وزارة البيئة والمياه والزراعة
Ministry of Environment Water & Agriculture

نبراس NPRAS
المنصة الوطنية لاستشراف البحث والابتكار للاستدامة
National Platform of R&I Analytics for Sustainability

المركز الوطني للرقابة على الالتزام البيئي
National Center for Environmental Compliance
المملكة العربية السعودية

توجهات الابتكار في قطاع البيئة

مكافحة التلوث والامتثال

الكلمات الافتتاحية

م. عبدالرحمن بن عبد المحسن الفضلي

معالي وزير البيئة والمياه والزراعة

لقد جاء إطلاقُ اللجنة العليا للبحث والابتكار في عام 2021 م إيماناً من قيادة المملكة بأهمية هذا القطاع، وإكمالاً لمسيرة العمل والتنفيذ لبرامج رؤية السعودية 2030 وأهدافها، التي من ضمن مستهدفاتها الرئيسة دعم البحث العلمي وتمكين الابتكار لبناء اقتصاد معرفي وتحقيق التنوع الحقيقي لموارد الدولة. إن أولويات الوزارة تشملُ تمكينَ الشركاء في منظومة البحث والتطوير والابتكار في تحفيز الابتكار وتوطين التقنيات لتقديم الحلول الفعالة في قطاعات الوزارة، باستخدام أحدث التقنيات مثل تقنيات المياه والتقنيات الحيوية وتقنيات الذكاء الاصطناعي و"إنترنت" "الأشياء".

م. منصور بن هلال المشيطي

معالي نائب وزير البيئة والمياه والزراعة

تحظى منظومة البيئة والمياه والزراعة باهتمام ودعم لا محدود من قيادتنا الرشيدة-أيدها الله- ضمن رؤية السعودية 2030 والتي أحدثت نقلات تحولية كبرى في جميع قطاعات المنظومة، وأحدثت أثراً ملحوظاً في تعزيز الاستدامة والحفاظ على مواردنا الحيوية. ونحن في وزارة البيئة والمياه والزراعة، إذ نقطف اليوم ثمار تلك النجاحات، فإننا نتطلع إلى المستقبل بكل ثقة من خلال تبني التقنيات الحديثة وتعزيز الممارسات والحلول المبتكرة في منظومة البيئة والمياه والزراعة، لزيادة الكفاءة وتحفيز الإنتاجية، مما سيكون له أبلغ الأثر في تحقيق المستهدفات الوطنية الطموحة.

الكلمات الافتتاحية

د. أسامة بن إبراهيم فقيها

وكيل وزارة البيئة والمياه والزراعة للبيئة

أولت حكومة المملكة العربية السعودية أهمية قصوى لحماية البيئة والموارد الطبيعية، بوصفها إحدى الركائز الرئيسة الثلاث لتحقيق التنمية المستدامة، ولهذا الغرض أعتمدت الإستراتيجية الوطنية للبيئة، والتي تضمنت 64 مبادرة للارتقاء بجميع النطاقات البيئية وإعادة هيكلة قطاعها، وإنشاء مراكز بيئية مختصة، وصندوق للبيئة يعد الأكبر في المنطقة؛ لتحفيز الممارسات والتقنيات الصديقة للبيئة. واعتماد نظام بيئي جديد متوافق مع أفضل الممارسات العالمية، ونظام آخر لإدارة النفايات مبني على أسس الاقتصاد الدائري، ونظام الأرصاد.

كما أطلقت حكومتنا الرشيدة مبادرة السعودية الخضراء، التي تضع ضمن مستهدفاتها زراعة 10 مليارات شجرة في جميع أنحاء المملكة، أي ما يعادل إعادة تأهيل 40 مليون هكتار من الأراضي، واستعادة المساحات الخضراء الطبيعية في المملكة وفق خارطة الطريق المعتمدة، والتي تسهم في استعادة الوظائف البيئية الحيوية، والحد من العواصف الغبارية والرملية وتحسين جودة الهواء. كما تستهدف هذه المبادرة حماية 30% من المناطق البرية والبحرية في المملكة، وإدارتها وفق أفضل الممارسات الدولية.

إن الحفاظ على البيئة محلياً وعالمياً يستلزم تعاضد جميع الجهات ذات العلاقة، والتي من ضمنها المؤسسات العلمية والأكاديمية بالتنسيق مع الجهات الحكومية المتخصصة، وذلك بتوفير القاعدة المعرفية والبحث العلمي في وضع التوجهات المرتبطة بالقضايا البيئية المتنوعة، مثل: التغير المناخي، والتنوع الأحيائي، واستصلاح الأراضي المتدهورة. ولأن مجال البيئة مترابط وواسع، فهو بحاجة إلى التقنيات والابتكار للاستفادة منها في العمل البيئي الوطني، للنهوض بهذا القطاع والتغلب على تحدياته.

وتعد التقنيات عامل تمكين حاسم لتحقيق مستهدفات الاستراتيجية الوطنية للبيئة، والتي تستلزم أساليب مبتكرة لرصد النظم البيئية، والحماية من الرعي الجائر والتصحّر، وتحسين ممارسة إدارة النفايات، ورصد التلوث والحد منه، وتحسين أنظمة الرصد والتنبؤ بالظواهر والتقلبات الجوية. وستسهم هذه التقنيات في تعزيز حماية بيئة المملكة وتنوّعها الأحيائي، وستساعد التقنيات الجاهزة للاستخدام والمطبقة في أماكن أخرى حول العالم في تقديم حلول فعالة، تسهم في تحقيق الاستدامة البيئية، ومستهدفات حماية البيئة ضمن رؤية السعودية 2030.

د.عبدالعزيز بن مالك المالك

وكيل وزارة البيئة والمياه والزراعة للبحث والابتكار

أولت المملكة العربية السعودية اهتماماً متزايداً بتعزيز منظومة البحث والتطوير والابتكار، إدراكاً منها للدور المحوري الذي تلعبه التقنيات الناشئة في تعظيم القيمة الاقتصادية للقطاع البيئي، ورفع كفاءة الاستفادة من الموارد، بما يضمن استدامتها للأجيال القادمة. ويعكس هذا التوجه الاستراتيجي طموحات المنظومة الوطنية للبحث والتطوير والابتكار للعقدين القادمين، والتي تضع استدامة البيئة وتأمين الاحتياجات الأساسية، من أمن غذائي ومائي، على رأس أولوياتها، مدفوعةً بمستهدفات طموحة للوصول إلى الحياد الصفري بحلول عام 2060، ورفع سعة إنتاج الطاقة المتجددة إلى 50% بحلول عام 2030.

وفي ظل التحولات المتسارعة التي يشهدها العالم، تبرز ضرورة تسريع وتيرة الابتكار البيئي ليس فقط كخيار استراتيجي، بل كركيزة أساسية لتمكين المبادرات الوطنية الكبرى مثل "مبادرة السعودية الخضراء"، وتحويل التحديات المناخية إلى فرص استثمارية واعدة تسهم في تنويع الاقتصاد الوطني.

وانسجاماً مع هذا الحراك، يأتي هذا التقرير كأحد المخرجات النوعية للمنصة الوطنية لاستشراف البحث والابتكار للاستدامة "نبراس" (NPRAS)، ليقدم قراءة تحليلية معمقة للمشهد العالمي والمحلي، حيث يرصد التقرير التوجهات الدولية لقطاع البحث والتطوير والابتكار في المجالات البيئية، وأبرز التقنيات الناشئة والاستثمارات الخضراء، بما يدعم صناع القرار والمستثمرين ببيانات دقيقة وموثوقة، تضمن توجيه الجهود الوطنية نحو المجالات التي تضمن للمملكة الاستفادة القصوى من ذلك الزخم.

ونؤكد في وزارة البيئة والمياه والزراعة أن تكامل الأدوار بين الجهات الحكومية، والقطاع الخاص، والمجتمع البحثي، يمثل حجر الزاوية لتحقيق هذا التحول المنشود. نحن ملتزمون بمواصلة تطوير بيئة جاذبة لتبني الابتكارات، ورفع جاهزية القطاعات لاستيعاب التقنيات الحديثة، وصولاً إلى منظومة بيئية مرنة ومستدامة، وأكثر قدرة على مواجهة تحديات المستقبل، بما يحقق مستهدفات رؤية السعودية 2030.

الكلمات الافتتاحية

علي بن سعيد الغامدي

الرئيس التنفيذي للمركز الوطني للرقابة على الالتزام البيئي

في ظل ما يشهده القطاع البيئي في المملكة من تحول نوعي، تتواصل جهود منظومة البيئة بتكامل أدوارها التنظيمية والتنفيذية والتقنية، بما يعزز كفاءة العمل ويرفع مستوى الامتثال، انسجامًا مع مستهدفات رؤية السعودية 2030.

وانطلاقًا من هذا التكامل، يأتي هذا التقرير ليعكس توجهات المنظومة نحو تبني الابتكار وتوظيف التقنيات الحديثة في مواجهة التحديات البيئية، مستندًا إلى تحليل البيانات، واستشراف الاتجاهات، وتطوير أدوات داعمة لاتخاذ القرار، كما يجسد التقرير دور المعرفة بوصفها ركيزة أساسية في تحسين الأداء البيئي ورفع القدرات الوطنية لتحقيق الاستدامة البيئية.

وفي هذا الإطار، يضطلع المركز بدورٍ ممكنٍ ضمن منظومة البيئة والمياه والزراعة، من خلال تطوير الأطر التنظيمية، وتعزيز أدوات الرقابة والرصد البيئي، وتمكين الامتثال البيئي عبر حلول قائمة على البيانات والتقنيات الناشئة، بما يسهم في تحقيق التكامل المؤسسي ورفع كفاءة العمل البيئي على مستوى المملكة.

كما يؤكد هذا التقرير أهمية الشراكة بين مختلف الجهات ذات العلاقة، وتكامل الجهود بين القطاعين العام والخاص، إضافة إلى دور المجتمع في دعم المبادرات البيئية، بما يعزز من الاستدامة ويحقق الأثر الإيجابي المنشود.

ختامًا، يمثل هذا التقرير خطوة ضمن مسار مستمر لتطوير العمل البيئي، قائم على الابتكار والتكامل، ويعكس هذا التزام المركز ببناء مستقبل أكثر استدامة، قائم على المعرفة والتقنية والشراكة في ظل دعم القيادة الرشيدة حفظها الله.

المنصة الوطنية لاستشراف البحث والابتكار للاستدامة "نبراس" (2/1)

نبراس
NPRAS
المنصة الوطنية لاستشراف البحث والابتكار للاستدامة
National Platform of R&I Analytics for Sustainability

وضعت وزارة البيئة والمياه والزراعة البحث والابتكار في مقدمة اهتماماتها للارتقاء بقطاعاتها وضمان استدامتها مستقبلاً، من خلال خطتها التنفيذية للبحث والابتكار ،التي تعمل على توجيه جهود البحث والابتكار بفعالية نحو الأولويات الوطنية، وتعزيز الاستدامة لخدمة مستهدفات رؤية السعودية 2030. لذا أطلقت مؤخراً المنصة الوطنية لاستشراف البحث والابتكار للاستدامة "نبراس" التي تجمع بيانات دقيقة وحديثة مرتبطة بقطاعات البيئة والمياه والزراعة، وتحللها باستخدام أدوات تحليلية متقدمة مثل تحليل البيانات الضخمة، وأدوات الذكاء الاصطناعي، والذكاء الاصطناعي التوليدي (Generative AI)، والذكاء الاصطناعي التوكيلي (Agentic AI)، وأدوات تحليل السناريوهات، وتعتمد نبراس على أكثر من (10) آلاف مصدر محلي وعالمي تشمل قواعد بيانات للمنشورات علمية وبراءات الاختراع وتقارير قطاعية وأخبار تقنية، وترصد أكثر من (100) مليون نقطة بيانات تحدث يومياً، لتقدم رؤى دقيقة تدعم اتخاذ قرارات البحث والابتكار في قطاعات البيئة والمياه والزراعة.

تُعد منصة "نبراس" نموذجاً فعالاً لتحويل البيانات إلى رؤى ذات أثر وطني ملموس. إذ تدعم القادة وصناع القرار وصناع السياسات لاتخاذ قرارات مبنية على البيانات وتوفر رؤى استراتيجية تسهم في تحسين سياسات تبني الابتكار وتحدد التقنيات الواعدة لمواجهة التحديات الوطنية. كما تزود المستثمرين ببيانات تساعدهم في تقليل مخاطر الاستثمار واكتشاف فرص متوافقة مع الأولويات الوطنية، وتفتح الباب أمام المبتكرين ورواد الأعمال لفهم الاحتياجات القطاعية وفرص التمويل. وتُمكن المنصة الباحثين والعلماء من خلال توفير شبكة بيانات لأبرز العلماء وتحديد الفجوات والأولويات البحثية، مما يعزز التعاون العلمي وتطبيق نتائج الأبحاث.

صناع القرار وصناع السياسات

- قرارات مدعومة بالبيانات والتحليل
- رؤى استشرافية لتحسين السياسات
- تحديد التقنيات الواعدة للتحديات الوطنية

المستثمرون

- بيانات تقلل مخاطر الاستثمار
- فرص استثمارية متوافقة مع الأولويات الوطنية
- الوصول إلى بيانات المشاريع ذات الأثر

المبتكرون ورواد الأعمال

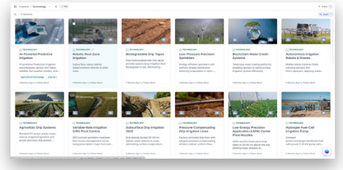
- الوصول لاحتياجات القطاعات الوطنية
- بيانات فرص الشراكات والتمويل للتقنيات الواعدة
- إبراز الحلول المبتكرة

الباحثون والعلماء

- بيانات أبرز العلماء والباحثين
- تحديد الفجوات والأولويات البحثية
- بيانات تعزز التعاون لتطبيق نتائج الأبحاث

المنصة الوطنية لاستشراف البحث والابتكار للاستدامة "نبراس" (2/2)

تقدم "نِبراس" حزمة متكاملة من الحلول تشمل الوصول للمنصة وتقديم خدمات نوعية، حيث تقوم المنصة برصد واستشراف توجهات التقنيات عبر المتابعة المستمرة لأحدث الابتكارات والتوجهات العالمية وربطها باحتياجات القطاع في المملكة، كما تدعم اتخاذ القرار من خلال توفير لوحات معلومات ومنهجيات تحليل تساعد الجهات المختصة في تقييم الحلول التقنية واختيار الأنسب منها. وتعمل المنصة أيضًا على نشر المعرفة وإعداد التقارير عبر تقارير تحليلية وموجزات معرفية تسهم في رفع الوعي حول التقنيات وأثرها وفرص تبنّيها، إضافة إلى تعزيز التعاون العلمي من خلال توفير مساحة للتواصل بين الخبراء والباحثين والجهات ذات العلاقة لتعزيز العمل المشترك وتبادل المعرفة.



كما تشمل خدمات نبراس النوعية تطوير خرائط طريق لتبني التقنيات بالتعاون مع الجهات لتساعدها على تبني حلول تقنية فعالة بتكاليف أقل، إلى جانب نشر تقارير قطاعية دورية تسلط الضوء على أبرز التقنيات والتوجهات والفرص المستقبلية، وإصدار موجز ابتكار شهري يتابع أهم المستجدات التقنية عالمياً ومحلياً بطريقة مبسطة وعملية، فضلاً عن تقديم ورش عمل معرفية وتدريبية تدعم نقل المعرفة وتوضيح التطبيقات العملية للتقنيات وتعزيز التعاون التقني والابتكاري.

كما أصدرت المنصة أول تقاريرها خلال شهر سبتمبر، وهو تقرير "**توجهات الابتكار في قطاع المياه: معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها**". واستعرض التقرير أبرز توجهات الابتكار التقني، وسياسات دعم الابتكار، وفرص الاستثمار في التقنيات الناشئة، ليشكّل مرجعًا استراتيجيًا لصنّاع السياسات وقادة القطاع والمستثمرين وروّاد الأعمال. كما تضمّن التقرير مرئيات لعدد من قيادات القطاع الخاص، بما يعكس الدور المحوري للشركات الوطنية ويمنحه بُعدًا تطبيقيًا متصلاً بواقع السوق. وإلى جانب ذلك، قدّم التقرير رؤى مستندة إلى البيانات والمقابلات مع قادة الابتكار، لتكون إطارًا عمليًا داعمًا لجهود تطوير الابتكار في قطاع المياه، وبما ينسجم مع مستهدفات رؤية السعودية 2030.

وبذلك تعد منصة "نبراس" الذراع الاستشرافي للوزارة لتحويل البيانات إلى رؤى تدعم اتخاذ القرار في البحث والابتكار بهدف الاسهام في تعزيز تنمية قطاعات البيئة والمياه والزراعة، ودعم الأمنين المائي والغذائي والاستدامة البيئية بما ينسجم مع الأولويات الوطنية للبحث والتطوير والابتكار.

نبذة عامة حول التقرير

يتطلب التوجه الاستراتيجي لنظام الابتكار القطاعي الالتزام بالمراقبة المستمرة والشاملة للتوجهات الرئيسة في مجال التقنية والابتكار، فهو أمر أساسي لتمكين أصحاب المصلحة على مستوى القطاع من تعديل سياساتهم وخططهم الاستراتيجية استجابةً للمشهد العالمي المعقد والتنافسي على المستويين التقني والاقتصادي على حدٍ سواء. ولدعم هذه الجهود أنشأت وزارة البيئة والمياه والزراعة منصة نبراس، وهي منصة متخصصة صُممت لاستخدام أدوات المراقبة المتقدمة والمنهجيات التحليلية، حيث تهدف المنصة إلى توجيه منظومة الابتكار ضمن قطاعات البيئة والمياه والزراعة، وذلك بتحديد التقنيات ومجالات الابتكار ذات الإمكانيات العالية للتأثير على المستوى القطاعي وترتيب أولوياتها.

ويأتي هذا التقرير جزءًا من سلسلة تقارير دورية قطاعية تصدرها منصة نبراس، بهدف تتبع توجهات الابتكار وتحليلها في قطاعات البيئة والمياه والزراعة. ويركز هذا التقرير على قطاع البيئة، ويقدم دراسة مفصلة لمجموعات التقنيات الستة ذات الأولوية والتي تظهر إمكانات قوية على امتداد سلسلة القيمة للقطاع. كما يقدم هذا التقرير مرئيات متصلة بأحدث التوجهات، والتطورات الناشئة، والفرص الرئيسة والتي من شأنها الإسهام في تشكيل مستقبل البيئة.

أهداف سلسلة التقارير القطاعية:

1. **توعية** أصحاب المصلحة بالتقنيات الناشئة ومجريات السوق، وأفضل الممارسات والسياسات العالمية المتعلقة بالابتكار في قطاعات البيئة والمياه والزراعة.

2. **تسريع جهود توطين تقنيات البيئة** ونشرها وذلك بتسليط الضوء على التقنيات الأكثر جاهزية، والتي من شأنها أن تعزز من كفاءة قطاع البيئة واستدامته.

3. **دعم اتخاذ القرارات،** وذلك بتزويد صانعي السياسات وقادة القطاع والمستثمرين برؤى قائمة على البيانات لتوجيه مبادرات الابتكار.

يُعدّ هذا التقرير جزءًا من سلسلة تضم خمسة تقارير يصدرها نبراس حول قطاع البيئة. ويهدف إلى تحديد التقنيات الرائجة التي تسهم في معالجة التحديات القطاعية في المملكة العربية السعودية.

الفهرس

1

كلمات افتتاحية 02
المنصة الوطنية لاستشراف البحث والابتكار للاستدامة "نبراس" 06
نبذة عامة حول التقرير 10
الفهرس 13

2

الملخص التنفيذي 14
المقدمة 16
نطاق التقرير 18
المنهجية 28

3

مجموعة التقنية ذات الأولوية 30
3.1 مكافحة التلوث والامتثال 32
3.1.1 التقنيات البارزة (قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي) 42

4

رؤى القادة 54

5

الملحق 62
بطاقة تقييم معايير الاختيار 80
قاموس المصطلحات 32
شركاؤنا 90

الملخص التنفيذي

يتناول هذا التقرير مستقبل الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية من خلال تحليل مجموعة التقنية ذات الأولوية ومستوى مواءمتها للاستراتيجيات الوطنية. كما أنه يقدم لأصحاب المصلحة المرئيات القابلة للتنفيذ حول التحديات والفرص والمسارات التقنية التي يمكن أن تعزز الإنتاجية والمرونة والاستدامة عبر سلسلة القيمة البيئية.

واستنادًا إلى ما سبق، فإن التقرير يعتمد على منهجية فاعلة تتكون من ثلاث مراحل متوافقة مع أفضل الممارسات العالمية، ومن أبرزها: إطار عمل منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية للحوكمة الاستباقية (OECD)، مما يضمن فاعلية نتائج التقرير وشموليتها، وإمكانية تطبيقها لتعزيز الابتكار وتطوير السياسات. وتتمثل المرحلة الأولى من إطار عمل منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية في المراقبة المنهجية، إذ تتبع منصة نبراس ما يزيد عن عشرة آلاف مصدر من بينها: المنشورات العلمية، وبراءات الاختراع وتقارير القطاع والأخبار، مع أكثر من مئة مليون نقطة بيانات تُحدث مرتين يوميًا لرصد المؤشرات الدالة على أهم التقنيات، بينما تمتاز المرحلة الثانية بتحليل توجهات التقنيات، إذ تُقيَّم التقنيات من حيث: النضج، ومستوى النضج في الابتكار، ومدى ملاءمتها لمواجهة التحديات الوطنية في قطاع البيئة. ويُحدّ التكرار من خلال جمع الابتكارات المشابهة؛ إذ تُصنف الابتكارات المتقاربة في الفكرة أو الوظيفة ضمن مجموعات موحدة لتفادي تكرار التقييم أو إدراج حلول متطابقة، مما يسهم في تحسين دقة التحليل وكفاءته. وفي المرحلة النهائية تُقيّم وتُختار التقنيات ذات الأثر المرتفع والتي تشهد تطورات سريعة، إذ تخضع لفحص دقيق لتقييم مدى أهميتها، مما يضمن اتخاذ قرارات مدروسة فيما يتعلق بالسياسات. كما يُستشار خبراء البيئة للتحقق من صحة التقنيات المستخدمة، وتقديم مرئيات عملية حول تبنيها ومستوى أهميتها، والتأكد من أن التقرير يعكس الأدلة القائمة على البيانات والخبرات في القطاع.

ويعتمد تقرير توجهات الابتكار في قطاع البيئة على تقرير خارطة طريق تبني التقنيات في قطاع البيئة في المملكة العربية السعودية، والذي سيسلط الضوء على القطاعات التقنية الرئيسة في كل مجموعة من مجموعات التقنيات ذات الأولوية ، مع الإشارة إلى التقنيات المتصلة في كل مجال تقني من ضمن مجموعات التقنيات ذات الأولوية. وسيساعد الرسم البياني في اختيار أفضل التقنيات، حيث تُقيّم كل منها بناءً على درجات الابتكار والاهتمام (يرجى الاطّلاع على الشكل [4]. سيركز هذا التقرير على مجموعة تقنية ذات أولوية (مكافحة التلوث والامتثال)، من خلال تسليط الضوء على تقنية رئيسة مختارة ضمن هذه المجموعة، وهي: قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي.

ويتناول التقرير في قسم "التقنيات البارزة" الرؤى التفصيلية لكل تقنية مختارة، مع تسليط الضوء على أهم الجهات الرئيسة الفاعلة، ومستوى جاهزية القدرات (CRL)، ومستوى جاهزية التقنية (TRL)، ومزايا التقنية وعيوبها، والمؤشرات والحقائق الرئيسة، والوضع الحالي، وتبني التقنية، وآفاق التقنية، ودراسات الحالة المحلية.

كما تستند معايير الاختيار المستخدمة لتقييم التقنيات الأربع إلى جدول التقنيات الموضح في قسم الملحق. ويشمل ذلك معيارين رئيسين وهما:

مستوى جاهزية التقنية (TRL)

درجة تسليط الضوء*

ختامًا، يتضمن هذا التقرير الرؤى التي جُمعت من المقابلات المجراة مع قادة الابتكار، مما يوفر لمحة عامة حول الأولويات الرئيسة، كما تمثل هذه الرؤى مجتمعة إطارًا توجيهيًا لصانعي السياسات وقادة القطاع والمستثمرين، حيث تمكنهم من تعزيز الابتكار والنهوض بالإدارة المستدامة لقطاع البيئة بما يتماشى مع رؤية السعودية 2030.

*درجة مركبة تشمل حجم الأبحاث الحالي [عدد براءات الاختراع والمنشورات العلمية خلال عام 2024] ومعدل النمو [2019–2024 معدل النمو السنوي المركب لبراءات الاختراع والمنشورات العلمية] فيما يتعلق بالتقنيات الرائدة ذات الأولوية. وتشير الدرجة 100 إلى أن التقنية تحتل المرتبة الأولى بين 15 تقنية مختارة من حيث حجم البحث ومعدل النمو. في حين تشير النتيجة 0 إلى أنها تحتل المرتبة الأخيرة في كلا المجالين.

المقدمة

يشهد قطاع البيئة في المملكة العربية السعودية اليوم تقاطعًا بين التحديات البيئية الحرجة والفرص التقنية غير المسبوقة. كما تواجه النظم البيئية على الصعيد العالمي ضغوطًا متزايدة بسبب فقدان التنوع الحيوي، وتدهور الأراضي، وتراكم النفايات وتغير المناخ؛ مما يهدد استدامة الموارد الطبيعية ومرونة النظم البيئية. وتتفاقم هذه التحديات في المملكة بشكل أكبر بفعل اتساع المساحات القاحلة، ومحدودية موارد المياه والتربة، والحاجة إلى الإدارة المستدامة للتنوع الحيوي والنظم البيئية. ومع ذلك تمثل هذه التحديات فرصًا كبيرة للابتكار، حيث تمكن التقنيات الناشئة المملكة من تعزيز الإدارة البيئية، بدءًا من أنظمة مراقبة النظام البيئي -التي توفر رؤى آنية حول التنوع الحيوي وصحة الموائل- وانتهاءً بالحلول المتقدمة لإدارة النفايات والاقتصاد الدائري، بالإضافة إلى تقنيات الري المبتكرة للأشجار والنباتات البرية، حيث تدعم هذه التقنيات اتخاذ القرارات القائمة على البيانات، والنمذجة البيئية التنبؤية، وتحسين كفاءة الموارد، كما تساهم في حماية رأس المال الطبيعي والحد من الآثار البيئية.

وفي إطار الأهداف الوطنية للمملكة العربية السعودية، **تهدف مبادرة السعودية الخضراء إلى ضمان أن يأتي 50% من توليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة بحلول عام 2030**، وذلك ضمن جهود أوسع لتعزيز الاستدامة البيئية وخفض الانبعاثات الكربونية. ويُستكمل ذلك باتخاذ إجراءات لحماية 30% من أراضي المملكة ومناطقها البحرية، إلى جانب مبادرات لزراعة 10 مليارات شجرة مما يسهم في تعزيز الاستدامة البيئية بشكل أكبر. ويستكمل ذلك بتدابير لحماية 30% من المناطق البرية والبحرية في المملكة. كما يتناول التقرير الوضع الحالي للتقنيات ضمن الفئات ذات الأولوية في مجال التقنيات البيئية، ومستوى نضج القدرات الوطنية، ومستويات الجاهزية، والجهات الرئيسة الفاعلة عالميًا، والمسارات المحتملة لاعتمادها على المستوى المحلي، كما يقدم البيانات حول الآثار الاقتصادية والبيئية المتوقعة لتطبيق هذه التقنيات، مما يوفر إطارًا توجيهيًا لدعم صناع السياسات والمستثمرين والباحثين والمبتكرين في تبني الحلول البيئية المبتكرة والمستدامة.

ويمكن للمملكة استعادة منظوماتها البيئية وحمايتها، وتحقيق الإدارة المستدامة للموارد، وأن تصبح نموذجًا عالميًا للإشراف البيئي، من خلال التركيز على الابتكار والتخطيط الاستراتيجي والشراكات الفاعلة، والتي تتماشى مع أهداف رؤية السعودية 2030 للتنمية المستدامة وحماية البيئة وتعزيز جودة الحياة في المجتمع.

نطاق التقرير (4/1)

يركز هذا التقرير على النهوض بقطاع البيئة في المملكة العربية السعودية من خلال دراسة مجموعة تقنية ذات أولوية: " **ومكافحة التلوث والامتثال** ". إذ يستعرض التقرير أهم الجهات الرئيسة الفاعلة، ومستوى جاهزية القدرات، ومستوى جاهزية التقنية، ومزايا التقنية وعيوبها، والمؤشرات والحقائق الرئيسة، والوضع الحالي، والتوطين، والمسار المستهدف، وأوجه عدم اليقين الرئيسة، ودراسات الحالة المحلية.

ويقدم التقرير المرئيات القابلة للتنفيذ لتوجيه الجهات المعنية في تبني الحلول التقنية المتطورة والتي تدعم أهداف المملكة المتمثلة في المستقبل البيئي المرن والمبتكر.

الجمهور المستهدف

يهدف هذا التقرير إلى دعم أصحاب المصلحة في النهوض بالقطاع البيئي في المملكة العربية السعودية واستدامته على المدى الطويل:

القادة وصناع القرار
المسؤولون عن اتخاذ القرارات التي تؤثر على التوجهات في قطاعات البيئة والمياه والزراعة

صانعو السياسات
المسؤولون عن تطوير السياسات لضمان توافق الاستراتيجيات الوطنية في قطاعات البيئة والمياه الزراعة مع رؤية السعودية 2030 والمعايير العالمية

المستثمرون
الجهات الممولة للمشاريع التقنية في قطاعات البيئة والمياه والزراعة

الباحثون والعلماء
المتخصصون في البحث العلمي والذين يسهمون في تطوير الحلول والممارسات المستدامة في قطاعات البيئة والمياه والزراعة

المبتكرون ورواد الأعمال
الشركات الناشئة والمبتكرون الذين يقدمون حلولاً فاعلة لمواجهة التحديات

ويوضح التقرير التطورات الرئيسة على مستوى مجموعات التقنيات الأربع ذات الأولوية، ويقدم البيانات الرئيسة حول أثرها الاقتصادي والبيئي المحتمل، مع تسليط الضوء على الحاجة إلى الاستثمارات المستهدفة والسياسات الداعمة. وتتماشى هذه المرئيات مع أهداف رؤية السعودية 2030، مما يعزز أهمية اعتماد الحلول المبتكرة والتخطيط الاستراتيجي لتعزيز الإنتاجية الزراعية والاستدامة والأمن الغذائي.

نطاق التقرير (4/2)

المواءمة مع الأهداف الوطنية

تمثل المواءمة بين الابتكار البيئي والأهداف الاستراتيجية الوطنية حجر الزاوية للتنمية المستدامة، وخاصةً في السياق التحولي لإطار رؤية المملكة 2030. وتشمل الأجندة البيئية الطموحة للمملكة: استعادة المنظومة الشاملة، والإدارة المستدامة للموارد، ومبادئ الاقتصاد الدائري والتي تهدف مجتمعة إلى تنويع الاقتصاد مع الحفاظ على التراث الطبيعي للأجيال القادمة. والتزمت المملكة العربية السعودية بتحقيق 50% من طاقتها الكهربائية من المصادر المتجددة بحلول عام 2030، وصافي انبعاثات غازات الدفيئة الصفرية بحلول عام 2060 مما يشير إلى الطموحات البيئية غير المسبوقة، وتزداد أهمية هذه المواءمة الاستراتيجية مع وضع المملكة العربية السعودية كدولة رائدة عالميًا في مجال الإشراف البيئي من خلال مبادرات، مثل: مبادرة السعودية الخضراء ومبادرة الشرق الأوسط الأخضر. وفي هذا السياق الاستراتيجي، تبرز هذه المجموعة التقنية ذات الأولوية كركيزة أساسية لتحقيق هذه الأهداف البيئية الوطنية:

مكافحة التلوث والامتثال

تشمل مراقبة التلوث والامتثال التقنيات والأنظمة المصممة لمنع التلوث البيئي ومراقبته والتخفيف من حدته وضمان الامتثال التنظيمي المتعلق به. ويشمل ذلك حلولًا للوقاية من تلوث الهواء والتخفيف من حدته (مثل تقنيات التحكم في الانبعاثات وأنظمة إدارة جودة الهواء)، **ومنع تلوث المياه والتخفيف من حدته** (مثل تقنيات المعالجة المتقدمة والتحكم في التصريف)، **ومنع تلوث التربة ومعالجته** (مثل الكشف عن التلوث وطرق استعادة التربة). وتشمل هذه المجموعة أيضًا **تقنيات مراقبة التلوث**، بما في ذلك الاستشعار في الوقت الفعلي، والمراقبة عن بعد، ومنصات تحليل البيانات التي تتبع مستويات الملوثات وتدعم إعداد التقارير التنظيمية. وتساهم هذه التقنيات مجتمعةً في توفير الحماية البيئية الفاعلة، والامتثال للمعايير، واتخاذ القرارات المدروسة لحماية النظم البيئية والصحة العامة.

نطاق التقرير (4/3)

التحديات والفرص المتاحة في قطاع البيئة

يقدم الشكل رقم (2) لمحة تحليلية حول التحديات البيئية الرئيسة والفرص المقابلة لها في المراحل الخمس. ويعمل هذا الإطار كأداة تشخيصية تحدد الجوانب التي تتطلب اهتمامًا فوريًا، وتسلط الضوء على الجوانب التي يمكن أن تُحدث فيها التدخلات التقنية والسياسية أكبر تأثير بيئي واقتصادي. ويواجه القطاع البيئي في المملكة تحديات رئيسة، مثل: فقدان التنوع الحيوي، ومكافحة التصحر، والإفراط في الرعي، وتراكم النفايات، وزيادة تلوث الهواء والمياه، بالإضافة إلى محدودية دقة التوقعات المناخية وآثار تغير المناخ العالمي. وتخلق هذه المشكلات فرصًا للنهوض بالقطاع من خلال التقنيات والممارسات المستدامة: كاستعادة النظام البيئي، وتحسين إدارة المراعي، وتوسيع نطاق إعادة التدوير، وتعزيز مراقبة التلوث، وتعزيز أنظمة التنبؤ بالمناخ. وتعد هذه الجهود ضرورية لتحقيق أهداف الاستدامة البيئية في رؤية السعودية 2030. فمن خلال تحديد هذه التحديات والفرص بشكل منهجي، يوفر الإطار أساسًا لاتخاذ القرارات الاستراتيجية، وتمكين صناع السياسات والباحثين ومسؤولي التخطيط البيئي من مواءمة أهداف الاستدامة الوطنية مع التطبيقات التقنية العملية، مما يضمن أن تكون جهود الابتكار مدفوعة بالبيانات ومستهدفة ومستجيبة للأولويات البيئية للمملكة.

ويوضح الشكل رقم [2] التحديات والفرص الحالية للقطاع البيئي، وينقسم إلى خمس مراحل رئيسة في سلسلة القيمة البيئية*: **"التنوع الأحيائي" و "الأراضي والنباتات والتصحر" و "إدارة النفايات" و "مكافحة التلوث والامتثال" و "الأرصاد الجوية"**

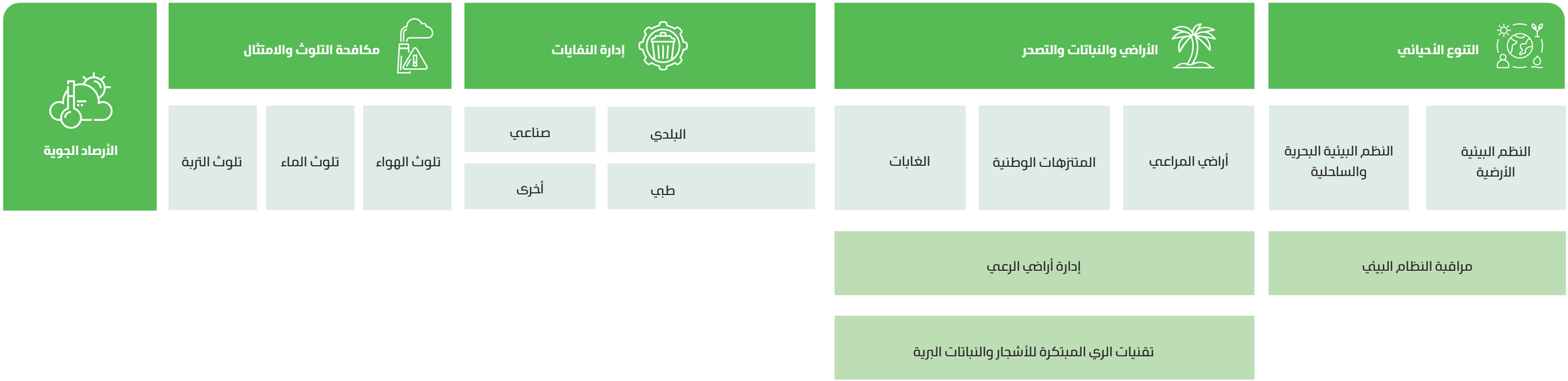
التنوع الأحيائي	الأراضي والنباتات والتصحر	إدارة النفايات	مكافحة التلوث والامتثال	الأرصاد الجوية
استعادة النظم البيئية البرية وتعزيز استدامتها	الحماية من الرعي الجائر	تقليل حجم المخلفات الناتجة	خفض مستويات الانبعاثات	تحسين التنبؤات والقدرات المناخية الإنذار المبكر
استعادة النظم البيئية البحرية والساحلية وتعزيز استدامتها	تعزيز ممارسات التخضير المستدامة	تحسين معالجة النفايات	زيادة فاعلية مراقبة جودة الهواء	زيادة أتمتة بيانات وتقارير الأرصاد الجوية
زيادة حماية أغف مناطق التنوع البيولوجي	الحماية من التصحر وتآكل التربة والجفاف	تقليل جمع النفايات المختلطة	زيادة القدرة على مراقبة الامتثال البيئي	زيادة التغطية الجغرافية
زيادة فاعلية الرصد والتقييم	التخفيف من انتشار الأنواع الغازية والأمراض النباتية	تحسين مستويات السلامة من النفايات الخطرة	تحسين مراقبة تلوث التربة	زيادة خدمات الأرصاد الجوية المقدمة
زيادة فاعلية الحفظ	زيادة فاعلية رصد الأراضي والإدارة المستدامة	زيادة القدرة على مراقبة الامتثال البيئي	زيادة فاعلية مراقبة جودة المياه	تحسين تقنيات التنبؤ والمحاكاة

" الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية، خارطة طريق تبني التقنيات" 2024

نطاق التقرير (4/4)

يعرض الشكل رقم (3) الإطار التقني لقطاع البيئة كما هو موضح في خارطة طريق تبني التقنيات*. حيث يمثل المستوى الأفقي الأول في المخطط المراحل الرئيسة في سلسلة القيمة البيئية، مما يتماشى مع تلك المقدمة في الشكل السابق. ويقسم المستوى الأفقي الثاني مكونات المراحل إلى عناصر. ويسلط المستوى الثالث الضوء على المجموعات التقنية ذات الأولوية: "مراقبة النظام البيئي" و"إدارة أراضي الرعي" و"تقنيات الري المبتكرة للأشجار والنباتات البرية". بالإضافة إلى تضمين "إدارة النفايات ومكافحة التلوث والامتثال والأرصاد الجوية" في الإطار باعتبارها مرحلة رئيسة ومجموعة تقنية ذات أولوية، وبالتالي ستُدرس بمزيد من التفصيل في هذا التقرير. وعليه، سيتناول هذا التقرير "مكافحة التلوث والامتثال " بمزيد من التفصيل.

الشكل (3): الإطار التقني لقطاع البيئة



" الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية، خارطة طريق تبني التقنيات" 2024

المنهجية

أُعِدّ هذا التقرير وفق أربع مراحل ركزت على تحليل المؤشرات التقنية

1. جمع المؤشرات وتحديد التقنية

لقد تضمنت الخطوة الأولى تحليل جمع المؤشرات وتقييمها تقيمًا منهجيًا لتحديد التقنيات ذات الصلة متوافق مع الأهداف البيئية في رؤية السعودية 2030 والاستراتيجية الوطنية للبيئة، وذلك بالنظر إلى الممارسات الراسخة -مثل إطار الحوكمة الاستباقية للتقنيات الناشئة (OECD 2024)- ولتحقيق ذلك اعتمد الفريق أسلوب المسح الذي يجمع بين مزايا الخبرة البشرية والذكاء الاصطناعي، مستخدمًا قاعدة البيانات والتي تحتوي على أكثر من 100 مليون نقطة بيانات (مثل براءات الاختراع وتقارير الصناعة والمنشورات العلمية، إلخ). وعلى مدى السنوات الخمس الماضية، جُمع حوالي 45,000 مؤشر يتعلق بالأولويات الاستراتيجية للمنشآت في قطاع البيئة. وباستخدام الذكاء الاصطناعي لتوليد البيانات المعززة بالاسترجاع (RAG) والتحقق من صحة الخبراء البشريين، جُمعت قائمة طويلة تضم 200 تقنية متميزة مذكورة في براءات الاختراع والمنشورات العلمية والمقالات الإخبارية لإجراء تحليل متعمق يضم كل مجموعة من مجموعات التقنيات الأربع ذات الأولوية، كما هو موضح في تقرير خارطة طريق تبني التقنيات البيئية لوزارة البيئة والمياه والزراعة.

2. تقييم التقنية والتعريف بالمشهد التقني

في الخطوة الثانية، أُنشئ المشهد التقني الشامل من القائمة الطويلة للتقنيات المذكورة في المؤشرات. إذ جرى خلال الخطوة الأولى تقليل التداخل المفاهيمي بين التقنيات من خلال إدراج التقنيات المماثلة أو الخاصة (مثل "P-band SAR" و "Multi-band Synthetic Attack Radar" و "SAR Constations" و "SAR-Review"). بعد ذلك اختيرت 15 تقنية كانت الأكثر ذكرًا في المؤشرات في عام 2024 لكل مجموعة من مجموعات التقنيات الأربع ذات الأولوية، وذلك ضمن المشهد التقني. وجُمعت التقنيات الـ 15 في مجالات تقنية بناءً على الغرض من الاستخدام والخصائص الوظيفية. وأخيرًا، قُيمت جميع التقنيات المدرجة في المشهد على مستوى نضج التقنيات والقدرات الوطنية (مستوى جاهزية القدرات ومستوى جاهزية التقنيات)، والآثار المحتملة، وسهولة التنفيذ وفقًا للمعايير الموضحة في خارطة طريق تبني التقنيات البيئية الخاصة بوزارة البيئة والمياه والزراعة.

3. تحليل التفاصيل واختيار العناصر المميزة

في الخطوة الأخيرة، دُرست مؤشرات كل تقنية بالتفصيل. وبناءً على ذلك وُضعت الأوصاف التقنية التي تشمل معلومات مثل الجهات الرئيسة الفاعلة عالميًا، والحالة الراهنة للاعتماد، وآفاق التطوير، ودراسات الحالة ذات الصلة. وفي هذا التقرير، أُختيرت تقنية واحدة في كل من مجالات التقنية المحددة لتُعرض كتقنية بارزة في هذا التقرير. وقد جرى الاختيار من خلال تقييم كمي لمستوى نشاط الابتكار الحالي ومسار نمو نشاط الابتكار. ولتحقيق هذه الغاية سُجلت درجة مركبة من حجم الأبحاث الحالي (عدد براءات الاختراع والمنشورات العلمية في عام 2024) ومعدل النمو (معدل نمو سنوي مركب 2019-2024 لبراءات الاختراع والمنشورات العلمية) فيما يتعلق بالتقنيات الرائدة في مجال الأولوية. حيث تشير النتيجة 100 إلى أن التقنية تحتل المرتبة الأولى بين 15 تقنية مختارة من حيث حجم البحث ومعدل النمو، في حين تشير النتيجة 0 إلى أنها تحتل المرتبة الأخيرة في كلا المجالين (يرجى الاطلاع على قسم تقييم معايير الاختيار في الملحق للحصول على نظرة عامة شاملة حول التقنيات ودرجات التقييم).

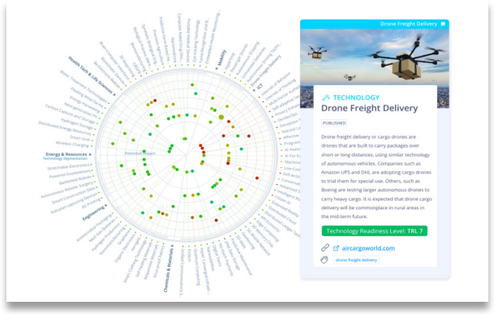
4. التحقق والأخذ بمرئيات الخبراء

واستكمالًا للتحليل الكمي والقائم على المؤشرات، تضمنت المنهجية دراسة المرئيات من خبراء قطاع البيئة الذين يتمتعون بخبرة واسعة في تبني التقنيات والابتكار القطاعي. حيث أُستشيرت مجموعة من الخبراء المختارين من خلال المقابلات المنظمة للتحقق من صحة التقنيات المحددة، وتقييم الأهمية العملية، وتقديم وجهات النظر السياقية حول حواجز الاعتماد، واعتبارات السياسة، وقابلية التطبيق على المستوى الإقليمي. واستُخدمت مدخلات الخبراء لتحسين أوصاف التقنيات، والتحقق من دقة الجهات الرئيسة الفاعلة والتوجهات نحو تبني التقنيات، وتحديد حالات الاستخدام الناشئة والتي قد لا تُفهم بشكل كامل من خلال المؤشرات وحدها. إذ ضمنت هذه الخطوة أن يعكس التقرير الأدلة القائمة على البيانات والخبرات العملية، مما يعزز متانة المشهد التقني وأهميته وقيمته، ويعزز اختيار التقنيات البارزة بشكل صحيح.

أُجريت التحليلات التي بُني عليها هذا التقرير في الإصدار الأول لمنصة نبراس في وزارة البيئة والمياه والزراعة، وهو نظام تشغيل ابتكاري معزز بالذكاء الاصطناعي يتيح الاستطلاع المنهجي لمؤشرات التقنية، والتتبع المستمر للتقنيات الناشئة وجهود الابتكار، وإنشاء قواعد بيانات التقنية الشاملة وتحديثها بشكل مستمر في مختلف مجالات الابتكار.

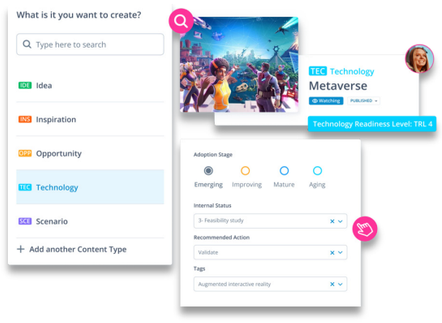
رادار التقنية

من خلال عرض راداري مرئي تفاعلي، يُمكن تحليل التقنيات الناشئة وتقييم أهميتها ومستوى نضجها وإمكانية تطبيقها. ويُساعد رادار التقنية على تحديد التطورات الجديدة مُبكرًا، وتحديد أولويات مجالات الابتكار استراتيجيًا، ومراقبة توجهات التقنية باستمرار.



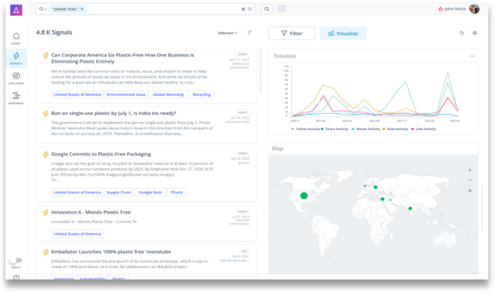
التقييم التعاوني

تُمكّن المنصة من إجراء تقييم مُنظّم وتعاوني للتقنيات الناشئة. كما تُقلّل مشاركة خبراء مُختلفين فرصة التقييمات الذاتية، وتُسهّل تحديد فرص الابتكار وتقييم المخاطرة بكفاءة.



المراقبة الآلية

تستخدم وظيفة الاستكشاف في المنصة التحليلات المدعومة بالذكاء الاصطناعي لمتابعة التطورات التقنية باستمرار من مصادر متنوعة، مثل: المنشورات العلمية وبراءات الاختراع وتقارير الصناعة والأخبار، كما حُددت المؤشرات ذات الصلة وصُنفت وحُدثت آنيًا بمرشحات وخوارزميات ذكية.



03

مجموعة التقنية ذات الأولوية لمكافحة التلوث والامتثال

3.1 مراقبة التلوث والامتثال

تشمل مراقبة التلوث والامتثال التقنيات والأنظمة المصممة لمنع التلوث البيئي ومراقبته والتخفيف من حدته وضمان الامتثال التنظيمي المتعلق به. ويشمل ذلك حلولًا للوقاية من تلوث الهواء والتخفيف من حدته (مثل تقنيات التحكم في الانبعاثات وأنظمة إدارة جودة الهواء)، ومنع تلوث المياه والتخفيف من حدته (مثل تقنيات المعالجة المتقدمة والتحكم في التصريف)، ومنع تلوث التربة ومعالجته (مثل الكشف عن التلوث وطرق استعادة التربة). وتشمل هذه المجموعة أيضًا تقنيات مراقبة التلوث، بما في ذلك الاستشعار في الوقت الفعلي، والمراقبة عن بعد، ومنصات تحليل البيانات التي تتبع مستويات الملوثات وتدعم إعداد التقارير التنظيمية. وتساهم هذه التقنيات مجتمعةً في توفير الحماية البيئية الفاعلة، والامتثال للمعايير، واتخاذ القرارات المدروسة لحماية النظم البيئية والصحة العامة.

التقنيات الرائدة في مراقبة التلوث والامتثال

نظم الذكاء الرقمي
Digital Intelligence Systems

- نظم المراقبة التنبؤية للانبعاثات باستخدام التوائم الرقمية للعمليات
  PEMS with Process Digital Twins
  (TRL 9)
- التقارير البيئية الآلية وفق لوائح التقنية التنظيمية
  Automated Environmental RegTech Reporting (TRL 7)
- الذكاء المتكامل لتطبيق اللوائح باستخدام الأقمار الصناعية والنماذج
  Integrated Satellite-Model Enforcement Intelligence
  (TRL 7)
- قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي
  Dynamic Emissions and Carbon Metering
  (TRL 6)

الامتثال وتقنيات المخابر التحليلية
Compliance & Laboratory Analytical Technologies

- الفحص غير المستهدف للمواد الكيميائية باستخدام مطيافية الكتلة عالية الدقة
  HRMS Non-Target Chemical Screening
  (TRL 7)
- تحليلات الامتثال عالية الإنتاجية لمركبات (PFAS)
  High-Throughput PFAS Compliance Analytics
  (TRL 8)
- خطوط سير العمل الآلية لضمان الجودة ومراقبتها
  Automated Monitoring QA/QC Pipelines
  (TRL 9)

شبكات الرصد الأرضية
Ground-Based Monitoring Networks

- الكشف عن ملوثات الهواء الخطرة على حدود الموقع باستخدام الذكاء الاصطناعي
  AI Fenceline HAP Detection
  (TRL 8)
- شبكات المراقبة المستمرة للميثان
  Continuous Methane Monitoring Networks
  (TRL 8)
- شبكات الحساسات منخفضة التكلفة والمعايرة بالذكاء الاصطناعي
  AI-Calibrated Low-Cost Sensor Networks
  (TRL 8)
- المراقبة المحيطية بالليزر مفتوح المسار
  Open-Path Laser Perimeter Monitoring
  (TRL 8)
- شبكات حساسات الروائح المدعومة بالتعلم الآلي
  ML Odour Sensor Networks
  (TRL 7)

نظم الكشف الجوي
Aerial Detection Systems

- طائرة مسيرة مستقلة مزودة بتقنية التصوير البصري للغاز للكشف عن التسرب وإصلاحه
  Autonomous OGI Drone LDAR
  (TRL 9)
- الأقمار الصناعية عالية الدقة لرصد الميثان
  High-Resolution Methane Satellites
  (TRL 9)
- رسم الخرائط وتقدير الانبعاثات المحمولة
  Mobile Plume Mapping and Quantification
  (TRL 8)

تعاريف التقنيات مدرجة في قسم قاموس المصطلحات

الابتكار والاهتمام والاستثمار في التقنية

لتقييم تطور كل تقنية ناشئة، جُمعت البيانات حول أربعة مقاييس ملموسة للنشاط: **المنشورات الإخبارية، وبراءات الاختراع، والمنشورات البحثية، والاستثمار.**

وللعثور على الكلمات الرئيسة المرتبطة بكل تقنية من التقنيات الـ 15، استُخدمت مجموعة محددة من مصادر البيانات لكل مقياس. ودُرست تلك الحالات بحثًا عن مؤشرات صحيحة للنشاط، وفُهرست الأرقام الناتجة من المؤشرات على مقياس درجات من 0 إلى 1 يتناسب مع التقنيات المدروسة:

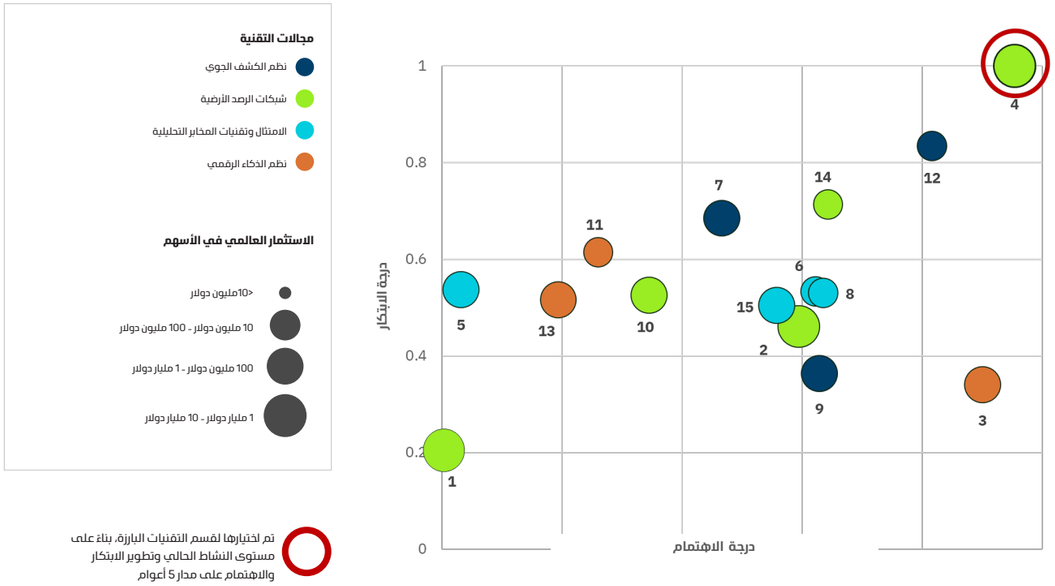
تجمع درجة الابتكار (Innovation Score) بين براءات الاختراع ودرجات الأبحاث. بينما تعتمد درجة براءات الاختراع على مقياس ملفات براءات الاختراع، وتعتمد درجة البحث على مقياس المنشورات البحثية.

تعكس **درجة الاهتمام (Interest Score)** عدد المنشورات الإخبارية العالمية، مقارنةً بالتقنيات التي تمت دراستها (على الرغم من إدراكنا أنه يمكن تضخيم درجة الاهتمام من خلال الجهود المتعمدة لتحفيز التغطية الإخبارية، إلا أننا نعتقد أن كل درجة تعكس إلى حد ما نطاق المناقشة والمناظرة حول تقنية معينة).

يوضح الاستثمار (Investment) تدفقات التمويل إلى الشركات المرتبطة بالتقنية، بما في ذلك زيادة رأس المال في السوق الخاص والسوق العام (رأس المال الاستثماري وعمليات الاندماج والاستحواذ المؤسسية والاستراتيجية، بما في ذلك المشاريع المشتركة)، والأسهم الخاصة (بما في ذلك عمليات الاستحواذ والاستثمار الخاص في الأسهم العامة)، والاستثمارات العامة (بما في ذلك الاكتتاب العام).

ملاحظة: ترتبط درجات الابتكار والاهتمام الخاصة بالتوجهات الـ 15 ببعضها البعض. إذ تظهر جميع هذه التوجهات الـ 15 مستويات عالية من الابتكار والاهتمام مقارنةً بالموضوعات الأخرى. على الرغم من أن بعض التقنيات قد يكون لها تطبيقات خارج قطاع البيئة، إلا أن هذا التحليل لم يأخذ في الاعتبار سوى براءات الاختراع والمنشورات والأخبار والاستثمارات في السياق البيئي.

الشكل (4): يوضح المخطط بياني درجة الابتكار مقابل درجة الاهتمام على مستوى جميع التقنيات الـ 15



1. طائرة مسيرة مستقلة مزودة بتقنية التصوير البصري للغاز للكشف عن التسرب وإصلاحه
2. الأقمار الصناعية عالية الدقة لرصد الميثان
3. الكشف عن ملوثات الهواء الخطرة على حدود الموقع باستخدام الذكاء الاصطناعي
4. شبكات المراقبة المستمرة للميثان
5. شبكات الحساسات منخفضة التكلفة والمعايرة بالذكاء الاصطناعي
6. المراقبة المحيطية بالليزر مفتوح المسار
7. رسم الخرائط وتقدير الانبعاثات المحمولة
8. الفحص غير المستهدف للمواد الكيميائية باستخدام مطيافية الكتلة عالية الدقة
9. تحليلات الامتثال عالية الإنتاجية لمركبات "PFAS"
10. نظم المراقبة التنبؤية للانبعاثات باستخدام التوائم الرقمية للعمليات
11. التقارير البيئية الآلية وفق لوائح التقنية التنظيمية
12. شبكات حساسات الروائح المدعومة بالتعلم الآلي
13. خطوط سير العمل الآلية لضمان الجودة ومراقبتها
14. الذكاء المتكامل لتطبيق اللوائح باستخدام الأقمار الصناعية والنماذج
15. قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي

وفقًا لمنهجية احتساب الدرجات في التقرير التقني التابع لشركة ماكنزي

التقنيات الرائدة في مجال الابتكار والمصلحة العامة

تعكس درجات الابتكار والاهتمام الثابتة مستوى حيوية التقنية في الوقت الحالي، بينما يعكس الزخم توجهها المستقبلي ومسار تطورها. كما يؤدي تتبع النمو أو الانخفاض إلى الكشف عن حالات الاختراق أمام المنافسين، وتحديد التراجع في موجات الاهتمام، كما يحدد توقيت الإعانات، ويعاير بناء القدرات، ويوائم ميزانيات البنية التحتية مع الطلب المستقبلي. وتُسهم هذه الديناميكيات في الحماية من الخسائر الغارقة وتعظيم أثر الموارد ضمن منظومة البيئة والمياه والزراعة.

بالنظر إلى معدلات النمو العالمية في براءات الاختراع والمنشورات العلمية والأخبار الصادرة حول التقنيات التي شملتها الدراسة على مدار السنوات الخمس الماضية، يتجلى بوضوح الزخم المتسارع بشكل خاص في مجال نظم الذكاء الرقمي. حيث تظهر التقنيات التالية معدلات نمو مرتفعة عبر جميع المقاييس قيد الدراسة:

طائرة مسيرة مستقلة مزودة بتقنية التصوير البصري للغاز للكشف عن التسرب وإصلاحه

وهي مركبات جوية مسيّرة مجهزة بحساسات التصوير البصري للغاز لإجراء الفحوصات الآلية للكشف عن التسربات وإصلاحها.

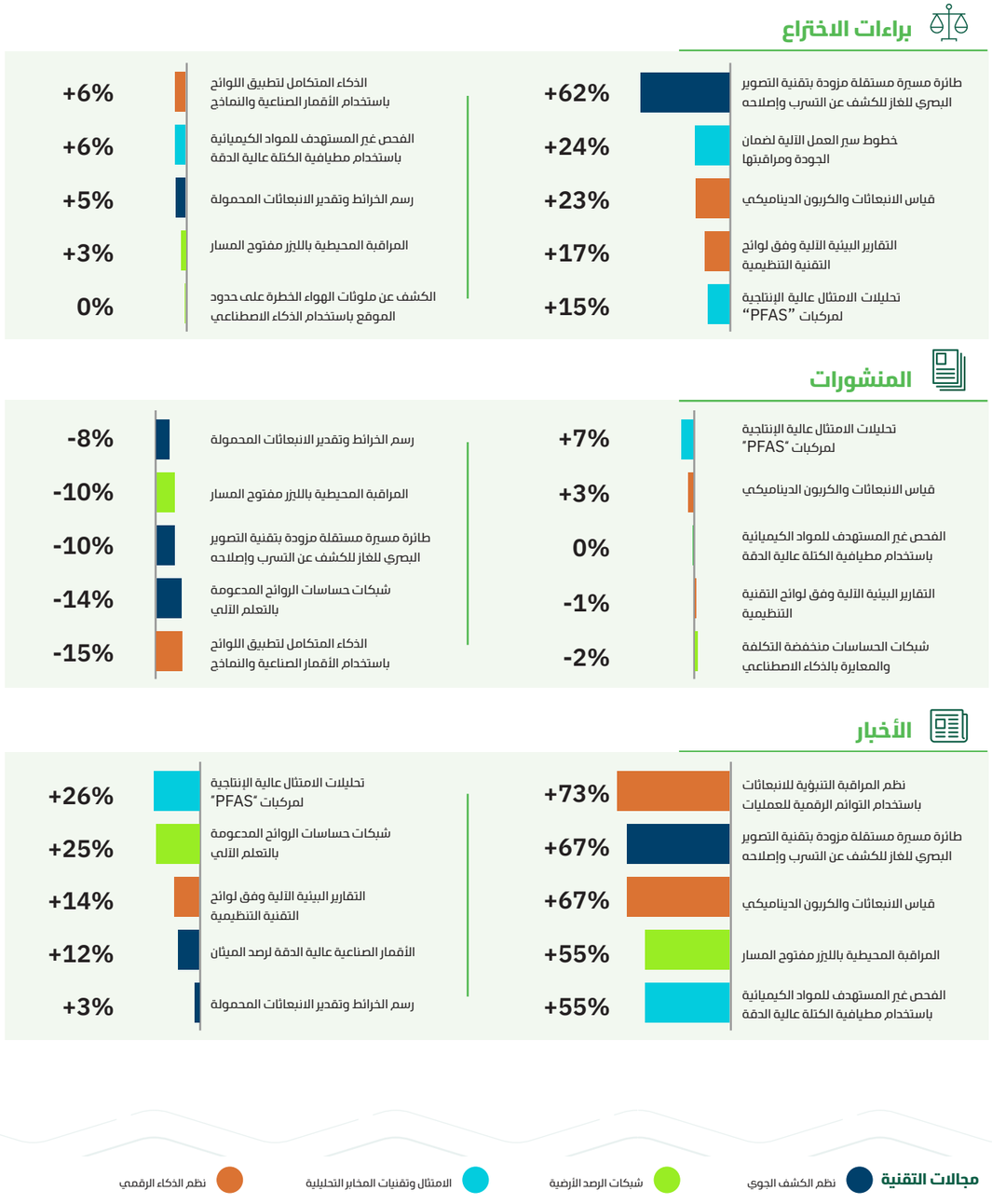
خطوط سير العمل الآلية لضمان الجودة ومراقبتها

وهي أطر منهجية لضمان الجودة تتحقق تلقائيًا من دقة بيانات المراقبة البيئية وموثوقيتها وصحتها عبر بروتوكولات موحدة.

نظم المراقبة التنبؤية للانبعاثات باستخدام التوائم الرقمية للعمليات

نظم المراقبة التنبؤية للانبعاثات المدمجة مع نسخ افتراضية للعمليات، والتي تمكّن من التنبؤ بالانبعاثات في الوقت الفعلي وتحسين التحكم التكيفي.

الشكل (5): معدل النمو السنوي المستمر لبراءات الاختراع والمنشورات والأخبار (2019–2024) – أعلى خمس تقنيات وأدنى خمس تقنيات



نبذة عن مجال البحث والتطوير والابتكار على المستوى الوطني

تتمتع المملكة العربية السعودية بمكانة تنافسية واعدة في التقنيات التي شملها التحقيق. ففيما يتعلق ببراءات الاختراع -ومقارنةً بالمرتبة العالمية الإجمالية للمملكة- فإن المملكة تُصنّف ضمن أفضل 10 دول عالميًا في اثنتين فقط من التقنيات التي شملتها الدراسة، كما جاءت ضمن أفضل 20 دولة ضمن 10 من التقنيات الناشئة الرئيسة في هذا المجال. أما بالنسبة لتقنية "**طائرة مسيرة مستقلة مزودة بتقنية التصوير البصري للغاز للكشف عن التسرب وإصلاحه**"، فقد احتلت بلادنا المرتبة الثامنة عالميًا في براءات الاختراع المسجلة بين عامي 2019 و 2024.

أما فيما يتعلق **بالمنشورات**، فإن الوضع واعد بشكل أقل، حيث دخلت المملكة قائمة أفضل (20) دولة في حوالي واحدة من التقنيات المرصودة. والفئة التقنية المهيمنة التي تحتل فيها المملكة العربية السعودية موقعًا متوسطًا هي "**شبكات الرصد الأرضية**".

الشكل (6): ترتيب المملكة العربية السعودية فيما يخص التقنيات الناشئة، الترتيب العالمي في عدد براءات الاختراع والمنشورات (2019-2024)

براءات الاختراع

المنشورات

1. طائرة مسيرة مستقلة مزودة بتقنية التصوير البصري للغاز للكشف عن التسرب وإصلاحه
2. الأقمار الصناعية عالية الدقة لرصد الميثان
3. الكشف عن ملوثات الهواء الخطرة على حدود الموقع باستخدام الذكاء الاصطناعي
4. شبكات المراقبة المستمرة للميثان
5. شبكات الحساسات منخفضة التكلفة والمعايرة بالذكاء الاصطناعي
6. المراقبة المحيطية باللايزر مفتوح المسار
7. رسم الخرائط وتقدير الانبعاثات المحمولة
8. الفحص غير المستهدف للمواد الكيميائية باستخدام مطيافية الكتلة عالية الدقة
9. تحليلات الامتثال عالية الإنتاجية لمركبات "PFAS"
10. نظم المراقبة التنبؤية للانبعاثات باستخدام التوائم الرقمية للعمليات
11. التقارير البيئية الآلية وفق لوائح التقنية التنظيمية
12. شبكات حساسات الروائح المدعومة بالتعلم الآلي
13. خطوط سير العمل الآلية لضمان الجودة ومراقبتها
14. الذكاء المتكامل لتطبيق اللوائح باستخدام الأقمار الصناعية والنماذج
15. قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي

مجالات التقنية
- نظم الكشف الجوي
- شبكات الرصد الأرضية
- الامتثال وتقنيات المخابر التحليلية
- نظم الذكاء الرقمي

3.1.1 قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي

يشير مصطلح قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي إلى أنظمة المراقبة المتقدمة والتي تستخدم تقنيات جمع البيانات في الوقت الفعلي: كالحساسات اللاسلكية، وصور الأقمار الصناعية، والذكاء الاصطناعي، لتتبع انبعاثات الغازات الدفيئة وقياسها وتوقعها بشكل مستمر، مع دقة ووضوح زمني عاليين. وتمكّن هذه النظم من المراقبة الآلية والمفضّلة للبصمة الكربونية عبر العمليات الصناعية، مستبدلةً أساليب التقييم الثابتة والمتأخرة بأساليب ديناميكية قائمة على الأداء، بهدف إدارة الانبعاثات والتحقق منها بشكل استباقي.

التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا

يمثل قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي نهجًا تحوليًا في مراقبة البيئة، وذلك بالاستفادة من تقنيات جمع البيانات في الوقت الفعلي، بما في ذلك الحساسات اللاسلكية وصور الأقمار الصناعية والذكاء الاصطناعي، لتتبع انبعاثات الغازات الدفيئة وقياسها بشكل مستمر وبدقة غير مسبوقة. وتُمكّن هذه التقنية المؤسسات من الانتقال من أساليب احتساب الكربون التقليدية الثابتة والمتأخرة إلى المقاييس الديناميكية والقائمة على الأداء، والتي توفر رؤى قابلة للتنفيذ لتحسين العمليات التشغيلية بشكل فوري. (أنظمة مراقبة الانبعاثات المستمرة | وكالة حماية البيئة الأمريكية، دور إنترنت الأشياء في مراقبة انبعاثات الكربون في الوقت الفعلي)

كما تكتسب هذه التقنية أهميتها لأنها تعالج الفجوات الحرجة في السيطرة على التلوث والامتثال التنظيمي، من خلال توفير قياسات دقيقة ودائمة، وجاهزة للتحقيق، مما يمكّن من التحخل الاستباقي بدلًا من الاكتفاء بالتقارير التفاعلية، حيث تدمج الأنظمة الحديثة أجهزة استشعار إنترنت الأشياء وخوارزميات التعلم الآلي والتحليلات القائمة على السحابة للكشف عن الحالات الشاذة والتنبؤ باتجاهات الانبعاثات وإرسال التنبيهات بشكل أوتوماتيكي عند تجاوز الحدود القصوى، مما يحوّل إدارة الكربون من عبء الامتثال إلى أداة تشغيلية استراتيجية. (الحلول الرائدة لإدارة الانبعاثات في قطاع النفط والغاز، الذكاء الاصطناعي يحوّل SensorUp:الحلول الرائدة لإدارة الانبعاثات في قطاع النفط والغاز، الذكاء الاصطناعي يحوّل تتبع وتقليل الانبعاثات من النطاق 3 في الوقت الفعلي)

وبالنسبة لأولويات المملكة العربية السعودية البيئية، فإن هذه التكنولوجيا تدعم مباشرة مراقبة النظم البيئية، والامتثال لمتطلبات السيطرة على التلوث، والتطبيقات الجوية، من خلال توفير البيانات الحقيقة والقابلة للتحقق، واللازمة لتحقيق الالتزامات المتعلقة بالوصول إلى صافي انبعاثات صفرية، مع تمكين الإدارة البيئية القائمة على الأدلة عبر مختلف البيئات الطبيعية والقطاعات الصناعية في المملكة. (CEMS – أنظمة المراقبة المستمرة للانبعاثات :دليل استراتيجي لصانعي القرار في القطاع الصناعي)

التقنية ونضج القدرات الوطنية

تظهر تقنية قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي مستوى نضج عاليًا (TRL6) -مع وجود أنظمة تجارية مطبقة بالفعل في المنشآت الصناعية حول العالم- إذ تدمج هذه التقنية أجهزة استشعار إنترنت الأشياء المثبتة، وتحليلات الذكاء الاصطناعي، والمنصات السحابية لتقديم المراقبة الفورية للانبعاثات بدقة وموثوقية مثبتة في البيئات التشغيلية. (أنظمة مراقبة الانبعاثات المستمرة | وكالة حماية البيئة الأمريكية، SensorUp :الحلول الرائدة لإدارة الانبعاثات في قطاع النفط والغاز). وتظهر المملكة العربية السعودية جاهزية متوسطة (CRL6) مع التزام حكومي قوي من خلال رؤية السعودية 2030 وانتشار فاعل لدى الشركات الكبرى مثل أرامكو السعودية، إلا أن قدرات التصنيع المحلية للتقنيات الأساسية للحساسات محدودة. كما أنشأت المملكة شراكات بحثية بين جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية والوكالات الوطنية مثل المركز الوطني للأمن السيبراني للمراقبة البيئية، في حين تقوم المشاريع الضخمة مثل نيوم بتنفيذ أنظمة متقدمة لتتبع الانبعاثات، على الرغم من أن معظم مكونات الأجهزة لا تزال مستوردة. (شراكة تعزز التنبؤ بجودة الهواء والعلوم البيئية في المملكة العربية السعودية، والبناء على النجاحات: مسار لتعزيز المحتوى المحلي في المملكة العربية السعودية).

مستوى جاهزية القدرات (CRL)

مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)

مدرج في قسم قاموس المصطلحات وصف مستوى جاهزية القدرات (CRL) ومستوى جاهزة التقنية (TRL)

الجهات الرئيسة الفاعلة عالميًا

01 Siemens Energy

02 ABB

03 Thermo Fisher Scientific

04 Teledyne API

05 Emerson

06 HORIBA

07 Gasmet Technologies

08 CEMTEK

09 Envana

10 Cyanergy

إمكانيات التقنية

توفر تقنية قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي إمكانات تحويلية للعمليات الصناعية، وذلك من خلال تمكين الإدارة البيئية في الوقت الفعلي، وتحسين العمليات التشغيلية، والامتثال التنظيمي عبر استخدام حساسات إنترنت الأشياء المتقدمة، وتحليلات الذكاء الاصطناعي، وأنظمة المراقبة القائمة على الحوسبة السحابية.

المزايا

- **التميّز التشغيلي من خلال الذكاء في الوقت الفعلي:** توفر أنظمة CEMS المتقدمة بيانات انبعاثات دقيقة في الوقت الفعلي، مما يمكّن المشغلين من تعديل نسب الاحتراق فورًا، وتحسين كفاءة الوقود، واكتشاف الشذوذ قبل ساعات من تحوّله إلى مخالفات امتثال، مما يحمي الإيرادات وسمعة الشركة Continuous Emission Monitoring Systems (CEMS)
- **الخفض الكبير للتكاليف والعائد الكبير على الاستثمار:** تحقق أنظمة مراقبة الانبعاثات في الوقت الفعلي فترات استرداد تتراوح بين 18 و24 شهرًا من خلال تحسين العمليات، وتوفير الوقود، وتجنب الغرامات الناتجة عن عدم الامتثال، بينما يمكن لحلول المراقبة التنبؤية للانبعاثات خفض النفقات الرأسمالية بنسبة 50% والنفقات التشغيلية بنسبة 90% مقارنةً بالبدائل التقليدية المعتمدة على الأجهزة Why Real-Time Emission Monitoring Is the Key to Safer, Greener Operations
- **تعزيز السلامة والإدارة البيئية:** توفر أنظمة المراقبة المستمرة تنبيهات فورية عند حدوث ارتفاعات في الغازات السامة أو اضطرابات في العمليات، مما يتيح اتخاذ إجراءات استجابة فورية مثل التهوية أو تنفيذ إجراءات الإيقاف، مع دعم أهداف إزالة الكربون في الوقت نفسه من خلال تتبع مفصّل للانبعاثات والتحقق من برامج تعويض الكربون. 10 Benefits of Continuous Emissions Monitoring for Pharma Compliance

العيوب

- **ارتفاع تكاليف التنفيذ والصيانة:** تتطلب أنظمة المراقبة المستمرة للانبعاثات استثمارات رأسمالية كبيرة في الأجهزة والبرمجيات والبنية التحتية، مع النفقات التشغيلية المستمرة والتي تتراوح بين 3–6% من إجمالي تكلفة التركيب سنويًا، بما في ذلك غازات المعايرة، والمواد الاستهلاكية، وخدمات ضمان الجودة المقدمة من الجهات الخارجية. Understanding Continuous Emissions Monitoring Systems (CEMS)
- **التحديات المتصلة بدقة البيانات والتحقق منها:** تواجه أنظمة تتبّع البصمة الكربونية مشكلات كبيرة تتعلق بسلامة البيانات، حيث تواجه 83% من الشركات مشكلات تتعلق بالوصول إلى بيانات الانبعاثات الدقيقة نتيجة الفجوات في بيانات المورّدين، وعدم اتساق معايير الإبلاغ، وتجزؤ الأنظمة، مما يعقّد عملية التتبع الشامل للانبعاثات. Carbon footprint data collection: Common challenges and how to solve them
- **ثغرات الأمن السيبراني وخصوصية البيانات:** تواجه شبكات مراقبة الانبعاثات القائمة على إنترنت الأشياء مخاطر أمنية كبيرة، بما في ذلك اختراقات البيانات، والتلاعب ببيانات الانبعاثات، والهجمات السيبرانية التي تستهدف البنية التحتية الحيوية، مما قد يضعف ثقة الجمهور ويثير شكوكًا واسعة حول موثوقية هذه الأنظمة IoT Networks for Enhanced Carbon Monitoring

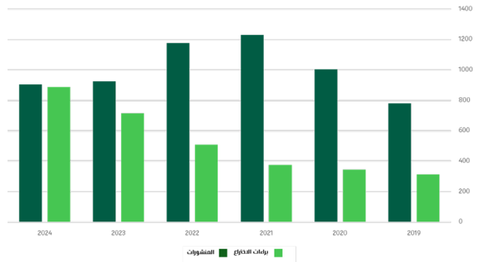
آخر التطورات

يشهد مجال قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي تقدمًا سريعًا في عام 2025، مع الابتكارات المتقدمة في الأنظمة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي، وشبكات استشعار إنترنت الأشياء، والتقنيات الرقمية المتكاملة التي تحول قدرات مراقبة الانبعاثات في الوقت الفعلي عبر القطاعات الصناعية.

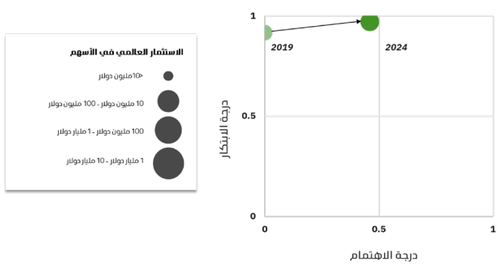
مؤشرات الابتكار الرئيسة

- **الأنظمة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي:** تُحدث تقنيات التعلّم الآلي -بما في ذلك بنيات الذاكرة طويلة/ قصيرة المدى وشبكة الالتفاف الزمني- تحولًا جذريًا في تقنية نظم المراقبة التنبؤية للانبعاثات، حيث تسهم في خفض التكاليف الرأسمالية بنسبة 50% والتكاليف التشغيلية بنسبة 90%، مع توفير البيانات بشكل مستمر وتعزيز الدقة في التعامل مع أنماط الانبعاثات المعقدة وغير الخطية. Researching the landscape of predictive emissions monitoring system emissions patterns
- **منصات إدارة الكربون المتكاملة القائمة على الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء:** تجمع أنظمة إدارة الكربون الشاملة الآن بين الذكاء الاصطناعي، وأجهزة استشعار إنترنت الأشياء، وعلوم البيانات لتوفير المراقبة الشاملة في الوقت الفعلي، والرؤى التنبؤية، واتخاذ القرارات الآلي، مستبدلةً المسوح الدورية التقليدية بإمكانيات تحليل ذكي ومستمر Integrating AI, IoT, and Data Science for a Comprehensive Carbon Management System
- **الحوسبة الطرفية للمعالجة في الوقت الفعلي:** تمكّن أجهزة إنترنت الأشياء المزودة بقدرات الحوسبة الطرفية من معالجة البيانات بشكل موزّع لمراقبة الكربون، مما يقلل زمن الاستجابة ويعزز اتخاذ القرارات في الوقت الفعلي، مع دعم الكشف المبكر عن أي شذوذ في دورة الكربون وتنفيذ استراتيجيات التحكم الآلي في الانبعاثات. Role of IoT, AI, and ML in Carbon Management
- **التعرف على أنماط التعلم الآلي:** تحقق أدوات التصنيف المتقدمة للغابات العشوائية دقة تصل إلى 100% في الكشف عن التغيرات في أنماط الانبعاثات والشذوذ في البيانات عبر المرافق الصناعية، مما يتيح إجراء تحليل متطور لبيانات نظام إدارة المخاطر البيئية الشاملة من معايير المراقبة المتعددة في وقت واحد Machine learning classifiers to detect data pattern change
- **التعرف على الأنماط باستخدام التعلم الآلي:** أنظمة المراقبة المستمرة للانبعاثات المدعومة بالذكاء الاصطناعي والمطبقة في مرافق معالجة الغاز تُظهر فاعلية عالية من حيث التكلفة، ودقة متفوقة في رصد أحداث الانبعاثات المتوقعة وغير المتوقعة، وذلك من خلال الكشف الفيزيائي في الوقت الفعلي، مقارنة بالأساليب التقليدية القائمة على النمذجة Leveraging Artificial Intelligence & Fixed, Continuous Methane Monitoring
- **مراقبة انبعاثات الكربون في البناء الذكي:** تحقق الأنظمة المعتمدة على إنترنت الأشياء والمندمجة مع تحليلات التعلم الآلي دقة عالية في مراقبة الانبعاثات الكربونية في الوقت الفعلي، مع تقليل النفقات التشغيلية، وتوفير تتبع مستمر آلي، مع الحد الأدنى من التدخل البشري لتطبيقات البناء. Real-Time Carbon Emissions Monitoring in Smart Construction

الشكل (7): عدد براءات الاختراع والمنشورات (2019–2024)



الشكل (8): تطور حجم استثمارات التقنية بناء على درجة الابتكار ودرجة الاهتمام



الرؤى والإحصائيات

تشهد تقنية قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي نموًا غير مسبوق، مع توسع كبير في السوق، وإمكانات كبيرة لتقليل التكاليف، وتحسينات ملحوظة في الدقة، مما يدفع إلى اعتمادها على نطاق واسع عبر مختلف القطاعات الصناعية.

الإحصائيات والحقائق الرئيسة

- **نمو سوق أنظمة إدارة الكربون:** توسّع سوق أنظمة إدارة الكربون عالميًا من 12.7 مليار دولار في عام 2024 إلى 14.24 مليار دولار في عام 2025، بمعدل نمو سنوي مركب قدره 12.2%، مع توقعات بوصوله إلى 21.73 مليار دولار بحلول عام 2029 Comprehensive Report on the Carbon Management System Market
- **مزايا تخفيض تكاليف نظم المراقبة التنبؤية للانبعاثات:** تقلل نظم المراقبة التنبؤية للانبعاثات التكاليف الرأسمالية بنسبة 50% والتكاليف التشغيلية بنسبة 90% مقارنةً بأنظمة المراقبة المستمرة للانبعاثات التقليدية المعتمدة على الأجهزة، مع ضمان توافر البيانات بشكل مستمر ودقة أعلى Researching the landscape of predictive emissions monitoring system
- **معدلات دقة نظم المراقبة المعتمدة على إنترنت الأشياء:** إن أنظمة مراقبة الانبعاثات الكربونية في الوقت الفعلي المعتمدة على إنترنت الأشياء تحقق معدلات دقة متفوقة بالإضافة إلى تقليل النفقات التشغيلية، مما يجعلها بديلًا فاعلًا من حيث التكلفة مقارنةً بأنظمة المراقبة التقليدية التي تعتمد على التشغيل اليشري Real-Time Carbon Emissions Monitoring in Smart Construction
- **توسع سوق أنظمة السيطرة على الانبعاثات الصناعية:** نما سوق أنظمة السيطرة على الانبعاثات الصناعية من 21.42 مليار دولار في 2024 إلى 22.78 مليار دولار في 2025 بمعدل نمو سنوي مركب قدره 6.4%، مع توقعات للوصول إلى 29.59 مليار دولار بحلول 2029 بمعدل نمو سنوي مركب قدره 6.8%. . Industrial Emission Control Systems Market 2025-2029
- **دقة أنظمة المراقبة المستمرة:** أظهرت أنظمة المراقبة المستمرة والثابتة دقة عالية في قياس انبعاثات الميثان، حيث أظهرت دراسة استمرت 4 أسابيع انخفاضًا بنسبة 4% فقط في التقدير (27 كغ من أصل 700 كغ مُطلقة) تحت أنماط انبعاث معقدة وظروف واقعية Performance Evaluation of Fixed-Point Continuous Monitoring Systems
- **توقعات سوق أرصدة الكربون:** من المتوقع أن ترتفع أسعار أرصدة الكربون بشكل كبير لتصل إلى زيادة قد تبلغ 3000% بحلول عام 2029، مما يدفع الطلب على أجهزة قياس الكربون وإدارته والتي يمكن أن تساعد الشركات على توفير ما يصل إلى 90% مقارنةً بشراء أرصدة الكربون من السوق Comprehensive Report on the Carbon Management System Market

تبني التقنيات

في حين تكتسب أنظمة قياس الانبعاثات الكربونية الديناميكية قوة دفع عالمية من خلال المهام التنظيمية والتزامات الاستدامة المؤسسية، إذ يعتمد نجاح المملكة العربية السعودية على إنشاء أطر حوكمة بيانات قوية، وبناء القدرات المؤسسية، ومواءمة السياسات مع الأهداف البيئية لرؤية السعودية 2030.

الوضع الراهن

- **تسارع التوسع على مستوى المؤسسات:** تُسارع الشركات الكبرى والهيئات الحكومية بتنفيذ منصات إدارة انبعاثات الكربون المدعومة بالذكاء الاصطناعي مثل Dcycle و Watershed، مع تسجيل الشركات انخفاضًا بنسبة 70% خلال الفترة التي يغطيها التقرير. Dcycle
- **تحسين تكامل التصنيع في الوقت الفعلي:** تحقق المنشآت الصناعية ما يصل إلى 20% من توفير الطاقة من خلال أنظمة مراقبة الانبعاثات في الوقت الفعلي والمُمكّنة بإنترنت الأشياء، والتي تتكامل مع الآلات وأنظمة العادم القائمة، مما يتيح اتخاذ الإجراءات التصحيحية الفورية عند اكتشاف أي شذوذ nZero
- **الاعتماد المدفوع بالمتطلبات الحكومية:** تنشر مؤسسات القطاع العام لوحات متابعة مؤتمتة لتحليل الكربون للامتثال للمتطلبات البيئية، حيث ساعدت منصات مثل ClearPath 2.0 التابعة لـ ICLEI، والتي أُطلقت في ربيع 2025، الحكومات الفرعية في الولايات المتحدة على تبسيط جرد الغازات الدفيئة وتخطيط الإجراءات المناخية ICLEI USA

متطلبات التوطين

- **المواءمة التنظيمية المطلوبة من المركز الوطني للرقابة على الالتزام البيئي:** يفرض المركز بروتوكولات الترخيص والمراقبة البيئية المتخصصة والتي يجب أن تلتزم بها نظم الانبعاثات الديناميكية، مما يتطلب التخصيص لتلبية معايير جودة الهواء في الوزارة، وأطر إعداد التقارير في الوقت الفعلي، والمعمول بها في محطات المراقبة في المدن الكبرى National Center for Environmental Compliance - Saudipedia
- **إطار حوكمة البيانات السيادية:** يفرض تركيز رؤية السعودية 2030 على الذكاء الاصطناعي السيادي وتوطين البيانات أن تعمل منصات قياس انبعاثات الكربون ضمن البنية التحتية الرقمية الوطنية الخاضعة للرقابة، مما يضمن بقاء بيانات الانبعاثات تحت ولاية المملكة العربية السعودية مع تحقيق أهداف الاقتصاد الرقمي البالغ قيمته 133 مليار دولار مع الامتثال لمعايير الذكاء الاصطناعي الأخلاقي Sovereign AI: The Engine Behind Saudi Arabia's $133 Billion Digital
- **فجوة بناء القدرات المؤسسية:** على الرغم من الأهداف البيئية الطموحة ضمن إطار مبادرة السعودية الخضراء، إلا أن المملكة تواجه تحديات كبيرة في الجاهزية المؤسسية لنشر أنظمة المراقبة المتقدمة، مما يتطلب تطوير القوى العاملة بشكل كبير، وبناء الخبرة الفنية لسد الفجوة بين التزامات الاستدامة لرؤية السعودية 2030 وقدرات التنفيذ التشغيلي. ESG in Saudi Arabia: The Key to Vision 2030's Success

آفاق التقنية

من المتوقع أن تشهد تقنية قياس الانبعاثات الكربونية الديناميكية نموًا متسارعًا من خلال النظم التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي وتكامل إنترنت الأشياء، على الرغم من أن نجاح النشر لا يزال يعتمد على المواءمة التنظيمية وأطر حوكمة البيانات.

التوجه المستقبلي

- **التميز في تصنيف التعلم الآلي:** تحقق خوارزميات XGBoost في أنظمة المراقبة البيئية المُمكّنة بإنترنت الأشياء دقة تقارب 80% في تصنيف جودة الهواء في الوقت الفعلي، مع تجاوز قيم ROC AUC الـ (0.90)، بينما تظهر نماذج الغابة العشوائية أداءً متفوقًا في التنبؤ بتركيزات الكربون عبر عدة معايير بيئية IoT-Enabled Indoor Air Quality Monitoring and Control Using Machine Learning Techniques
- **الكفاءة من حيث التكلفة في البناء الذكي: ت**حقق أنظمة مراقبة الانبعاثات الكربونية المعتمدة على إنترنت الأشياء والمندمجة مع تحليلات التعلم الآلي معدلات دقة تتراوح بين 85-99%، مع تقليل النفقات التشغيلية بنسبة 10-50% مقارنةً بأساليب المراقبة اليدوية التقليدية، مما يتيح تتبع الانبعاثات بشكل مستمر وآلي مع الحد الأدنى من التدخل البشري. Real-Time Carbon Emissions Monitoring in Smart Construction Using IoT and Machine Learning
- **تقنيات الكشف عن عمليات الاحتيال المتطورة باستخدام سلسلة الكتل والتعلم الآلي:** تُدمج خوارزميات التعلم الآلي مثل الغابة العشوائية وXGBoost والشبكات العصبية مع أنظمة التحقق من أرصدة الكربون القائمة على سلسلة الكتل لمعالجة صور الأقمار الصناعية والإفصاحات المؤسسية، مما يعزز بشكل كبير آليات الشفافية ويقلل من مخاطر التلميع البيئي في مشاريع تعويض الكربون القائمة على الغابات Discover Sustainability

أوجه عدم اليقين الرئيسة

- **انحراف معايرة أجهزة الاستشعار وموثوقية البيانات:** تواجه أجهزة الاستشعار الخاصة بإنترنت الأشياء تحديات مستمرة تتعلق بالحساسية البيئية وانحراف المعايرة، حيث أظهرت بروتوكولات غازات الدفيئة أن 83% من الشركات تعاني من مشكلات في الوصول إلى بيانات انبعاثات دقيقة، مما قد يقوض مصداقية أنظمة المحاسبة الكربونية الآلية. Carbon footprint data collection: Common challenges and how to solve them
- **قابلية التوسع في سلسلة الكتل ومفارقة الطاقة:** تواجه أنظمة التحقق والقياس الرقمية القائمة على سلسلة الكتل اختناقات حرجة في قابلية التوسع عند معالجة كميات هائلة من بيانات الكربون، بينما تخلق آليات التوافق ذات الاستهلاك الكثيف الطاقة وضعًا متناقضًا حيث تستهلك أنظمة التحقق طاقة كبيرة للتحقق من مزاعم خفض الكربون Blockchain for Carbon Removal Verification Scalability Challenges
- **الفجوات في التوافقية والمعايير:** إن انتشار منصات سلاسل الكتل غير المتوافقة ومعايير أرصدة الكربون يخلق مخاطر التجزئة، حيث تستخدم الأنظمة المختلفة صيغ بيانات مملوكة تعيق التكامل السلس وقد تؤدي إلى ما يُعرف بـ "حديقة البرمجيات"، مما يضعف كفاءة سوق الكربون العالمي. Scalable Blockchain MRV Systems for Verified Carbon

المصدر: صورة منشأة بالذكاء الاصطناعي باستخدام Google Gemini، تم توليدها بناءً على أوامر نصية.

دراسة الحالة المحلية

نشر نظام AirGo الهجين لمراقبة جودة الهواء في جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية

قامت جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية بتطوير نظام "AirGo" ونشره، وهو نظام شامل لمراقبة جودة الهواء، حيث يجمع بين أجهزة استشعار إنترنت الأشياء المتنقلة والثابتة لتتبع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وأول أكسيد الكربون، وغيرها من انبعاثات غازات الدفيئة في البيئات الحضرية. ويستجيب النظام للاحتياج الملح لجمع البيانات البيئية في الوقت الفعلي في المدن السعودية سريعة النمو، حيث تتجاوز مستويات الجسيمات الدقيقة بشكل متكرر المعايير الصحية العالمية نتيجة للأنشطة الصناعية، والتحضر، والعواصف الترابية الطبيعية. ويدعم تبني جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية لهذا النظام -بشكل مباشر- التزامات الاستدامة البيئية ضمن رؤية السعودية 2030، كما يوفّر نموذجًا قابلًا للتوسع لتطوير المدن الذكية في مختلف أنحاء المملكة. تعمل جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية على تطوير نظام مركب لمراقبة جودة الهواء للمدن الذكية بما يدعم الأهداف البيئية لرؤية السعودية 2030، ونظم مراقبة جودة الهواء في المدن السعودية لمواجهة تحديات التلوث

يقدّم نظام AirGo فوائد تشغيلية كبيرة من خلال تصميمه المعياري والمزوّد بالطاقة الشمسية، مما يمكّنه من المراقبة المستمرة للغازات مثل ثاني أكسيد الكربون، وثاني أكسيد الكبريت، والأوزون، وثاني أكسيد النيتروجين، إلى جانب قياس الجسيمات الدقيقة. حيث تنقل البيانات في الوقت الفعلي عبر الشبكات المحمولة إلى قواعد البيانات السحابية والمزوّدة بأنظمة التنبيه الآلية، مما يوفر تحذيرات فورية عن الصحة البيئية ويدعم نمذجة التلوث التنبؤية. وأظهرت التقنية أداءً موثوقًا أثناء الاختبارات المكثفة في الحرم الجامعي، حيث تمكنت من الكشف بدقة عن الأحداث البيئية مثل العواصف الترابية، مع توليد البيانات الدقيقة والتي تمكّن من التنبؤ على المستوى المحلي وتدعم تطوير السياسات المبنية على الأدلة لسلطات التخطيط العمراني.

كما تستخدم التقنية الوحدات المتنقلة والمدعومة بنظام تحديد المواقع العالمي -المثبتة على المركبات والحافلات- إلى جانب أجهزة الاستشعار الثابتة الموجودة على البنية التحتية مثل مصابيح الشوارع، مما يخلق شبكة مراقبة شاملة تغطي المناطق الحضرية الواسعة بقدرات كبيرة على تحديد الموقع الجغرافي بدقة. وحقق الباحثون في جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية المستوى السادس من الجاهزية التقنية من خلال الاختبارات المنهجية، كما يشاركون بفاعلية مع الجهات المصنعة لتوسيع نطاق الإنتاج للنشر التجاري خلال (12-18) شهرًا، وتتيح قدرة النظام على التكيف النشر في البيئات المتنوعة بما في ذلك المناطق ذات البنية التحتية المحدودة، بينما يتيح تصميمه الفاعل -من حيث التكلفة- إمكانية اعتماده على نطاق واسع في المدن والمناطق الصناعية السعودية التي تسعى إلى تلبية متطلبات الامتثال البيئي. يوفر نشر أجهزة الاستشعار المتنقلة والثابتة شبكات مراقبة حضرية شاملة، وقد وصلت التقنية إلى المستوى السادس من الجاهزية التقنية (TRL6) مع التخطيط لنشر تجاري خلال 18 شهرًا.

04

رؤى القادة

الابتكار من أجل مستقبل مستدام: وزارة البيئة والمياه والزراعة في تطورات تقنيات البيئة

في ظل المشهد المتغير للابتكار البيئي، بات من الواضح أن التحول لم يعد خيارًا بل ضرورة ملحّة. يشهد القطاع تحولًا جذريًا تقوده تحديات تغيّر المناخ وشحّ المياه ومحدودية الموارد، مما يستدعي تبنّي نهج أكثر تكاملًا واستشرافًا للمستقبل. ولم يعد الابتكار مقتصرًا على التقدم التكنولوجي فحسب، بل أصبح يرتكز بشكل متزايد على مواءمة السياسات والبحث العلمي وآليات السوق لتحقيق أثر قابل للتوسع ومستدام. ومن أبرز الرؤى المتبلورة تزايد أهمية التعاون عابر القطاعات، حيث يتعين على الحكومات والمؤسسات البحثية والقطاع الخاص العمل بشكل تكاملي لتسريع تطوير الحلول. وفي الوقت ذاته، تبرز البيانات والتقنيات الرقمية كممكنات أساسية، تتيح مستويات أعلى من الدقة في الرصد والتنبؤ ودعم اتخاذ القرار. ومع ذلك، يبقى التحدي الحقيقي في ردم الفجوة بين تطوير الابتكارات وتطبيقها على أرض الواقع. وفي المحصلة، يتوقف نجاح الابتكار البيئي على القدرة على ترجمة الاستراتيجيات الطموحة إلى نتائج عملية قابلة للتنفيذ، بما يضمن توافقها مع الاحتياجات المحلية وانسجامها مع التوجهات العالمية. ويتطلب ذلك ليس فقط الاستثمار في بناء القدرات، بل أيضًا تبنّي عقلية قائمة على المرونة والتجريب وتعزيز القدرة على الصمود على المدى الطويل.

د. عبدالله الردادي
وكيل وزارة البيئة والمياه والزراعة المساعد للشؤون الدولية والمناخ

الابتكار من أجل مستقبل مستدام: صندوق البيئة في تطورات تقنيات البيئة

في أرض قاحلة وطموحاتها جسورة – كزراعة 10 مليارات شجرة والحفاظ على 30% من النظم البيئية – أصبحت التقنيات حليفنا الأبرز. من أنظمة الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي التي توفر كل قطرة ماء، إلى مراقبة النظم البيئية للتنوع الحيوي، حوّلت الابتكارات التحديات إلى محفزات. وبينما تكتسب الحلول التقليدية زخماً، أتابع عن كثب أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي التي توظف الأرض لإنتاج الطاقة الشمسية والرعي المستدام في آنٍ واحد – نموذج أنيق لحل معضلة الغذاء والطاقة والمياه. لقد جعلت رؤية السعودية 2030 ومبادرة السعودية الخضراء من الاستدامة البيئية أولوية وطنية، بدعم من أنظمة مالية وتنظيمية تمكّن من التوسع. وخلال العقد المقبل، سنشهد حلولاً سعودية خالصة مصمّمة لبيئتنا، وسوقاً ناضجاً للاعتمادات البيئية، ونظماً بيئية متكاملة توظف الأقمار الصناعية والذكاء الاصطناعي والأنظمة الذكية بتناغم. المملكة لا تواكب المستقبل فقط، بل تُعيد رسم ملامحه في مجال استدامة المناطق الجافة.

د. عبدالرحمن الفوزان
رئيس المستشارين في صندوق البيئة

الابتكار من أجل مستقبل مستدام: موان وتطورات تقنيات البيئة

يواجه قطاع إدارة النفايات اليوم منظومة معقّدة من التحديات البيئية تمتد عبر كامل سلسلة القيمة، بدءًا من محدودية تقنيات المعالجة وضعف أنظمة تتبع البيانات، وصولًا إلى الفجوات السلوكية وقضايا تصميم المواد، والارتفاع الموسمي في كميات النفايات المصاحبة لمواسم مثل الحج. وتُعد التقنيات عنصرًا محوريًا في تجاوز هذه التحديات، لا سيما في المجالات التي لا تزال تعاني نقصًا في الابتكار، مثل معالجة وإعادة تدوير بطاريات الليثيوم-أيون، التي تقيدها تعقيدات تقنية وارتفاع التكاليف وغياب المعايير الموحدة. وفي المملكة العربية السعودية، يقود تحول القطاع نهجٌ مُصمَّم بعناية من خلال المخططات الرئيسة لإدارة النفايات، التي تنطلق من الواقع المحلي بدلًا من الاكتفاء باستنساخ النماذج الدولية. وتسهم هذه المخططات في وضع خط أساس واضح، وتوجيه الاستثمارات طويلة المدى، ومواءمة تطوير القطاع مع الأولويات الوطنية. كما يتعزز الابتكار البيئي بفعل فجوات البنية التحتية الواضحة، وقوة التوجهات التنظيمية المنبثقة عن رؤية السعودية 2030، ونماذج الشراكة بين القطاعين العام والخاص التي تستقطب الاستثمارات الخاصة. وخلال العقد المقبل، سيتحول مسار الابتكار من الحلول المنفصلة إلى تحسين الكفاءة وخفض التكاليف وتعزيز التكامل الرقمي. ومن خلال تمكين التجريب، وتعزيز البحث والتطوير وبناء القدرات، وتوسيع آفاق التعاون بين القطاعات، تمتلك المملكة فرصة فريدة لترسيخ مكانتها بوصفها رائدة عالميًا في مجال الابتكار البيئي.

د. محمد العاصم
نائب الرئيس للتخطيط والتطوير في موان

الابتكار من أجل مستقبل مستدام: سرك و تيرافيول في تطورات تقنيات البيئة

النموذج البيئي الحاسم في وقتنا الراهن يتمثل في الانتقال من نموذج خطي قائم على "الاستخراج-الإنتاج-التخلص" إلى اقتصاد دائري متكامل على مستوى وطني. وبالنسبة لنا، يعني بذلك تحويل النفايات إلى موارد ذات قيمة—سواء من خلال تحويل النفايات البلدية إلى وقود صناعي عالي الجودة وموثوق، أو عبر توظيف الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء لتحويل التدفقات المعقدة للنفايات إلى أنظمة موارد قائمة على البيانات. إلى جانب ما يُتداول على نطاق واسع، أتابع باهتمام تقنية التحلل الحراري للكتلة الحيوية لإنتاج الفحم الحيوي، وتقييم الكربون كعنصر ذي قيمة ضمن منظومة الاقتصاد الدائري. فهذه الحلول تتجاوز مجرد استرداد الطاقة، إذ تتيح احتجاز الكربون بشكل دائم وتحسين صحة التربة، وهو أمر بالغ الأهمية في المناطق الجافة، كما تفتح آفاقاً جديدة لتمويل المشاريع. في المملكة العربية السعودية، يقود الابتكار البيئي رؤية السعودية 2030، وخريطة تنظيمية واضحة، إلى جانب تزايد الطلب على التكامل الصناعي. وعلى مدى العقد المقبل، سيتحول السوق من إدارة النفايات إلى إدارة الموارد الشاملة، مما يمهّد الطريق أمام المملكة لتصبح مركزاً عالمياً للبتروكيماويات الدائرية، ومراكز النفايات المتكاملة، وحلول المناخ القابلة للتصدير المصممة للبيئات القاسية.

سلطان السيف
الرئيس التنفيذي لشركة تيرافيول | المدير التنفيذي للتقنية والابتكار للشركة السعودية للاستثمار في إعادة التدوير (سرك)

الابتكار من أجل مستقبل مستدام: منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة في تطورات تقنيات البيئة

الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية يتمحور في جوهره حول تحويل الطموحات إلى أنظمة تشغيلية قابلة للتطبيق على نطاق واسع. التحديات الأساسية التي تواجه المملكة—مثل محدودية الرصد البيئي، وتشتّت التخطيط، وضعف القدرات، وتدنّي مستوى الالتزام، وتدهور المراعي، والإجهاد المائي، وضعف استغلال الموارد الحيوية—لا تكمن في غياب التقنيات، بل في غياب التكامل بين مكوّنات النظام البيئي. فالتقنيات المتقدمة، كالرصد الأرضي، والمراقبة الرقمية، ونمذجة السيناريوهات، وآليات القياس والإبلاغ والتحقق (MRV)، لا تحقق قيمتها الحقيقية إلا إذا دُمجت ضمن منظومات الحوكمة، وإجراءات التشغيل الموحدة، والبنية المؤسسية الفاعلة. التحدي المقبل يتمثل في مواءمة الابتكار مع أنظمة وطنية متكاملة تربط البيانات بالرقابة، والحوافز بالتمويل. وخلال العقد المقبل، ستتسارع وتيرة الابتكار البيئي من خلال الرقمنة، والذكاء الاصطناعي، والحلول الذكية للمياه، والتمويل القائم على النتائج، مع تركيز كبير على المخرجات المحققة ومشاركة القطاع الخاص. ويمكن للمملكة أن ترسّخ مكانتها كقوة عالمية في هذا المجال، من خلال بناء "نظام بيئي موحّد" يجمع رؤية مشتركة للأولويات، والمخاطر، ومستويات الأداء، مدعومًا بأنظمة رصد قابلة للتوسع، ومساءلة مائية فعالة، وحوكمة صارمة للمراعي، ونماذج تمويل تُكافئ الأثر الفعلي. ويمكن أن يشكّل هذا النموذج القيادي في البيئات الجافة مرجعًا عالميًا للابتكار المستدام في ظل الظروف المناخية القاسية.

د. نزار حداد
مدير برنامج منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة بالمملكة العربية السعودية

الابتكار من أجل مستقبل مستدام: أكوا باور في تطورات تقنيات البيئة

تتمحور قصة الابتكار البيئي في تحلية المياه بالمملكة العربية السعودية حول فكّ الارتباط التاريخي بين إنتاج المياه والاعتماد على الوقود الأحفوري. فقد انتقلت المملكة بوتيرة متسارعة من تقنيات التحلية الحرارية كثيفة الاستهلاك للطاقة إلى تقنيات التناضح العكسي لمياه البحر فائقة الكفاءة، مدعومة بأنظمة استعادة الطاقة، وتكامل الطاقة الشمسية، وتحسين تشغيل المحطات بالاعتماد على الذكاء الاصطناعي. وأسهمت هذه الحلول في خفض استهلاك الطاقة في التحلية إلى مستويات قياسية، محوّلة إنتاج المياه من عبء كربوني إلى ركيزة أساسية في استراتيجية الحياد الصفري. وفي موازاة ذلك، تبرز—وإن كانت أقل حضورًا إعلاميًا—مقاربات الجيل القادم، مثل التناضح العكسي الدفعي وتقنيات الضغط المبتكرة، التي تدفع الكفاءة نحو حدودها الديناميكية الحرارية. ويقود الاستثمار في هذا المسار سعيُ المملكة إلى سيادة الماء والطاقة، وخفض التكاليف، وتوطين التقنيات عالية القيمة بدلًا من استيرادها. وخلال العقد المقبل، يُتوقَّع أن يتطوّر السوق نحو محطات ذاتية التشغيل تعمل بالطاقة المتجددة وتدار بأنظمة رقمية متقدمة. وفي المحصلة، لا تكتفي المملكة بترسيخ مكانتها كأكبر مستخدم عالمي لتقنيات المياه، بل تتجه بثبات لتصبح مُصدّرًا عالميًا للابتكار البيئي القادر على الصمود في مواجهة تغيّر المناخ.

د. راتول داس
مدير تنفيذي – الأبحاث والتطوير

05

الملحق

المقابلات - الأسئلة الموجهة لقادة القطاع

د. عبدالله الردادي –وزارة البيئة والمياه والزراعة
وكيل وزارة البيئة والمياه والزراعة المساعد للشؤون الدولية والمناخ

1. ما هي التحديات الرئيسة المتعلقة بالبيئة، وكيف تلعب التقنيات دورًا في التغلب عليها؟

هناك العديد من التحديات البيئية التي تواجهها المملكة، بعض هذه التحديات ينطبق على المملكة ودول المنطقة، والبعض الآخر يشمل جميع دول العالم، يمكن تقسيم هذه التحديات بحسب القطاع الفرعي للبيئة، بحسب ما هو متبع في خارطة تبني التقنيات المنشورة من وزارة البيئة والمياه والزراعة، وهناك دور للابتكار في كل من هذه القطاعات الفرعية، ولتعدد التحديات والفرص المتوفرة، من الأفضل اتباع منهجية لذلك، والمقترح هو ربط الفرص التقنية بالمبادرات الحالية والتوجهات المعلنة، ومنها التكيف المناخي، فهناك العديد من التقنيات التي تسهم في التكيف مع التغيرات المناخية، مثال آخر هو الاقتصاد الدائري فهناك العديد من الفرص للابتكار في هذا المجال (مثل إعادة التدوير وغيرها)، والمقترح هنا هو ربط الابتكارات بالجهود الوطنية الحالية لتكون مكملة لها.

2. ما الذي لم يُرصد بعد، وما الذي تتابعه عن كثب؟

تصعب إجابة هذا السؤال بحكم عدم الاطلاع الشامل على الخطط غير المعلنة للجهات، ولكن هناك العديد من الموضوعات المرتبطة بالمبادرات الوطنية، مثل السعودية الخضراء، حيث يستلزم التشجير - وهو إحدى المبادرات – تقنيات متقدمة ومبتكرة في هذا المجال تسهم في تحقيق الطموحات العالية للمبادرة، وهو مجال مرتبط بالمملكة وعدد قليل من الدول بحكم الطبيعة الصحراوية للمملكة.

3. ما الذي يدفع الاستثمارات في الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية؟

الابتكار في البيئة مدفوع بالحاجة أكثر من الاستثمار، ولذلك فهو أكثر صعوبة من غيره من القطاعات، ولذلك فإن الدور الحكومي للابتكار في قطاع البيئة ضروري للغاية، وقد يتعدى التنظيمات والتشريعات الممكنة للابتكار إلى تسهيل الابتكار وتوفير الأدوات التمويلية

للابتكار التي تصب في دعم التوجه الوطني البيئي، وهو أمر لا ينطبق على الشركات الناشئة، بل على كبريات الشركات التي يمكن لها إحداث الفارق في القطاع البيئي في المملكة، على أن تكون هذه الحلول موجهة لخدمة التحديات المحلية البيئية.

4 كيف تتوقع تطور سوق الابتكار في مجال البيئة في السنوات الخمس إلى العشر القادمة؟

المملكة من أكبر الدول التي استثمرت في قطاع البيئة خلال العشر سنوات الماضية، وهي من أكثر الدول إيماناً بالابتكار بصفته الحل الأمثل للتحديات البيئية، كما أصبحت المملكة وجهة استثمارية جذابة، ويمكن الربط بين الابتكار والاستثمار والبيئة من خلال السياسات الموجهة التي تحقق نقلة نوعية في هذا المجال.

5 كيف يمكن للمملكة العربية السعودية أن تكون رائدة عالميًا في مجال الابتكار في مجال البيئة؟

تتبوأ المملكة مكانة رائدة عالميًا في الجهود البيئية، وتُعدّ المبادرة السعودية الخضراء ومبادرة الشرق الأوسط الخضراء مثالين بارزين على ذلك (للمزيد من المعلومات، يُرجى زيارة الموقع الالكتروني للمبادرة). وتُعد المنطقة الجغرافية السعودية من أكثر المناطق تضرراً من تغير المناخ، كما أنها من أكثر المناطق التي تعاني من شحّ المياه في العالم، وهذه التحديات هي الدافع وراء الابتكار بالمجمل، والمملكة متميزة دولياً في المبادرات البيئية، وهناك فرصة ضخمة للاستفادة من هذا التميز في الابتكار البيئي الدولي بما يتناسب مع موقف المملكة، والتحديات المحلية والإقليمية التي تواجهها في قطاع البيئة، ويشمل ذلك قطاعات كثيرة بعيدة عن التغير المناخي الذي تواجهه جميع دول العالم.

المقابلات - الأسئلة الموجهة لقادة القطاع

د. عبدالرحمن الفوزان -صندوق البيئة
رئيس المستشارين

1. ما هي التحديات الرئيسة المتعلقة بالبيئة، وكيف تلعب التقنيات دورًا في التغلب عليها؟

التحدي الرئيس الذي نواجهه يتمثل في ندرة الموارد في بيئة قاحلة، إلى جانب الطموح الواسع لأهدافنا الوطنية — مثل زراعة 10 مليارات شجرة وحماية 30% من المناطق البرية والبحرية. تقليديًا، كان التعامل مع التصحر أو النفايات الحضرية بهذا النطاق يعتمد على الجهد اليدوي ويُدار بردّة الفعل. وهنا برز دور التقنيات، حيث أحدثت نقلة نوعية في هذا القطاع ودعمت جهود الحماية البيئية الفاعلة:

- **رصد النظم البيئية:** تتيح أقمار الرادار الصناعية من الجيل الجديد (SAR) تتبع التنوع الحيوي وصحة المواطن البيئية في الوقت الفعلي، حتى في المناطق النائية والواسعة.
- **كفاءة استخدام الموارد:** في منطقة تعاني من شح المياه، تضمن أنظمة الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي الاستفادة القصوى من كل قطرة ماء، مما يدعم نمو الغطاء النباتي المحلي دون استنزاف المياه الجوفية غير المتجددة.
- **الاقتصاد الدائري:** تعمل تقنيات إدارة النفايات المتقدمة على تحويل تحديات التوسع الحضري إلى فرص لاستعادة الموارد، من خلال تحويل النفايات إلى مواد خام ذات قيمة.

2. ما الذي لم يُرصد بعد، وما الذي تتابعه عن كثب؟

من وجهة نظري، فإن معظم التقنيات البارزة في هذا التقرير تحظى بالاهتمام، إلا أن بعضها لا يزال على هامش المتابعة ولم يُسلَّط عليه الضوء بعد، بانتظار الانتقال إلى حيز التطبيق. أركز بشكل خاص على أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي (الرعي تحت الألواح الشمسية). فبينما يُنظر غالبًا إلى الطاقة الشمسية والحفاظ على الأراضي كمصالح متنافسة، تقدم الزراعة الشمسية نموذجًا تكامليًا ثنائي الاستخدام، حيث توضع الألواح الشمسية فوق أراضي الرعي لتوفير الظل، مما يقلل من تبخر التربة وإجهاد الحرارة على المواشي، بينما تولّد الألواح في الوقت ذاته طاقة نظيفة. إنها حل أنيق لمعادلة الغذاء والطاقة والمياه في بيئتنا الصحراوية. وعلى الرغم من مزاياها، لا تخلو هذه التقنية من تحديات فنية، وهو أمر طبيعي في دورة الابتكار. وتتمثل الخطوة التالية في أن يبادر المطورون إلى سد هذه الفجوات عبر بحوث وتطوير موجهة.

3. ما الذي يدفع الاستثمارات في الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية؟

ما يُحفّز الاستثمار في الابتكار في أي دولة هو ذاته ما يُحفّزه في المملكة العربية السعودية، الرؤية المستقبلية والإطار الهيكلي:

- **الاستراتيجيات الوطنية:** حولت رؤية السعودية 2030 ومبادرة السعودية الخضراء (SGI) حماية البيئة من كونها رفاهية إلى مهمة اقتصادية محورية.
- **الاستدامة المالية:** تعمل مؤسسات مالية عديدة — مثل صندوق البيئة — على تحفيز القطاع الخاص من خلال تقليل مخاطر تبنّي التقنيات الخضراء. فهي لا تكتفي بتمويل المشاريع، بل تسهم في بناء سوق ترتبط فيه صحة البيئة بمرونة الاقتصاد.
- **مهام البحث والتطوير والابتكار:** أولت هيئة البحث والتطوير والابتكار (RDIA) أولوية لمجال "البيئة المستدامة والاحتياجات الأساسية"، من خلال توفير خارطة طريق واضحة وتمويل مخصص للحلول ذات الجاهزية التقنية العالية.
- **الالتزام الوطني بحماية البيئة:** مثلًا، في إطار الاقتصاد الدائري للكربون، تُوجَّه رؤيتنا نحو تطبيق مبادئ "التقليل، وإعادة الاستخدام، وإعادة التدوير، والإزالة " (4Rs)، ما يوجّه رأس المال نحو تقنيات قادرة على احتجاز الانبعاثات وتحويلها إلى قيمة اقتصادية.

4. كيف تتوقع تطور سوق الابتكار في مجال البيئة في السنوات الخمس إلى العشر القادمة؟

شهد سوق الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية نضجًا متسارعًا، حيث نتجاوز مرحلة إثبات المفهوم نحو التصنيع واسع النطاق. وتشمل المحركات الرئيسة للمرحلة القادمة (خلال 5 إلى 10 سنوات):

- **نضج السوق:** أتوقع تطورًا كبيرًا في السوق المحلي يتمثل في إنشاء أنظمة قوية للاعتمادات البيئية. ومع تزايد توافق التوجهات بين القطاعين العام والخاص، ستنتقل الحلول البيئية من كونها مبادرات مدعومة إلى محرك رئيس للقيمة الاقتصادية.
- **توطين الابتكار "صُنع في السعودية":** الانتقال من استيراد التقنيات البيئية إلى تطوير حلول مبتكرة ومُسجلة ببراءات اختراع، مصممة خصيصًا لتناسب بيئتنا المحلية.
- **البيئة المعرفية:** نتجه نحو تكامل البيانات بدلاً من العزلة التقنية؛ إذ ستتغذى بيانات النظم البيئية من الأقمار الصناعية تلقائيًا في أنظمة الري الذكية وإدارة الثروة الحيوانية، مما يخلق نظامًا بيئيًا متكاملًا ذاتي التكيف والتحسين.

5. كيف يمكن للمملكة العربية السعودية أن تكون رائدة عالميًا في مجال الابتكار في مجال البيئة؟

تُعد المملكة العربية السعودية بمثابة "مختبر حي" عالمي، نحوّل فيه تحديات الحرارة الشديدة وندرة المياه إلى نموذج يُحتذى به في المناطق الجافة حول العالم. ولا تقتصر ريادتنا على حدودنا الجغرافية؛ بل نضع خارطة طريق قابلة للتوسع تخدم ما يقارب نصف مساحة اليابسة على كوكب الأرض التي تواجه ظروفًا مماثلة. نحن نعمل على توحيد معايير تقنيات البيئة الجافة للاستخدام العالمي، ونعزز جهود الاستعادة البيئية إقليميًا عبر مبادرة الشرق الأوسط الأخضر، ونقود نموذج الحوكمة الاستباقية. ومن خلال مواءمة استراتيجيتنا الوطنية مع الأطر الدولية المتقدمة، لا نكتفي بمواكبة التوجهات البيئية، بل نُسهم فعليًا في صياغة مستقبل السياسات البيئية العالمية.

المقابلات - الأسئلة الموجهة لقادة القطاع

د. محمد العاصم – موان
نائب الرئيس للتخطيط والتطوير

1. ما هي التحديات الرئيسة المتعلقة بالبيئة، وكيف تلعب التقنيات دورًا في التغلب عليها؟

يواجه قطاع إدارة النفايات مجموعة متنوّعة من التحديات يمكن تصنيفها ضمن خمس فئات رئيسة، هي: تقنيات سلسلة القيمة، والرقمنة وتتبع البيانات، والزيادة الموسمية في كميات النفايات المصاحبة للمواسم الكبرى مثل موسم الحج، إضافة إلى الوعي والقدرات والسلوكيات، وتصميم المواد وتعظيم قيمتها. وتندرج تحت كل فئة من هذه الفئات تحديات متعددة تتطلب معالجتها اتباع مقاربات متخصصة تتناسب مع طبيعة كل تحدٍّ.

وفيما يتعلق بتقنيات سلسلة القيمة، تنشأ العديد من التحديات نتيجة محدودية توفر التقنيات القادرة على معالجة أنواع معينة من النفايات. ويُعد نقص الحلول الابتكارية المجدية اقتصاديًا لمعالجة بطاريات الليثيوم-أيون أحد أبرز هذه التحديات. إذ تواجه عمليات معالجة وإعادة تدوير البطاريات المستهلكة قيودًا متعددة، من أبرزها تعقيد تفكيك المكونات شديدة التكامل، والحاجة إلى تقنيات متقدمة، وغياب المعايير الموحدة بين الشركات المصنّعة. وتمثل هذه التحديات فرصة واعدة لتطوير حلول تقنية مبتكرة يمكن أن تسهم بدور محوري في سد الفجوات القائمة، وتحسين كفاءة الاستفادة من مختلف تدفقات النفايات وتعظيم القيمة المستخلصة منها.

2. ما الذي لم يُرصد بعد، وما الذي تتابعه عن كثب؟

في إطار إدارة قطاع النفايات، يتبنى المركز الوطني لإدارة النفايات (موان) نهجًا متميزًا من خلال تطوير المخططات الرئيسة لإدارة النفايات، والتي تهدف إلى إحداث تحول شامل في القطاع. وقد عمل المشروع على وضع خط أساس دقيق للبنية التحتية القائمة، وتطوير أطر تفصيلية توجه تطور أنظمة إدارة النفايات، إلى جانب إعداد خطط استثمارية متكاملة تشمل مختلف مكونات القطاع. وعوضًا عن التطبيق المباشر لأفضل الممارسات العالمية، تقوم المخططات الرئيسة لإدارة النفايات على تحديد تلك الممارسات وتحليلها وتكييفها بما يتواءم مع واقع البنية التحتية الحالية في المملكة، ويلبي الاحتياجات الوطنية الخاصة عبر جميع مسارات وتدفقات النفايات ذات الصلة.

3. ما الذي يدفع الاستثمارات في الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية؟

تُسهم الفرص الاستثمارية التي جرى تحديدها حاليًا، والمكملة للبنية التحتية القائمة لإدارة النفايات، في خلق سوق واعد للحلول الابتكارية. ويُعد قطاع إدارة النفايات نموذجًا مصغرًا يعكس هذه الآلية، حيث يؤدي وجود فجوة واضحة في البنية التحتية، إلى جانب مستهدفات السياسات الداعمة للاقتصاد الدائري ضمن رؤية السعودية 2030، إلى توليد فرص سوقية باتت تجذب استثمارات القطاع الخاص، مدعومة بنماذج الشراكة بين القطاعين العام والخاص والأطر التنظيمية الحديثة. ويتكرر هذا النمط ذاته في قطاعات أخرى مثل الطاقة والمياه والصناعة. كما تُبرز محدودية القدرات الاستيعابية لمعالجة بعض أنواع النفايات، ونقص توفر التقنيات المناسبة لها، الحاجة إلى تطوير تقنيات متقدمة ومحلية. وتشكل هذه الفرص الاستثمارية، مقرونة بالتزام المركز الوطني لإدارة النفايات بتحقيق الاستدامة البيئية، عاملًا محفزًا لاستثمارات القطاع الخاص الهادفة إلى سد الفجوات القائمة وتحسين الأداء العام للقطاع.

4. كيف تتوقع تطور سوق الابتكار في مجال البيئة في السنوات الخمس إلى العشر القادمة؟

سيواصل الابتكار في قطاع إدارة النفايات تطوره بالتوازي مع التوسع المتزايد في البنية التحتية للقطاع. وخلال السنوات الخمس إلى العشر المقبلة، يُتوقع أن ينتقل التركيز من الابتكارات القائمة على تقديم حلول منفصلة إلى تحسين التقنيات القائمة ورفع كفاءتها وتعزيز جدواها الاقتصادية. كما يُرجح أن يشهد السوق توسعًا ملحوظًا في تبني الأدوات والأنظمة الرقمية، بما يسهم في تحسين عمليات الرصد والمتابعة، ودعم اتخاذ القرار، وتعزيز الالتزام بالمتطلبات التنظيمية داخل قطاع إدارة النفايات.

5. كيف يمكن للمملكة العربية السعودية أن تكون رائدة عالميًا في مجال الابتكار في مجال البيئة؟

إن إرساء إطار تنظيمي واضح يشجّع على التجريب وتنفيذ المشاريع التجريبية، مع الحفاظ في الوقت ذاته على الضوابط البيئية، من شأنه استقطاب المبتكرين محليًا ودوليًا، وإنتاج حلول بيئية عالية الأثر في مجال إدارة النفايات. كما أن تعزيز قدرات البحث والتطوير، والاستثمار في الكفاءات الوطنية، وتفعيل الشراكات بين القطاع الصناعي والجامعات والجهات الحكومية، سيُسهم في رفع مستوى القدرة الابتكارية للمملكة. ومن خلال هذه المبادرات، تستطيع المملكة ترسيخ مكانتها بوصفها رائدة في هذا القطاع، وتصدير خبراتها وتأثيرها إلى المستويين الإقليمي والعالمي.

المقابلات - الأسئلة الموجهة لقادة القطاع

سلطان السيف – تيرافيول و سرك
رئيس تنفيذي ومدير تنفيذي

1. ما هي التحديات الرئيسة المتعلقة بالبيئة، وكيف تلعب التقنيات دورًا في التغلب عليها؟

التحدي الرئيس يتمثل في التحول من نموذج الاقتصاد الخطي القائم على "الاستخراج–الإنتاج–التخلص" إلى نموذج اقتصاد دائري كامل على نطاق وطني.

- **من منظور شركة تيرافيول:** يكمن التحدي في ضمان اتساق وجودة المواد الأولية المستخلصة من النفايات. نحن نستخدم تقنيات المعالجة الميكانيكية الحيوية المتقدمة لتحويل النفايات البلدية إلى وقود عالي الجودة مشتق من النفايات، مما يوفر بديلاً مستدامًا للوقود الأحفوري في الصناعات الثقيلة مثل صناعة الأسمنت.
- **من منظور سرك:** يتمثل التحدي في إدارة تعقيد وكميات تدفقات النفايات المتنوعة. نحن نعتمد على تقنيات الفرز المعززة بالذكاء الاصطناعي، واللوجستيات المدعومة بإنترنت الأشياء، لتحويل عمليات جمع النفايات إلى منظومة ذكية قائمة على البيانات لاستعادة الموارد.

2. ما الذي لم يُرصد بعد، وما الذي تتابعه عن كثب؟

أركز بشكل خاص على التحلل الحراري للكتلة الحيوية لإنتاج الفحم الحيوي (Biochar). وبينما يركز جزء كبير من القطاع على استعادة الطاقة، نرى فرصة كبيرة في تحويل النفايات الزراعية والعضوية إلى فحم حيوي. تدعم هذه التقنية مبادرة السعودية الخضراء من خلال تعزيز صحة التربة وتوفير وسيلة دائمة لاحتجاز الكربون في البيئات الجافة. إضافة إلى ذلك، يُعد تسعير الكربون ضمن الاقتصاد الدائري—من خلال دمج إدارة النفايات في أسواق أرصدة الكربون العالمية—مجالاً ناشئًا سيُعيد تعريف جدوى تمويل المشاريع.

3. ما الذي يدفع الاستثمارات في الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية؟

تُحفَّز الاستثمارات بفضل خارطة الطريق التنظيمية الواضحة التي يوفّرها نظام إدارة النفايات الوطني والتوجهات الاستراتيجية لرؤية السعودية 2030. وبالإضافة إلى الإطار التنظيمي، تبرز حاجة متزايدة للتكامل الصناعي؛ فلم تعد الشركات تكتفي بالتخلص من النفايات، بل تسعى أيضاً لتحقيق أمن الطاقة. ويُعد نموذج تيرافيول لتحويل النفايات إلى وقود صناعي أداة فعالة لمواجهة تقلبات الأسعار، مع تمكين الشركات من تحقيق أهدافها في مجالات البيئة والمجتمع والحوكمة (ESG).

4. كيف تتوقع تطور سوق الابتكار في مجال البيئة في السنوات الخمس إلى العشر القادمة؟

سنشهد تحولاً كاملاً من مفهوم "إدارة النفايات" إلى "إدارة الموارد". سيتطور السوق ليُصبح منظومة متكاملة تُعد فيها "النفايات" المادة الأولية الرئيسة لقطاعات صناعية جديدة. ونتوقع نشوء قطاع محلي نابض بتقنيات المناخ، وتطوّر فيه الشركات الناشئة السعودية حلولًا محلية ملائمة للبيئات الشحيحة بالمياه ومرتفعة الحرارة، مع إمكانية تصدير هذه الخبرات عالميًا.

5. كيف يمكن للمملكة العربية السعودية أن تكون رائدة عالميًا في مجال الابتكار في مجال البيئة؟

بأن تصبح المملكة مركزًا عالميًا لـ "البتروكيميائيات الدائرية" و"محاور النفايات المتكاملة"، فإنها تتمتع بميزة فريدة بفضل وجود شركات صناعية رائدة عالميًا مثل (سابك وأرامكو)، بالإضافة إلى جهة وطنية متخصصة تقود الاقتصاد الدائري (سرك). ومن خلال توحيد استخدام تقنيات الثورة الصناعية الرابعة (كالذكاء الاصطناعي، والبلوك تشين، والروبوتات) في معالجة النفايات، يمكننا تصدير نماذج تشغيلية لبناء مدن حديثة ومستدامة إلى بقية أنحاء العالم.

المقابلات - الأسئلة الموجهة لقادة القطاع [3/1]

د. نزار حداد – منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة
مدير برنامج

1. ما هي التحديات الرئيسة المتعلقة بالبيئة، وكيف تلعب التقنيات دورًا في التغلب عليها؟

تُعدّ التحديات البيئية ذات الأولوية في المملكة العربية السعودية معروفة جيدًا، ويمكن تلخيصها في: محدودية الأنظمة والقدرة على القياس المنتظم للظروف البيئية، ضعف التنسيق في التخطيط واتخاذ القرار بين الجهات المختلفة، نقص القدرات المؤسسية والبشرية، ضعف تطبيق الأنظمة والامتثال البيئي، وغياب النظم المثبتة لتوسيع نطاق استخدام التقنيات والممارسات المبتكرة. والأهم من ذلك، ضرورة توافق التقنيات والابتكار مع السياسات، وإجراءات التشغيل القياسية، والعوامل التمكينية الأخرى.

فيما يلي أبرز التحديات البيئية:

- **ضعف نظم الرصد والتحقق البيئي** لحالة تدهور الأراضي، والنباتات، والضغوط على التنوع الحيوي، وأداء جهود الاستعادة. تجمع منظمة الأغذية والزراعة (الفاو) بين تحليلات الاستشعار عن بعد السحابية مثل "SEPAL" وعمليات جمع البيانات الميدانية المعيارية مثل "Open Foris" لتوفير مراقبة قابلة للتكرار، وضمان الجودة، وتقارير قابلة للتحقق، ما يُمكّن من توجيه التدخلات وتتبعها وتعديلها حسب الحاجة.
- **نقص القدرات البشرية والمؤسسية** في تشغيل أنظمة وأدوات البيانات البيئية ودعم اتخاذ القرار. وغالبًا ما يتم سدّ هذه الفجوات من خلال متعاقدين خارجيين، لكن بطريقة مجزأة، مما يقلل من عائد التقنيات والابتكار. تدعم الفاو برامج تدريبية موجهة، وتطوير إرشادات وبروتوكولات، وآليات ضمان جودة، تساعد الفرق الوطنية السعودية على إنتاج خرائط اتخاذ القرار، والمؤشرات البيئية، ولوحات المعلومات بشكل متسق.
- **ضعف دمج الضوابط البيئية** في التخطيط المكاني وقرارات الاستثمار. تسهم أدوات الفاو مثل منصة "يدًا بيد" وأدوات الاستشعار عن بعد والتحقق الميداني في دمج البيانات المكانية متعددة القطاعات، لربط حساسية النظم البيئية ومخاطر تدهور الأراضي باحتياجات البنية التحتية، مما يُعزز من أولويات التنمية ويقلل من النزاعات المكلفة من خلال دمج الاعتبارات البيئية مسبقًا في تخطيط استخدام الأراضي.
- **تدهور شديد في المراعي الواسعة** نتيجة عدة عوامل، أهمها ضعف الحوكمة في إدارة الرعي، بما في ذلك الضغط الرعوي غير المستدام، وضعف تطبيق الأنظمة، وغموض قواعد الوصول، ونقص آليات إدارة المراعي. تدعم الفاو عبر منصة "معرفة الرعاة" مفهوم "إدارة الرعي الرقمية" كنظام تشغيلي يشمل إجراءات معيارية، ومؤشرات، وآليات إنفاذ، وخرائط موسمية لحركة الرعاة، واتفاقات تشاركية على قواعد الوصول. وتُستخدم أدوات الاستشعار عن بعد والتحقق الميداني لتمكين الحوكمة عبر إتاحة رؤية أوضح للظروف ومستوى الامتثال.

- **عدم توافق الحوافز الحكومية، خصوصًا في نظم الرعي**، يمثل عائقًا رئيسًا رغم جهود المملكة في التشريعات وإعادة هيكلة القطاع. تدعم الفاو تصميم حزم حوافز قائمة على النتائج، تربط بين التصاريح وإجراءات التشغيل القياسية ومؤشرات الأداء الرئيسة، وعمليات التفتيش المبنية على المخاطر، والغرامات/الرسوم التدريجية، والعقود القائمة على تحقيق النتائج، ما يسمح بمكافأة الجهات الممتثلة وردع المخالفين.
- **الهدر في نفايات الأغذية والكتلة الحيوية**، نتيجة للتجزئة وضعف التكامل في التخطيط والتمويل. يمكن للفاو دعم تخطيط الاقتصاد الحيوي الدائري من خلال رسم خرائط لإمدادات الكتلة الحيوية (فقد الأغذية، النفايات، المخلفات، السماد)، وتحديد مواقع المعالجة المثلى (التسميد، الهضم اللاهوائي، الفحم الحيوي)، وربطها بجهود استصلاح الأراضي وتحسين التربة، مما يهيئ فرصًا للاستثمار والشراكات بين القطاعين العام والخاص وفق نماذج خدمات قائمة على الأداء البيئي والاستعادة.
- **القيود الشديدة المرتبطة بالجفاف ونُدرة المياه**، والتي تتفاقم نتيجة تغيّر المناخ. تدعم أدوات الفاو مثل "WaPOR" قياس إنتاجية المياه وأنماط التبخر والنتح، ما يعزز جدولة الري الذكي والمساءلة، كما تتيح أدوات المحاكاة مثل "AquaCrop" اختبار استراتيجيات مواجهة نقص المياه تحت الضغط الحراري، وتوفر أدوات الإنذار المبكر مثل "ASIS" آليات لتحويل إشارات الجفاف والإجهاد النباتي إلى إجراءات استباقية لحماية الاستثمارات وسبل العيش.

تقدم الفاو مجموعة من التقنيات المناسبة لمواجهة التحديات البيئية في السعودية، إلا أن فعاليتها تتطلب إدماجها في الحوكمة وسير العمل، وتعزيزها بأنظمة رصد وتقييم موحدة، وتنسيق بين الجهات، ودعم اتخاذ القرار المكاني، وأنظمة امتثال قابلة للتنفيذ، وتمويل قائم على النتائج. وتكمن القيمة المضافة للفاو في تمكين سلسلة متكاملة من الأدوات والبروتوكولات إلى بناء القدرات والتشغيل، بما يضمن قرارات بيئية أكثر تنسيقًا وفعالية وقابلة للقياس على نطاق واسع في المملكة.

المقابلات - الأسئلة الموجهة لقادة القطاع [3/2]

د. نزار حداد – منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة
مدير برنامج

2. ما الذي لم يُرصد بعد، وما الذي تتابعه عن كثب؟

تتمثّل قوة منظمة الأغذية والزراعة (الفاو) في دعم تنفيذ التقنيات البيئية، ولا سيما من خلال اختيارها، وتجريبها، وتوسيع نطاق استخدامها في المملكة العربية السعودية. ومن خلال تجاربنا، نرصد باستمرار الفجوة التشغيلية بين الطموحات البيئية وما يمكن تطبيقه فعليًا على أرض الواقع بشكل مستدام. فيما يلي أبرز القضايا التي نتابعها عن كثب:

- **عنق الزجاجة في التنسيق:** تتقاطع مهام الجهات المعنية في مجالات استصلاح الأراضي، والتنوع الحيوي، والرصد البيئي، مما يؤدي أحيانًا إلى تنفيذ تدخلات متوازية دون تحقيق استفادة متبادلة أو مشاركة البيانات اللازمة لتحديد أولويات الإجراءات، الأمر الذي يرفع من تكاليف التقنيات ويضعف الأثر المرجو.
- **استدامة التقنيات:** تنفيذ العقود دون تعزيز موازٍ للقدرات المؤسسية قد يؤدي إلى فشل الاستدامة. إذ أن المنصات والتطبيقات التي تُسلَّم عبر عقود ذات نوايا طيبة قد لا تصمد دون وجود ملكية وطنية، وبنية مؤسسية، وحوكمة بيانات واضحة، وترتيبات تمويل تشغيلي طويلة الأجل.
- **جودة البيانات:** يجري اعتماد التطبيقات المحمولة والأدوات الرقمية بوتيرة أسرع من تنمية القدرات الفنية اللازمة لمراقبة الجودة، والمعايرة، وجمع البيانات. وتزداد المخاطر حين تُستبدل عمليات التحقق الميداني المُكلفة بهذه الأدوات، مما يخلق وفرة في البيانات لكنها تفتقر للجودة المطلوبة لدعم التخطيط واتخاذ القرار الفعّال.
- **نماذج المحاكاة:** مع توفر أدوات النمذجة المعقدة للجميع، يزداد استخدامها في التخطيط والتصميم والتنفيذ. إلا أن الجهود المبذولة في المعايرة والتحقق غالبًا ما تكون محدودة، إما بسبب ضغوط التسليم السريع أو نقص البيانات الميدانية اللازمة للمعايرة الدقيقة.
- **مشاركة المجتمعات المحلية:** في القطاع البيئي، لا تحظى المؤسسات والمجتمعات المحلية بالمشاركة الكافية، غالبًا بسبب غياب هياكل الحوكمة التشاركية، مثل اتفاقيات استخدام الموارد، وقواعد الوصول، والحوافز. فيبقى أصحاب العلاقة الأساسيون في موقع المتفرج، في حين ينبغي أن يكونوا شركاء فاعلين في إدارة الموارد البيئية والأراضي.

تأتي هذه النتائج ثمرة مشاركة منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (الفاو) المتواصلة في قطاع البيئة، من خلال مشروع التنمية الزراعية الريفية المستدامة، الذي تم تصميمه بالتعاون مع وزارة البيئة والمياه والزراعة، وينفَّذ بالشراكة مع المركز الوطني لتنمية الغطاء النباتي ومكافحة التصحر.

من خلال هذا المشروع، دعمت الفاو عمليات التخطيط والتنفيذ المبنية على الأدلة في مجالات الغابات، والمراعي، والمتنزهات الوطنية، ومكافحة التصحر، والأنظمة الجغرافية المكانية، مستفيدة من مجموعة من التقنيات البيئية التي تطورها. ففي مجال الغابات، تم مسح ورسم خرائط لـ613,132 هكتارًا ضمن 492 موقعًا غابيًا في خمسة مناطق، كما أُعدت خمسة أطالس غابية إقليمية، وطُوّر وجُرّب أول جرد وطني للغابات في منطقة الباحة، تمهيدًا لتوسيع نطاقه على مستوى المملكة. أما في المراعي، فقد جرى مسح وتقييم ورسم خرائط لـ26 موقعًا ذا أولوية، تغطي نحو 8 ملايين هكتار. وفي مجال مكافحة التصحر، نُفِّذت تجربة للتحكم بزحف الرمال في منطقة واحدة، مما أسهم في حماية 22,176 هكتارًا و616,650 شجرة. وفي المتنزهات الوطنية، أسهمت التقييمات الميدانية في تطوير نموذج لمتنزه وطني، ودعمت عمليات التخطيط على مستوى المملكة. وفي ما يخص البيانات والأنظمة الجغرافية المكانية، قدمت الفاو دعمًا فنيًا مستمرًا، وأنتجت أكثر من 80 منتجًا فنيًا، كما أسهمت في تطوير منصة رقمية وأدوات موحّدة لجمع البيانات المتعلقة بالغابات، والمراعي، وتأهيل الغطاء النباتي، ورصد تدهور الأراضي. ولضمان استدامة هذه الجهود، دعمت الفاو بناء قدرات أكثر من 300 موظف من الكادرين الإداري والميداني في المركز الوطني لتنمية الغطاء النباتي ومكافحة التصحر. من منظور الفاو، تُعدّ الأولوية هي مواءمة نشر التقنيات البيئية والابتكار مع أنظمة تشغيلية منسّقة. وتشمل أدوات الفاو: منصة "يدًا بيد"، ومجموعة من أدوات الاستشعار عن بعد مفتوحة المصدر مثل "SEPAL" و"Open Foris"، ونماذج المحاكاة مثل "WaPOR" و"ASIS"، إلى جانب آليات التحقق الميداني والمشاركة المجتمعية، ما يوفر أساسًا متينًا لتطبيق مستدام وسريع للتقنيات والابتكارات البيئية في المملكة.

3. ما الذي يدفع الاستثمارات في الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية؟

تُحفَّز الاستثمارات في الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية غالبًا من خلال الالتزام بتحقيق الأهداف الوطنية، مثل رؤية السعودية 2030 ومبادرات السعودية الخضراء.

ويركز القطاع بشكل كبير على الحلول التقنية المتقدمة، وتبني أفضل الممارسات والمعايير الدولية، وتقليل المخاطر، وتعزيز الكفاءة.

تكمن قيمة منظمة الأغذية والزراعة (الفاو) في ربط هذه الاستثمارات بأنظمة وطنية قابلة للتنفيذ، وتوفير طبقات تخطيط مشتركة، بما يضمن مواءمة الابتكارات مع الأولويات الوطنية، واستدامتها بعد انتهاء المشاريع، وتحقيق نتائج موثوقة تفتح المجال لمزيد من التمويل والتوسّع.

المقابلات - الأسئلة الموجهة لقادة القطاع [3/3]

د. نزار حداد – منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة
مدير برنامج

4. كيف تتوقع تطور سوق الابتكار في مجال البيئة في السنوات الخمس إلى العشر القادمة؟

شهد سوق الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية نضجًا متسارعًا، حيث نتجاوز مرحلة إثبات من المتوقع أن يشهد سوق الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية نموًا سريعًا، مدفوعًا بالتزامات واستثمارات حكومية عبر مشاريع رائدة مثل مبادرة السعودية الخضراء. ومن المهم الإشارة إلى أن المملكة تُبدي التزامًا عاليًا في هذا القطاع، وتشترط إدماج حماية البيئة في جميع المشاريع. واستنادًا إلى التوجهات الحالية، ستركز مجالات الابتكار البيئي الرئيسة على إدارة المياه، بما في ذلك حصاد المياه المتجددة، واستخدام المياه الرمادية، ورفع كفاءة استخدامها، إلى جانب العمل المناخي والتقنيات الذكية الملائمة للمناخ، ورقمنة القطاع البيئي. سيتم توسيع استخدام أدوات الرصد الرقمي، وتحليلات الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء في إدارة المراعي والغابات والمناطق المحمية. كما ستؤدي أدوات الاستشعار عن بعد السحابية والمراقبة الأرضية دورًا محوريًا في جهود العمل المناخي، وأنظمة الري الذكية، ونمذجة كفاءة استخدام المياه وسيناريوهاتها، بما يشمل استصلاح الأراضي والتشجير الحضري. وستُحرز المملكة تقدمًا في تطوير واختبار وتكييف نماذج لدمج استثمارات القطاع الخاص في تأهيل الموارد الأرضية، وآليات الدفع مقابل الخدمات البيئية، لا سيما على مستوى المجتمعات المحلية ومستخدمي الأراضي. كما ستُسهم التطورات الحديثة في إنشاء أنظمة بيانات بيئية متكاملة وفعّالة، تعتمد على مصادر جماعية وبيانات المواطنين، ما يُسهل دمج الذكاء البيئي في الأعمال، وتطوير البنية التحتية، وتخطيط استخدام الأراضي، وصياغة السياسات. إضافة إلى ذلك، سيساهم إنشاء مراكز للابتكار في اختبار وتكييف وتوسيع نطاق تطبيق التقنيات والابتكارات البيئية.

5. كيف يمكن للمملكة العربية السعودية أن تكون رائدة عالميًا في مجال الابتكار في مجال البيئة؟

تستعرض هذه الفقرة كيف يمكن للمملكة العربية السعودية الاستفادة من تقنيات وحلول منظمة الأغذية والزراعة (الفاو) لترسيخ مكانتها كقائد عالمي في الابتكار البيئي. وتتمثل الاستراتيجية الأساسية في بناء "نظام وطني بيئي" يتيح نموذجًا موحدًا ومنسقًا للتنفيذ. وبمساندة الفاو، يمكن ترسيخ هذا النموذج عبر طبقات تخطيط واستهداف مكانية مشتركة باستخدام أدوات مثل منصة "يدًا بيد"، إلى جانب أدوات التصور الجاهزة لاتخاذ القرار مثل Earth Map يقوم النموذج على رؤية موحدة للأولويات والتدخلات والمخاطر بين الجهات، تدعمها لوحات معلومات تُحوّل البيانات إلى قرارات موجهة لصانعي السياسات، والفرق الفنية، وجهات الرقابة الميدانية. يمكن للسعودية تعزيز مكانتها

العالمية من خلال إضفاء الطابع المؤسسي على منظومة الرصد والإبلاغ والتحقق (MRV) التي تدمج بين تحليلات الأقمار الصناعية والأدلة الميدانية المحققة. وتُعد منصة "SEPAL" مثالية لمعالجة بيانات الاستشعار عن بعد القابلة للتوسيع، بينما توفر "Open Foris" أدوات موحدة لجمع البيانات الميدانية والتحقق وضمان الجودة. غير أن قيمة الفاو لا تكمن فقط في الأدوات، بل في تفعيل إجراءات التشغيل القياسية، وتصميم منهجيات المعاينة، وتحديد المؤشرات، ونقاط ضبط الجودة، وبناء القدرات الوطنية بما يضمن استدامة الأنظمة بعد انتهاء المشاريع. نظرًا لأن المياه تمثل القيد الأهم في المملكة، فإن تعزيز مكانتها كقوة بيئية عالمية يتطلب أن تصبح مرجعًا عالميًا للحلول البيئية الذكية مائيًا، بما يشمل استصلاح الأراضي وتعزيز الغطاء النباتي. وتدعم الفاو نهجًا لإدارة المياه يربط بين البروتوكولات التشغيلية والأدلة القابلة للقياس، من خلال أدوات مثل "WaPOR" لمتابعة أنماط التبخر والنتح وإنتاجية المياه، و "AquaCrop" لاختبار سيناريوهات الري المقنن والضغط الحراري. وهذا محوري لتقييم أداء التقنيات عند تعميمها في بيئات تعاني من شح المياه، ما يحوّل "الري الذكي" من مجرد شعار تسويقي إلى دليل إجرائي خاضع للمساءلة. وفي مجال المراعي، تستطيع المملكة أن تقود جهود الاستدامة من خلال دمج عملي بين الحوكمة والتقنية. ويمكن للفاو أن تسهم في ترجمة السياسات الرعوية إلى إطار رقمي لإدارة الرعي يتضمن إجراءات تشغيل واضحة، ومؤشرات، وتنبيهات للامتثال، مدعومة بالتخطيط الموسمي، وخرائط التنقل والممرات، واتفاقيات تشاركية بشأن قواعد الوصول إلى الأراضي الرعوية. ما يجعل ظروف الرعي والامتثال مرئية وقابلة للتحليل، ويُحوّل أدوات الحوكمة إلى تغييرات سلوكية ملموسة. أما الخطوة الاستراتيجية الأخرى التي تعزز مكانة السعودية عالميًا، فتتمثل في توسيع نطاق التجارب الناجحة وربطها بنماذج تمويل قائمة على النتائج المحققة. وهنا يمكن للفاو أن تسهم في تصميم برامج تعتمد على نماذج خدماتية قائمة على الأداء، وآليات دفع مقابل النتائج تستند إلى أدلة (MRV) لتفعيل المدفوعات، وتقليل المخاطر أمام القطاع الخاص، واستقطاب التمويل الأخضر الجماعي. ويكون هذا النموذج قابلاً للتكرار باستخدام عناصر جاهزة تشمل: تنسيقًا فعالًا، نتائج محققة، إدارة صارمة للمياه، حوكمة قابلة للتنفيذ للمراعي، وتمويلًا مجزيًا للأثر، مع تركيز على البيئات الجافة وشبه الجافة، وقابلية التطبيق عالميًا في بيئات مماثلة.

المقابلات - الأسئلة الموجهة لقادة القطاع

د. راتول داس – أكوا باور
مدير تنفيذي، الأبحاث والتطوير

1. ما هي التحديات الرئيسة المتعلقة بالبيئة، وكيف تلعب التقنيات دورًا في التغلب عليها؟

يتمثّل التحدّي البيئي الأبرز في قطاع تحلية المياه بالمملكة العربية السعودية في ارتفاع كثافة استهلاك الطاقة تاريخيًا، إذ اعتمدت هذه الصناعة لسنوات طويلة على حرق مئات الآلاف من براميل النفط يوميًا لتشغيل المحطات الحرارية. وللحد من ذلك، شرعت المملكة في تحوّل متسارع نحو تقنية التناضح العكسي لمياه البحر (SWRO) وهي تقنية تتطلّب قدرًا أقل بكثير من الكهرباء. وبحلول عام 2026، يجري تعزيز هذا التحوّل عبر التوسّع في تركيب أجهزة استعادة الطاقة، مثل مبادلات الضغط، القادرة على إعادة تدوير ما يصل إلى 98% من الطاقة الكامنة في التيارات المهدرة، إلى جانب دمج مزارع شمسية مخصّصة لفصل إنتاج المياه عن شبكة الكهرباء كثيفة الانبعاثات. وقد أسهمت هذه التطورات، مقرونةً بإدارة الأحمال المعتمدة على الذكاء الاصطناعي، في خفض الطاقة اللازمة لإنتاج المتر المكعب من المياه إلى مستويات قياسية تقترب من 2.7 كيلوواط/ساعة، مما حوّل تحلية المياه من عبء معتمد على الوقود الأحفوري إلى ركيزة أساسية في طموحات المملكة لتحقيق الحياد الصفري.

2. ما الذي لم يُرصد بعد، وما الذي تتابعه عن كثب؟

ما لا يزال خارج دائرة الاهتمام الإعلامي السائد، لكنه يكتسب زخمًا متزايدًا في المملكة، هو التوجّه نحو تقنية التناضح العكسي الدُفعي (Batch RO). فعلى الرغم من أن التناضح العكسي التقليدي لا يزال التقنية المهيمنة حاليًا، فإن تقنية "Batch RO" التي يجري اختبارها عبر شراكات بحثية مثل التعاون مع شركة هارموني للتحلية المنبثقة عن معهد ماساتشوستس للتقنية (MIT)– تعتمد على دورة ضغط ذات حلقة مغلقة، تتجنّب الهدر الطاقي الناتج عن التدفق المستمر، ما يفتح المجال لرفع كفاءة التشغيل إلى مستويات تقترب من الحدّ النظري للديناميكا الحرارية.

3. ما الذي يدفع الاستثمارات في الابتكار البيئي في المملكة العربية السعودية؟

ينطلق الاستثمار في ابتكارات تحلية المياه بالمملكة العربية السعودية أساسًا من الحاجة الاستراتيجية إلى فصل إنتاج المياه عن استهلاك الوقود الأحفوري، بما يتيح تحرير ملايين البراميل من النفط الخام للتصدير، مع خفض التكلفة المستوية لإنتاج المياه. وفي إطار التكليفين المتوازيين لرؤية السعودية 2030 ومبادرة السعودية الخضراء، تُولي المملكة أولوية قصوى لما يمكن وصفه بـ"سيادة الماء والطاقة"، عبر التحوّل إلى تقنيات تناضح عكسي عالية الكفاءة ومتكاملة مع الطاقة الشمسية، دعمًا لتحقيق أهدافها الطموحة للحياد الصفري. وإلى جانب ذلك، يتعزّز توجّه قوي لتحويل القطاع من مستورد للتقنيات إلى

مُصدّر عالمي لها؛ فمن خلال توطين تصنيع أغشية التناضح العكسي ودمج تطبيقات الذكاء الاصطناعي الصناعي، تعمل المملكة على بناء اقتصاد معرفي يتعامل مع أمن المياه بوصفه أصلًا صناعيًا عالي التقنية. ولا يقتصر هذا التحوّل على تأمين إمدادات مستدامة للمشروعات العملاقة فحسب، بل يرسّخ أيضًا موقع المملكة بوصفها منصة الاختبار الرئيسة للجيل القادم من تقنيات المياه القادرة على الصمود في مواجهة تغيّر المناخ.

4. كيف تتوقع تطور سوق الابتكار في مجال البيئة في السنوات الخمس إلى العشر القادمة؟

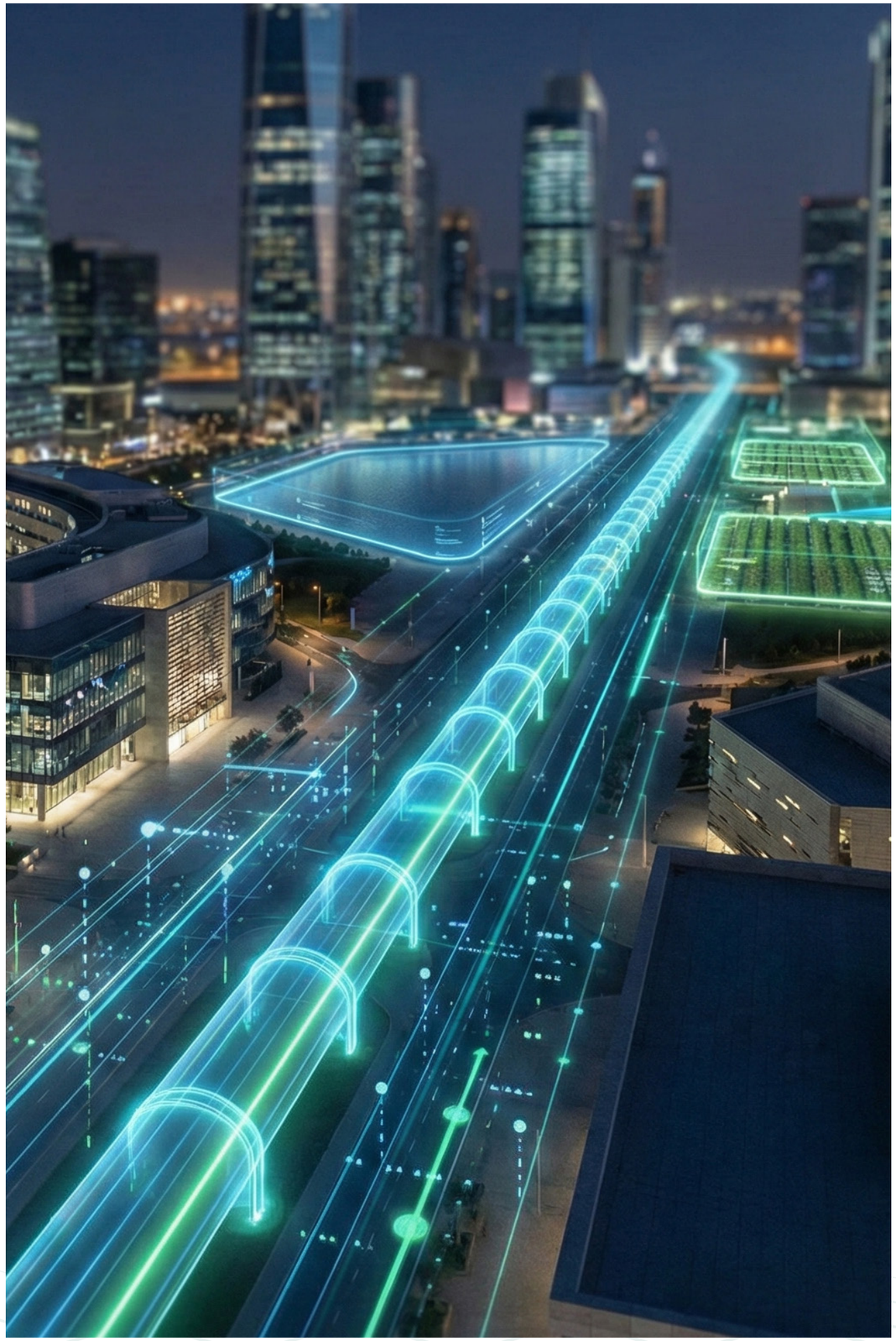
خلال السنوات الخمس إلى العشر القادمة، سينتقل قطاع تحلية المياه في المملكة العربية السعودية من مجرد التوسّع الكمي في الإنتاج إلى تحقيق مفهوم "المياه المحايدة طاقيًا"، عبر تكامل تقني جذري وشامل. وبحلول عام 2030، تستهدف المملكة تشغيل 50% من طاقتها التحلية باستخدام مصادر الطاقة المتجددة، على أن تشهد السنوات الخمس اللاحقة نشر المفاعلات النووية الصغيرة المعيارية (SMRs) لتوفير حمل أساسي مستقر وخالٍ من الكربون. ويجري إدارة هذا التحوّل الطاقي من خلال سوق "رقمي أولًا"، حيث تعمل محطات ذاتية التشغيل—مدعومة بالذكاء الاصطناعي التنبؤي والتوائم الرقمية—على تحسين استخدام كل كيلوواط/ساعة لحظيًا. وفي المحصلة النهائية، يتجه التركيز من كون المملكة أكبر مستهلك عالمي لتقنيات المياه إلى أن تصبح المصدّر الرئيس لها، عبر توطين تصنيع المكونات الجوهرية مثل الأغشية ومضخات الضغط العالي، وتحويل أمن المياه إلى محرّك صناعي عالي التقنية.

5. كيف يمكن للمملكة العربية السعودية أن تكون رائدة عالميًا في مجال الابتكار في مجال البيئة؟

تسعى المملكة العربية السعودية إلى ترسيخ موقعها بوصفها قائدًا عالميًا في الابتكار البيئي، عبر الانتقال من دور مستهلك للتقنية إلى محرّك رئيس لتوسيع نطاقها وبناء الملكية الفكرية. وقد شكّلت "أيام الابتكار 2026" في الرياض محطة مفصلية، تُوّجت بتوقيع 27 شراكة استراتيجية ضمّمت خصيصًا لردم الفجوة بين أبحاث المختبرات والتطبيق الصناعي. وتكشف مخرجات الحفل عن توجّه واضح نحو "الكفاءة التحويلية"، إذ تعتزم المملكة اختبار تقنية التناضح العكسي الدُفعي (Batch RO) بالتعاون مع "Harmony Desalting" التابعة لمعهد "MIT"، لدفع استرداد الطاقة إلى حدوده الديناميكية الحرارية القصوى، إلى جانب تقنية ضغط البخار بالجاذبية بالتعاون مع "WGA"، وهي تقنية خضراء تتجاوز القيود التقليدية للأنظمة الحرارية والغشائية، بهدف خفض تكلفة إنتاج المياه بصورة جذرية. ومن خلال دمج هذه الحلول العميقة مع الذكاء الاصطناعي الصناعي لأتمتة الأحمال الطاقية، واستخدام أغشية متقدمة مقاومة للتلوث، لا تكتفي المملكة بتأمين مستقبلها المائي، بل تعمل أيضًا على تحويل هذه الابتكارات المحلية إلى منتجات عالية التقنية موجّهة للأسواق العالمية.

بطاقة تقييم معايير الختيار

	التقنية	مجال التقنية	مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)	درجة تسليط الضوء
	مجموعة التقنية ذات الأولوية (1)			
1	طائرة مسيرة مستقلة مزودة بتقنية التصوير البصري للغاز للكشف عن التسرب وإصلاحه	نظم الكشف الجوي	9	32
2	الأقمار الصناعية عالية الدقة لرصد الميثان	نظم الكشف الجوي	9	46
3	الكشف عن ملوثات الهواء الخطرة على حدود الموقع باستخدام الذكاء الاصطناعي	شبكات الرصد الأرضية	8	11
4	شبكات المراقبة المستمرة للميثان	شبكات الرصد الأرضية	8	51
5	شبكات الحساسات منخفضة التكلفة والمعايرة بالذكاء الاصطناعي	شبكات الرصد الأرضية	8	40
6	المراقبة المحيطية بالليزر مفتوح المسار	شبكات الرصد الأرضية	8	8
7	رسم الخرائط وتقدير الانبعاثات المحمولة	نظم الكشف الجوي	8	31
8	الفحص غير المستهدف للمواد الكيميائية باستخدام مطيافية الكتلة عالية الدقة	الامتثال وتقنيات المخابر التحليلية	7	56
9	تحليلات الامتثال عالية الإنتاجية لمركبات "PFAS"	الامتثال وتقنيات المخابر التحليلية	8	51
10	نظم المراقبة التنبؤية للانبعاثات باستخدام التوائم الرقمية للعمليات	نظم الذكاء الرقمي	9	21
11	التقارير البيئية الآلية وفق لوائح التقنية التنظيمية	نظم الذكاء الرقمي	7	48
12	شبكات حساسات الروائح المدعومة بالتعلم الآلي	شبكات الرصد الأرضية	7	7
13	خطوط سير العمل الآلية لضمان الجودة ومراقبتها	الامتثال وتقنيات المخابر التحليلية	9	53
14	الذكاء المتكامل لتطبيق اللوائح باستخدام الأقمار الصناعية والنماذج	نظم الذكاء الرقمي	7	24
15	قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي	نظم الذكاء الرقمي	6	76



قاموس المصطلحات

مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)

تُستخدم مستويات جاهزية التقنيّة كطريقة لتقييم نضج التقنية المطورة، وله مقياس من 1-9 (من المبادئ الأساسية والبحوث إلى الأنظمة الفعلية المثبتة والتطبيق التجاري الكامل)

TRL1	TRL2	TRL3	TRL4	TRL5
أبحاث تقنيّة أساسية	أبحاث تطبيقية	وظائف مهمة	اختبارات معملية من مكون النموذج الأولي أو العملية	اختبارات معملية للنظام المُدمج

TRL6	TRL7	TRL8	TRL9
التحقق من النموذج الأولي	عرض النظام التجريبي	التصميم التجاري	الاستخدام التجاري الكامل

مستوى جاهزية القدرات (CRL)

أداة تقييم تُستخدم لقياس جاهزية التقنية لدخول السوق وجدواها الاقتصادية، وله مقياس من 1 - 9. يركز هذا المقياس على نموذج العمل، والتحقق من ملاءمة السوق، والحاجة التجارية للتقنية، بما يضمن توافق الحل المقترح مع متطلبات السوق وامتلاكه لحالة عمل قابلة للتنفيذ. وعلى عكس مقياس TRL، يُعدCRL أكثر موضوعية، ويتطلب تحليلًا سوقيًا مفصلًا.

CRL1	CRL2	CRL3	CRL4	CRL5
• الإمكانات والتجهيزات العلمية الأساسية محدودة في المملكة العربية السعودية •	• تم تنفيذ أبحاث علوم أساسية على نطاق محدود في المملكة من قبل أفراد محليين وأجنبيين • تتوفر المعدات المخبرية الأساسية داخل المملكة، مع اعتماد محدود على الاستعانة بمصادر خارجية	• تحتوي العديد من المختبرات في المملكة على القدرة الكاملة على إجراء أبحاث علمية أساسية مناسبة • تُنشر مخرجات الأبحاث من المختبرات المحلية على نطاق واسع، وتحظى بالاقتباس في المجلات الدولية	• تم تنفيذ تطبيقات علمية وعملية للتقنيات ذات الصلة على نطاق محدود، إما في مختبرات سعودية أو من قبل شركات التقنيات المحلية في المملكة (مثل الشركات متعددة الجنسيات والجهات الوطنية الرائدة) •	• تم تطوير نماذج تقنية عملية في عدد من المختبرات السعودية و/أو مع شركات • نُشرت النتائج على نطاق واسع • تم تمكين مجموعة كبيرة من العلماء والمهندسين والتقنيين السعوديين ذوي الكفاءة العالية

CRL6	CRL7	CRL8	CRL9
• نجحت مختبرات أو شركات سعودية في إنتاج نماذج أولية قابلة للتسويق(MVP) لمكونات تقنية مكتملة الوظائف • تم عرض هذه النماذج الأولية في منتديات ومؤتمرات عامة	• تتوفر سعة تصنيع محلية على نطاق واسع داخل المملكة • وإذا كانت التقنية مبنية على خدمة، فيمكن نشرها وتقديمها على مستوى وطني	• تتوفر سعة تصنيع محلية على مستويات تكلفة تُقارن بأنظمة مشابهة • التقنية المبنية على خدمة، يمكن نشرها وتقديمها على مستوى وطني	• قامت القدرة التصنيعية المحلية بإنتاج كميات كبيرة تم بيعها على المستوى الوطني والدولي • تم نشر التقنية المبنيه على خدمة في عدة دول

المصادر:

1. TRL – قامت ناسا بوضع التعريف: https://esto.nasa.gov/files/trl_definitions.pdf. هناك وصف مفصل للأجهزة والبرمجيات: https://www.nasa.gov/pdf/458490main_TRL_Definitions.pdf

2. CRL – التعريف من دليل المهمة الوطنية الصادر عن RDIA

قاموس المصطلحات

3.1 مراقبة التلوث والامتثال

	المصطلح	الوصف
1	طائرة مسيرة مستقلة مزودة بتقنية التصوير البصري للغاز للكشف عن التسرب وإصلاحه	أنظمة "الطائرة بدون طيار في صندوق" والمزودة بتقنية تصوير الغازات البصرية تؤتمت عمليات الكشف عن التسربات وإصلاحها عبر تنفيذ مهام مجدولة، والتقاط الأدلة المرئية والموسومة جغرافيًا للانبعاثات، وإنشاء سجلات التفتيش الجاهزة للجهات التنظيمية. وتتمثل القفزة الجديدة في العمليات الذاتية (الإطلاق عن بُعد، ومسارات الطيران القابلة للتكرار، وتوثيق الأدلة بشكل معياري) جنبًا إلى جنب مع دمج التحليلات الآلية وأوامر التسربات العرضية إلى انبعاثات غير متناسبة وشكاوى عامة. وتكمن قيمة الامتثال في السرعة، وقابلية التدقيق، وتقليل الاعتماد على الجولات اليدوية في الموقع.
2	الأقمار الصناعية عالية الدقة لرصد الميثان	تكتشف الأنظمة الفضائية الجديدة أعمدة الميثان وتقدّرها على نطاق المنشآت، مما يمكّن من تحديد "المصدرين الخارقين" بشكل مستقل، والتحقق من الانبعاثات المبلغ عنها ذاتيًا، واستهداف عمليات التفتيش في المواقع الأكثر تأثيرًا. وتأتي القيمة الناشئة من الدقة المكانية العالية، وخوارزميات الاسترجاع المحسنة، ووتيرة إعادة النظر بشكل أسرع، وبوابات البيانات المفتوحة أو التي يمكن الوصول إليها. وبالنسبة لوزارة البيئة والمياه والزراعة، يُعمم نفس منطق المراقبة بما يتجاوز الميثان: يمكن أن يؤدي الكشف عن الأعمدة الصناعية والتفاعلات بين الأرض والغلاف الجوي عبر الأقمار الصناعية إلى تعزيز سلاسل الأدلة للإنفاذ والسياسات. والتحول في الامتثال من عمليات التفتيش التفاعلية إلى اللوائح القائمة على المعلومات الاستخباراتية مع القياس الموثوق من الأطراف الخارجية.
3	الكشف عن ملوثات الهواء الخطرة على حدود الموقع باستخدام الذكاء الاصطناعي	تعتمد مراقبة الحدود الصناعية المدعومة بالذكاء الاصطناعي على أجهزة استشعار موزعة حول مواقع المنشآت للكشف عن ارتفاعات مفاجئة في الملوثات الهوائية الخطرة مثل المركبات العضوية المتطايرة (مثل البنزين/التولوين)، ثم تستخدم نماذج كشف الشذوذ والاستدلال لتحديد الانبعاثات المحتملة ودعم التحقيق السريع. وتكمن الميزة الناشئة في تحليلات الوقت الفعلي (في زمن الاستجابة المنخفض)، وتصنيف الأدحاث تلقائيًا، ودمج النتائج في سير العمل الخاص بالامتثال (إنشاء الحالات، حزم الأدلة، وأولوية عمليات التفتيش). وبالنسبة لوزارة البيئة والمياه والزراعة، فإن ذلك مرتبط مباشرة بالممرات الصناعية والمستقبلات الحساسة مثل حدود المدن، والمدارس، والمستشفيات. وعند تنفيذه بشكل صحيح، يقلل ذلك من تعرض المجتمع للمخاطر ويحوّل الشكاوى إلى بيانات قابلة للقياس ويمكن اتخاذ إجراءات إنفاذية بناءً عليها.
4	شبكات المراقبة المستمرة للميثان	تستخدم شبكات المراقبة المستمرة للميثان أجهزة استشعار ثابتة (نقطية أو مفتوحة المسار) إلى جانب التحليلات لاكتشاف الانبعاثات وتحديد موقعها، وزيادة دقتها في القياس على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع. ويكمن التحوّل الناشئ في الانتقال من "الكشف فقط" إلى أطر التقارير والمصالحة المعتمدة على القياس، بما في ذلك الإرشادات حول كيفية دعم المراقبة المستمرة لتقدير الانبعاثات وضمان الامتثال. وبالنسبة لوزارة البيئة والمياه والزراعة، تعتبر المراقبة المستمرة للميثان مهمة في المواقع التي تكون فيها التسربات متقطعة وسهلة الفقدان عند استخدام البرامج الدورية للكشف عن التسربات وإصلاحها. كما تدعم هذه التقنية الامتثال الاستباقي، فالمشغلون يكتشفون المشكلات مبكرًا، والجهات التنظيمية تحصل على شفافية محسّنة، وتُركّز موارد الإنفاذ على الأحداث ذات التأثير الكبير. كما أن المعايير ومستويات القبول في تطور مستمر، وهذا بالضبط ما يجعلها عنصرًا في قائمة المراقبة.
5	شبكات الحساسات منخفضة التكلفة والمعايرة بالذكاء الاصطناعي	يمكن لشبكات كثيفة من أجهزة الاستشعار الهوائية منخفضة التكلفة رسم خرائط لتدرجات التلوث على مستوى الأحياء، وتأثيرات الحواف الصناعية، والأحداث العرضية—طالما كانت المعايرة قوية وموثوقة- والتقنية الناشئة هي المعايرة المعتمدة على التعلم الآلي والتعلّم بالنقل، والتي تصحح انحراف المعايرة، والتحيّزات المكانية، والاعتمادات على الظروف الجوية، مما يدفع بيانات الحساسات منخفضة التكلفة لتقترب من أداء على مستوى اتخاذ القرار. وبالنسبة لوزارة البيئة والمياه والزراعة، فإن هذا يتيح تغطية أوسع مقارنةً بمحطات المراجع فقط، ويدعم إدارة التعرض بشكل عادل، ويساعد على تحديد أولويات التفتيش والتخفيف في المناطق الحضرية سريعة النمو. وتكمن المخاطر في سوء الاستخدام: فبدون تطبيق إجراءات ضمان الجودة ومراقبتها، يمكن الطعن في صحة بيانات الحساسات منخفضة التكلفة. وتكمن الفرصة في دمج المعايرة المعتمدة على التعلم الآلي مع بروتوكولات التموقع المشترك وإجراءات الحوكمة لجعل البيانات قابلة للدفاع عنها عند اتخاذ القرارات التشغيلية.
6	المراقبة المحيطية بالليزر مفتوح المسار	تقنية المراقبة المحيطية بالليزر مفتوح المسار (مثل TDLAS والأساليب البصرية المرتبطة بها) تقيس تركيزات الغازات على طول مسار شعاع عبر محيط المنشآت أو الممرات الصناعية. تؤعد هذه التقنية قوية للكشف المستمر عن الانبعاثات المنتشرة، ويمكن أن تدعم إعادة بناء الأحداث عند دمجها مع بيانات الأرصاد الجوية والنمذجة العكسية. وتكمن الميزة الناشئة في الأنظمة المدمجة والقادرة على قياس عدة غازات، والاستقرار الأفضل، وأنماط النشر المتزايدة والتي تتكامل مع تحليلات الامتثال (مثل التنبيهات، وتحديد المواقع، وحزم الأدلة). بالنسبة لوزارة البيئة والمياه والزراعة، فإن هذا مرتبط بمناطق البتروكيماويات، وسلاسل القيمة للأسمدة/الأمونيا، والمنشآت الكبيرة إذ من الممكن أن تفشل الحساسات النقطية في رصد الانبعاثات بين المعدات. كما يزداد الاعتماد على هذه التقنية، لكن الاستخدام واسع النطاق الموحد من قبل الجهات التنظيمية لا يزال في طور التطور.
7	رسم الخرائط وتقدير الانبعاثات المحمولة	يعتمد رسم الخرائط المتحركة للأعمدة الانبعاثية على استخدام المركبات، أو الأنظمة المحمولة، أو الطائرات بدون طيار، أو الطائرات التقليدية لتحديد مواقع الانبعاثات بسرعة وقياس كميتها باستخدام طرق التوازن الكتلي، أو مستويات التدفق، أو الانعكاس العكسي للأعمدة، تكمن القيمة الناشئة في القياس الكمي الأسرع (وليس مجرد الكشف)، وانخفاض تكاليف النشر بفضل الطرق المحمولة، وتحسين توصيف عدم اليقين بما يمكن الدفاع عنه في سياقات الامتثال. بالنسبة للوزارة، تُعد هذه التقنية جسرًا عمليًا بين الأقمار الصناعية (للكشف الواسع) والتفتيش على مستوى المكونات (للتفاصيل الدقيقة)، وخصوصًا للمجمعات الصناعية ومنشآت النفايات. وتمكّن هذه التقنية من تنفيذ دورات سريعة لـ ""اكتشاف–قياس–معالجة""، وتساعد الجهات التنظيمية على تحديد أولويات التعامل مع أسوأ مصادر الانبعاثات. أما طرق القياس الكمي والمعايير الموحدة فلا تزال في طور التطور.

	المصطلح	الوصف
8	الفحص غير المستهدف للمواد الكيميائية باستخدام مطيافية الكتلة عالية الدقة	تكتشف تقنية المسح غير الموجه باستخدام مطيافية الكتلة عالية الدقة المواد الكيميائية خارج القوائم المحددة مسبقًا، وهو أمر بالغ الأهمية لمراقبة الملوثات الناشئة، والنواتج الثانوية غير المعروفة، والتعرضات للمخاليط الكيميائية. وتكمن القدرة الناشئة في أرشفة البيانات الموحدة، والفحص الاستعادي ("إعادة فحص العينات القديمة للبحث عن مشتبه بهم جدد")، وسير العمل الموجه للجهات التنظيمية والذي يربط عمليات الكشف بتحديد أولويات المخاطر والتحقيق في المصادر. وبالنسبة لوزارة البيئة والمياه والزراعة، تعمل تقنية المسح غير الموجه على تعزيز الالتزام بمعايير المياه والمخلفات، ودعم التحقيق في التصريفات الصناعية، والكشف المبكر عن الملوثات الجديدة قبل أن تصبح منتشرة. أما الجزء الصعب فهو تحويلها إلى عمليات تشغيلية فاعلة، ويشمل ذلك قواعد البيانات المرجعية، وضمان الجودة ومراقبتها، وقابلية الدفاع القانوني. كما تنتقل عدة دول حاليًا من مرحلة البحث العلمي إلى الاستخدام المنهجي لأغراض تنظيمية.
9	تحليلات الامتثال عالية الإنتاجية لمركبات "PFAS"	يتسارع رصد مركبات PFAS عالميًا مع دخول الحدود الجديدة ومتطلبات الإبلاغ حيز التنفيذ. والطبقة التقنية الناشئة هي سير العمل المخبري عالي الإنتاجية (تحسين تحضير العينات، وخطوط أنابيب LC-MS/MS، وإضافات لفحص المشتبه بهم، والأتمتة)، إلى جانب أنظمة البيانات التي تتعامل مع كميات كبيرة من المراقبة وتنتج تقارير جاهزة للجهات التنظيمية. بالنسبة لوزارة البيئة والمياه والزراعة، تعد قدرة رصد مركبات PFAS مهمة لحماية مياه الشرب، والإشراف على التصريفات الصناعية، ومعالجة ترشيح المكبات، ومواقع استخدام رغوة مكافحة الحرائق القديمة. حتى وإن اختلفت المعايير الوطنية، فإن سلاسل التوريد العالمية ومخاطر السمعة تتقارب نحو الشفافية بشأن مركبات PFAS. وتكمن الفجوة قريبة المدى في التكلفة والقدرة التشغيلية—لذلك تعد التحليلات القابلة للتوسع وتصميم المراقبة ذات الأولوية عناصر أساسية.
10	نظم المراقبة التنبؤية للانبعاثات باستخدام التوائم الرقمية للعمليات	تقوم أنظمة المراقبة التنبؤية للانبعاثات بتقدير الانبعاثات اعتمادًا على بيانات العمليات/التشغيل باستخدام نماذج معايرة—وغالبًا ما تُعتبر مكملاً فعالاً من حيث التكلفة أو بديلاً حيث يكون القياس المباشر المستمر صعبًا. وتكمن الحدود الناشئة في الدمج مع التوائم الرقمية للعمليات، وتحسين حوكمة النماذج، وتعزيز ضمان الجودة ومراقبتها وضمان القدرة على الدفاع عنها أثناء التدقيق. بالنسبة للوزارة، يمكن لأنظمة PEMS تقليل النقاط العمياء في الامتثال في المنشآت المعقدة (مثل محطات الطاقة، والمصافي، والغلايات الصناعية)، وتمكين الكشف المستمر عن الشذوذ الذي يحفّز الصيانة أو التحقيق قبل تجاوز الحدود المقررة.و لا تعتبر هذه التقنية جديدة، لكن الدمج مع التوائم الرقمية على مستوى الامتثال وتوسيع الشراكات الصناعية يجعلها منطقة تتطور بسرعة.
11	التقارير البيئية الآلية وفق لوائح التقنية التنظيمية	تؤتمت التقنية التنظيمية البيئية أعمال الامتثال: بدءًا من جمع البيانات من أجهزة الاستشعار ونظام الأتمتة والتعامل الموزع، والتحقق من صحتها، وكشف الشذوذ، والحساب الآلي للمؤشرات التنظيمية، ووصولًا إلى تقديم البيانات بصيغ قابلة للقراءة آليًا مع مسارات تدقيق. إن القيمة الناشئة ليست في "لوحات المعلومات" بحد ذاتها، بل في الامتثال المصمم مسبقًا: تقليل التعامل اليدوي، وخفض حالات التأخير أو الإبلاغ المفقود، وتحسين سلامة الأدلة، وتمكين التفتيش القائم على المخاطر. بالنسبة للوزارة، يقلل هذا من العقبات في تطبيق الإنفاذ ويسرّع الإجراءات التصحيحية من خلال إنشاء سجلات متسقة وقابلة للتتبع عبر المنشآت المختلفة. كما يدعم ذلك الإشراف القابل للتوسع مع نمو النشاط الصناعي. وينشأ هذا المجال الآن لأن المعايير الخاصة بالتقارير القابلة للقراءة آليًا، والتكامل بين الأنظمة، والضوابط الآلية لا تزال في طور التكوين.
12	شبكات حساسات الروائح المدعومة بالتعلم الآلي	تعد حساسات الروائح المدعومة قضية سياسية حساسة لأنها تولد الكثير من الشكاوى، لكنها صعبة الإثبات. تجمع شبكات الحساسات الإلكترونية "E-nose" الناشئة بين مصفوفات الحساسات الكيميائية ومصنّفات التعلم الآلي وتقنيات تعويض الانحراف لتحديد بصمات الروائح وربطها بأحداث المنشأة والظروف الجوية. بالنسبة للوزارة، تعتبر تقنية الروائح مهمة حول المكبات، ومحطات معالجة مياه الصرف، والمناطق الصناعية، وحدود المدن سريعة النمو، حيث تتحول مشكلات الإزعاج إلى ضغط اجتماعي ومخاوف صحية عامة. وتظل هذه التقنية ناشئة لأن الاستقرار طويل المدى، والمعايرة، وقابلية الدفاع القانوني لم تُوحد بعد بشكل كامل. ومع ذلك، فإن الزخم قوي في مواد الحساسات وطرق الذكاء الاصطناعي، مما يجعل هذا المجال ذا تأثير كبير لتحديث ممارسات الامتثال.
13	خطوط سير العمل الآلية لضمان الجودة ومراقبتها	تركز خطوط سير ضمان الجودة ومراقبتها الآلية لأنظمة المراقبة المستمرة على سلامة البيانات: قواعد التحقق، التنبيهات الآلية، التعامل مع الفجوات، التخزين الآمن، ومخرجات التقارير الموحدة. ويكمن الجزء الناشئ في المعالجة الرقمية المعتمدة والمراعية للأمن، والتي تجعل بيانات الانبعاثات قابلة للدفاع القانوني وتقلل من فرص التلاعب أو الأخطاء العرضية في الإبلاغ. بالنسبة للوزارة، يُعد هذا أساسيًا: فالتطبيق الجيد للإنفاذ يحتاج إلى بيانات قوية وموثوقة. وتتوافق حلول نظام الأتمتة والتعامل الموزع الحديثة مع المعايير الخاصة بأداء النظام، ويمكن أن تتكامل مباشرة مع أنظمة الإبلاغ للجهات التنظيمية. بينما توجد أنظمة الأتمتة والتعامل الموزع، فإن الاتجاه نحو خطوط سير معتمدة، وقابلة للتدقيق، ومدركة للأمن السيبراني، ومتكاملة مع التحليلات لا يزال في مرحلة التطور، وهو أمر حاسم مع تحول المراقبة نحو الامتثال المستمر.
14	الذكاء المتكامل لتطبيق اللوائح باستخدام الأقمار الصناعية والنماذج	يجمع هذا بين الأرصاد الساتلية، والحساسات الأرضية، ونماذج جودة الهواء لتوليد رؤى جاهزة للإنفاذ: اكتشاف الأعمدة الانبعاثية، ورسم خرائط احتمالية المصدر، والتنبؤ بالحوادث، وتحديد أولويات التفتيش. ويكمن الجانب الناشئ في الدمج التشغيلي—أي الانتقال من نماذج البحث التجريبية إلى أنظمة دعم القرار التي يمكن للجهات التنظيمية استخدامها يوميًا. بالنسبة للوزارة، يدعم ذلك إدارة الحوادث الصناعية والتعرض الحضري مع تحسين استخدام موارد التفتيش. ويحسّن هذا النهج الشفافية من خلال توثيق أسباب استهداف التفتيش لمواقع محددة باستخدام أدلة متعددة المصادر. وتظل هذه التقنية ناشئة لأن طرق دمج البيانات، والتواصل بشأن عدم اليقين، وحوكمة الإنفاذ لا تزال قيد التطوير، والعديد من التطبيقات لم تُوحَّد بعد أو تُؤسَّس على نطاق واسع.
15	قياس الانبعاثات والكربون الديناميكي	يعمل القياس الديناميكي للانبعاثات والكربون على قياس الانبعاثات وشدة الكربون في الزمن شبه الحقيقي باستخدام بيانات محددة بالسياق (ظروف التشغيل، مزيج الطاقة، حالات العمليات)، بدلًا من الاعتماد على عوامل ثابتة وتقديرات نهاية الفترة. وتكمن القيمة الناشئة في مواءمة الامتثال مع متطلبات الإبلاغ المتشددة وآليات السوق، بالإضافة إلى تحكم تشغيلي أسرع من خلال الكشف المبكر عن أنماط الانبعاثات غير الطبيعية. بالنسبة للوزارة، فإن الصلة غير مباشرة لكنها في تزايد: فمع تفصيل تقارير المنشآت الصناعية وجعلها قابلة للقراءة آليًا، يمكن للقياس الديناميكي أن يعزز المصداقية ويقلل النزاعات. كما أنه يتماشى مع الأهداف الوطنية الأوسع للاستدامة. وتظل هذه التقنية ناشئة لأن المعايير، والتكامل بين الأنظمة، وطرق التحقق لا تزال تتطور، والعديد من التطبيقات لا تزال في مراحلها المبكرة أو محدودة بقطاعات معينة.

قاموس المصطلحات

الاختصارات

	الاختصارات	المصطلحات والوصف
1	SAR	يعد رادار الفتحة التركيبية تقنية تصوير راداري تقوم على إنشاء صور عالية الدقة من خلال معالجة الإشارات الصادرة عن هوائي متحرك، بحيث تحاكي فتحة هوائي أكبر من الحجم الفعلي.
2	P-band	نطاق تردد راداري (0.3–1 غيغاهرتز) يتيح اختراق أعماق الغطاء النباتي، وهو مناسب لتطبيق حلول مراقبة الكتلة الحيوية وباطن الأرض.
3	L-band	نطاق تردد راداري (1–2 غيغاهرتز) يستخدم لمراقبة رطوبة التربة واختراق الغطاء النباتي بصورة متوسطة لتطبيقات رادار الفتحة التركيبية.
4	S-band	نطاق تردد (2–4 غيغاهرتز) يستخدم لمراقبة السطح بدقة أعلى نسبيًا مع قدرة اختراق محدودة، وهو مفيد لمتابعة تغيرات سطح التربة.
5	JAXA's ALOS-4	القمر الصناعي التابع لوكالة الفضاء اليابانية "ALOS 4" (القمر الصناعي للمراقبة الأرضية المتقدمة-4) والذي يعمل بنطاق L band، وهو مخصص لمراقبة الظروف البيئية وإدارة الكوارث.
6	NASA-ISRO's	بعثة رادار الفتحة التركيبية المشتركة بين ناسا ومنظمة أبحاث الفضاء الهندية لمراقبة المناخ، وتقييم الكربون ورصد الكوارث الطبيعية.
7	NISAR	نيسار هو رادار الفتحة التركيبية الناتج عن مشروع الشراكة بين ناسا ومنظمة أبحاث الفضاء الهندية، وهو قمر صناعي ثنائي التردد يستخدم للمراقبة الأرضية حول العالم، ومراقبة حالات الاختلال.
8	R&D	البحث والتطوير: أنشطة ابتكارية تنفذها الجهات الحكومية أو الشركات لاستحداث خدمات ومنتجات أو تحسين الخدمات والمنتجات القائمة.
9	ESA's	وكالة الفضاء الأوروبية: منظمة حكومية دولية تضم 22 دولة، وتتولى مسؤولية تنسيق البعثات والأنشطة الفضائية.
10	BIOMASS mission	بعثة تابعة لوكالة الفضاء الأوروبية ضمن مجموعة أقمار Earth Explorer، وتستخدم رادار P band لقياس الكتلة الحيوية العالمية ومخزونات الكربون.
11	geosynchronous	مدار متزامن مع دوران الأرض، يتيح للأقمار الصناعية البقاء في الموضع نفسه نسبيًا فوق سطح الأرض، وتوفير تغطية مستمرة ومتواصلة لمنطقة محددة.
12	Sentinel	مجموعة الأقمار الصناعية التابعة لوكالة الفضاء الأوروبية، والتي توفر بيانات المراقبة المنهجية للأرض ضمن برنامج "كوبرنيكوس" للمراقبة البيئية.
13	RADARSAT	برنامج أقمار رادارسات هو برنامج كندا للأقمار الصناعية برادار الفتحة التركيبية (SAR)، حيث يوفر مراقبة أرضية في جميع الظروف الجوية، لدعم مراقبة البيئة وإدارة الموارد.
14	LEO	قمر ليو هو قمر صناعي منخفض المدار يقع على ارتفاع (160-2000) كيلومتر، ويتيح تغطية مستمرة للأرض بفترات مدارية أقصر.
15	Shakuntala	قمر صناعي استكشافي فائق الطيف أطلقته الشركة الهندية الناشئة "Pixxel"، يزن أقل من 15 كجم، ويجمع بيانات تفصيلية عن سطح الأرض عبر أكثر من 150 نطاقًا طيفيًا وبدقة مكانية تبلغ 10 أمتار.
16	Hyperspectral Imaging	تقنية تقوم بالتقاط بيانات الطيف الكهرومغناطيسي عبر مئات النطاقات الطيفية الضيقة، مما يتيح التعرّف الدقيق على المواد وإجراء التحليل الطيفي.

	الاختصارات	المصطلحات والوصف
17	PV-livestock	أنظمة تجمع بين الألواح الشمسية الكهروضوئية ورعي الثروة الحيوانية في نفس المساحة من الأرض، بما يحقق الاستخدام المزدوج للأراضي من خلال إنتاج الطاقة ودعم الأنشطة الزراعية في آنٍ واحد.
18	Megawatt (MW)	وحدة قدرة كهربائية تساوي مليون واط، وتُستخدم لقياس القدرة اللحظية لتوليد الطاقة أو استهلاكها.
19	photovoltaic (PV)	تقنية تحول ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء باستخدام مواد شبه موصلة، وتُستخدم عادة في الألواح أو الخلايا الشمسية السيلكونية.
20	Agriculture and Applied Economics Association (AAEA)	تشير إلى منظمة مهنية تضم خبراء الاقتصاد الزراعي والباحثين ومحللي السياسات، وتركز على قضايا الغذاء والزراعة والموارد الطبيعية واقتصاد الموارد.
21	Levelized Cost of Electricity (LCOE)	متوسط تكلفة إنتاج وحدة الكهرباء على مدى العمر التشغيلي لمحطة الطاقة، وتشمل جميع التكاليف الرأسمالية والتشغيلية.
22	Kilowatt (kW)	وحدة قدرة كهربائية تعادل ١,٠٠٠ واط، وتُستخدم لقياس معدل استهلاك الطاقة أو القدرة الإنتاجية.
23	INR	العملة الرسمية للهند، الروبية الهندية.
24	Mollification	التخفيف من آثار التغير المناخي أو تقليل حدتها عبر تنفيذ استراتيجيات التكيف والحد من الأثر.
25	ACWA Power	شركة سعودية تعمل في مجال الطاقة المتجددة، وتُعد أكبر شركة خاصة لتحلية المياه في العالم، وفي التحول الرائد في مجال الطاقة والهيدروجين الأخضر.
26	Badeel	شركة مياه وكهرباء قابضة مملوكة بالكامل لصندوق الاستثمارات العامة، ومتخصصة في تطوير مشاريع الطاقة المتجددة في المملكة العربية السعودية.
27	Saudi Aramco Power Company (SAPCO)	شركة تابعة لأرامكو السعودية مختصة بتطوير البنية التحتية لتوليد الكهرباء ومشاريع الطاقة المتجددة، بما يدعم التنمية الزراعية والصناعية في المملكة العربية السعودية.
28	Gigawatt (GW)	وحدة قدرة كهربائية تعادل مليار واط أو ١,٠٠٠ ميجاواط، وتستخدم عادةً لقياس قدرة مرافق توليد الطاقة واسعة النطاق.
29	Afif1	محطة طاقة شمسية كهروضوئية بقدرة ٢ جيجاواط تقع في منطقة الرياض بالمملكة العربية السعودية، وقد طُوّرت ضمن توسع المملكة في مشاريع الطاقة المتجددة في إطار رؤية السعودية ٢٠٣٠.
30	Afif2	محطة طاقة شمسية كهروضوئية بقدرة ٢ جيجاواط تقع في منطقة الرياض بالمملكة العربية السعودية، وقد طُوّرت ضمن توسع المملكة في مشاريع الطاقة المتجددة في إطار رؤية السعودية ٢٠٣٠.
31	Electrochemical slag	تشير إلى النفايات الميتالورجية المعالجة باستخدام التيار الكهربائي لاستخراج المعادن القيمة من خلال التفاعلات الكهروكيميائية الخاضعة للتحكم والأكسدة.

قاموس المصطلحات

الاختصارات

	الاختصارات	المصطلحات والوصف
32	EU's Critical Raw Materials Act	إطار تشريعي أوروبي يحدد مستهدفات مرونة سلاسل الإمداد ومعايير إعادة التدوير للمواد الاستراتيجية الأساسية في مسيرة التحول الأخضر.
33	Bioleaching	عملية تقنية حيوية تستخدم الكائنات الدقيقة لاستخراج المعادن من المواد الخام والمخلفات من خلال الأكسدة الحيوية والإذابة.
34	Biological metal extraction processes	أساليب تقنية حيوية تستخدم كائنات حية مثل البكتيريا والفطريات لاستخلاص المعادن من المواد الخام والمخلفات.
35	Virgin mining	استخراج المعادن والفلزات مباشرة من رواسب الخام الطبيعية في قشرة الأرض باستخدام طرق التعدين التقليدية.
36	IoT	شبكة من الأجهزة المادية المتصلة ببعضها البعض والمزودة بأجهزة الاستشعار والبرمجيات والتي تقوم بجمع البيانات وتبادلها لاسلكيًا.
37	Metallurgy	علم تقنية استخراج المعادن من المواد الخام وتكريرها ومعالجتها لإنتاج مواد وسبائك مفيدة.
38	Aramco	أرامكو السعودية هي شركة النفط الوطنية السعودية وأكبر شركة طاقة متكاملة في العالم.
39	Ma'aden	شركة التعدين العربية السعودية هي شركة تعدين عملاقة مملوكة للدولة تعمل في مجال تعدين العديد من السلع، وتعد واحدة من أسرع شركات التعدين نموًا في العالم، وتركز على الذهب والفوسفات والألومنيوم.
40	AI	الذكاء الاصطناعي هو محاكاة عمليات الذكاء البشري بواسطة نظام حاسوبي، بما في ذلك التعلم والتفكير وحل المشكلات والإدراك وفهم اللغة لأداء مهام عادةً ما تتطلب قدرات إدراكية بشرية.
41	Black-box systems	نماذج حاسوبية تظل عمليات اتخاذ القرار الداخلية فيها غامضة وغير مفهومة للمستخدمين، على الرغم من أنها تنتج مخرجات واضحة من مدخلات معينة.
42	Weather forecasting APIs	واجهة برمجة التطبيقات التي توفر وصولًا موحدًا إلى خدمات البيانات الجوية، مما يتيح دمج تنبؤات الطقس الفورية في الأنظمة الزراعية.
43	Multi-sensor fusion system	الأطر التقنية المتكاملة التي تجمع بيانات من أنواع متعددة من أجهزة الاستشعار لإنشاء نظام شامل لمراقبة البيئة في الوقت الفعلي بهدف تمكين التطبيقات الزراعية الدقيقة.
44	IoT-enabled edge computing system	هياكل الحوسبة الموزعة التي تدمج أجهزة استشعار إنترنت الأشياء مع قدرات المعالجة المحلية لتمكين تحليل البيانات فوريًا، وتعزيز الاستجابة الآلية.
45	Nano-agriculture technology	الأنظمة الزراعية المتقدمة التي تستخدم مواد وأجهزة نانوية لتحسين إنتاجية المحاصيل، وتحسين توزيع المغذيات، وتحسين تطبيقات الزراعة الدقيقة.
46	Nanotechnology	المعالجة العلمية وهندسة المواد على نطاق النانو (١-١٠٠) لخلق خصائص جديدة وتطبيقات أكثر كفاءة.
47	ISOA-ASVM algorithm	خوارزمية تجمع بين خوارزمية تحسين الأسراب وآلة الدعم التكيفي من أجل تحسين عملية اتخاذ القرارات الزراعية وتحسين نظام الري الدقيق.

	الاختصارات	المصطلحات والوصف
48	LightAgro	منصة أمنية زراعية تعتمد على تقنية سلسلة الكتل الخفيفة وتستخدم المصادقة التشفيرية secp256k1 لحماية بيانات الري المتصلة بإنترنت الأشياء عن طريق قدرات الكشف عن التهديدات المعززة بالتعلم الآلي.
49	Secp256k1	معيار تشفير منحنى إهليلجي معين، يستخدم للتوقيعات الرقمية والمصادقة، ويوفر أمانًا بمقدار 256 بت لتطبيقات سلسلة الكتل.
50	Machine Learning (ML)	الطريقة الحسابية التي تمكن الأنظمة من تعلم الأنماط تلقائيًا من البيانات وإجراء التنبؤات دون تعليمات برمجية صريحة.
51	GIS	نظام المعلومات الجغرافية (GIS) هو تقنية التحليل المكاني والتي تقوم بجمع البيانات الجغرافية وتخزينها وتحليلها وتصورها لأغراض رسم الخرائط الزراعية وإدارة الموارد.
52	M&A	عمليات الدمج والاستحواذ
53	IPOs	الطرح العام الأولي
54	EWA	قطاعات البيئة والمياه والزراعة
55	RAG AI	تقنية الذكاء الاصطناعي المعززة للاسترجاع، التي تجمع بين البحث وإجابات الذكاء الاصطناعي

شركاؤنا

وزارة البيئة والمياه والزراعة
Ministry of Environment Water & Agriculture

المركز الوطني للرقابة على الالتزام البيئي
National Center for Environmental Compliance
المملكة العربية السعودية

الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة
The General Authority Of Meterology and Environment Protection

مركز الملك عبد العزيز للخيل العربية الأصيلة
King Abdulaziz Arabian Horse Center

سرك SIRC
الشركة السعودية الاستثمارية لإعادة التدوير
Saudi Investment Recycling Company

المركز الوطني لتنمية الغطاء النباتي ومكافحة التصحر
National Center for Vegetation Cover Development & Combating Desertification

مـوان MWAN
المركز الوطني لإدارة النفايات
National Center for Waste Management

صندوق البيئة
ENVIRONMENT FUND

المركز الوطني لتنمية الحياة الفطرية
National Center for Wildlife
المملكة العربية السعودية

المركز الوطني للأرصاد
National Center for Meteorology
المملكة العربية السعودية

Food and Agriculture Organization of the United Nations

acwa

وزارة البيئة والمياه والزراعة
Ministry of Environment Water & Agriculture
نبراس
NPRAS
المنصة الوطنية لاستشراف البحث والابتكار للاستدامة
National Platform of R&I Analytics for Sustainability
مـــوان MWAN
المركز الوطني لإدارة النفايات
National Center for Waste Management