كواشف الغاز العاملة بالأشعة تحت الحمراء

أسامة أبو لبدة

برنامج إجادة الدولي للتعليم والتدريب التقني – ليبيا، ص. ب 135 مدينة صبراتة

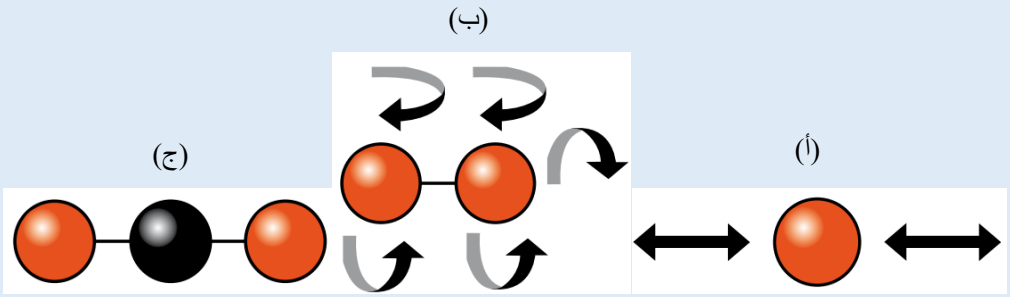
1 مقدمة

لقد كانت الأنواع القديمة من الراصد المثبت في كواشف الغاز التقليدية تتطلب من طاقم العمل الاقتراب اللصيق من مصدر التسرب الغازي كي يتحقق التماس المباشر للراصد مع الغاز السروب ويتسنى بذلك تنشيطه وأخذ القياسات به. لذلك سمي هذا النظام من الكواشف بنظام التنشق، لأن الراصد لا بد له من تنشق الغاز أولا لكي يعمل وفق المطلوب. إلا أن الخبرات السابقة مع هذا النظام البسيط دلت على وجود جوانب قصور كثيرة فيه، أبرزها هو الوقت الطويل نسبيا في استغراق الراصد في عملية القياس، وعدم أخذه بالحسبان ظروف التهوية والطقس السائدة في الموقع أثناء الرصد، واقتصار قياساته على نقطة القياس التي جرت عندها الملاحظة (أي في فضاء محدود حول موقع المعاينة فقط)، فضلا عن ارتفاع المخاطر المحتملة على حياة المفتش (العنصر البشري الفاحص) والعاملين والمعدات بالمنشأة عند فشله في رصد التسرب الغازي رصدا دقيقا. أما الأنواع الحديثة من الكواشف فجاءت لتلبي رغبات طواقم العمل فيما يخص السلامة في التعامل مع الظروف غير التقليدية في الصناعة النفطية، مستفيدة من نظم الحوسبة الآلية الحديثة في إضفاء الكثير من التحسينات على أداء الكواشف وارتفاع حساسيتها ضد التغيرات الطفيفة والفجائية في بيئة العمل. وتعتمد الكواشف الحديثة في عملها على مجموعة من كاميرات التصوير العاملة ضمن مجالات محددة من طاقة الإشعاع الكهرومغنطي، والتي وجدت لها تطبيقات متنوعة في المجالات الصناعية، مثل الكواشف العاملة بالأشعة البصرية والكواشف العاملة بالأشعة تحت الحمراء. ومعروف أن معظم المواد الهيدروكربونية التي نتعامل معها في الصناعة النفطية تمتص جزءًا من الطاقة ضمن أطوال الأشعة تحت الحمراء المتوسطة والبعيدة؛ لذا فالكواشف التي ترصد هذه المواد تقع ضمن هذه المديات من الطاقة الكهرومغنطية. وبمقدور هذه الكاميرات المتطورة إبصار الغاز السروب باستخدام خصائصه الفيزيائية لإنتاج مرئية متكاملة للمنطقة، كأن يظهر التسرب على هيئة نثار في شاشة عرض بلورية (LCD) رقمية تسهل على المستخدم رؤية مواقع انبعاث الغاز المتطاير وتفسير المرئية الناتجة في وقت متزامن مع عملية الرصد وتسجيل القراءات. لذلك يسمى نظام هذه الكواشف بنظام التصوير. وقد دلت الخبرات مع هذه الكواشف على نجاحها في تحقيق متطلبات مرغوبة لدى مشغلي المنشآت النفطية، من حيث التوفير والجودة والسلامة والكفاءة والربحية، كما أنها متفوقة على الكواشف العاملة بنظام التنشيق في الكشف عن المشاكل المستترة في المنشآت حتى قبل وقوعها، مما رفع فعالية برامج الرصد والمراقبة والإنذار، وجعل من هذا النظام خيارا مجديا لتقليل المخاطر في التطبيقات الصناعية.

أبو لبدة ©2020

2 المبدأ الفيزيائي

تختلف الجزيئات المكونة لغاز معين عن غيره من الغازات الأخرى من حيث أوزانها وطريقة ارتباط الذرات في الجزيء الغازي. وعادة ما ترتبط الذرات ببعضها على هيئة سلسلة زنبركية لها ثابت مرونة معين. وبناء على عدد الذرات وكتلتها وثابت المرونة للسلسلة، يمكن للجزيء على طول محور ما التحرك، والاهتزاز، والدوران، والانفتال، والتمدد، والتأرجح أو غير ذلك من الحركات. فمثلا نجد أن الغازات البسيطة وحيدة الذرة (يحتوي الجزيء الواحد على ذرة منفردة (شكل 1/أ))، مثل غازات الهيليوم والنيون والكريبتون، لا يمكنها الاهتزاز أو الدوران، لكنها قادرة فقط على الحركة بواسطة الانزياح في اتجاه معين، وتسمى بالحركة الانتقالية. أما إذا كان الجزيء الغازي يحتوي على ذرتين من نفس النوع (مثل غاز الهيدروجين H_2، أو غاز من ذرة نيتروجين وذرة أكسجين)، فإنه يستطيع الشقلبة حول أي محور، مع قدرته أيضا على الحركة الانتقالية (شكل 1/ب).

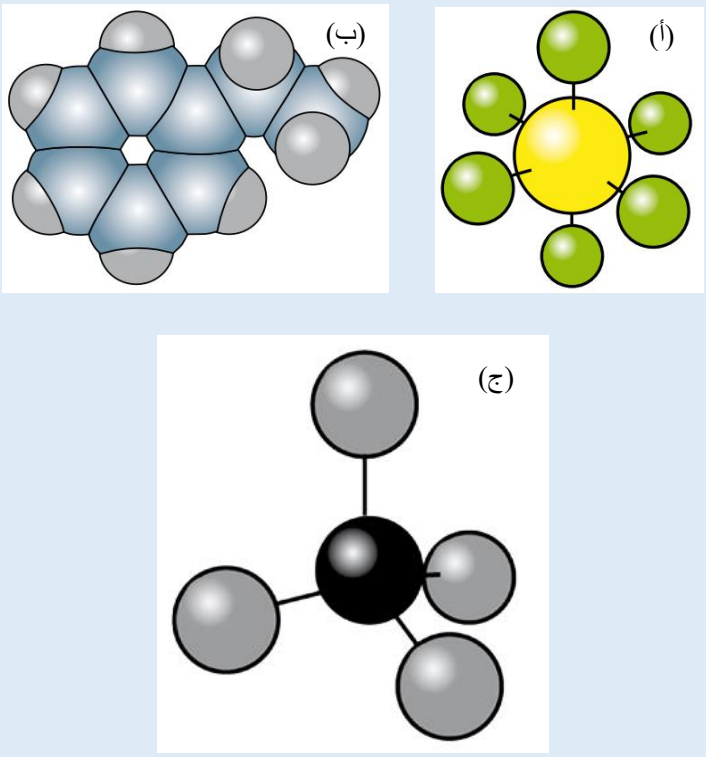


شكل 1: أنواع جزيئات الغاز واتجاهات الحركة الممكنة: (أ) جزيء من ذرة منفردة. (ب) جزيء من ذرتين لنفس العنصر. (ج) جزيء من ذرات مختلفة

وإذا كان الجزيء الغازي مكونا من عدة ذرات تنتمي لنوعين مختلفين (شكل 1/ج) مثل غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2، أو الميثان CH_4، أو سداسي الفلور الكبريتي SF_6، أو الستايرين $C_6H_5CH=CH_2$ (شكل 2) فيسمى بالجزيء ثنائي الذرات. وهذا النوع يمتلك حرية عالية على القيام بالحركة الاهتزازية والحركة الانتقالية لمرات عديدة. وينسحب هذا الأمر أيضا على الجزيئات الغازية متعددة الذرات.

يمتلك جزيء الغاز متعدد الذرات قدرة عالية على امتصاص وبث الطاقة الحرارية مقارنة بالجزيء الغازي وحيد الذرة. وبسبب اختلاف تردد الحركات الانتقالية التي يتحرك بها الجزيء متعدد الذرات، فأنه يمكن تقسيم تلك المستويات الترددية إلى عدد من النطاقات أو المجالات الطاقوية، بحيث تتطابق بعض هذه الترددات مع مستويات محددة من الترددات في الطيف الكهرومغنطي، كالأشعة تحت الحمراء القريبة أو تحت الحمراء الوسيطة أو البعيدة، أو الأشعة المرئية (البصرية)،

إلخ. يلخص الجدول (1) أنواع الحركة الانتقالية للجزيئات الغازية، وترددات تلك الحركة، ومستوى الطاقة المميز لكل تردد ضمن إشعاع الطاقة الكهرومغنطية. باستخدام هذه التقسيمات للترددات، يمكن تصميم كاميرات التصوير بحيث تكون حساسة لهذه المستويات الطاقوية والتي يمكن من خلالها التفريق ما بين الشارات المميزة لأنواع الغازات المختلفة، ومن ثم سهولة كشفها والتعرف عليها.



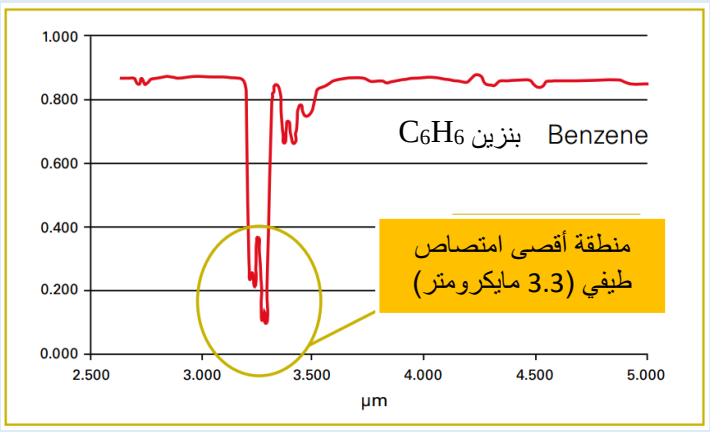
شكل 2: أمثلة لجزيئات ثنائية الذرات: (أ) سداسي الفلور الكبريتي. (ب) الستايرين. (ج) الميثان

جدول 1: ترددات ومستويات الطاقة الكهرومغنطية لأنواع الحركة الانتقالية لجزيئات الغاز

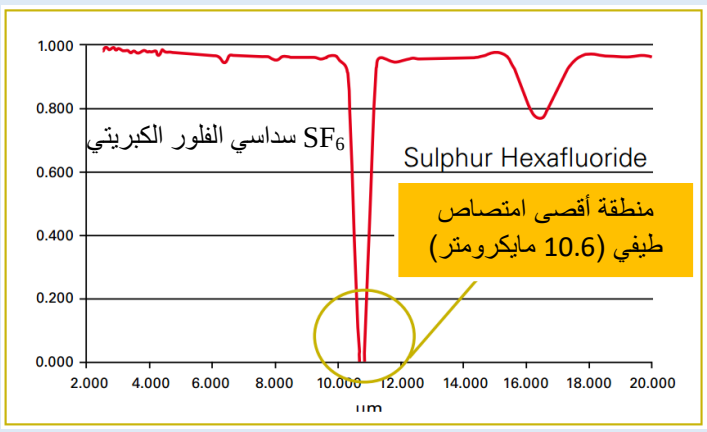
نوع الحركة الانتقالية	التردد (هيرتز)	مجال الطاقة الكهرومغنطية
دوران الجزيئات ثقيلة الوزن	10^{9} إلى 10^{11}	الميكروويف (أطول من 3 ملم)
دوران الجزيئات خفيفة الوزن، واهتزاز الجزيئات ثقيلة الوزن	10^{11} إلى 10^{13}	تحت الحمراء البعيدة (30 مايكرومتر-3 ملم)
اهتزاز الجزيئات خفيفة الوزن. دوران واهتزاز الهيكل البنائي	10^{13} إلى 10^{14}	تحت الحمراء (3 – 30 مايكرومتر)
انتقال الإلكترونات	10^{14} إلى 10^{16}	فوق البنفسجية – الأشعة المرئية

أبو لبدة ©2020

وليتسنى للجزيء الغازي امتصاص الفوتون الساقط (الطاقة تحت الحمراء) بواسطة الحركة الانتقالية من مستوى إلى آخر لا بد للجزيء أن يمتلك عزما ثنائي الأقطاب يمكنه من الاهتزاز بنفس تردد الفوتون الساقط. وهذا التفاعل سيسمح للطاقة الكهرومغنطية للفوتون أن تنتقل إلى الجزيء أو يمتصها. وتستفيد كاشفات الغاز من هذا الامتصاص الطيفي المميز في إبصار الغاز وتمييزه عن الأجسام الأخرى في الخلفية. وعادة ما تصمم راصدات الكاميرا ونظامها البصري على العمل ضمن مديات محددة من الأطوال الموجية وضمن حزمة دقيقة جدا (بالمقياس النانومتري)، كي تكتسب الكاميرا حساسية أعلى ضمن تلك المستويات دون غيرها (انتقائية)، وكأن تلك المديات عبارة عن نوافذ مفتوحة للكاميرا تمكنها من إبصار الغاز. أما باقي المستويات خارج هذه المديات فهي مغلقة أمام الكاميرا ولا تستطيع من خلالها إبصار الغاز. ويوضح الشكل (2) والشكل (3) مخططين لطيفين منبعثين من بخار البنزين (C_6H_6) وبخار سداسي الفلور الكبريتي (SF_6) باتجاه كاميرا الكاشف. يظهر طيف البنزين ممتصا ضمن منطقة الطاقة تحت الحمراء المتوسطة، بينما يظهر طيف سداسي الفلور الكبريتي ممتصا ضمن منطقة الطاقة تحت الحمراء البعيدة.



شكل 2: مخطط طيفي لبخار البنزين



شكل 3: مخطط طيفي لبخار سداسي الفلور الكبريتي

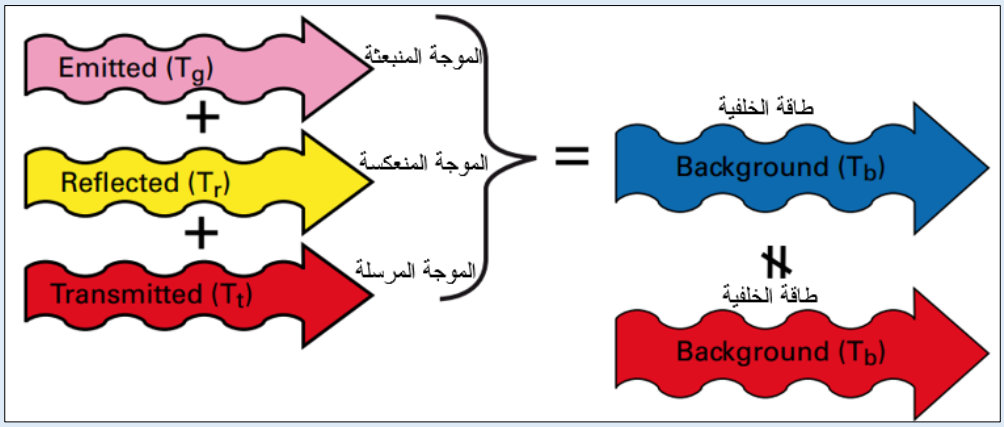
3 آلية العمل

عند توجيه كاميرا الكاشف على منظر يخلو من أي تسرب لغاز متطاير في الخلفية، فإن الأجسام المُبصرة في المنظر سترسل وتعكس إشعاع الطاقة تحت الحمراء ليمر هذا الإشعاع عبر العدسات والمرشح في الكاميرا. ولا يسمح المرشح إلا لأطوال موجية محددة من الإشعاع كي تمر عبر الكاشف، ومنه تنشأ مرئية غير مكثفة (غير موازنة) في الشدة الإشعاعية. أما لو وجد في الموقع سحابة أو دخان لغاز معين متطاير في الفراغ الفاصل ما بين الأجسام المبصرة والكاميرا، وشرع ذلك

الغاز بامتصاص الطاقة ضمن مدى الحزمة الطيفية التي يشتغل عليها المرشح، فإن كمية الإشعاع (الطاقة) المار عبر السحابة باتجاه الكاشف ستقل (شكل 4).

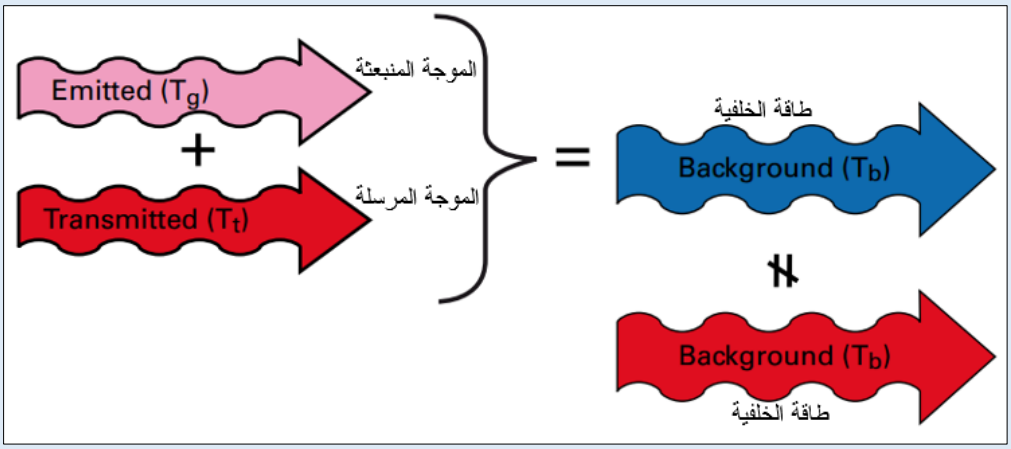
شكل 4: تأثير سحابة الغاز السروب على إشعاع الطاقة

ولكي يتسنى لنا إبصار سحابة الغاز هذه وتفريقها عن الخلفية، يجب توفر تمايز (تضاد) إشعاعي فيما بينهما؛ بحيث كمية الإشعاع المغادر من السحابة لا تماثل كمية الإشعاع الداخل عبرها كما هو موضح بالشكل (5). فإذا كان السهم الأزرق بنفس حجم السهم الأحمر، فإن السحابة لن تكون مرئية للكاميرا. إلا أن ما يحدث في واقع الأمر هو أن كمية الإشعاع المنعكس عن جزيئات الغاز في السحابة هو عبارة عن مقدار ضئيل جدا يمكن إهماله، لكن المفتاح الحقيقي للنجاح في إبصار سحابة الغاز يكمن في تحسس الفرق في الحرارة الظاهرية ما بين السحابة والخلفية (شكل 6). كما أن تحرك السحابة في الفراغ الفاصل بين الكاميرا وأجسام الخلفية يساعد على تحسين عملية إبصار السحابة.



شكل 5: التمايز الإشعاعي بين الخلفية وسحابة الغاز السروب

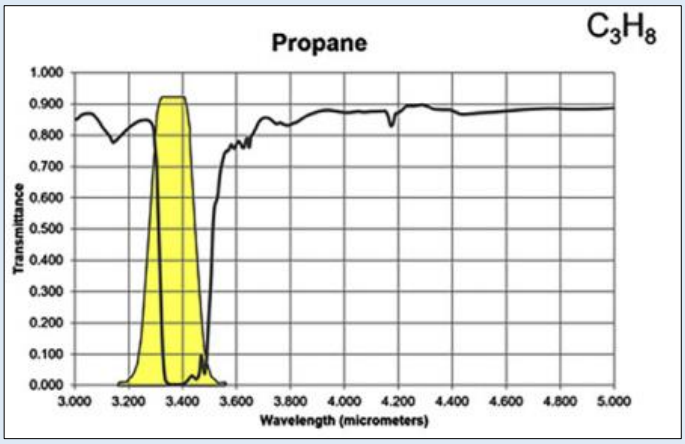
أبو لبدة ©2020



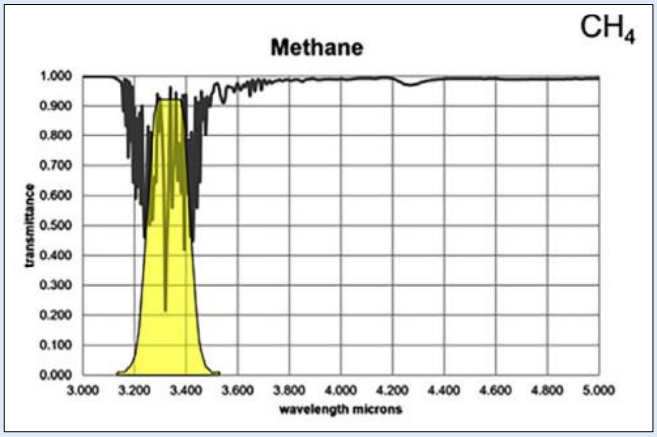
شكل 6: الفرق في درجات الحرارة الظاهرية ما بين الخلفية وسحابة الغاز السروب

1-3 امتصاص الغاز للأشعة تحت الحمراء

تعتمد خصاص امتصاص الأشعة تحت الحمراء في المركبات الغازية على مدى الأطوال الموجية بالدرجة الأولى. يوضح الشكلان (7) و(8) مخططين لذروة الامتصاص الطيفي (منطقة الانخفاض السحيق في موجات الطاقة المرسلة) الخاصة بكل من غازي البروبان والميثان. تمثل المنطقة الصفراء نطاق الرصد الذي يعمل ضمنه المرشح الطيفي المثبت في كاميرا التصوير، وهي منطقة تمثل المدى الموجي الذي يمتص فيه الغاز المستهدف معظم الطاقة تحت الحمراء التي ترسلها الخلفية. وتمتص معظم المواد الهيدروكربونية الطاقة ضمن الطول الموجي 3.3 مايكرومتر، لذا فإن المرشح المستخدم في الشكلين يمكن استخدامه للكشف عن أنواع عديدة من الغازات. وتتحدد عملية الرصد بمعامل الاستجابة تجاه كل نوع من هذه الغازات (تتوافر في جداول خاصة تضعها الشركات المصنعة للكاميرات)، ويعبر المعامل عن درجة حساسية الكاشف لغاز ما. وهناك من المواد الهيدروكربونية التي لها أكثر من منطقة امتصاص واحدة، فمثلا للإيثيلين حزمتي امتصاص قويتين للأشعة المرسلة (شكل 9) لكن نحتاج لكشفه مستشعرا يعمل ضمن الأشعة تحت الحمراء البعيدة (أطول من 3.3 مايكرومتر) حيث يبدي حساسية أعلى تجاه الإثيلين عند الموجات الطويلة مما عند موجات الأشعة تحت الحمراء المتوسطة.

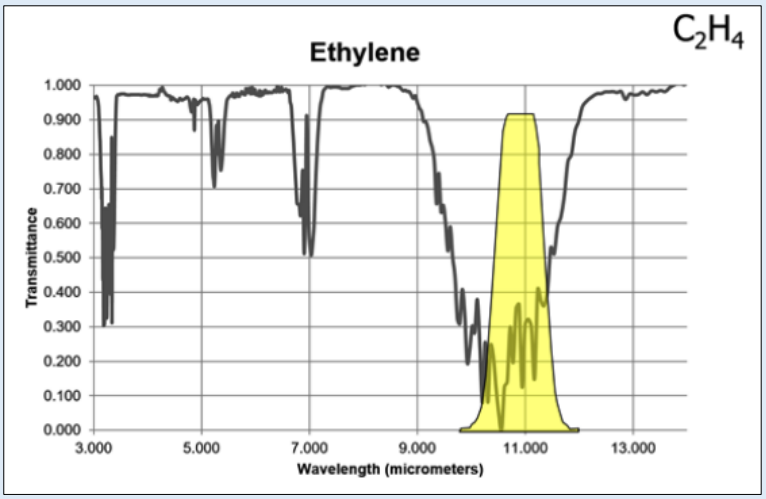


شكل 7: خصائص امتصاص الأشعة تحت الحمراء للبروبان

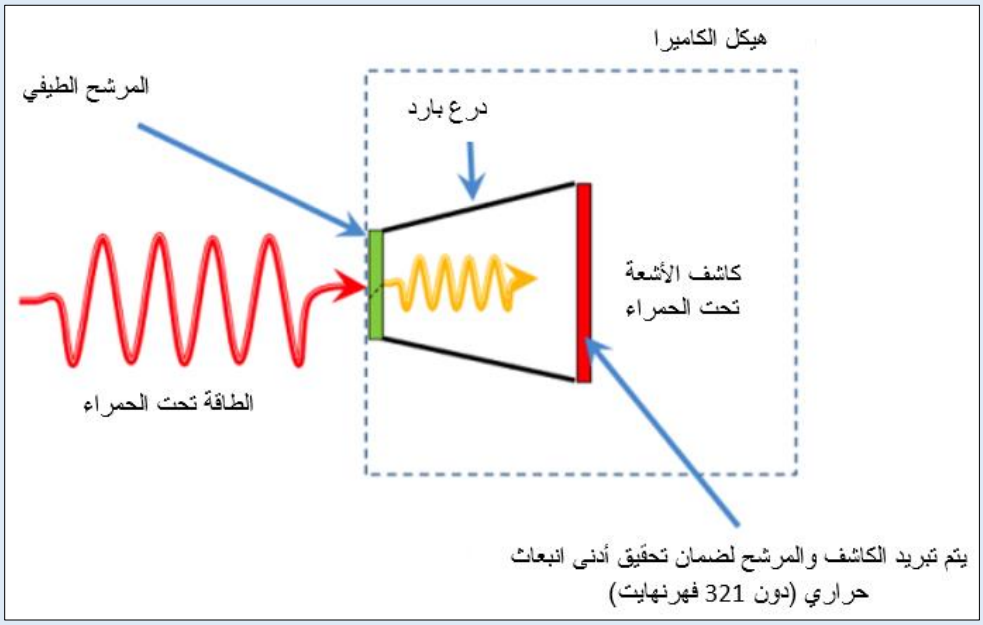


شكل 8: خصائص امتصاص الأشعة تحت الحمراء للميثان

إذا استطعنا تصميم مرشح يقيد الكاميرا للعمل ضمن الأطوال الموجية التي يمتص فيها الغاز الطاقة الإشعاعية المرسلة بشدة عالية (انخفاض طيفي سحيق)، فسيساعد ذلك على تحسين عملية إبصار الغاز. وتسمى عملية تخصيص الحزمة الطيفية التشغيلية (الضيقة) بعملية التكيف الطيفي. وبسبب وجود الغاز نفسه في الموقع، فقد تحجب رؤية أجزاء كثيرة من الإشعاع المنطلق من الأجسام الأخرى الموجودة في الخلفية. كما يجري تثبيت المرشح في مقدمة الكاشف، ويتوجب تبريده بطريقة معينة لمنع تأثر جودة الإشعاع المرصود أثناء انتقاله من المرشح إلى الكاشف (شكل 10).



شكل 9: خصائص امتصاص الأشعة تحت الحمراء للإيثيلين



شكل 10: التصميم الداخلي لكاميرا الرصد الغازي العاملة بالأشعة تحت الحمراء

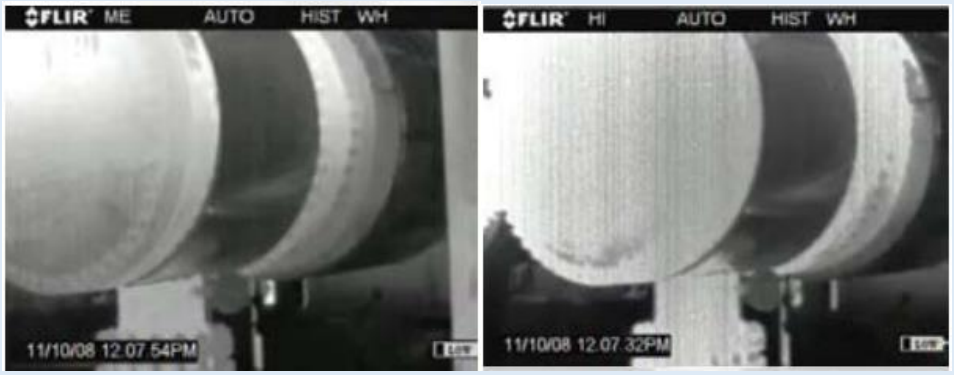
2-3 طرق تحسين الكشف عن التسرب

من الطرق المتبعة عادة على تحسين الكشف عن التسرب هي طريقة التنغيم الحراري (thermal tuning). ويقصد بهذه العملية إدخال تعديلات يدوية على إعدادات الكاميرا بهدف إضفاء ألوان على الدرجات المختلفة من الشدة اللونية مما يحسن عملية إبصار وتفسير مظاهر المرئية وبالتالي زيادة فرص اكتشاف التسرب المستتر. كما أنها تسمح للفاحص بتحديد أكثر من تسرب واحد في المنظر الواحد (شكل 11).

ومن طرق التحسين الأخرى هي طريقة اختيار المدى الصحيح من درجات الحرارة، وفيها يحدد الفاحص مدى معينا من درجات الحرارة لتحسين جودة المرئية (شكل 12)، ويتحدد المدى المناسب وفقا لدرجات الحرارة التقريبية للجسم المستهدف. ومن شأن هذا الاختيار أن يقلل من التشوهات في المرئية، ويحسن من إبصار وتفسير التسرب. وإذا اختار الفاحص مدى غير مناسب من درجات الحرارة، فلن يحصل على قراءات صحيحة من درجات الحرارة في الجسم المستهدف وبالتالي تنعدم فرصة الكشف عن أي تسرب (شكل 13). ويوضح الشكل (14) الطريقة الصحيحة لاستخدام الكاميرا تحت الحمراء في الموقع بحيث تعطي الفاحص أكبر تمايز حراري بين الجسم المبصر والخلفية، وتحقق له أفضل رؤية للتسرب المستتر.

شكل 11: مرئية بالأشعة تحت الحمراء قبل تطبيق التنغيم الحراري (يمين) وبعد تطبيقه (يسار)

شكل 12: مرئية بالأشعة البصرية لتسرب غازي (يمين) ومرئية لنفس المنظر بالأشعة تحت الحمراء (يسار)



شكل 13: مرئية بالأشعة تحت الحمراء قبل تطبيق المدى الحراري الصحيح (أعلى) وبعد تطبيقه (أسفل)

أبو لبدة ©2020

شكل 14: تطبيق كاميرا الأشعة تحت الحمراء في الموقع

4 ميزات العمل بنظم الكواشف تحت الحمراء

نظرا للخصائص التشغيلية سالفة الذكر، فإن العديد من الخبراء يعتبر كواشف الأشعة تحت الحمراء ذات جدوى كبيرة في رصد تسربات الغاز التي قد تسبب في وقوع حوادث جسيمة في الأرواح والممتلكات، كالحرائق والانفجارات والتسمم والاختناق. فقد أشارت الخبرات المتراكمة في الصناعة النفطية إلى أن النسبة الكبرى من المعدات (99%) تتطلب توظيف أدوات فحص مكلفة وتستغرق وقتا طويلا في إنجاز المهمة والكشف عن الأعطال. لكن الخصائص التشغيلية التي تمتلكها كاميرات الأشعة تحت الحمراء تمنح الفاحص نظرة كاملة وسريعة على موقع العمل، وتمكنه من تركيز الاهتمام مباشرة على المناطق التي تحتاج تدخلا علاجيا قبل استفحال التسرب، دون الحاجة إلى فحص كل أجزاء المعدات؛ مما يعني توفيرا في الوقت والجهد، وتوجيها مدروسا للموارد.

ومن الميزات الأخرى في نظم الكواشف تحت الحمراء هي عدم الحاجة إلى إغلاقها أو إيقافها أثناء إجراء عملية التفتيش في المنشأة، إذ أنها تسمح بإجراء القياسات عن بعد وبسرعة كبيرة، وأخذ القراءات بالتزامن مع عملية المسح دون الحاجة إلى التماس المباشر مع المادة المتطايرة، أو الدخول إلى المواقع التي يصعب الولوج إليها بالطرق العادية (شكل 15). كما أنها قادرة على رصد أنواع مختلة من التسربات سواء أكانت دقيقة من على بعد بضعة مترات فقط، أو ضخمة من على بعد مئات الأمتار، أو متحركة على عربات النقل داخل وخارج المنشأة. وهذا كله يساعد على سرعة تحديد المشكلة في مراحلها المبكرة ومنع استفحالها إلى مستويات يصعب التعامل معها، وبذلك تتحسن جودة العمل وترتفع معايير السلامة لكل من طاقم العمل والمعدات.

شكل 15: كاميرا الأشعة تحت الحمراء لرصد التسرب الغازي

يمكن أيضا لكاميرات التصوير تحت الحمراء أن تلعب دورا رئيسا في تقليل الأضرار المنعكسة على البيئة، نظرا لقدرتها على رصد مشاكل مستترة في عمليات العزل في المباني، والتي قد تتسبب بانبعاث أنواع من غازات الدفيئة في الغلاف الجوي، التي تساهم في رفع معدلات الاحترار العالمي. ومعالجة هذه المشاكل عادة تكلف أموالا طائلة من الحكومات، وإهمالها قد يلحق بالشركات سمعة غير طيبة، والتعرض إلى عقوبات مالية باهظة، بالإضافة إلى تعريض العاملين والسكان القاطنين بجوار المنشأة إلى مخاطر مميتة ومستترة. لكن بالاستفادة من الخصائص التشغيلية للكواشف تحت الحمراء، يمكن للكاميرا رصد أنواع غفيرة من المركبات العضوية الطيارة (VOCs) وغازات الدفيئة المختلفة، مثل غاز فلوريد الكبريت (SF_6) الذي يعتبر خطرا على البيئة بمقدار 24,000 مرة خطورة غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2). فهذه التقنية إذًا توفر الكثير من الحلول العصرية لمشاكل يومية تواجه الصناعة النفطية والصحة العامة والنظام البيئي.

المراجع

1. Craig O'Neill and Ron Lucier (2018). Understanding cooled vs. uncooled optical gas imaging. Available: www.flir.com/ogi. Accessed: May 10th 2019
2. FLIR Systems Inc. (2017). Environmental Protection With A FLIR Optical Gas Imaging Camera. Available: www.flir.eu/OGI. Accessed: May 12th, 2019
3. Oil & Gas Online. (2018). The Long Wave Gas Detection Camera. Available: www.oilandgasonline.com. Accessed: May 10th 2019