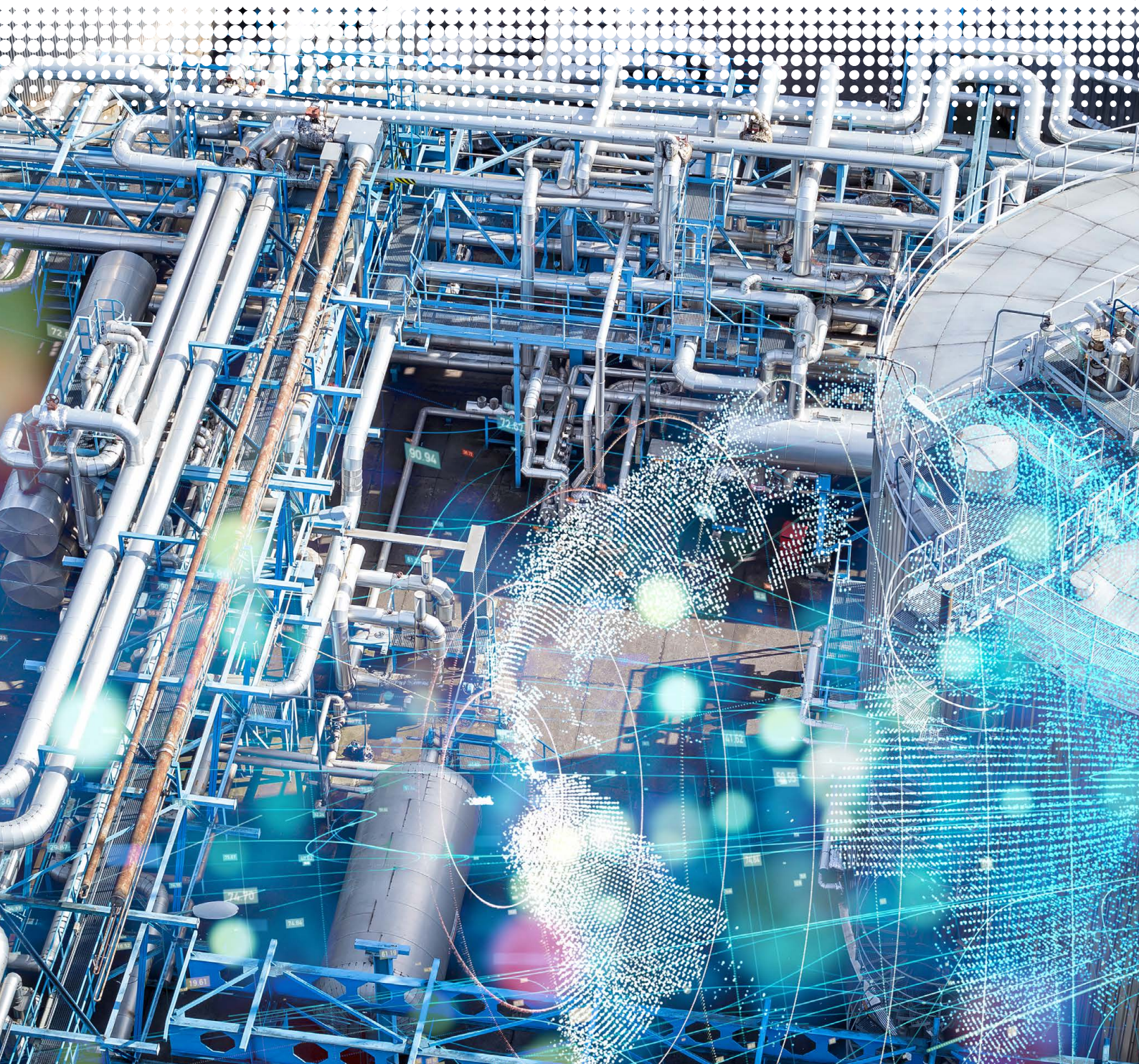
تقليل انبعاثات غاز الميثان:

دليل أفضل الممارسات

التحديد والكشف والقياس والتقدير الكمي

23 يوليو 2020



إخلاء المسؤولية

تم تطوير هذا المستند بواسطة شراكة المبادئ التوجيهية لغاز الميثان. يوفر الدليل ملخصاً لعمليات التخفيف المعروفة حالياً، والتكاليف، والتقنيات المتاحة حتى تاريخ النشر، ولكنهم قد يتغيرون أو قد يتم تحسينهم مع مرور الوقت. المعلومات المضمنة دقيقة على حد علم المؤلفين، ولكنها لا تعكس بالضرورة وجهات نظر أو مواقف جميع الأطراف الموقعة أو المنظمات الداعمة لشراكة المبادئ التوجيهية لغاز الميثان، وسيحتاج القراء إلى إجراء تقييمهم الخاص للمعلومات المقدمة. لا يتم منح أي ضمان للقراء بشأن اكتمال أو دقة المعلومات المضمنة في هذا الدليل من قبل شركة إس إل آر الدولية ومقاوليها، شراكة المبادئ التوجيهية لغاز الميثان أو الجهات الموقعة أو المنظمات الداعمة لها.

يصف هذا الدليل الإجراءات التي يمكن أن تتخذها المنظمات للمساعدة في إدارة انبعاثات الميثان. أي إجراءات أو توصيات ليست إلزامية؛ إنهم ببساطة وسائل فعالة للمساعدة في إدارة انبعاثات الميثان. قد تكون الأساليب الأخرى فعالة بنفس القدر، أو أكثر فاعلية في موقف معين. إن ما يختار القراء فعله يعتمد في الغالب على الظروف والمخاطر المحددة تحت الإدارة والنظام القانوني المعمول به.

المحتويات

قائمة المصطلحات 2

الملخص 4

المقدمة 5

الأساليب 7

التحسين المستمر 20

دراسات الحالة 21

قائمة التحقق 31

المراجع 32

الملحق: الدراسات والتقارير التي قيمت تقنيات الكشف والقياس والتقدير الكمي 35

قائمة المصطلحات

القياس
قياس انبعاثات غاز الميثان. يمكن أن يكون القياس من أي متغير (الحجم والتركيز والكتلة والتردد وما إلى ذلك) يسمح بالكشف أو تقدير معدل الانبعاث.

عمليات النفط والغاز الوسطى
القطاع/الجزء الأوسط من سلسلة إمداد الغاز الطبيعي، والذي يتضمن نقل الغاز وتخزينه، ومحطات الغاز الطبيعي المسال. في بعض الحالات، قد يشمل هذا الجزء من سلسلة التوريد أيضاً مصانع معالجة الغاز.

الحد الأدنى للكشف (MDL)
الحد الأدنى للكشف هو أقل تركيز أو معدل انبعاث يمكن اكتشافه بشكل موثوق.

سلسلة توريد الغاز الطبيعي
تسلسل العمليات المتضمنة في إنتاج وتوزيع الغاز الطبيعي، من البئر المنتج إلى المستهلك النهائي.

المسار المفتوح
جهاز استشعار يرسل شعاعاً من الضوء، ويكشف الغاز على طول مسار الحزمة عن طريق امتصاص الضوء. قد يكون طول المسار المفتوح من بضعة أمتار إلى بضع مئات من الأمتار.

سلبي/نشط
وصف لأجهزة الاستشعار التي تستخدم الطيف الكهرومغناطيسي للكشف عن غاز الميثان. تقيس المستشعرات السلبية الإشعاع الطبيعي الموجود من الأشياء، بينما تحتوي المستشعرات النشطة على مصدر إشعاع.

مستشعر نقطي
جهاز استشعار يكتشف تركيزات الميثان في مكان معين. قد يكون المستشعر جزءاً من جهاز محمول أو جهاز مثبت في مكان ما.

الأصل
المعدات المادية المملوكة لشركة غاز طبيعي، مثل المعدات التي تسمح للشركة بإنتاج الغاز ومعالجته ونقله وتخزينه وتوزيعه.

الكشف
الكشف عن الانبعاثات من المصادر المحتملة لانبعاثات الميثان باستخدام معدات استشعار الميثان.

عمليات تكرير البترول وتسويقه ونقله
القطاع/الجزء من العمليات النهائية لسلسلة إمداد الغاز الطبيعي، وهو شبكة التوزيع (إمداد العملاء بالغاز من خلال أنابيب الغاز وخطوط الخدمة والعدادات).

التكنولوجيا الناشئة
التكنولوجيا التي أصبحت متاحة للتو، أو تم توفيرها ولكن لم يتم اعتمادها على نطاق واسع بعد. نظراً للتحسين المستمر للعديد من التقنيات، فقد يتم اعتماد بعض التقنيات المصنفة حالياً على أنها ناشئة بسرعة أكبر على نطاق واسع.

التحديد
سرد وتجميع جميع مصادر الانبعاث من نظام يعتمد على مصادر الانبعاث المعروفة والمصممة والمسح للانبعاثات غير المقصودة أو غير المرغوب فيها. (يسمى هذا أيضاً 'الكشف ' في بعض الظروف).

السجلات
سجل لجميع المصادر المعروفة للانبعاثات ومعدلات الانبعاث. يوفر السجل ملخصاً للانبعاثات خلال فترة زمنية معينة.

أسلوب
تقنية أو مجموعة من التقنيات المستخدمة في الكشف أو القياس أو التحديد الكمي.

مطياف امتصاص ليزر الصمام الثنائي القابل للضبط (TDLAS)

تقنية لقياس تركيزات جزيئات معينة، على سبيل المثال، الميثان وبخار الماء، في خليط من الغازات.

عمليات التنقيب والإنتاج

العمليات الأولية من سلسلة إمداد الغاز الطبيعي، والتي تشمل إنتاج الغاز وتجميعه. في بعض الحالات، قد يشمل هذا القسم من سلسلة التوريد أيضاً مصانع معالجة الغاز.

برنامج

مجموعة الأساليب التي تختارها شركة الغاز لتحديد واكتشاف وقياس وتحديد كمية انبعاثات غاز الميثان. قد يشتمل البرنامج على العديد من تقنيات الفحص والمسح، بالإضافة إلى تقنيات القياس الكمي المختلفة لتحديد معدل الانبعاثات من كل مصدر تم اكتشافه. يلخص البرنامج ويتتبع الانبعاثات.

تحديد كمّي

تحديد معدل الانبعاث. يمكن القيام بذلك مباشرة من خلال القياس أو بشكل غير مباشر من خلال الحسابات والنمذجة.

معدل

كمية من غاز الميثان تنبعث في فترة زمنية محددة.

الفحص

تقييمات لغرض رئيسي هو تحديد مصادر الانبعاثات. في العديد من السياقات، يمكن أن يكون الفحص هو نفس المسح. ومع ذلك، في بعض السياقات التنظيمية، لا ينطبق الفحص إلا على أساليب الكشف الأقل صرامة أو الأقل حساسية، مثل AVO (الصوتي، المرئي، الشمّي).

القطاع/الجزء

قسم من سلسلة توريد الغاز الطبيعي. تشمل الأقسام محطات الإنتاج والتجميع والمعالجة والنقل والتخزين ومحطات تسييل الغاز الطبيعي المسال وإعادة تحويله إلى غاز والتوزيع.

قياس الطيف

قياس الطول الموجي وشدة الإشعاع الكهرومغناطيسي.

مسح

استخدام معدات وقياسات الكشف لفحص مجموعة من الأصول بحثاً عن علامات الانبعاثات.

الملخص

تتمثل إحدى الخطوات الرئيسية في تقليل انبعاثات الميثان في تحديد مصادر الانبعاثات واكتشافها. ثم يتم قياس الانبعاثات وتقديرها كمياً وتسجيلها في سجلات، والتي تعتبر نقطة انطلاق لتحديد أولويات أنشطة التخفيف (أنشطة تقليل الانبعاثات).

يصف هذا الدليل بإيجاز الطرق المستخدمة لتحديد واكتشاف وقياس وتقدير انبعاثات غاز الميثان، ويعطي تفاصيل عن المستندات الأخرى التي توفر التفاصيل الفنية للطرق والتقنيات. ستعتمد أفضل الممارسات في التحديد والكشف والقياس والتقدير الكمي على:

- خصائص المنشأة،
- حجم الانبعاثات؛ و
- فعّالية الطرق المستخدمة من حيث التكلفة.

قد تعتمد طرق الاستخدام أيضاً على المتطلبات التنظيمية، وما إذا كان من الممكن استبدال النهج التنظيمي بطريقة بديلة أو استكماله بأساليب طوعية إضافية. توضح دراسات الحالة أنواع برامج التحديد والكشف والقياس والتقدير الكمي (برامج IDM&Q) التي طورتها المنظمات لتلبية احتياجات أجزاء عديدة من سلسلة توريد الغاز الطبيعي.

يجب تحديث وتحسين عملية تحديد واكتشاف وقياس وتحديد كمية الانبعاثات، فضلاً عن التفاصيل المسجلة في السجلات، بشكل دوري لإدراج معلومات جديدة وتتبع التقدم المحرز في التخفيف (الحد) من الانبعاثات.

عناصر برامج IDM&Q مذكورة أدناه.

أفضل الممارسات لتقليل انبعاثات غاز الميثان من خلال التحديد والكشف والقياس والتقدير الكمي
تحديد المصادر المعروفة والمصادر المحتملة للانبعاثات في سجل.
مسح المصادر المعروفة والمحتملة للكشف عن الانبعاثات الفعلية.
تحديد كمية انبعاثات الميثان مباشرة عن طريق قياس معدلات الانبعاث، أو بشكل غير مباشر باستخدام مجموعة من القياسات والحسابات والنمذجة
استخدام المعلومات من القياس الكمي لإنشاء أو تحديث السجلات.
تحديث وتحسين برامج IDM&Q بشكل دوري.

المقدمة

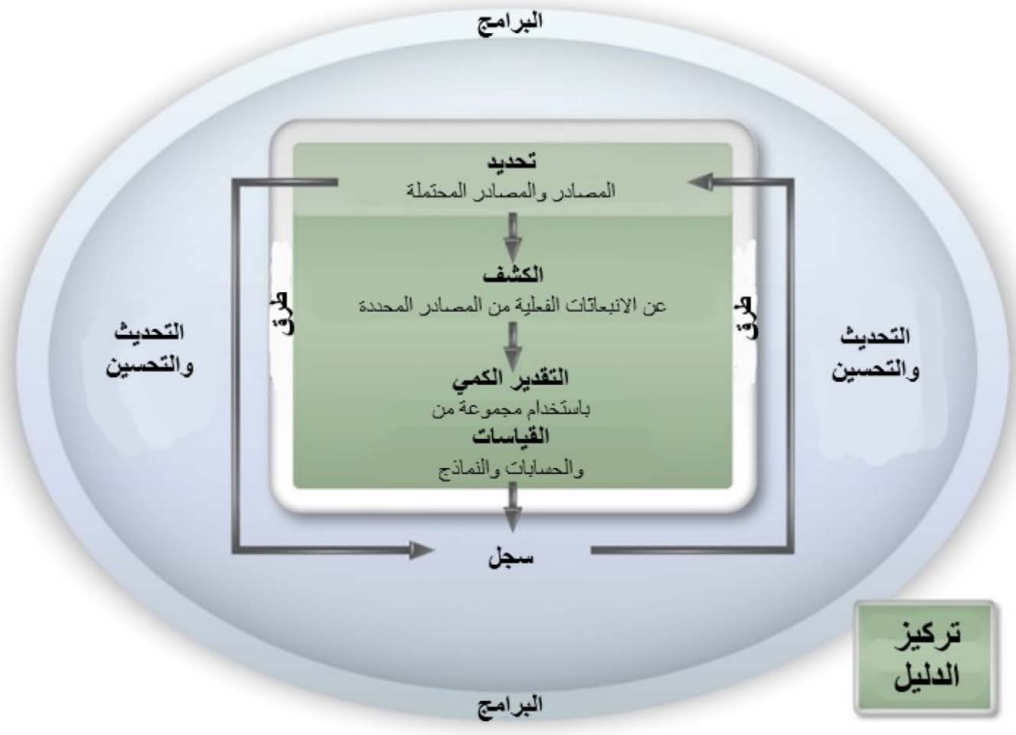
بسبب النطاق الواسع لمصادر الانبعاث في سلاسل قيمة الغاز الطبيعي، تختلف طرق تحديد واكتشاف وقياس وتقدير الانبعاثات كمياً، لا سيما عبر القطاعات ذات الأنواع المختلفة من الأصول. ستعتمد الأساليب المستخدمة على ما إذا كانت معلومات الانبعاثات ضرورية للبرامج التطوعية، أو لسجلات الشركات التفصيلية، أو لتلبية اللوائح التي تتطلب استخدام طرق محددة.

تشمل مصادر انبعاثات الميثان في سلاسل قيمة الغاز الطبيعي ما يلي:

- التنفيس (إطلاق الغاز في الجو)؛
- التسربات الهاربة (التسربات من المعدات، بشكل عام من العيوب أو التآكل العادي في الوصلات محكمة الغلق مثل حشوات الفلنجات، والوصلات الملولبة، وتعبئة ذراع الصمام، من الصمامات ضعيفة التثبيت، أو من النفاذية من أنابيب البولي إيثيلين (التوزيع))؛
- الاحتراق غير الكامل (غاز الميثان غير المحترق في غازات العادم لمحركات الغاز، وتوربينات الغاز)؛
- الحرق (المشاعل تحرق غاز الميثان الذي يمكن أن ينطلق مباشرة في الجو؛ يؤدي الاحتراق غير الكامل في المشاعل إلى انبعاثات غاز الميثان).

تم وصف أفضل الممارسات لتخفيف الانبعاثات من هذه المصادر في أدلة أخرى تم تطويرها بواسطة شراكة المبادئ التوجيهية للميثان1 (متاحة على https://methaneguidingprinciples.org/best-practice-guides/)، ومن العناصر الحيوية في هذه الأدلة هي تحديد واكتشاف وقياس وتقدير كمية وتتبع الانبعاثات.

الشكل 1. البرامج والأساليب التي تحكم IDM&Q



كما يوضح الشكل 1، فإن تحديد واكتشاف وقياس وتقدير الانبعاثات يؤدي إلى سجلات شاملة يتم تحديثها وتحسينها بانتظام. الموضوعات التي يركز عليها هذا الدليل مظللة باللون الأخضر الداكن في الشكل 1. يظهر التظليل الأفتح الموضوعات التي تمت تغطيتها جزئياً.

سيركز هذا الدليل على الأساليب المستخدمة في التحديد والكشف والقياس والتقدير الكمي. هذه الشروط موصوفة أدناه.

التحديد والكشف: بعض مصادر الانبعاثات جزء معروف من تصميم أنظمة الغاز الطبيعي. في هذه الحالات، يتم استخدام تحليلات تصميمات النظام لتحديد المصادر. الانبعاثات الأخرى غير مقصودة ويلزم إجراء مسوحات الكشف لتحديد المصادر غير المقصودة وتأكيد المصادر المعروفة.

القياس والتقدير الكمي: يمكن استخدام مجموعة متنوعة من الطرق لتقدير الانبعاثات كمياً. غالباً ما تتضمن الطرق قياسات تركيز الميثان في تدفقات العملية أو الهواء المحيط، ولكنها يمكن أن تشمل أيضاً مجموعة متنوعة من القياسات الأخرى، بدءاً من قياس معدلات تدفق تيار العملية إلى سرعات الرياح. يمكن إجراء التحديد الكمي لمعدل الانبعاث من خلال القياس المباشر للمصدر، أو بشكل غير مباشر من خلال مجموعة من القياسات والحسابات والنماذج.

برامج تطوير وتحديث وتحسين السجلات: تستخدم طرق متعددة بشكل عام في برامج شاملة لتحديد واكتشاف وقياس وتقدير الانبعاثات. يتم تجميع هذه المعلومات في سجلات الانبعاثات، والتي يتم تحديثها وتحسينها بانتظام.

نطاق هذا الدليل

يصف هذا الدليل بإيجاز أساليب أفضل الممارسات المستخدمة لتحديد واكتشاف وقياس وتقدير انبعاثات غاز الميثان ; كمياً، ويوفر روابط لأوصاف أكثر تفصيلاً ودراسات الحالة. ويلخص بإيجاز مزايا وعيوب الأساليب ويعطي تفاصيل التقارير التي تلخص تحديد واكتشاف وقياس وتقدير كمية الانبعاثات في مختلف القطاعات. تُظهر دراسات الحالة أنواع البرامج التي طورتها المؤسسات في أجزاء من سلسلة قيمة الغاز الطبيعي لتناسب احتياجاتها. في نهاية هذا الدليل، توجد قائمة تحقق وتنفيذها IDM&Q لتطوير برامج.

الأساليب

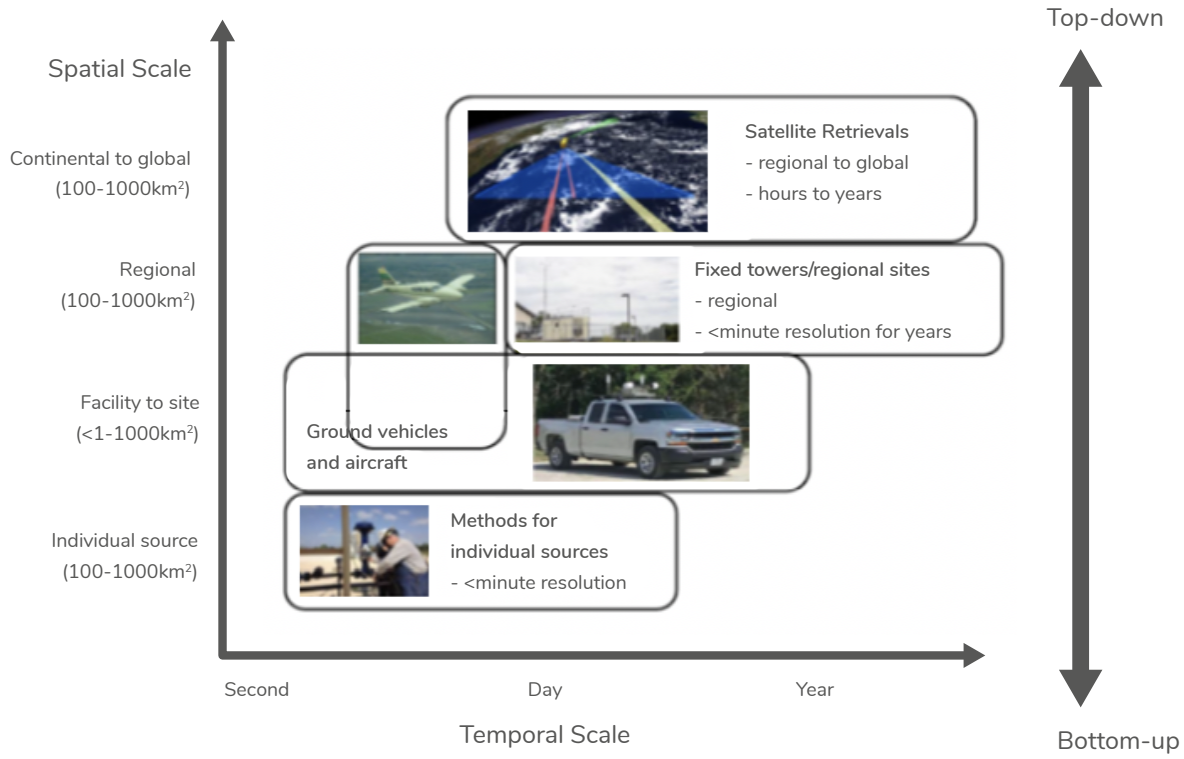
تختلف طرق الكشف عن الانبعاثات وقياسها وتقدير كميتها أيضاً في النطاقات الزمنية. توفر بعض الطرق "لقطة" واحدة لانبعاثات الميثان، في حين أن البعض الآخر متكرر أو مستمر. يمكن أن تكون اللقطات مفيدة عند استخدامها للتحقق من نتائج أنشطة التخفيف، مثل الأنشطة للقضاء على المصدر (على سبيل المثال، عن طريق استبدال الأجهزة الهوائية التي تعمل بالغاز بأجهزة تعمل بالهواء المضغوط). يمكن أن تكون مصادر الانبعاث الأخرى متقطعة و / أو متكررة، لذا فإن زيادة وتيرة الكشف والإصلاح قد يؤدي إلى تحسين الكشف وتقليل أكبر للانبعاثات. ستعتمد أفضل ممارسة لتكرار الاكتشاف والقياس والتقدير الكمي على خصائص مصادر الانبعاثات في المنشأة، وفعالية الطرق من حيث التكلفة، والمتطلبات التنظيمية.

طرق الكشف والقياس والتحديد الكمي

تختلف طرق الكشف عن الانبعاثات وقياسها وتحديد كميتها في الحجم، من البرامج المستخدمة للمصادر الفردية إلى البرامج الإقليمية أو العالمية واسعة النطاق، كما هو موضح في الشكل 2.

الطرق المطبقة على نطاقات كبيرة جداً، عادةً حيث يتضمن القياس الفردي العديد من المصادر، يشار إليها عموماً باسم التقييمات التنازلية. الطرق المطبقة على نطاق المصادر الفردية، ثم المجمعة لموقع أو منطقة، يشار إليها عموماً باسم التقييمات التصاعدية. لكل من التقييمات التنازلية والتصاعدية مزايا وعيوب. توفر التقييمات التصاعدية معلومات مفصلة عن المصادر الفردية وأنواع المعدات والعمليات التي تنبعث منها. يسمح هذا النهج بإجراءات محددة لتقليل الانبعاثات، ولكنه قد يغيب عن بعض مصادر الانبعاثات غير المتوقعة أو غير المقصودة أو غير المعينة. تفتقر التقييمات التنازلية عموماً إلى التفاصيل المتعلقة بالمصادر الفردية، ولكنها يمكن أن توفر معلومات شاملة حول الانبعاثات في موقع ما أو في منطقة ما. اعتماداً على حجم البرنامج، قد تتضمن التقييمات التنازلية مساهمات من مصادر ليست جزءاً من سلسلة قيمة الغاز الطبيعي، وهذا يحتاج إلى أن يتم حسابه عند تفسير التقييمات التنازلية، وعند مقارنة التقييمات التنازلية بالتقديرات التصاعدية. يقدم هذا الدليل دراسات حالة عن الاستخدام المنسق لكل من التقييمات التنازلية والتصاعدية.

الشكل 2. طرق الكشف عن الانبعاثات وقياسها وتحديد كميتها تغطي مجموعة واسعة من المقاييس المكانية والزمانية (مقتبسة من المرجع 2)



ومع ذلك، يوفر الملحق روابط إلى أوصاف أكثر تفصيلاً وتقييمات للطرق. تم إجراء هذه التقييمات من قبل منظمات مهنية أو صناعية مثل مجلس تنظيم التكنولوجيا المشترك بين الولايات (ITRC)3، ومنظمة MARCOGAZ (الرابطة الفنية لصناعة الغاز الطبيعي الأوروبية)، والرابطة الوطنية لمفوضي المرافق التنظيمية (NARUC) 5. بالإضافة إلى ذلك، يتم تضمين روابط للمعلومات من مراكز اختبار الطرق6 وملخصات المعلومات من منظمات مثل الأكاديميات الوطنية الأمريكية للعلوم والهندسة والطب (NASEM)2.

بعض تقنيات الكشف المدرجة في الجدول 1 آخذة في الظهور وقد لا يتم استخدامها على نطاق واسع حتى الآن.

الكشف

يلخص الجدول 1 أدناه الطرق المستخدمة في الكشف عن مصادر الانبعاثات. يتم تنفيذ الأساليب باستخدام الأجهزة المحمولة، أو الأجهزة الموجودة على المركبات أو الطائرات بدون طيار (drones) أو الطائرات، أو على القمر الصناعي. قد تكتشف الانبعاثات باستخدام أجهزة استشعار سلبية أو نشطة في نقطة ثابتة أو فوق مسار مفتوح، أو قد تتضمن التصوير. تستخدم الأساليب مجموعة من تقنيات الاستشعار. تنطبق بعض الأساليب على جميع قطاعات سلسلة قيمة الغاز الطبيعي. البعض الآخر له استخدامات أكثر تخصصاً. يعد تقديم أوصاف مفصلة لكل طريقة ومزاياها وعيوبها خارج نطاق هذا الدليل.

الجدول 1: طرق الكشف عن انبعاثات غاز الميثان

نوع المسح (ووسائل التعيين)	طريقة الاستشعار	الاستخدام الرئيسي	إمكانية تحديد كمية المعدلات	مستوى الثقة في الكشف	القطاعات التي تستخدم فيها الطريقة
مسح من قبل شخص على الأقدام، يستخدم لمصادر فردية	مستشعر المسار المفتوح	كشف التسربات والانبعاثات من التنفيس	ممكن	مرتفع	جميع القطاعات
	مستشعر نقطي		ممكن	مرتفع	جميع القطاعات
	تصوير مجال الانتشار (التصوير الضوئي للغاز) ((سلبي		ممكن مع معالجة إضافية	مرتفع	جميع القطاعات
	الفحص الصابوني		غير ممكن	مرتفع إذا كان الموقع التقريبي للتسرب معروفاً	جميع القطاعات
	التصوير بالموجات فوق الصوتية		ممكن	متوسط	جميع القطاعات
أجهزة الكشف ثابتة الموقع (محيط أو خط السياج)	مسار مفتوح	الكشف عن الأحداث غير العادية (قد يحدد أيضاً المصدر)	ممكن	مرتفع	قطاعات التنقيب والإنتاج وعمليات النفط والغاز الوسطى هذه تقنية ناشئة) لعمليات النفط والغاز (الوسطى
	مستشعر نقطي			مرتفع	التنقيب والإنتاج وعمليات النفط والغاز الوسطى هذه تقنية ناشئة) لعمليات النفط والغاز (الوسطى
أجهزة الكشف ثابتة الموقع (منطقة أو إقليم)	مسار مفتوح	الكشف عن الأحداث غير العادية (قد يحدد أيضاً المصدر)	ممكن	متوسط	التنقيب والإنتاج وعمليات النفط والغاز الوسطى هذه تقنية ناشئة) لعمليات النفط والغاز (الوسطى
	مستشعر نقطي				

نوع المسح (ووسائل التعيين)	طريقة الاستشعار	الاستخدام الرئيسي	إمكانية تحديد كمية المعدلات	مستوى الثقة في الكشف	القطاعات التي تستخدم فيها الطريقة
المسح بمركبة ذات العجلات	مسار مفتوح	الكشف عن إجمالي الانبعاثات في الموقع	نعم	متوسط	جميع القطاعات
	مستشعر نقطي	الكشف عن إجمالي الانبعاثات في الموقع	ممكن	متوسط إلى مرتفع	جميع القطاعات
	تصوير مجال الانتشار	تحديد مصادر الانبعاثات	ممكن مع معالجة إضافية	مرتفع	جميع القطاعات
المسح بواسطة طائرة (drone) بدون طيار مركبة جوية) UVA أو بدون طيار، طائرة صغيرة يقودها جهاز تحكم عن بعد أو أجهزة كمبيوتر على متن (الطائرة	مسار مفتوح	بديل للمسح على الأقدام	ممكن	متوسط	جميع القطاعات هذه تقنية ناشئة) لعمليات النفط والغاز الوسطى وعمليات (التنقيب والإنتاج
	مستشعر نقطي	بديل للمسح على الأقدام	نعم	متوسط إلى مرتفع	التنقيب والإنتاج وعمليات النفط والغاز الوسطى هذه تقنية ناشئة) لعمليات النفط والغاز (الوسطى
	تصوير مجال الانتشار	تحديد مصادر الانبعاثات	ممكن مع معالجة إضافية	مرتفع	جميع القطاعات هذه تقنية ناشئة) لعمليات النفط والغاز الوسطى وعمليات تكرير (البترول وتسويقه ونقله

نوع المسح (ووسائل التعيين)	طريقة الاستشعار	الاستخدام الرئيسي	إمكانية تحديد كمية المعدلات	مستوى الثقة في الكشف	القطاعات التي تستخدم فيها الطريقة
المسح بواسطة الطائرات	مسار مفتوح	تحديد مصادر الانبعاثات	ممكن	مرتفع	عمليات التنقيب والإنتاج
	مستشعر نقطي	تحديد مصادر الانبعاثات وتقدير كميتها	ممكن، حسب التكنولوجيا	مرتفع (التقنيات المختلفة لها حدود (اكتشاف دنيا مختلفة	جميع القطاعات هذه تقنية ناشئة) لعمليات النفط والغاز الوسطى وعمليات تكرير (البترول وتسويقه ونقله
	تصوير مجال الانتشار	تحديد مصادر الانبعاثات	ممكن مع معالجة إضافية	مرتفع	جميع القطاعات هذه تقنية ناشئة) لعمليات النفط والغاز الوسطى وعمليات تكرير (البترول وتسويقه ونقله
المسح بواسطة الأقمار الصناعية	تصوير مجال الانتشار	الكشف عن إجمالي انبعاثات المنطقة	ممكن مع معالجة إضافية	يتم تحديدها. حد كشف أدنى كبير	جميع القطاعات هذه تقنية ناشئة) (لجميع القطاعات

تستخدم طرق القياس والتقدير الكمي مجموعة من تقنيات الاستشعار، والتي تم وصفها في الدراسات والتقارير المدرجة في جدول في الملحق. لم تحدد أي من التقارير الأكثر شمولاً المدرجة في الملحق واحدة من أفضل الممارسات ولا حتى مجموعة من الممارسات الموصى بها. التفاصيل الدقيقة لتقنيات المستشعرات المختلفة هي خارج نطاق هذا الدليل.

القياس والتقدير الكمي

يلخص الجدول 2 الطرق المستخدمة لقياس وتحديد كمية معدلات الانبعاث من مصادر الانبعاث. ترتبط بعض هذه الطرق بطرق الكشف، حيث يمكن أن يكون التقدير الكمي نتيجة مسح الكشف. تستخدم طرق التقدير الكمي الأخرى تقنيات مستقلة تماماً لا علاقة لها بطريقة أو تقنية الكشف. مثال على التقدير الكمي المستقل هو جهاز Hi FlowTM Sampler، والذي يمكن استخدامه لتحديد كمية الانبعاثات بعد تحديد المصدر بطريقة من طرق الكشف.

تم تقييم طرق التقدير الكمي المدرجة في الجدول 2 من قبل منظمات مهنية أو صناعية مثل مجلس تنظيم التكنولوجيا المشترك بين الولايات (ITRC) ومنظمة MARCOGAZ والأكاديميات الوطنية الأمريكية للعلوم والهندسة والطب .(NASEM)2-5 يتم سرد مصادر معلومات أخرى في الملحق.

يشير الجدول 2 إلى نفس أنواع المسح، بدءاً من المسوحات على الأقدام إلى الأقمار الصناعية، كما هو موضح في الجدول 1. ومع ذلك، لا يمكن استخدام بعض طرق الكشف في الجدول 1 لإنتاج معدل انبعاث، لذلك لم يتم تضمينها. يتم سرد بعض المزايا والعيوب العامة لكل طريقة قياس وتقدير كمي في الجدول. ومع ذلك، يجب على الشركة تقييم مدى ملاءمة تقنية محددة لكل تطبيق محدد.

نوع المسح (ووسائل التعيين)	التكنولوجيا	القياس وطريقة التحديد الكمي	دقة التحديد الكمي	المميزات والعيوب	القطاعات التي تستخدم فيها الطريقة
مسح من قبل شخص على الأقدام، يستخدم لمصادر فردية	جهاز أخذ العينات الشمّي، مثل كاشف أو (FID) التأين باللهب أشباه الموصلات عالية الحساسية، التي تأخذ عينات من تركيز الميثان في الهواء	غير مباشر. من خلال استخدام معادلة ارتباط تعلق التركيز بالمعدل، أو من خلال استخدام معاملات انبعاث التسرب / عدم التسرب	متوسطة إلى مرتفعة	الميزة: توجد طرق موثقة جيداً، مثل النماذج / عامل الارتباط لـ EN15446، وهي منهجية تحديد كمية غير مباشرة المساوئ: يجب استخدام العمليات الحسابية والارتباطات ما بعد المسح	جميع القطاعات للمنشآت فوق سطح الأرض
	أخذ عينات التدفق (يسحب الجهاز ما يكفي من الهواء لالتقاط (الانبعاث بالكامل	مباشر	مرتفعة	الميزة: معدل انبعاث في الوقت الحقيقي العيب: تم إيقاف جهاز Hi FlowTM Sampler ؛ المشكلات الفنية(HFS) المعروفة؛ يستغرق وقتاً طويلاً	جميع القطاعات، لكنها ليست حساسة بدرجة كافية للعديد من التسربات الصغيرة في نظام التوزيع
	تصوير الغاز الضوئي مع معالجة الصور في الوقت الحقيقي (OGI + QOGI) هذه تقنية ناشئة (للقياس الكمي	غير مباشر	منخفضة إلى متوسطة	الميزة: تقدير معدل الانبعاث في الوقت الحقيقي العيب: مستوى ثقة منخفض. تعتمد بشدة على الظروف البيئية؛ ضعيف بالنسبة للتسربات الكبيرة للغاية؛ يتطلب تدريباً محدداً الميزة: قياس التدفق المباشر العيب: الوصول الآمن إلى خط مصدر الانبعاث يمثل مشكلة في كثير من الأحيان	جميع القطاعات، ولكن غالباً ما تكون غير حساسة بدرجة كافية لتسربات نظام التوزيع الصغيرة
	مقياس التدفق الكتلي أو أنبوب بيتو أو أي جهاز تدفق آخر يتم إدخاله في مصدر انبعاث متدفق مثل مدخنة التنفيس	مباشر	مرتفعة	الميزة: مواد رخيصة ودقيقة العيب: يستغرق وقتاً طويلاً وعمالة كثيفة	جميع القطاعات المزودة بمداخن تنفيس
	أكياس المعايرة	مباشر	مرتفعة		جميع القطاعات إذا كان حجم التسرب مناسباً

نوع المسح (ووسائل التعيين)	التكنولوجيا	القياس وطريقة التحديد الكمي	دقة التحديد الكمي	المميزات والعيوب	القطاعات التي تستخدم فيها الطريقة
مسح من قبل شخص على الأقدام، يستخدم لمصادر فردية	غرفة التدفق الجماعي حاوية مبنية حول تعبير) سطحي عن تسرب خط الأنابيب، مما يسمح بقياس تركيز الهواء (المسحوب	مباشر	متوسطة	الميزة: لا تعتمد على نمذجة الجو العيب: يحدد معدلات الانبعاث من المناطق المغطاة فقط؛ يتطلب عمالة كثيرة؛ يفترض الالتقاط الكامل للتسرب ويقيسه بعد الفقد في التربة	النقل والتوزيع، لتسربات الأنابيب المدفونة
	التصوير بالموجات فوق الصوتية هذه تقنية ناشئة) (لجميع القطاعات	غير مباشر	غير معروف بعد، من المحتمل أن تكون متوسطة	الميزة: في الوقت الحقيقي، سريع العيب: جديد ولا يزال قيد التقييم؛ يتطلب انخفاض ضغط معين؛ برمجية الميثان لا تزال في مرحلة التطوير	جميع القطاعات
أجهزة الكشف ثابتة الموقع (محيط أو خط السياج)	مجسات النقطة في الشبكة هذه تقنية ناشئة) (لجميع القطاعات	غير مباشر. ممكن مع نمذجة إضافية ومعلومات الأرصاد الجوية	متوسطة إلى منخفضة	قيد التطوير	عمليات التنقيب والإنتاج وعلميات النفط والغاز الوسطى مع كثافة كبيرة من المنشآت السطحية
المسح بالمركبة ذات العجلات	مركبة مزودة بكاشف ميثان بالإضافة إلى التحليل باستخدام معلومات الأرصاد الجوية ونمذجة التشتت العكسي	غير مباشر	متوسطة إلى منخفضة	بالنسبة للعديد من الأساليب، يتم القياس الكمي في المكتب، بعد الانتهاء من المسح	جميع القطاعات المنشآت السطحية مع) وصول قريب للمركبة، أو خطوط أنابيب مدفونة (مع وصول للسيارة
	مركبة الكشف وإطلاق الكاشف	مباشر. النسب مطلوبة فقط لتحديد المعدل	متوسطة إلى عالية	الميزة: مفهومة جيداً ومدققة للغاية العيب: كثيفة العمالة. تعتمد الدقة على الموقع المشترك للكشاف / مصدر الانبعاث	جميع القطاعات، ولكن في الغالب يستخدم من قبل عمليات التنقيب والإنتاج وعلميات النفط والغاز الوسطى

نوع المسح (ووسائل التعيين)	التكنولوجيا	القياس وطريقة التحديد الكمي	دقة التحديد الكمي	المميزات والعيوب	القطاعات التي تستخدم فيها الطريقة
المسح بواسطة طائرة (drone) بدون طيار مركبة جوية) UAV أو بدون طيار، طائرة يقودها جهاز تحكم عن بعد أو أجهزة كمبيوتر (على متن الطائرة هناك العديد من) للكشف، UAV تقنيات لكن القليل منها ينتج عنه تقدير كمي للمعدل، لذلك لم يتم تضمينها في هذا (الجدول	نموذج توازن الكتلة (قياسات مع وعكس اتجاه الريح باستخدام مسار طيران يحيط (بالمصدر	مباشر	منخفضة	الميزة: غير مكلفة بالمقارنة مع الأساليب التنازلية واسعة النطاق العيب: عدد قليل من المزودين؛ يتطلب ظروف جوية مواتية	عمليات التنقيب والإنتاج وعمليات النفط والغاز الوسطى
المسح بواسطة الطائرات	توازن الكتلة من خلال مسار الرحلة عكس ومع اتجاه الرياح	مباشر	متوسطة يمكن أن يكون مرتفعاً) إذا تم إحاطة مصنع (واحد بمسار الرحلة	الميزة: نهج محكم العيب: غالي الثمن؛ يتطلب ظروف جوية مواتية؛ عدد قليل من المزودين	جميع القطاعات، وإن كانت أقل في التوزيع
	امتصاص الضوء السلبي	غير مباشر. باستخدام نمذجة بكسل الانتشار	منخفضة	الميزة: عدة مزودين العيب: حد أدنى ضعيف للكشف؛ عدم اليقين الشديد	جميع القطاعات
	امتصاص الضوء النشط	غير مباشر. باستخدام نمذجة بكسل الانتشار	متوسطة	الميزة: تكنولوجيا مثبتة العيب: قلة من مزودي الخدمة	جميع القطاعات

نوع المسح (ووسائل التعيين)	التكنولوجيا	القياس وطريقة التحديد الكمي	دقة التحديد الكمي	المميزات والعيوب	القطاعات التي تستخدم فيها الطريقة
المسح بواسطة الأقمار الصناعية من المقرر إطلاق أقمار صناعية أخرى يمكنها الكشف عن غاز الميثان.	قياس الطيف أداة TROPOMI (المراقبة الكروية)	غير مباشر. مطلوب معالجة مكثفة	متوسطة	العيب: يتطلب معالجة كبيرة لمعلومات الأقمار الصناعية لتقدير الانبعاثات	جميع القطاعات
	قياس الطيف في Methane Sat إطلاق عام 2022 هذه تقنية ناشئة (لجميع القطاعات	غير مباشر. مطلوب معالجة مكثفة	مجهولة	الميزة: مواجهة مجانية ومتكررة وعامّة (للميثان Methane Sat سات العيب: لم يتم إطلاقه بعد؛ يتطلب معالجة كبيرة لمعلومات الأقمار الصناعية لتقدير الانبعاثات. التأخير المتوقع لبيانات المعدل	جميع القطاعات
	قياس الطيف (WAF-P (Wide-Angle Fabry-Perot) GHG Sat هذه تقنية ناشئة (لجميع القطاعات من المقرر إطلاق أقمار صناعية أخرى يمكنها اكتشاف غاز الميثان GHG مثل سلسلة Sat الأخرى، بالإضافة إلى GOSAT-3 و MERLIN و GeoCarb و EarthCARE و GEO-CarbonSat و Meto وسلسلة CAPE)	غير مباشر. يمكن إضافتها بعد التحليل	مجهولة	الميزة: متاح العيب: الخدمة للتأجير. أقمار صناعية دقيقة محدودة في المدار حالياً؛ حد أدنى للكشف عالي	جميع القطاعات

التحسين المستمر

يتم تسجيل انبعاثات الميثان التي تم تحديدها واكتشافها وقياسها وتحديدها كمياً في سجلات المنشآت والشركات والمناطق. يجب تحديث السجلات هذه بانتظام لتعكس التغييرات في المعدات والعمليات وأي معلومات جديدة أخرى.

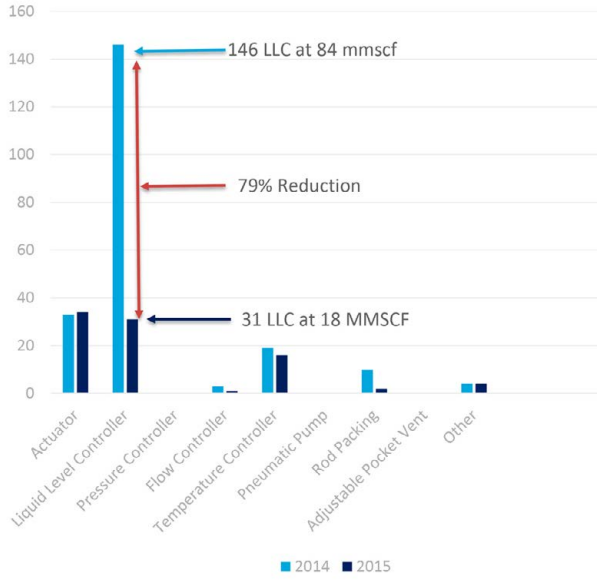
قد تظهر معلومات جديدة يمكن استخدامها لتحديث وتحسين التقييمات التصاعدية. قد يشمل ذلك طرق الكشف الجديدة، والدراسات الجديدة التي تقوم بتحديث متوسط معدلات الانبعاث من المعدات (معاملات الانبعاث)، والنماذج الجديدة لتقدير الانبعاثات، أو غيرها من الابتكارات. عند توفر معلومات محسّنة، يجب تحديث السجلات.

يمكن أيضاً استخدام المعلومات المستمدة من التقييمات التنازلية لتحديث السجلات وتحسينها بشكل دوري. أظهر عدد كبير من دراسات القياس أن جزءاً صغيراً من المواقع، أو جزءاً صغيراً من فئات معينة من المعدات في سلسلة إمداد الغاز الطبيعي، تمثل نسبة كبيرة من إجمالي الانبعاثات. بناءً على التجربة في الولايات المتحدة، كانت 5٪ من المصادر مسؤولة بشكل عام عن أكثر من 50٪ من إجمالي الانبعاثات2،7. قد لا يتم احتساب هذه المصادر، المعروفة باسم المصادر عالية الانبعاث، في سجلات الانبعاثات. نظراً لأن أساليب الأقمار الصناعية وعمليات التقييم الأخرى التنازلية أصبحت متاحة بشكل روتيني، فسيصبح من الممكن مقارنة سجلات الانبعاثات التصاعدية بشكل منتظم مع الكميات المستقلة التنازلية. قد تكون هذه المقارنات صعبة ولكنها يمكن أن توجه التحسين المستمر لسجلات انبعاثات الميثان.

دراسات الحالة

تأتي دراسات الحالة الواردة في هذا الدليل من قطاعات مختلفة من سلسلة قيمة الغاز الطبيعي. وهي تمثل الممارسات الحالية وتوضح مجموعة متنوعة من طرق التحديد والكشف والقياس والتحديد الكمي. تجمع بعض دراسات الحالة بين أكثر من تقنية واحدة. يلخص الجدول 3 أدناه القطاعات وأنواع المسح التي تنطبق عليها دراسات الحالة. تم اختيار دراسات الحالة بحيث تم تمثيل كل قطاع وتم تمثيل أنواع المسح المختلفة.

	قطاع الصناعة			
نوع المسح	التنقيب والانتاج	النقل والتخزين	التوزيع	محطات الغاز الطبيعي المسال
قدم	دراسة الحالة 1	دراسة الحالة 4 ودراسة الحالة 5	دراسة الحالة 6	دراسة الحالة 7
موقع ثابت	دراسة الحالة 2			
مركبة ذات عجلات	دراسة الحالة 2		دراسة الحالة 6	
طائرة بدون طيار أو مركبة جوية بدون طيار	دراسة الحالة 2			
الطائرات	دراسة الحالة 3 ودراسة الحالة 8	دراسة الحالة 8	دراسة الحالة 8	
الأقمار الصناعية	دراسة الحالة 8	دراسة الحالة 8	دراسة الحالة 8	



التكاليف: أنفقت SWN ما يقرب من 500000 دولار أمريكي سنوياً على العناصر التي تجاوزت المتطلبات التنظيمية. كانت قيمة الغاز الموفر حوالي 250 ألف دولار أمريكي سنوياً، لذلك كان للبرنامج معدل عائد سلبي.

الدروس المستفادة: تم وضع موظفي SWN في فريقين – ركز أحدهم على مواقع الآبار، والآخر ركز على محطات التجميع في عمليات النفط والغاز الوسطى. تمت زيارة كل موقع كل عام. تعتقد SWN أن الاستثمار أنتج العديد من العوائد غير النقدية الأخرى. يعتقدون أيضاً أن استخدام

ليزر المسار المفتوح كطريقة كشف ثانية زاد بشكل كبير من عدد التسربات التي تم العثور عليها، والتحقق من التسربات، وسرعة فرقهم.

المصدر: عروض تقديمية من قبل SWN إلى وكالة حماية البيئة الأمريكية، تظهر على https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-11/documents/15.jordan_2017aiw.pdf

دراسة الحالة 1: عمليات التنقيب والإنتاج (الإنتاج والتجميع)

دراسة الحالة: برنامج الكشف عن التسرب وإصلاحه الذكي لشركة الطاقة الجنوبية الغربية (Southwestern Energy (SWN – تحسين يفوق المتطلبات التنظيمية

وصف البرنامج: ابتداءً من عام 2014، بدأت SWN في إجراء مسوحات التصوير الضوئي للغازات (OGI) لمواقع الآبار الجديدة والمعدلة ومحطات تجميع الضاغط، وفقاً لما تتطلبه اللوائح الفيدرالية الأمريكية (NSPS OOOOa). أضافت SWN العناصر التالية، والتي تجاوزت المتطلبات التنظيمية.

- تضمنت جميع المواقع الموجودة التي لم تكن جزءاً من اللائحة.
- أضافوا ما يلي إلى فحص OGI للتسرب المطلوب.
  - مسح مكرر بواسطة أداة ليزر إضافية ذات مسار مفتوح
  - تقدير معدل التسربات المحددة بواسطة Hi FlowTM Sampler
  - تم تضمين أجهزة التحكم الهوائية كهدف

النتيجة: تمكنت SWN من تحديد وحدات التحكم في مستوى السائل الهوائية (LLC) المعطوبة وتقليل الانبعاثات من هذه الأجهزة بنسبة 79٪ في عام واحد، مما يوفر 115 مليون قدم مكعب قياسي في السنة من الانبعاثات من هذه الفئة. باستخدام Hi FlowTM Sampler، تمكنوا من تحديد كمية تخفيضاتهم. كما حققوا أيضاً تخفيضات في حالات التسربات الهاربة من معدات أخرى، لكن هذه الوفورات كانت أقل بكثير.

التكاليف: لم يبلغ عنها.

الدروس المستفادة: تم تسجيل توزيعات مماثلة للانبعاثات عبر الطائرات بدون طيار، وطرق مراقبة اتجاه الريح والطرق التقليدية المستخدمة في الكشف والقياس الكمي. تقدم تقنيات المراقبة الناشئة متوسطة إلى عالية التردد حالياً كشفاً أسرع ورؤى ثاقبة للأنماط، وغالباً ما تتفوق على التصوير الضوئي للغاز من حيث تحديد مصادر الانبعاثات. تحدد العينات المأخوذة في اتجاه الريح الانبعاثات في المواقع، ويمكن للتقنيات المركبة على الطائرات بدون طيار تحديد الانبعاثات من معدات معينة وتحديد كمية تلك الانبعاثات. ومع ذلك، لا يزال التصوير الضوئي للغاز يلعب دوراً مهماً في تحديد المكونات التي تتسرب.

المصدر: "رؤى من تجربة ميدانية لتقنيات اكتشاف الميثان"، الاجتماع السنوي للاتحاد الجيوفيزيائي الأمريكي، سان فرانسيسكو – EE Tullos, S Aminfard, FJ Cardoso-Saldaña, D Allen, I Mogstad, L DeWitt, B ,Flowers, SC Herndon
A Scott, S Elms, and B Smith
December 2019

دراسة الحالة 2: عمليات التنقيب والإنتاج (الإنتاج والتجميع)

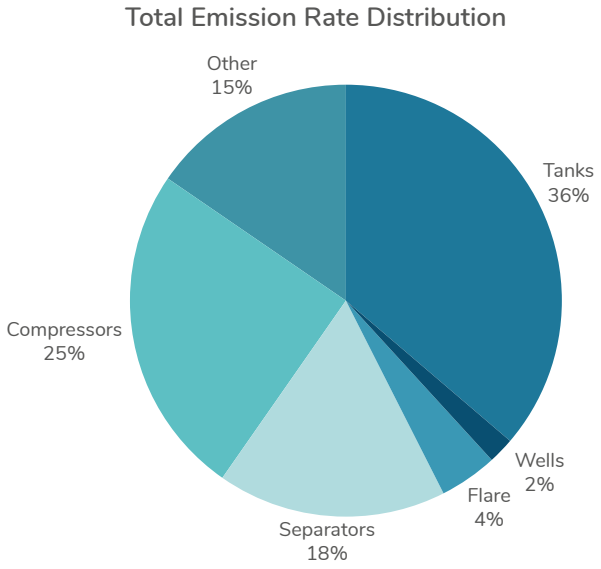
دراسة الحالة: تجربة ميدانية لتقنيات الكشف عن الميثان (XTO/ExxonMobil)

وصف البرنامج: مع توسع برامج الكشف عن التسرب وإصلاحه (LDAR)، اكتسبت طرق جديدة لتحسين تغطية الموقع، وتتبع البيانات وكفاءة وقت الاستجابة، وفعالية التكلفة الإجمالية، اهتماماً متزايداً. استجاب مطورو التقنيات الناشئة من خلال تطوير العديد من أنظمة الكشف والقياس والتقدير الكمي لانبعاثات الميثان. قامت ExxonMobil بتنفيذ برنامج LDAR طوعي تجاوز المتطلبات التنظيمية. لقد جربوا ثلاث تقنيات كشف متميزة (المركبات والطائرات بدون طيار وأنظمة المواقع الثابتة) أثناء إجراء مسوحات الانبعاثات التقليدية وقياسات الرياح.

النتيجة: تم تقييم الانبعاثات باستخدام مستشعر مُثبَّت بطائرة بدون طيار، ومستشعر اتجاه الريح في الموقع الثابت، وجهاز استشعار مُركب على السيارة، وجهاز مراقبة اتجاه الرياح المحمول. تمت مقارنة عملية الكشف عن الانبعاثات وتحديد كميتها بالانبعاثات المكتشفة باستخدام التصوير الضوئي للغاز في العديد من مواقع الآبار العاملة في منطقة إنتاج الغاز الجاف في شرق تكساس. تم جمع نتائج جميع الطرق في أوقات متقاربة بقدر الامكان. تم قياس الانبعاثات باستخدام أداة Hi FlowTM في مجموعة مختارة من المواقع للتحقق من الأساليب. تمت مقارنة تقنيات الكشف عن انبعاثات الميثان، وتحديد موقعها (إسناد المصدر) وتقديرها الكمي مع بعضها البعض.

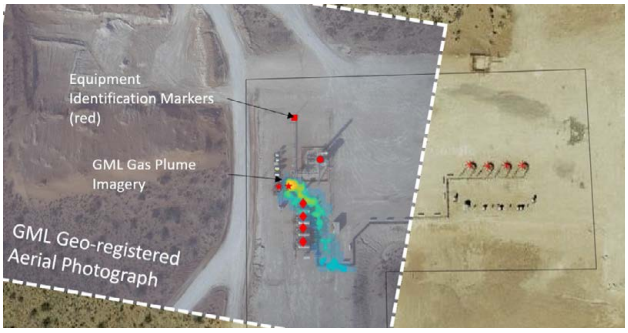
المعدات	عدد المعدات التي فاضت	النسبة المئوية لنوع المعدات التي تم الانبعاث منها
الخزانات	512	7.4
الآبار	313	1
المشاعل	65	6.2
الفواصل	310	6.1
الضواغط	39	64.1
أخرى*	33	100

* "أخرى" تشمل فقط قطع المعدات غير المصنفة التي تم اكتشاف أنها تصدر انبعاثات. لا يعني ذلك جميع قطع المعدات الأخرى الموجودة في المواقع التي تم مسحها.



دراسة الحالة 3: عمليات التنقيب والإنتاج (الإنتاج والتجميع)

دراسة الحالة: تجربة ميدانية لتقنيات الكشف الجوي عن غاز الميثان (XTO/ExxonMobil)



وصف البرنامج: خلال عام 2019، أجرت ExxonMobil مسحاً جوياً لأصول حوض برميان (غرب تكساس وجنوب شرق نيو مكسيكو) باستخدام تقنية تحديد المدى عن طريق الضوء أو الليزر (Gas Mapping LiDARTM) المستندة إلى الطائرات (مسار مفتوح نشط). كان الغرض من هذا المشروع هو فهم تواتر وكمية انبعاثات غاز الميثان في المناطق المستهدفة.

النتيجة: تم تراكب الانبعاثات التي تم العثور عليها على التصوير الجوي الذي تم التقاطه باستخدام الكاميرا المدمجة في المستشعر لتحديد موقع المعدات وتحديدها على 505 منصة في منطقة المسح. من خلال تحليل أنواع المعدات المرئية في الصور الجوية، يمكن أن ترتبط الانبعاثات بأنواع معينة من المعدات، مثل الخزانات والآبار والمشاعل والفواصل والضواغط وغيرها من المعدات (غير المصنفة). قدمت النتائج تقديراً للانبعاثات لكل انبعاث تم اكتشافه، وتفصيلاً حسب المعدات.

التكاليف: لم يبلغ عنها

الدروس المستفادة: قدم نهج الفحص والمسح هذا طريقة تحديد سريعة، مما أدى إلى إنتاج النتائج الأولية في غضون 24 ساعة، مع تقدير الانبعاثات بعد أسبوع واحد. بعض مصادر الانبعاث، مثل الضواغط، كانت متوقعة. البعض الآخر، مثل المشاعل، كانت غير متوقعة. سيتعين القيام بمزيد من العمل لتصنيف انبعاثات الخزانات، حيث يجب ألا تكون هناك انبعاثات من الخزانات التي تعمل بأنظمة التحكم في البخار، بينما من المتوقع حدوث انبعاثات من الخزانات التي تسمح بالنفاذ وغير المتحكم بها. أظهرت النتائج أيضاً أن أنظمة الخزانات لمواقع ليست تابعة لشركة اكسون في المنطقة التي تم مسحها كانت جزءاً أكبر بكثير من إجمالي الانبعاثات مقارنة بمواقع ExxonMobil (78٪) لغير ExxonMobil مقابل 36٪ لشركة ExxonMobil).

المصدر: EE Tullos, ExxonMobil, May 2020

- الحد من انبعاثات الشبكة من التسربات (0.8- مليون متر مكعب عام 2019) نتيجة استمرار مبادرة تركيب / استبدال صمام كروي في محطات خفض ضغط الشبكة. قلل ذلك تسرب الغاز من أنظمة تفريغ المرشح بالمحطة، بسبب عدم وجود إحكام داخلي لصمام التفريغ. سيقود هذا البرنامج في فترة أربع سنوات 2017-2020 إلى تعديل 351 محطة، وتوفير 2.5 مليون متر مكعب من الغاز؛
- تقليل الانبعاثات الناتجة عن أنظمة إزالة الضغط، خاصة في بعض منشآت التخزين.
- خطط جديدة لتنفيذ تقنية الكشف عن التسرب وإصلاحه مع الموظفين في عام 2020.

المصدر: "سنام في فرقة العمل المعنية بالإفصاح المالي المتعلق بالمناخ"، وهو تقرير عن تغير المناخ يُنشر كل عام اعتباراً من عام 2019. انظر موقع سنام على الإنترنت

_https://www.snam.it/en/Sustainability/strategy_and commitments/task_force_CFD.html

دراسة الحالة 4: عمليات النفط والغاز الوسطى (النقل والتخزين تحت الأرض ومحطات إعادة تحويل الغاز الطبيعي المسال إلى غاز)

دراسة الحالة: "أفضل الممارسات للتحديد والقياس الكمي" لشركة سنام (Snam)

وصف البرنامج: استخدمت سنام طريقة تم تطويرها دولياً مع معهد أبحاث الغاز ووكالة حماية البيئة الأمريكية، مدمجة مع سلسلة من القياسات الميدانية التي أجريت مع شركة راديان الأمريكية (Radian)، على الأصول والأقسام التمثيلية لشبكتها. منذ عام 2018، وخاصة خلال 2019/2020، نفذت Snam حملة قياس في الموقع. تم تنفيذ النشاط باستخدام جهاز كشف تأين اللهب (FID)، وفي بعض الحالات، جهاز Hi FlowTM Sampler (HFS))، لتقدير معدلات الانبعاث. تم استخدام عوامل الارتباط لتقدير التسربات الهاربة والإبلاغ عنها. تم أيضاً استخدام التعبئة والتغليف ومزيج من معدلات تدفق المنفاخ وقياسات جهاز كشف تأين اللهب.

النتيجة: تمكن سنام من تحسين نظام محاسبة الانبعاثات بناءً على القياسات الميدانية. خلال عامين من النشاط، تم قياس أكثر من 150,000 مكون. بناءً على هذه المعلومات، تم تحديث معاملات الانبعاث. وهناك حملة ميدانية جديدة جارية.

التكاليف: أنفقت سنام ما يقرب من 200,000 يورو سنوياً لأداء هذه الأنشطة.

الدروس المستفادة: تمكنت سنام من فهم المصادر الرئيسية للانبعاثات في أصولها بشكل أفضل وتقديم برامج التخفيف لاستبدال مكونات محددة. تقدم سنام أيضاً برامج الكشف عن التسرب وإصلاحه (LDAR) لتحديد تسربات الميثان وتخطيط أعمال الصيانة. تم تحقيق النتائج التالية:

النتيجة: بناءً على الخبرة المكتسبة خلال حملة LDAR الأولى، نفذت Enagás عدة حملات إضافية في السنوات القليلة الماضية. سمحت الإصلاحات في عام 2019 لشركة Enagas بتجنب 140 طناً من الانبعاثات. منذ عام 2013، تم تقليل التسربات الهاربة بنسبة 47٪.

تقوم Enagás الآن بتنفيذ حملات LDAR داخلياً كجزء من برنامج الصيانة الخاص بها، لزيادة وتيرة الحملة (سنوياً في جميع البنية التحتية العاملة في إسبانيا) وضمان التحسين المستمر.

التكاليف: تبلغ تكلفة إجراء حملات LDAR حوالي 200,000 يورو سنوياً.

الدروس المستفادة: الدروس الرئيسية المستفادة من حملات LDAR هي كما يلي.

- لا يزال هناك قدر كبير من عدم اليقين المرتبط بتقنيات القياس ومعاملات الانبعاث ومعاملات الارتباط، ولا توجد منهجية معيارية.
- يعتبر القياس في الموقع في الوقت الحالي أكثر الأساليب فعالية وموثوقية للكشف عن التسربات، وقياس الانبعاثات، وإدخال تدابير التخفيف.
- يعد تكرار الحملات أيضاً عاملاً محدداً لتقليل التسربات الهاربة، خاصة في المنشآت التي تعمل فيها المعدات في ظل تغيرات كبيرة في درجات الحرارة.

المصدر: تقرير Enagás السنوي لعام 2019 في

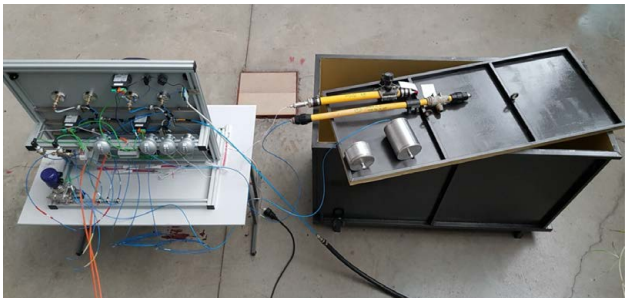
/https://www.enagas.es/stfls/ENAGAS/Documentos
Annual%20Report_2019.pdf

دراسة الحالة 5: عمليات النفط والغاز الوسطى (النقل والتخزين تحت الأرض ومحطات إعادة تحويل الغاز الطبيعي المسال إلى غاز)

دراسة الحالة: Enagás هي شركة البنية التحتية للغاز الطبيعي في إسبانيا ولديها 12,000 كيلومتر من خطوط أنابيب الغاز و19 محطة ضاغط و493 محطة تنظيم وقياس وثلاثة مرافق تخزين تحت الأرض وأربعة مصانع لإعادة تحويل الغاز الطبيعي المسال إلى غاز. قامت شركة Enagás بحساب بصمة الكربون السنوية والتحقق منها طوعاً، بما في ذلك انبعاثات الميثان، منذ عام 2013.

وصف البرنامج: قبل عام 2013، كان الحد من انبعاثات الميثان بواسطة Enagás مرتبطاً بشكل أساسي بمتطلبات السلامة. نظراً لأن التسربات الهاربة جزء مهم من البصمة الكربونية، قررت Enagás تنفيذ أول حملة LDAR في 2013/2015. غطت هذه الحملة التسربات الهاربة في جميع محطات الغاز الطبيعي المسال، وجميع مخازن الغاز تحت الأرض وعينة من البنية التحتية لنقل الغاز. تم تنفيذ الحملات بدعم خارجي.

تم قياس التسربات الهاربة في البداية باستخدام تقنيتين مختلفتين – HFS (Hi FlowTM Sampler) وأجهزة الكشف المحمولة التي تستخدم مستشعرات أشباه الموصلات عالية الحساسية. في الحملات اللاحقة، قررت Enagás قياس الانبعاثات باستخدام كاشف محمول، حيث كان نظام HFS يستغرق وقتاً طويلاً. لذلك يتم حالياً الكشف عن التسرب وقياسه باستخدام كاشف محمول وكاميرا OGI (التصوير الضوئي للغاز). يتم إجراء القياس الكمي باستخدام عوامل الارتباط من قراءات الجهاز المحمول لتقدير معدلات الانبعاث لكل تسرب تم اكتشافه، وفقاً لمعيار EN 15446.



التكاليف: تخطط شركة SEDIGAS لإنفاق ما يقرب من 150 ألف يورو على هذا المشروع.

النتيجة: تم إنشاء قاعدة بيانات تربط قائمة بالعناصر المتسربة وخصائصها المحددة بمتوسط معدل تدفق تسرب لكل نوع من عناصر التسرب وحالة التشغيل. نتيجة لذلك، بمجرد اكتشاف تسرب، يمكن تعيين معدل التدفق من قاعدة البيانات هذه.

الدروس المستفادة: يجب أن يكون التحديد الكمي أفضل الآن على طول الشبكة بأكملها، مما يوفر لمشغلي التوزيع عوامل مناسبة للقياس الكمي. أظهرت النتائج أيضًا أنه يجب توخي مزيد من العناية فيما يتعلق ببعض عناصر الشبكة (على سبيل المثال، الوصلات والمفاصل).

المصدر: عروض تقديمية من NEDGIA وSEDIGAS حول "تقييم الانبعاثات الهاربة في شبكات توزيع الغاز".

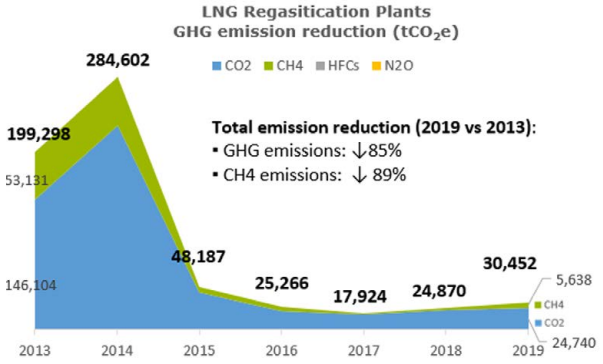
دراسة الحالة 6: عمليات النفط والغاز النهائية (التوزيع)

دراسة الحالة: قامت NEDGIA (شركة توزيع الغاز في إسبانيا) بالتنسيق مع SEDIGAS (جمعية الغاز الإسبانية) وأنشأت طريقة لقياس معدلات تدفق الغاز الطبيعي للتسربات تحت الأرض التي تم الكشف عنها من خلال المسوحات الروتينية.

وصف البرنامج: يتم إجراء استطلاعات كشف التسرب بشكل روتيني بواسطة المركبات أو الأشخاص أو كليهما. يتم الكشف عن التسرب على مراحل. أولاً، يتم تحديد موقع التسربات بواسطة شخص يمشي بالقرب من الأنابيب المدفونة قدر الإمكان، ويأخذ عينات من الهواء على سطح الأرض. يتم تأكيد مواقع التسرب التقريبية عن طريق الحفر السطحي الذي يبدأ عند حافة المنطقة التي يتم فيها اكتشاف الغاز، ويتقدم نحو الحافة المقابلة للكشف. يجب أن تكون الحفر عميقة بما يكفي للمرور عبر أي ترصيف وقاعدة خرسانية. يتم إدخال مسبار كاشف الغاز في الحفرة المحفورة. يحتوي كاشف الغاز المحمول المستخدم على مستشعرات توصيل حراري (من 0 إلى 100٪ ميثان) عالية الجودة (من 0 إلى 9,900 جزء في المليون)، وزمن استجابة 20 ثانية. يجب أن تحتوي المجسات على مخروط أو أي نظام إغلاق مناسب آخر لتجنب دخول الهواء الخارجي من خلال نقطة الشفط بمجرد إدخاله في الحفرة المحفورة.

يتم تحديد كمية التسربات التي تم تحديدها من خلال برنامج بحث تم تصميمه للحصول على عوامل انبعاث محددة لأجزاء مختلفة من شبكة إمداد الغاز. يقوم البرنامج بتحديد كمية تدفق الغاز الطبيعي في الحفرة التي تسبب التسرب، دون مراعاة كيفية وصول هذا الغاز إلى السطح. باستخدام عينات من أقسام الأنابيب المحفورة، يستخدم المعمل طريقة "انخفاض الضغط" في عينة مختومة، بدءاً من ضغط ودرجة حرارة التشغيل الميداني، من أجل تحديد معدل التسرب الصافي. العينات المادية التي تم جمعها هي مجموعة فرعية من جميع التسربات، ولكن يتم اختيار العينات بعناية لتمثيل مختلف ظروف إنشاء الشبكة والتشغيل لجميع التسربات، مثل الضغط وقت التشغيل، ومواد المعدات، وحجم المعدات، وجزء التسرب (على سبيل المثال، الأنبوب، الصمام، الاقتران، اللحام).

النتيجة: منذ عام 2013، تم تقليل التسربات الهاربة في محطات الغاز الطبيعي المسال بنسبة 55٪ والتنفيس بنسبة 98٪، وتم تقليل إجمالي انبعاثات غاز الميثان بنسبة 89٪. تم تطوير تطبيق ويب خصيصاً لرصد وتسجيل المعلومات التي تم الحصول عليها في حملات LDAR. يقدّر التطبيق معدلات الانبعاث السنوية ووفورات الانبعاثات السنوية، فضلاً عن تحديد أولويات التسربات بناءً على حجمها.



الدروس المستفادة: نتج عن نهج شامل للتحديد والكشف والقياس والتحديد الكمي نتائج كبيرة لشركة Enagás.

المصدر: Enagás

دراسة الحالة 7: أنظمة الغاز الطبيعي المسال

دراسة الحالة: مشغل محطة الغاز الطبيعي المسال لشركةEnagás – إدارة انبعاثات الميثان والحد منها

وصف البرنامج: تعد إدارة انبعاثات الميثان والحد منها جزءاً من ثقافة Enagás، على جميع مستويات الشركة. تقوم شركة Enagás بتشغيل وصيانة ثلاثة مصانع لإعادة تحويل الغاز الطبيعي المسال إلى غاز.

تصنف Enagás انبعاثات الميثان إلى ثلاث فئات – الهاربة، المنفّسة، والاحتراق غير الكامل. تستخدم Enagas كاشفاً محمولاً من نوع Sensit (مستشعر نقطي) في التشغيل اليومي لمحطات الغاز الطبيعي المسال (على سبيل المثال في نهاية أنشطة تحميل وتفريغ السفينة)، وأثناء أنشطة بدء التشغيل والصيانة.

اعتماداً على نوع الانبعاث والمعدات المرتبطة به، يتم تطبيق طرق التحديد الكمي المحددة وتدابير التخفيف في محطات الغاز الطبيعي المسال.

- تحديد التسربات الهاربة: يتم الكشف عن التسربات وقياسها باستخدام كاشف محمول وكاميرا OGI. منذ عام 2020، يتم تنفيذ حملات LDAR التي تلبي المعيار الأوروبي EN 15446 كل عام في جميع محطات الغاز الطبيعي المسال التي تديرها Enagás في إسبانيا (برشلونة، قرطاجنة، هويلفا). يتم إصلاح التسربات الهاربة بالتوازي أثناء حملات LDAR. يتم تضمين التسربات التي لا يمكن إصلاحها وقت الكشف في خطة الصيانة ويتم إصلاحها قبل نهاية العام، ما لم يتطلب الإصلاح أعمالاً كبيرة.

- تحديد كمية التنفيس: يتم حساب انبعاثات الميثان من الأجهزة التقنية (مثل أجهزة تحليل الغاز) مع الأخذ في الاعتبار تكوين الغاز، والعدد الإجمالي للأجهزة التقنية والحجم الإجمالي للغاز المنفّس. في حالة تنفيس التشغيل والصيانة، يتم قياس انبعاثات الميثان باستخدام أجهزة قياس التدفق بالموجات فوق الصوتية في مدخنة التنفيس.

- تقنيات القياس على مستوى الموقع: لدى Enagás بعض المشاريع التعاونية المتعلقة بالقياسات على مستوى الموقع (المركبات ذات العجلات والطائرات بدون طيار والأقمار الصناعية) من أجل مقارنة القياسات في الموقع بالمعلومات المتاحة حول مصادر الانبعاثات المختلفة.

- تشير القياسات التي تم إجراؤها في اتجاه الريح لمنشآت النقل والتخزين السطحية إلى أن بعض التقديرات التصاعدية للانبعاثات أعلى مما تقترحه القياسات التنازلية، ولكن البعض الآخر أقل. ساهمت المواقع عالية الانبعاثات بأغلبية الانبعاثات.16،17

- التوزيع

  - أظهرت الشبكات مجموعة واسعة من خصائص الانبعاث – المناطق الحضرية ذات خطوط توزيع معرضة للتآكل بها انبعاثات أعلى بحوالي 25 مرة من المناطق التي تحتوي على مواد خطوط أنابيب أكثر حداثة18.

  - بالنسبة لتسرب واحد كبير للغاية من فشل احتواء بئر واحد في حقل تخزين تحت الأرض، استخدمت الدراسات تقنيات قياس تنازلية مختلفة19.

الدروس المستفادة:

- يمكن أن تشير عمليات التحقق التنازلية إلى الانبعاثات غير المميزة أو المقدرة بشكل غير كاف في التقييمات التصاعدية

- ينبغي مقارنة التقديرات التنازلية مع التقييمات التصاعدية التي لها نفس المقاييس المكانية والزمانية مثل الملاحظات.

- يمكن أن تمثل مجموعات فرعية ذات انبعاثات عالية من المعدات نسبة كبيرة من إجمالي انبعاثات الميثان من سلاسل إمداد الغاز الطبيعي. إذا كانت المصادر عالية الانبعاث ناتجة عن أعطال أو عمليات غير طبيعية، فقد لا يتم التنبؤ بها من خلال التقديرات التصاعدية.

- معظم القياسات التنازلية هي في الوقت الحالي لقطات موجزة للانبعاثات، ومحدودة في نطاقها المكاني، وباهظة التكلفة. ومع ذلك، فإن هذا يتغير مع بدء ظهور تقديرات الانبعاثات القائمة على القياسات التي تم إجراؤها بواسطة الأقمار الصناعية والمسوحات الجوية وأنظمة المراقبة الأرضية.

دراسة الحالة 8: التوفيق بين التقييمات التنازلية والتصاعدية

دراسة الحالة: إن طرق التوفيق بين سجلات الانبعاثات التصاعدية والقياسات التنازلية واسعة النطاق وتتنوع في المقياس، يمكن إجراء المطابقات في منشأة واحدة أو على مستوى إقليمي أو حوض. في المرافق السطحية لعمليات النفط والغاز الوسطى، مثل محطات الضواغط ومحطات معالجة الغاز ومحطات القياس والتنظيم الكبيرة، تكون المقارنة بشكل عام على مستوى المنشأة. في أنظمة التوزيع، غالباً ما تكون المقارنة إقليمية، وفي هذا التحليل من الصعب فصل الانبعاثات من سلسلة قيمة الغاز الطبيعي عن المصادر الأخرى، وفصل مصادر الانبعاثات داخل نظام التوزيع عن الانبعاثات التي تنشأ بعد قياس الغاز ونقله للعملاء.

وصف البرنامج: قد تتراوح الحاجة إلى التسوية من التحسين المستمر للسجلات إلى الالتزامات الطوعية للشركات الفردية.

النتائج: توثق العديد من دراسات الحالة المطابقات بين التقييمات التصاعدية والتقييمات التنازلية. ومع ذلك، تم إجراء معظم هذه التحاليل في أمريكا الشمالية. يركز الملخص أدناه على التحليلات التي ظهرت في المجلات العلمية المحكمة. يظهر ملخص في تقرير من الأكاديمية الوطنية الأمريكية للعلوم والهندسة والطب.2

- مواقع الإنتاج الأولية ومحطات ضواغط التجميع: تعد التقديرات التنازلية أكبر بشكل عام من التقديرات التصاعدية. تم إجراء المقارنات على مستويات مختلفة، بما في ذلك ما يلي.

  - قياسات تنازلية على مستوى الموقع مأخوذة لمئات من مواقع الإنتاج والتجميع11-8

  - تم إجراء قياسات تنازلية على مستوى الحوض باستخدام الطائرات12،13. على الرغم من أن بعض هذه التحليلات قد أشارت إلى أن القياسات التنازلية أكبر من التقديرات التصاعدية13، فقد قام البعض الآخر بالتوفيق بين الملاحظات باستخدام محاسبة دقيقة للغاية للانبعاثات العرضية المسجلة (لا سيما التفريغ السائل من الآبار).12

  - أصبحت قياسات الأقمار الصناعية متاحة الآن، مما يوفر متوسط تقديرات الانبعاثات كل عام لمناطق صغيرة تصل إلى 50 كم2. 14،15 ومن المتوقع أن تعمل الأقمار الصناعية المخطط لها لعام 2020 فصاعداً على تحسين الدقة المكانية والزمانية.

قائمة التحقق

تقوم قائمة التحقق التالية بتقييم التقدم المحرز في تقليل انبعاثات الميثان من خلال التحديد والقياس الكمي.

النشاط	المكتمل	النسبة المئوية لجميع المعدات أو العمليات في هذا البرنامج
تحديد المصادر المعروفة للانبعاثات وإجراء مسح للانبعاثات غير المقصودة أو غير المرغوب فيها		
تحديد كمية المصادر المعروفة والمعثورعليها بشكل مباشر عن طريق قياس معدلات الانبعاث، أو بشكل غير مباشر باستخدام مزيج من القياسات والعمليات الحسابية والنماذج		
استخدام هذه المعلومات لإنشاء أو تحديث سجلات الانبعاثات		
تحديث وتحسين خطط تحديد وتقدير كمية الانبعاثات بشكل دوري • المقارنة بين تحديد كميات المصادر بالقياسات واسعة النطاق • النظر في اختبار التقنيات الناشئة التي لديها القدرة على تحسين كفاءة التحديد أو التقدير الكمي، أو بتكلفة أفضل • استخدام التقنيات التي لديها القدرة على تقليل الوقت بين ظهور الانبعاثات والاكتشاف الأولي		

الملحق

الدراسات والتقارير التي قيمت تقنيات الكشف والقياس والتقدير الكمي

اسم الدراسة أو التقرير	السنة	القطاعات ذات الصلة	الاستنتاجات الرئيسية
تحسين توصيف انبعاثات الميثان البشرية المنشأ في الولايات المتحدة2	2018	الجميع	• الفصل 3 (طرق قياس ورصد انبعاثات الميثان) يصف المقاييس المختلفة لطرق التقدير الكمي. • الفصل 6 (مواجهة تحديات توصيف انبعاثات الميثان) يحدد التوصيات للتسويات التنازلية والتصاعدية.
تقييم تقنيات الكشف عن الميثان المبتكرة3	2018	الجميع	• الفصل 4 (التطبيقات) يناقش التطبيقات العملية للتقنيات. • الفصل 5 (إرشادات ومبادئ التقييم) يناقش أهمية تحديد أهداف النظام قبل أن يتم تقييم طريقة معينة. • يوجد ملخص للتقييمات للعديد من تقنيات استشعار الميثان وجدول تقييم كبير يقارن 18 تقنية استشعار فردية.
تقييم انبعاثات غاز الميثان لمشغلي أنظمة نقل وتوزيع الغاز4	2019	النقل والتوزيع فقط	• يوصي بحملات جمع البيانات عن التسربات والانبعاثات التشغيلية والحوادث. • يقدم الفصل 7 جدول مقارنة بـ 18 طريقة لقياس وتحديد كمية تسرب غاز الميثان. • يوفر أيضاً طرقاً لتقديرات هندسية.
الطرق المحتملة التي يمكن أن تساهم بها صناعة الغاز في الحد من انبعاثات الميثان: تقرير لمنتدى مدريد (5 إلى 6 يونيو 2019)20	2019	الجميع	• وثيقة واسعة تغطي بروتوكولات التعريف والتقدير الكمي. • يقدم فقط نظرة عامة على فئات الاكتشاف ولا (توجد تقنيات محددة (انظر القسم 4.2.1 • يغطي مفاهيم التحديد الكمي والتقييمات التنازلية والتقييمات التصاعدية والبواعث الفائقة.

اسم الدراسة أو التقرير	السنة	القطاعات ذات الصلة	الاستنتاجات الرئيسية
أخذ عينات من تقنيات وممارسات الكشف عن انبعاثات الميثان للبنية التحتية لتوزيع الغاز الطبيعي5	2019	التوزيع فقط	• تحديد التقنيات والممارسات الحالية والناشئة المناسبة للكشف عن التسربات. • ينتج جدولاً (الملحق أ) يقارن بين 27 تقنية، على الرغم من أن الجدول ليس إلزامياً أو شاملًا. • هذا هو "كتيب تعليمي لمنظمي الطاقة بالولاية"
مقارنة بينية أحادية التعمية لتقنيات الكشف عن الميثان - نتائج من تحدي مراقبة الهاتف المحمول لجامعة ستانفورد (Stanford / EDF)21 وصندوق الدفاع عن البيئة	2019	الجميع، ولكن كان التركيز على الإنتاج	• قارن، من خلال اختبار ميداني، 10 طرق تستخدم منصة مركبة أرضية أو جوية لإجراء الكشف. • أظهرت النتائج باستخدام اختبارات التحرير أحادية التعمية المتحكم بها أن التقنيات فعالة بشكل عام في الكشف عن التسربات، مع ستة من التقنيات العشر التي تكشف بشكل صحيح أكثر من 90٪ من التسريبات. ومع ذلك، لم يتمكنوا من تحديد قطعة معينة من المعدات إلا في 50٪ من السيناريوهات. • يحتاج تحديد كمية الانبعاثات إلى تحسين حيث أن معظم التقنيات يمكن أن تقدم فقط تقديرات للانبعاثات العالية جداً.
إطار مكافئ لخفض انبعاثات الميثان للبرامج البديلة لاكتشاف التسرب وإصلاحه25	2019	الجميع، ولكن التركيز على الإنتاج	• تقترح هذه الورقة إطار عمل من خمس مراحل لتوضيح أوجه التشابه عبر تقنيات اكتشاف التسرب الجديدة. يجمع هذا النهج بين الاختبار الخاضع للرقابة ونمذجة المحاكاة والتجارب الميدانية.

اسم الدراسة أو التقرير	السنة	القطاعات ذات الصلة	الاستنتاجات الرئيسية
مراجعة لتقنيات المدى القريب والفحص للتخفيف من انبعاثات الميثان المتسربة في عمليات التنقيب والإنتاج للنفط والغاز22	2019	عمليات التنقيب والإنتاج	• LDAR يقارن ست فئات تقنية للاستخدام في الأدوات المحمولة وأجهزة الاستشعار الثابتة والمختبرات – والمركبات الجوية غير المأهولة (MGLs) الأرضية المتنقلة والطائرات والأقمار الصناعية (UVAs). • تتراوح حدود الكشف الدنيا لفئات التكنولوجيا من <1 جرام في الساعة لأجهزة الطريقة 21 إلى 106 × 7.1 جرام في الساعة للقمر الصناعي GOSAT. • يقدم نهجاً مختلطاً لتأكيد الفحص، يسمى حالياً، يمكن استخدام LDAR. برنامج المراقبة الشامل، إلى المستشعرات الثابتة والمختبرات الأرضية المتنقلة والطائرات بدون طيار والطائرات كتقنيات فحص، ولكن يجب تقييم أدائها في ظل مجموعة من الظروف البيئية والتشغيلية لتحسين فعالية الكشف.
وثيقة التوجيه الفني رقم 2: التسربات الهاربة من المكونات والمعدات23	2017	الجميع	• تسرد خمس تقنيات لفحص التسرب. • تسرد ست تقنيات للقياس المباشر.
إرشادات أفضل الممارسات لإدارة الميثان في قطاع النفط والغاز24	2019	الجميع	• ناقش التقنيات على مستوى أوسع، مثل التنازلية مقابل من التصاعدية، ومقياس القياس. • قدّم توصيات بشأن الأساليب والخطط وتدابير التخفيف، ولكن ليس بشأن تقنيات الكشف أو القياس أو التحديد الكمي.

المراجع

1. Methane Guiding Principles (MGP), Best Practices Guides (2020). Available at: **www.methaneguidingprinciples.org/best-practice-guides/**

2. US National Academies of Science, Engineering and Medicine (NASEM), 'Improving Characterization of Anthropogenic Methane Emissions in the United States', National Academies Press, Washington, DC (2018. Available at: **www.nap.edu/catalog/24987/improving-characterization-of-anthropogenic-methane-emissions-in-the-united-states**

3. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC), 'Evaluation of Innovative Methane Detection Technologies', 2018. Available at: **methane-1.itrcweb.org/**

4. MARCOGAZ, 'Assessment of methane emissions for Gas Transmission and Distribution system Operators'. Available at: **www.marcogaz.org/app/download/8161672063/WG_ME-485-Assessment+of+methane+emissions+for+gas+Transmission+and+Distribution+system+operator.pdf?t=1588852446**

5. National Association of Regulatory Utility Commissioners (NARUC). 'Sampling of Methane Emissions Detection Technologies and Practices for Natural Gas Distribution Infrastructure', an Educational Handbook for State Energy Regulators, 2019.

6. Final Report to US Department of Energy, ARPA-E MONITOR (Methane Observation Networks with Innovative Technology, 2018

7. AR Brandt, GA Heath and D Cooley, 'Methane leaks from natural gas systems follow extreme distributions', Environ Sci Technol, Environ. Sci. Technol. 2016, 50, 22, 12512–12520, doi: 10.1021/acs.est.6b04303

8. D Zavala-Araiza, RA Alvarez, DR Lyon, DT Allen, AJ Marchese, DJ Zimmerle and SP Hamburg, 'Abnormal process conditions required to explain emissions from natural gas production sites', Nature Communications, 8, 14012, doi: 10.1038/ncomms14012, 2017

9. Environmental Defense Fund, PermianMap. Available at: **www.permianmap.org**

10. CS Bell, TL Vaughn, D Zimmerle, SC Herndon, TI Yacovitch, GA Heath, G Petron, R Edie, RA Field, SM Murphy, AM Robertson and J Soltis, comparison of methane emission estimates from multiple measurement techniques at natural gas production pads, Elementa-Science of the Anthropocene 5. DOI: 10.1525/Elementa.266

11. TL Vaughn, CS Bell, TI Yacovitch, JR Roscioli, SC Herndon, S Conley, S Schwietzke, GA Heath, G Petron and D Zimmerle, comparing facility-level methane emission rate estimates at natural gas gathering and boosting stations, Elementa-Science of the Anthropocene 5. DOI: 10.1525/Elementa.257, 2017

12. TL Vaughn, CS Bell, CK Pickering, S Schwietzke, GA Heath, G Pétron, D Zimmerle, RC Schnell and D Nummedal, 'Temporal variability largely explains top-down/bottom-up difference in methane emission estimates from a natural gas production region', Proceedings of the National Academy of Sciences Nov 2018, 115 (46) 11712-1717; DOI: 10.1073/pnas.1805687115

13. RA Alvarez, D Zavala-Araiza, DR Lyon, DT Allen, ZR Barkley, AR Brandt, KJ Davis, SC Herndon, DJ Jacob, A Karion, EA Kort, BK Lamb, T Lauvaux, JD Maasakkers, AJ Marchese, M Omara, SW Pacala, J Peischl, AL Robinson, PB Shepson, C Sweeney, A Townsend-Small, SC Wofsy, and SP Hamburg, 'Assessment of Methane Emissions from the US Oil and Gas Supply Chain', Science DOI: 10.1126/science.aar7204, 2018

14. JA de Gouw, JP Veefkind, E Roosenbrand, B Dix, JC Lin, J Landgraf and PF Levelt, 'Daily Satellite observations of Methane from oil and Gas production Regions in the United States', Scientific Reports, (2020) 10:1379, doi: 10.1038/s41598-020-57678-4

15. Y Zhang, R Gautam, S Pandey, M Omara, JD Maasakkers, P Sadavarte, D Lyon, H Nesser, MP Sulprizio, DJ Varon, R Zhang, S Houweling, D Zavala-Araiza, RA Alvarez, A Lorente, SP Hamburg, I Aben and DJ Jacob, 'Quantifying methane emissions from the largest oil-producing basin in the United States from space', Sci. Adv. 6, eaaz5120 (2020)

16. R Subramanian, LL Williams, TL Vaughn, D Zimmerle, JR Roscioli, SC Herndon, TI Yacovitch, C Floerchinger, DS Tkacik, AL Mitchell, MR Sullivan, TR Dallmann and AL Robinson, 'Methane Emissions from Natural Gas Compressor Stations in the Transmission and Storage Sector: Measurements and Comparisons with the EPA Greenhouse Gas Reporting Program Protocol', Environmental Science & Technology 49(5):3252-3261. DOI: 10.1021/e35060258, 2015

17. DJ Zimmerle, LL Williams, TL Vaughn, C Quinn, R Subramanian, GP Duggan, B Willson, JD Opsomer, AJ Marchese, DM Martinez, and AL Robinson, 'Methane Emissions from the Natural Gas Transmission and Storage System in the United States', Environ Sci Technol 49(15): 9374–9383 doi: 10.1021/acs.est.5b01669, 2015

18. JC von Fischer, D Cooley, S Chamberlain, A Gaylord, C J Griebenow, SP Hamburg, J Salo, R Schumacher, D Theobald and J Ham, 'Rapid, Vehicle-Based Identification of Location and Magnitude of Urban Natural Gas Pipeline Leaks', Environmental Science & Technology 51(7):4091-4099. DOI: 10.1021/acs.est.6b06095, 2017

19. S Conley, G Franco, I Faloona, D.R Blake, J Peischl, and TB Ryerson, 'Methane emissions from the 2015 Aliso Canyon blowout in Los Angeles, CA', Science, 351, 1317-1320, doi: 10.1126/science.aaf2348, 2016

20. 'Potential ways the gas industry can contribute to the reduction of methane emissions' GIE and Marcogaz, June 2019. Available at: **https://www.gie.eu/index.php/gie-publications/methane-emission-report-2019/27786-gie-marcogaz-report-for-the-madrid-forum-potential-way-gas-industry-can-contribute-to-the-reduction-of-methane-emissions/file**

21. AP Ravikumar, S Sreedhara, J Wang, J Englander, D Roda-Stuart, C Bell, D Zimmerle, D Lyon, I Mogstad, B Ratner and AR Brandt, 'Single-blind inter-comparison of methane detection technologies – results from the Stanford/EDF Mobile Monitoring Challenge', Elem Sci Anth, 7(1), p.37. DOI: http://doi.org/10.1525/elementa.373, 2019

22. TA Fox,, TE Barchyn, D Risk, AP Ravikumar, and CH Hugenholtz, 'A review of close-range and screening technologies for mitigating fugitive methane emissions in upstream oil and gas', Environ Res. Lett. 14 053002, 2019

23. Climate and Clean Air Coalition's (CCAC) Oil and Gas Methane Partnership (OGMP) 'Technical Guidance Document Number 2: Fugitive Component and Equipment Leaks', modified March 2017

24. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) 'Best Practice Guidance for Methane Management in the Oil and Gas Sector', January 2020

25. Fox et al, 'A methane emissions reduction equivalence framework for alternative leak detection and repair programs', Elementa, 2019. Available at www.doi.org/10.1525/elementa.369.

METHANE
GUIDING
PRINCIPLES