلامسية، وغير إشعاعية لتقييم الحالات الصحية المختلفة، مما يجعله أداة داعمة في الطب السريري وخاصة في تقييم الحالات التي تتضمن تغيرات في درجة الحرارة السطحية للجسم [31].

5-2-2 التطبيقات الصناعية والهندسية

يُعد التصوير الحراري أداة متقدمة في المجالات الصناعية والهندسية نظرًا لقدرتها على كشف الفروقات الحرارية غير المرئية للعين المجردة، مما يسمح بتحليل أداء المعدات والأنظمة بشكل دقيق. في القطاع الصناعي، تُستخدم الكاميرات الحرارية لمراقبة الحالة الحرارية للآلات والمحركات، مما يتيح الكشف المبكر عن ارتفاع درجات الحرارة أو الأعطال المحتملة قبل أن تتحول إلى مشاكل كبيرة تؤدي إلى توقف الإنتاج أو خسائر مادية كبيرة [33].

كما يُستفاد من التصوير الحراري في عمليات الصيانة التنبؤية، حيث يمكن تحديد المكونات التي تتطلب إصلاحًا أو استبدالًا استنادًا إلى أنماط الحرارة غير الطبيعية. على سبيل المثال، تُستخدم الكاميرات الحرارية لمراقبة المحولات الكهربائية، القواطع، وخطوط الطاقة، لضمان عملها ضمن نطاق درجات الحرارة المثلى وتقليل خطر حدوث الأعطال [34].

في مجال الهندسة المدنية والبناء، تُستخدم الكاميرات الحرارية لتقييم كفاءة العزل الحراري للمباني وكشف التسريبات الحرارية في الأسطح والجدران، ما يعزز كفاءة استهلاك الطاقة ويحد من الهدر [35].

بالإضافة إلى ذلك، يُعد التصوير الحراري أداة فعالة في مراقبة جودة العمليات الصناعية، مثل تصنيع المعادن وعمليات الصب، حيث يمكن من خلاله التحقق من توزيع الحرارة وضمان استقرار عملية الإنتاج [36].

كما تُستفيد الصناعات الهندسية الدقيقة، مثل تصنيع المكونات الميكانيكية عالية الدقة، من التصوير الحراري للكشف عن العيوب أو الانحرافات الحرارية التي قد تؤثر على أداء المنتج النهائي. تُتيح هذه التقنية أيضًا مراقبة العمليات في الوقت الفعلي وتحسين جودة الإنتاج، ما يجعلها جزءًا لا يتجزأ من أنظمة إدارة الجودة المتقدمة [37].

5-2-3 التطبيقات الأمنية والعسكرية

1- التطبيقات العسكرية والدفاعية

يُستخدم التصوير الحراري بشكل واسع في العمليات العسكرية، لا سيما في الظروف الليلية أو عند الرؤية المنخفضة، حيث يتيح للقوات اكتشاف وتحديد الأهداف بدقة عالية في البيئات البرية والجوية والبحرية. كما تُستخدم الكاميرات الحرارية في أنظمة الملاحة للطائرات ومناظير الأسلحة الحرارية، بالإضافة إلى أجهزة التصوير المحمولة على الرأس وأنظمة التحكم في إطلاق النار للدبابات وتوجيه الصواريخ بدقة عالية. ويُعد الاستخدام في الطائرات المسيّرة (UAVs) من التطبيقات الحديثة التي عززت قدرات الاستطلاع والدفاع [37].

2- التطبيقات الأمنية وإنفاذ القانون

تلعب الكاميرات الحرارية دورًا أساسيًا في الأمن الداخلي ومراقبة الحدود، حيث تُستخدم لتتبع المشتبه بهم، والتحقيق في مسارح الجرائم، وإدارة عمليات البحث والإنقاذ. كما ساعدت هذه التقنية في مكافحة الحرائق من خلال الكشف عن الأشخاص المحاصرين وتحديد مواقع بؤر الحريق، ما يعزز من فعالية فرق الاستجابة الأولية ويقلل من المخاطر البشرية والمادية [28].

3- المراقبة والكشف الحيوي والصناعي

تتيح أجهزة التصوير الحراري مراقبة الوظائف الحيوية للكشف المبكر عن الحمى أو الأمراض المعدية، مما يسهم في تحسين الرقابة الصحية أثناء الأوبئة. بالإضافة إلى ذلك، تُستخدم هذه التقنية في التطبيقات الصناعية المرتبطة بالأمن، مثل مراقبة تسرب الغاز وفحص المباني والصيانة التنبؤية، ما يعزز سلامة المنشآت ويضمن استمرارية العمليات التشغيلية دون توقف غير متوقع [33].

4-2-5 التطبيقات البيئية والزراعية

1- مراقبة المحاصيل الزراعية:

تُستخدم كاميرات التصوير الحراري لمراقبة صحة النباتات وكشف الإجهاد المائي والحراري. من خلال تحليل توزيع درجات الحرارة على أوراق النباتات، يمكن تحديد المناطق التي تعاني من نقص المياه أو الأمراض قبل ظهور الأعراض البصرية، مما يساعد المزارعين على تحسين إدارة الري وتطبيق التدابير الوقائية [12].

2- أدارة الري والموارد المائية:

يُعتبر التصوير الحراري أداة فعّالة لتقدير تبخر المياه من التربة والمحاصيل، ما يساهم في تحسين استراتيجيات الري وزيادة كفاءة استخدام المياه. وتتيح هذه التقنية تحديد المناطق التي تحتاج إلى ري إضافي أو تقليل الري لتوفير الموارد [31].

3- مراقبة الغابات والنظم البيئية:

يُستخدم التصوير الحراري في دراسة توزيع الحرارة في الغابات والمناطق الطبيعية، بما في ذلك مراقبة النشاط البيولوجي للكائنات الحية والنباتات، واكتشاف حرائق الغابات في مراحلها المبكرة، وتحليل تأثير التغير المناخي على البيئة [30].

4- كشف ومراقبة الآفات الزراعية:

يمكن للتصوير الحراري الكشف عن نشاط الحشرات أو الآفات التي تؤثر على المحاصيل من خلال تغييرات الحرارة الناتجة عن إصابة النباتات. تساعد هذه التقنية في التدخل المبكر للحد من انتشار الآفات وتقليل الخسائر الاقتصادية [37].

5- مراقبة صحة التربة والبيئة الزراعية:

تُتيح الكاميرات الحرارية مراقبة درجة حرارة التربة بشكل دقيق لتحديد خصوبتها ونشاط الكائنات الدقيقة فيها، بالإضافة إلى مراقبة التغيرات البيئية المرتبطة بالزراعة المستدامة [35].

المصادر

[1] الإمارات اليوم، "تقنية التصوير الحراري تقترب من مرحلة الانتشار عبر الهواتف الذكية"، جريدة الإمارات اليوم، 6 سبتمبر 2014. [Online]. Available: https://www.emaratalyoum.com/technology/mobiles/2014-09-06-1.707077

[2] جامعة كربلاء، "تحسين كفاءة التصوير الحراري باستخدام النظام البصري"، بدون تاريخ. [Online]. Available: https://uokerbala.edu.iq/archives/research-paper

[3]G. C. Holst, Common Sense Approach to Thermal Imaging. Bellingham, WA, USA: SPIE Press, 2000.

[4]Hikvision، "تقنية التصوير الحراري"، بدون تاريخ. [Online]. Available: https://www.hikvision.com/ar/core-technologies/thermal-imaging

[5]الموسوعة التعليمية، "الرسّم الحراري"، بدون تاريخ. [Online]. Available: http://mousou3a.educdz.com/الرسم-الحراري/

[6]X. P. V. Maldague, Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. New York, USA: Wiley, 2001.

[7]F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.

[8]Hawkeep Technology, "Thermal Imaging Technology ", بدون تاريخ. [Online]. Available: https://www.hawkeeptech.com/thermal-imaging

[9]A. F. Abdulkareem and A. Q. Hashim, "Infrared medical thermography, medical applications, and its basic principles: A review," BIO Web of Conferences, vol. 97, p. 00140, 2024.

[10]H. Kaplan, Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. SPIE Press, 2007.

[11]GST-IR, "Characteristics of uncooled infrared detector .بدون تاريخ ",]Online]. Available: https://www.gst-ir.net/news-events/infrared-knowledge/493.html

[12]R. Vadivambal and D. S. Jayas, "Applications of thermal imaging in agriculture and food industry: A review," Food and Bioprocess Technology, vol. 4, no. 2, pp. 186–199, 2011.

[13]Open Medscience, "Thermography in medical imaging: Exploring its role and applications] .بدون تاريخ ",Online]. Available: https://openmedscience.com/thermography-in-medical-imaging-exploring-its-role-and-applications/

[14]FLIR Systems, Thermal Imaging Applications and Principles. Portland, OR, USA: FLIR Systems Inc., 2016.

[15]B. Lahiri, S. Bagavathiappan, T. Jayakumar, and J. Philip, "Medical applications of infrared thermography: A review," Infrared Physics & Technology, vol. 55, pp. 221–235, 2012.

[16]Physics LibreTexts, "Thermal Radiation] .بدون تاريخ ",Online]. Available: https://phys.libretexts.org

[17]R. Osamintiaja et al., "Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing," Sensors, vol. 14, no. 7, pp. 12305–12348, 2014.

[18]M. Stewart et al., "Infrared thermography as a non-invasive tool to study animal welfare," Animal Welfare, vol. 14, pp. 319–325, 2005.

[19]C. Meola, Infrared Thermography: Recent Developments and Future Trends. New York, USA: Bentham Science Publishers, 2012.

[20]B. F. Jones, "Re-evaluation of the use of infrared thermography for medical image analysis," IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 17, pp. 1019–1027, 1998.

[21]C. Ibarra-Castanedo, J. R. Tarpani, and X. P. V. Maldague, "Non-destructive testing using thermography," 2013.

[22]C. Miola and G. M. Carlomagno, "Recent advances in the use of infrared thermography," Measurement Science and Technology, vol. 15, p. R27, 2004.

[23]R. Boroheit, T. A. Turner, and D. D. Pasco, "Use of infrared thermography in veterinary medicine," in Medical Infrared Imaging, CRC Press, 2008.

[24]M. Vollmer and K.-P. Möllmann, Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2011.

[25]R. Paschotta, "Thermal detectors," RP Photonics Encyclopedia بدون ,] .تاريخOnline]. Available: https://www.rp-photonics.com/thermal_detectors.html

[26]Infrared thermography in maritime systems:" A systematic review," Applied Sciences, vol. 15, no. 23, p. 12551, 2025.

[27]H. N. Al-Jubori, I. Al-Darraji, and H. Jerbi, "Defect detection using thermography camera techniques: A review," Al-Khwarizmi Engineering Journal, 2024.

[28]G. K. Balakrishnan et al., "A review of infrared thermography for condition-based monitoring in electrical energy," Energies, vol. 15, no. 16, p. 6000, 2022.

[29]GAO Tek, "Applications of infrared thermometers & cameras in maintenance and inspections industry] .بدون تاريخ ",Online]. Available: https://gaotek.com

[30]C. Kim and R. Shrestha, "Innovations in building diagnostics and condition monitoring: A comprehensive review of Infrared thermography applications," Buildings, vol. 13, no. 11, p. 2829, 2023.

[31]R. S. Shekhawat, "Infrared thermography: A review," International Journal of Engineering Trends and Technology, vol. 35, no. 1, pp. 287–290, 2016.

[32]A. F. Abdulkareem and A. Q. Hashim, "Infrared medical thermography," 2024.

[33]Open Medscience, "Thermography in medical imaging بدون تاريخ. ",]Online]. Available: https://openmedscience.com/thermography-in-medical-imaging-exploring-its-role-and-applications/

[34]Holst, G. C., Common Sense Approach to Thermal Imaging. Bellingham, WA, USA: SPIE Press, 2000.

[35]GST-IR, "Characteristics of uncooled infrared detector بدون ", تاريخ.[Online]. Available: https://www.gst-ir.net/news-events/infrared-knowledge/493.html

[36]R. S. Shekhawat, "Infrared thermography: A review," 2016.

[37]Shekhawat, R. S., "Infrared thermography: A review," 2016.