وزارة البيئة والمياه والزراعة
Ministry of Environment Water & Agriculture

مـــوان MWAN
المركز الوطني لإدارة النفايات
National Center for Waste Management

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

توجهات الابتكار في قطاع البيئة

إدارة النفايات

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

د. عبدالله السباعي

الرئيس التنفيذي للالمركز الوطني لإدارة النفايات

يشهد قطاع إدارة النفايات في المملكة تحولًا نوعيًا، يركز على حماية البيئة، وتعزيز الكفاءة التشغيلية، والاستفادة من التقنيات الحديثة لإدارة البيانات ودعم السلوكيات المستدامة، بما يتماشى مع رؤية السعودية 2030.

في (موان)، نؤمن بأن إدارة النفايات أولوية استراتيجية وركيزة أساسية لرفع كفاءة الموارد، وتطوير البنية التحتية، وتعزيز الشراكات بين أصحاب المصلحة لتحقيق أثر ملموس ومستدام.

تتمتع المملكة العربية السعودية ببيئة تمكينية تشجع تبادل المعرفة وتطبيق أفضل الممارسات الدولية، بما يعزز الابتكار في الاقتصاد الدائري ويضعها نموذجًا عالميًا في الحلول البيئية.

من خلال الابتكار، والتعاون، والشراكات الاستراتيجية، نواصل في (موان) قيادة التحول نحو قطاع إدارة نفايات أكثر كفاءة ووعيًا، نحو مستقبل بيئي مستدام ومزدهر.

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

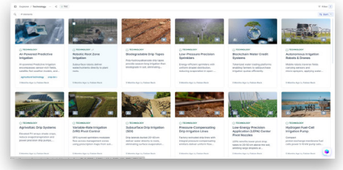
- الوصول لاحتياجات القطاعات الوطنية
- بيانات فرص الشراكات والتمويل للتقنيات الواعدة
- إبراز الحلول المبتكرة

الباحثون والعلماء

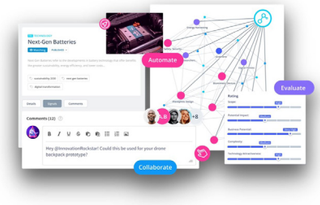
- بيانات أبرز العلماء والباحثين
- تحديد الفجوات والأولويات البحثية
- بيانات تعزز التعاون لتطبيق نتائج الأبحاث

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 ستة 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 إدارة النفايات 32
31.1 التقنيات البارزة (التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا) 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 واحدة 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 أولوية تقنية واحدة "إدارة النفايات"، من خلال تسليط الضوء على تقنية رئيسية مختارة ضمن هذه المجموعة، وهي: التعدين الحري والهيدروميتالورجيا من مجموعة إدارة النفايات.

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 المملكة 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، **أعلن سمو ولي العهد محمد بن سلمان عند إطلاق مبادرة السعودية الخضراء عن استهداف رفع نسبة تحويل النفايات عن المرادم إلى 94%**، بما يعزز كفاءة إدارة النفايات ويدعم جهود المملكة في حماية البيئة وتحقيق الاستدامة. 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: " **إدارة النفايات**". 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 السعودية 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. **وأعلن سمو ولي العهد محمد بن سلمان عند إطلاق مبادرة السعودية الخضراء عن استهداف رفع نسبة تحويل النفايات عن المرادم إلى 94%**، بما يدعم توجه المملكة نحو الاقتصاد الدائري، ويعزز كفاءة إدارة النفايات، ويسهم في تحقيق مستهدفاتها البيئية الوطنية. 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 المجموعات التقنية ذات الأولوية كركائز أساسية لتحقيق هذه الأهداف البيئية الوطنية:

إدارة النفايات

تمثل تقنيات إدارة النفايات ركيزة أساسية من ركائز التحول الاقتصادي الدائري في المملكة العربية السعودية، والتزامات الاستدامة البيئية بموجب رؤية السعودية 2030، وذلك من خلال مواجهة التحدي المتمثل في إدارة تدفقات النفايات الناتجة عن التوسع السريع للمراكز الحضرية والأنشطة الصناعية. وتتضح المواءمة الاستراتيجية مع رؤية السعودية 2030 بشكل خاص في أهداف الاقتصاد الدائري، حيث تقوم تقنيات إدارة النفايات **بتمكين استعادة الموارد، والحد من التلوث البيئي، وخلق فرص اقتصادية جديدة من خلال اتباع المنهجيات المبتكرة لتعزيز قيمة النفايات**. وتعد هذه التقنيات ضرورية لدعم أهداف الصحة البيئية لبرنامج جودة الحياة، والحد من انبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن التخلص من النفايات، وترسيخ مكانة المملكة العربية السعودية كرائدة إقليمية في ممارسات إدارة النفايات المستدامة والتي تسهم في تحقيق أهداف حماية البيئة والتنوع الاقتصادي.

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"**

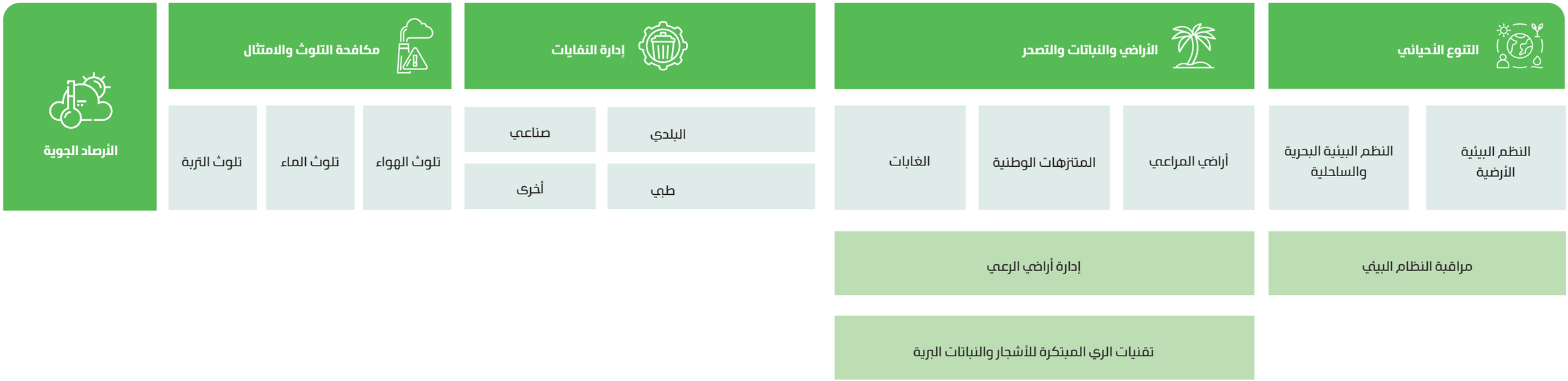
التنوع الأحيائي	الأراضي والنباتات والتصحر	إدارة النفايات	مكافحة التلوث والامتثال	الأرصاد الجوية
استعادة النظم البيئية البرية وتعزيز استدامتها	الحماية من الرعي الجائر	تقليل حجم المخلفات الناتجة	خفض مستويات الانبعاثات	تحسين التنبؤات والقدرات المناخية الإنذار المبكر
استعادة النظم البيئية البحرية والساحلية 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 و الأرصاد الجوية" في الإطار باعتبارها مرحلة رئيسة ومجموعة تقنية ذات الأولوية، وبالتالي ستُدرس بمزيد من التفصيل في هذا التقرير. وعليه، سيتناول هذا التقرير "إدارة النفايات " 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).

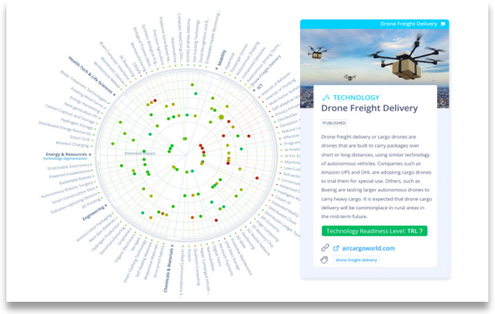
4. التحقق والأخذ بمرئيات الخبراء

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.

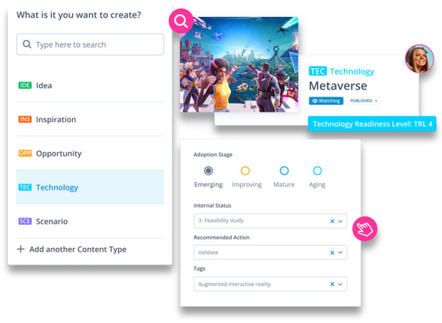
رادار التقنية

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.



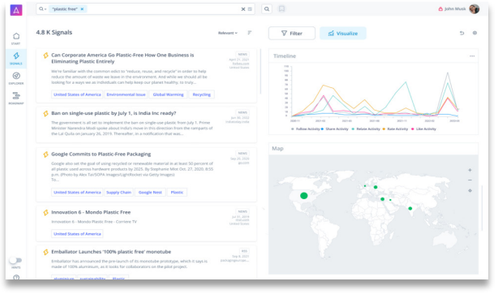
التقييم التعاوني

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

محور التركيز ضمن مجموعات التقنيات ذات الأولوية

3.1 إدارة النفايات

تشمل تقنيات إدارة النفايات كلًا من إعادة التدوير للمواد، واستعادة الطاقة، وإعادة تدوير النفايات العضوية في جميع أنواع النفايات، بما في ذلك نفايات البناء والهدم، والنفايات البلدية الصلبة، والنفايات الزراعية.

التقنيات الرائدة في إدارة النفايات

التطبيق الذكي ورقمنة القطاعات
Smart Enforcement & Sector Digitization

التحول في الفرز الدقيق وإعادة التدوير
Revolutionized Precision Sorting & Recycling

الاستدامة الموسمية وتحول موسم الحج نحو ممارسات مستدامة
Seasonality & Hajj Sustainable Transformation

قيادة التغيير في تصميم المواد والمنتجات
Driving Change in Material & Product Design

وحدات التقاط الكربون النموذجية لتحويل النفايات إلى طاقة
Modular carbon-capture retrofit for waste-to-energy (WtE)
(TRL 7)

إعادة التدوير الكيميائي المتقدم للبلاستيك (التحلل الحراري، إزالة البلمرة)
Advanced chemical recycling of plastics (pyrolysis, depolymerisation)
(TRL 7)

أنظمة الفرز الروبوتية المدعومة بالذكاء الاصطناعي
AI-powered robotic sorting systems
(TRL 8)

الهضم اللاهوائي اللامركزي
Decentralised anaerobic digestion
(TRL 7)

تقنية التحويل إلى غاز عالي الحرارة/ تحويل النفايات إلى طاقة باستخدام البلازما
High-temperature gasification / plasma WtE
(TRL 8)

إعادة تدوير البلاستيك الأنزيمي
Enzymatic recycling
(TRL 7)

تتبع البيانات الإلكترونية للبيان الإلكتروني عبر سلسلة الكتل
Blockchain e-manifest traceability
(TRL 6)

أنابيب النفايات الهوائية
Pneumatic Waste Pipes
(TRL 8)

إنتاج الهيدروجين من النفايات البلاستيكية
Hydrogen-from-plastics
(TRL 6)

الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام مخلفات البناء القابلة لإعادة التدوير
3D printing with recyclable construction waste
(TRL 6)

حاويات النفايات الذكية المدعومة بإنترنت الأشياء
Smart IoT bins
(TRL 9)

محطات الفرز المتنقلة في مواقع استراتيجية لتمكين فصل النفايات في موقعها
Mobile sorting stations at key locations to enable onsite waste separation
(TRL 6)

التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا
Urban mining & hydrometallurgy
(TRL 8)

المرافق الذكية لإعادة تدوير الموارد
Smart Material Recovery Facilities (MRFs)
(TRL 8)

التعدين وإعادة تدوير المواد من مكبات النفايات
Landfill mining & resource recovery
(TRL 7)

إعادة التدوير عن طريق الألعاب
Gamified Recycling
(TRL 9)

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:

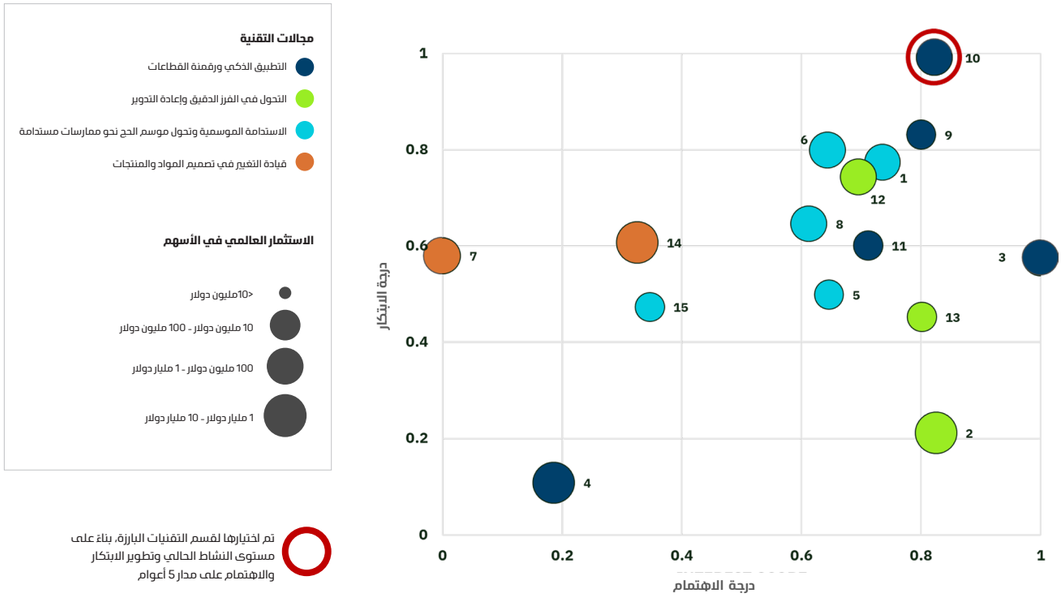
تجمع درجة الابتكار (Innovation Score) بين براءات الاختراع ودرجات الأبحاث. بينما تعتمد درجة براءات الاختراع على مقياس ملفات براءات الاختراع، وتعتمد درجة البحث على مقياس المنشورات البحثية.

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



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 توجه التقنية المستقبلي ومسار تطوره، إذ تؤدي متابعة النمو أو الانخفاض إلى الكشف عن حالات الاختراق أمام المنافسين، وتحديد التراجع في موجات الاهتمام، وتحديد توقيت الإعانات، ومعايرة بناء القدرات، ومواءمة ميزانيات البنية التحتية مع الطلب المستقبلي، كما تُسهم هذه الآليات في الحماية من التكاليف الغارقة وتعزيز أثر الموارد ضمن منظومة البيئة والمياه والزراعة.

وعند النظر إلى معدلات النمو العالمية في براءات الاختراع والمنشورات العلمية والأخبار الصادرة حول التقنيات الي شملتها الدراسة على مدار السنوات الخمس الماضية، يتجلى بوضوح الزخم المتسارع خصوصًا في مجال التقنية " **التحول في الفرز الدقيق وإعادة التدوير** "، حيث تظهر التقنيات التالية معدلات نمو مرتفعة عبر جميع المقاييس قيد الدراسة:

إعادة التدوير الكيميائي المتقدم للبلاستيك (التحلل الحراري، وإزالة البلمرة)

وهي عمليات على المستوى الجزيئي تعمل على تقسيم النفايات البلاستيكية إلى مواد كيميائية أساسية ومونومرات لإعادة استخدامها بشكل دائري

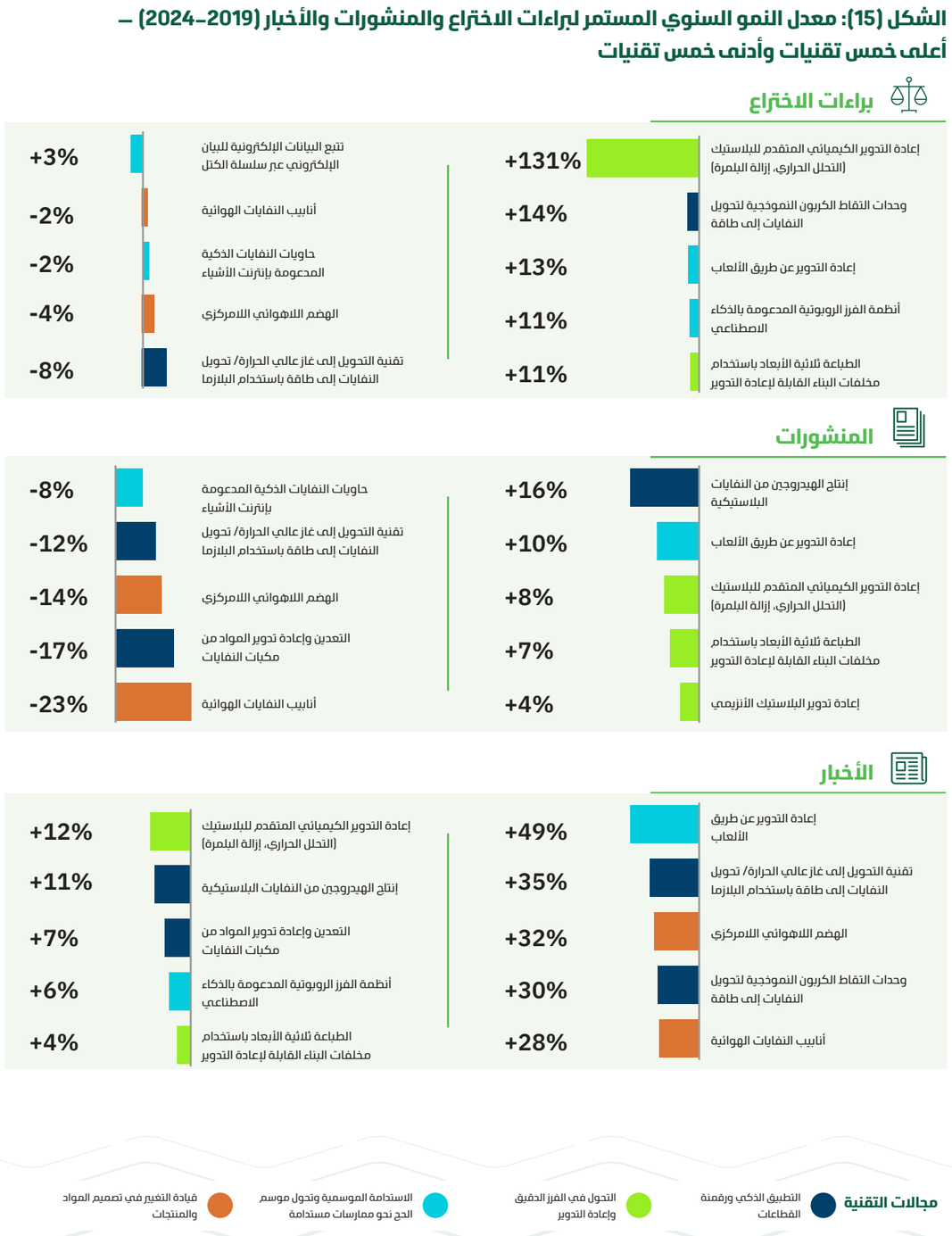
إعادة التدوير عن طريق الألعاب

المنصات الرقمية التفاعلية التي تستخدم عناصر الألعاب والمكافآت والتطبيقات لزيادة مشاركة الجمهور في إعادة التدوير.

التحويل إلى غاز عالي الحرارة/ تحويل النفايات إلى طاقة باستخدام البلازما

العمليات الحرارية الشديدة التي تحول النفايات إلى طاقة نظيفة من خلال تقنيات التحويل إلى غاز وتحلل البلازما.

الشكل (15): معدل النمو السنوي المستمر لبراءات الاختراع والمنشورات والأخبار (2019–2024) – أعلى خمس تقنيات وأدنى خمس تقنيات



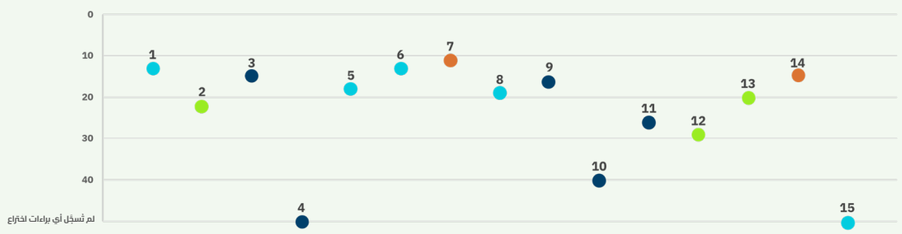
نبذة عن مجال البحث والتطوير والابتكار على المستوى الوطني

تتمتع المملكة بمكانة جيدة في التقنيات المحقق فيها، ففيما يتعلق **ببراءات الاختراع** -**ومقارنةً بالمرتبة العالمية الإجمالية للمملكة** - فإن المملكة تُصنّف ضمن أفضل 60 دولة عالميًا في حوالي 60% من التقنيات التي جرى مسحها، بينما لم تدخل قائمة أفضل 10 دول في أي من التقنيات الناشئة الرئيسة. هذا وتحتل المملكة مكانة رائدة في مجالات التقنية **"الاستدامة الموسمية وتحول موسم الحج نحو ممارسات مستدامة" و "قيادة التغيير في تصميم المواد والمنتجات.**

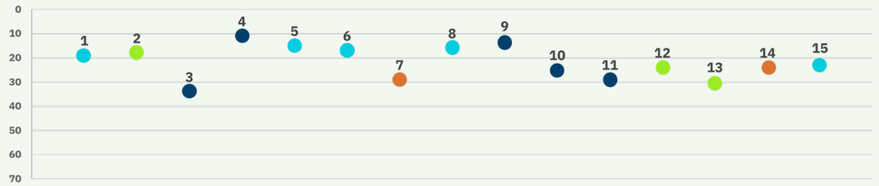
وفيما يتعلق **بالمنشورات البحثية**، توزعت مكانة المملكة بشكل أكثر توازنا، حيث تحتل المملكة المرتبة الأولى في قائمة أفضل (20) دولة في حوالي (46%) من التقنيات المرصودة. كما تشير البيانات نسبيًا إلى وجود مخرجات قوية للنشر في تقنية **التحويل إلى غاز عالي الحرارة/ تحويل النفايات إلى طاقة باستخدام البلازما**. وبهذا يشير المشهد العام للنشر إلى النضج المتزايد في الأبحاث، خاصة في مجال استعادة الموارد وتقنيات معالجة المواد الدائرية المتقدمة.

الشكل (16): ترتيب المملكة العربية السعودية فيما يخص التقنيات الناشئة، الترتيب العالمي في عدد براءات الاختراع والمنشورات (2019-2024)

براءات الاختراع



المنشورات



1. أنظمة الفرز الروبوتية المدعومة بالذكاء الاصطناعي
2. إعادة التدوير الكيميائي المتقدم للبلاستيك (التحلل الحراري، إزالة البلمرة)
3. وحدات التقاط الكربون النموذجية لتحويل النفايات إلى طاقة
4. تقنية التحويل إلى غاز عالي الحرارة/ تحويل النفايات إلى طاقة باستخدام البلازما
5. تتبع البيانات الإلكترونية للبيان الإلكتروني عبر سلسلة الكتل
6. حاويات النفايات الذكية المدعومة بإنترنت الأشياء
7. الهضم اللاهوائي اللامركزي
8. المرافق الذكية لإعادة تدوير الموارد
9. إنتاج الهيدروجين من النفايات البلاستيكية
10. التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا
11. التعدين وإعادة تدوير المواد من مكبات النفايات
12. إعادة تدوير البلاستيك الأنزيمي
13. الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام مخلفات البناء القابلة لإعادة التدوير
14. أنابيب النفايات الهوائية
15. إعادة التدوير عن طريق الألعاب

مجالات التقنية

- التطبيق الذكي ورقمنة القطاعات
- التحول في الفرز الدقيق وإعادة التدوير
- الاستدامة الموسمية وتحول موسم الحج نحو ممارسات مستدامة
- قيادة التغير في تصميم المواد والمنتجات

3.1.1 التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا

هو استخراج المعادن الثمينة واستعادتها ومسارات النفايات الحضرية باستخدام العمليات الكيميائية المائية. ويجمع هذا النهج المستدام بين التعدين الحضري (استخراج المعادن من الإلكترونيات والبنية التحتية المهملة) وتقنيات التعدين المائي (تقنيات الكيمياء الرطبة) لاستعادة المواد الحيوية، مثل: الليثيوم والكوبالت والعناصر الأرضية النادرة لتطبيقات الاقتصاد الدائري.

التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا

يمثل التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا نهجًا ثوريًا لإدارة النفايات، حيث يحول الإلكترونيات والنفايات الصناعية التي يُتخلص منها إلى موارد معدنية قيمة من خلال العمليات الكيميائية المائية، وتعمل هذه التقنية على استخراج المعادن الحيوية بشكل منهجي، ومنها: الليثيوم والكوبالت والنيكل والعناصر الأرضية النادرة الناتجة عن تدفقات النفايات الإلكترونية، ولا سيما بطاريات أيونات الليثيوم المستهلكة والتي تُعد من أعلى النفايات احتواء على هذه المواد القيّمة (JOM, ScienceDirect).

التقنية ونضج القدرات الوطنية

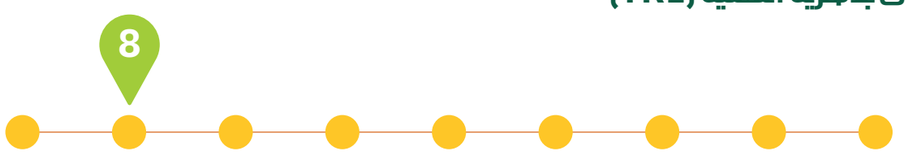
تتمتع تقنية التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا اليوم بجاهزية تقنية عالية (TRL 8)، إذ تُطبّق في المحطات التجريبية ذات القدرة التشغيلية التجارية ونجحت في إعادة تدوير المعادن الحيوية من مصادر النفايات الإلكترونية. وقد أثبتت هذه التقنية كفاءة أداء نظامها في البيئات التشغيلية، حيث حققت العمليات الهيدروميتالورجية معدلات عالية لإعادة تدوير المعادن (Web of Science).

خاصة في سياق أهداف الاقتصاد الدائري للمملكة، إذ تسهم في تقليل الاعتماد على استخراج المواد الخام من المصادر الطبيعية، وتساعد في معالجة أزمة النفايات الإلكترونية المتزايدة. كما أن العمليات الهيدروميتالورجية المتقدمة تمكّن من تحقيق معدلات عالية من إعادة تدوير المعادن الحيوية، بما يدعم الاستدامة البيئية وأمن الموارد (Separation and Purification Technology).

وفي سياق المملكة العربية السعودية، صُنّفت تقنية التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا في المستوى الرابع من حيث نضج القدرات الوطنية (CRL 4)، وذلك بسبب محدودية الإمكانات البحثية والتصنيعية المحلية في هذا المجال. وعلى الرغم من أن المملكة قد وضعت أطرًا لإدارة النفايات وأهدافًا واضحة للاستدامة، إلا أنها لا زالت بحاجة إلى المرافق المتخصصة في التعدين الحضري، والخبرات في مجال الهيدروميتالورجيا (Materials research proceedings, IEEE Xplore).

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 Umicore

02 Aurubis

03 Glencore

04 Boliden

05 BASF

06 EnviroLeach Technologies

07 Redwood Materials

08 Mitsubishi Materials

إمكانيات التقنية

تنطوي تقنية التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا على إمكانات نوعية لتحويل النفايات الالكترونية إلى مصادر قيّمة للمعادن، كما تُسهم في معالجة تحديات سلاسل إمداد المعادن القيمة والاستدامة البيئية.

المزايا

- **الحد من الأثر البيئي:** تُسهم التقنيات الهيدروميتالورجية المتقدمة في تقليل البصمة البيئية (الانبعاثات) بشكل ملحوظ مثل إزالة المعادن الثقيلة من مكبات النفايات، بما يمنع تسربها إلى التربة والمياه الجوفية، وتعزز تطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري عبر اتباع عمليات منظمة لتحويل النفايات إلى موارد. Cleaner Waste Systems
- **كفاءة استهلاك الطاقة:** تُسهم العمليات الميتالورجية الإلكتروكيميائية في تخفيض نسبة استهلاك الطاقة بشكل ملحوظ مقارنةً بأساليب صهر المعادن التقليدية، وذلك مع الحفاظ على أعلى معايير النقاء للموارد المُعاد تدويرها. EPO
- **تنوّع مصادر النفايات:** يمكن للتقنيات الهيدروميتالورجية معالجة أنواع متعددة من النفايات في الوقت نفسه، كالمخلفات والشوائب الناتجة عن تغويز الفحم، والمواد المحتوية على النيتروجين، كما تعزز الاستفادة من الموارد وتنشئ حلولًا متكاملة للاقتصاد الدائري. Journal of Fuel Chemistry and Technology

العيوب

- **ارتفاع تكاليف البنية التحتية:** تتطلب مرافق التعدين الحضري الاستثمار برأس مال أولي مرتفع نسبيًا لتجهيز المعدات المتخصصة والبنية التحتية للمعالجة، كما تعتمد جدواها الاقتصادية بشكل كبير على الدعم التنظيمي وأُطر السياسات. Oxford University Press eBooks
- **التحديات المتعلقة بالممتلكات المادية:** يمكن أن تؤدي تقنيات المعالجة الهيدروميتالورجية المتقدمة إلى تغيير الخصائص المغناطيسية والإلكترونية للمعادن المُعاد تدويرها، مما قد يضر بجودة المواد ويحد من إمكانية استخدامها في العناصر الإلكترونية عالية الأداء. Scientific.Net
- **تعقيد الإدارة البيئية:** تولّد العمليات الهيدروميتالورجية تدفقات النفايات السامّة والمخاطر الكيميائية التي تتطلب الامتثال التنظيمي الدقيق، وقد يؤدي ضعف الرقابة إلى أضرار بيئية وتحديات إدارية كبيرة. TECHNO REVIEW
- **خطر مياه الصرف الحمضية:** توجد حاجة إلى التحكم في المياه الحمضية الناتجة عن المعالجة الهيدروكيميائية والتي تتطلب أنظمة معالجة متطورة لمنع التلوث.*

*رؤى أخذ بها من الخبراء في قطاع البيئة

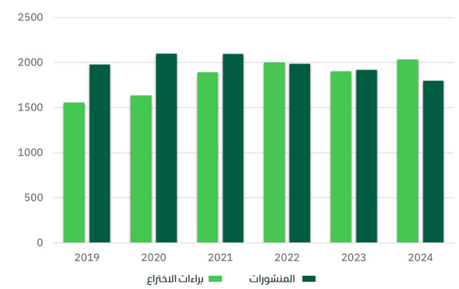
آخر التطورات

تشهد تقنيات التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا تطورات كبيرة بفضل دمج الذكاء الاصطناعي والابتكارات الكهروكيميائية وتقنيات إعادة تدوير البطاريات، الأمر الذي يعزز كفاءة إعادة تدوير المعادن ويُحسّن الاستدامة البيئية.

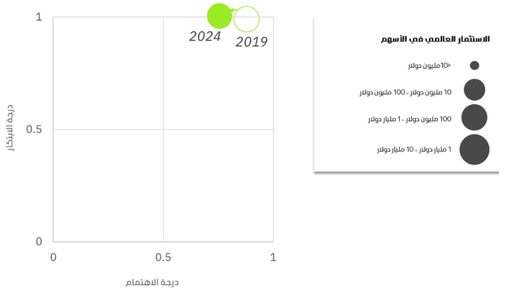
مؤشرات الابتكار الرئيسة

- **معالجة مخلفات المعادن وشوائبها بالطرق الكهروكيميائية:** برزت مؤخرًا تقنيات جديدة لإعادة تدوير خبث المعادن باستخدام المنهجيات المبتكرة والتي تستعيد المعادن القيّمة من مصادر النفايات الصناعية عبر عمليات الأكسدة الكهروكيميائية المتقدمة. EPO
- **الابتكار في التعدين الأخضر:** تركز منهجيات التعدين من الجيل الخامس (5.0) على استراتيجيات الابتكار الأخضر في قطاع التعدين من خلال دمج الممارسات المستدامة والاعتبارات البيئية في عمليات التعدين الحضري والتقنيات الهيدروميتالورجية الحديثة. ResearchGate
- **إعادة تدوير المعادن الحيوية:** تركز العمليات الهيدرولوجية المتخصصة لإعادة تدوير بطاريات أيونات الليثيوم على استعادة المعادن الحيوية، مثل: الليثيوم والكوبلت والنيكيل، مما يدعم مبادرات الاقتصاد الدائري في تصنيع البطاريات. JOM
- **عمليات التعدين القائمة على الذكاء الاصطناعي:** تُحدث حلول الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي تحولًا جذريًا في رقمنة قطاع التعدين، إذ تعزز قدرات التحليلات التنبؤية وأنظمة المعالجة الآلية، وتحسّن استخراج الموارد في عمليات التعدين الحضري. SpringerNature
- **الأنظمة الذكية للتعدين الحضري:** يسهم توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في عمليات التعدين الحضري في خلق الفرص الجديدة وتطوير تقنيات الفرز الآلي للنفايات، وتحديد أنواع المواد وتحسين عمليات إعادة التدوير، مما يدعم معالجة التحديات التقليدية للتحوّل الرقمي. transformation ScienceDirect
- **العمليات المتقدمة لإعادة تدوير البطاريات:** لقد طُورت التقنيات الهيدروميتالورجية الشاملة لإعادة تدوير بطاريات أيونات الليثيوم، مما يمكّن من استرداد المعادن الحيوية بكفاءة عالية من خلال أنظمة المعالجة المتكاملة والمحسّنة والتي تدعم مبادئ الاقتصاد الدائري. Separation and Purification Technology

الشكل (17): عدد براءات الاختراع والمنشورات (2019-2024) للتعدين الحضري والهيدروميتالورجيا



الشكل (18): تطور حجم استثمارات التقنية بناء على درجة الابتكار ودرجة الاهتمام



الرؤى والإحصائيات

تتمتع تقنيات التعدين الحضري والعمليات الهيدروميتالورجية بإمكانات اقتصادية كبيرة، حيث تحقق تقنيات إعادة التدوير المتقدمة معدلات كفاءة عالية إلى جانب وفورات مالية ملموسة مقارنة بأساليب التعدين التقليدية.

الإحصائيات والحقائق الرئيسة

- **تزايد الحوافز التنظيمية:** تعمل لوائح الاقتصاد الدائري الصادرة عن الاتحاد الأوروبي إلى جانب حوافز الابتكار على تعزيز منظومات إعادة تدوير المعادن وتخفيف الاعتماد على عمليات استخراج الموارد الأولية، ويلزم نظام الاتحاد الأوروبي للمواد الخام الحيوية بأن تصل إعادة تدوير المواد الاستراتيجية إلى 15% بحلول 2030. weforum.org

- **تقييم مخلفات الهواتف المحمولة:** تكشف البحوث التقييمية الاقتصادية عن التركيبات المعدنية في نفايات الهواتف المحمولة عبر عمليات الفرز والفحص، وتؤكد على وجود إمكانات ملحوظة لإعادة تدوير المعادن من الإلكترونيات الاستهلاكية. Waste Management

- **تطبيقات التعدين الحضري:** تؤكد الدراسات على إمكانية تطبيق التعدين الحضري لإعادة تدوير المحتويات المعدنية من المخلفات الكهربائية والإلكترونية، مما يبرز فرصًا كبيرة لاستعادة الموارد عبر تقنيات المعالجة المتقدمة. Journal of Sustainable Development of Natural Resources Management

- **نمو سوق إعادة تدوير البطاريات:** تُظهر تقنيات إعادة تدوير بطاريات أيونات الليثيوم قابلية عالية للتوسع، ومدفوعة بتحسينات في تصميم المفاعلات وعمليات المعالجة، مما يسهم في استعادة تكلفة تقدّر بنحو 50–60% مقارنة بطرق التخلص التقليدية، ويدعم ذلك مبادرات الاقتصاد الدائري في المملكة. SSRN .

- **توليد النفايات الإلكترونية على مستوى العالم :** ينتج البشر (62) مليون طن من النفايات الإلكترونية سنويًا، وهو ما يمثل مخزونًا غنيًا من المعادن القابلة للاستخلاص عبر تقنيات التعدين الحضري، ولا سيما من خلال عمليات الاستخلاص الهيدروميتالورجية المتقدمة. The Conversation

- **قيمة المعادن المستخلصة من النفايات الإلكترونية:** احتوت النفايات الإلكترونية عالميًا على معادن بقيمة 91 مليار دولار في عام 2022، تشمل 31 مليار كيلوغرام من المعادن مع 4 مليار كيلوغرام من المواد الخام الحيوية، إلا أنه لم يُسترجع منها سوى 28 مليار دولار من خلال عمليات إعادة التدوير الرسمية وغير الرسمية. statista.com

تبني التقنيات

على الرغم من التقدم العالمي في التعدين الحضري بدعم من سياسات الاقتصاد الدائري في الاتحاد الأوروبي ومراكز معالجة النفايات الإلكترونية في آسيا، فإن تبني هذا التوجه في السعودية يرتبط بتأسيس منظومة شاملة لجمع النفايات، وتطوير للمرافق الهيدروميتالورجية المتخصصة، وتعزيز الاتساق التنظيمي مع مستهدفات الاقتصاد الدائري ضمن رؤية السعودية 2030.

الوضع الراهن

- **الإنجاز المستدام في مجال إعادة تدوير البطاريات:** أثبتت الدراسات الحديثة إمكانية التعدين الحضري للبطاريات الهالكة (التي انتهى عمرها الافتراضي) باستخدام العمليات الهيدروميتالورجية المتقدمة، إذ تحقق معدلات استعادة عالية للمعادن مع تقليل للأثر البيئي مقارنةً بطرق الاستخراج التقليدية. Energy Storage Materials

- **الابتكار في مجال التعدين الحيوي:** تسهم الدراسات العلمية في تطوير تقنيات التعدين الحيوي لاستعادة النيكل من المصادر الثانوية بصورة مستدامة، مما يدعم تطبيقات الطاقة المتجددة وأهداف الاقتصاد الدائري من خلال عمليات استخراج المعادن بالوسائل الحيوية. Sustainable Chemistry and Pharmacy

- **أبحاث تحسين العمليات:** تركز المنشورات الأكاديمية على استعادة المعادن القيمة من خلال تحسين تقنيات معالجة المعادن والهيدروميتالورجيا، وتطوير طرق استخراج المعادن بما يعزز الكفاءة ويحد من البصمة البيئية. MDPI eBooks

- **فرصة مثالية لتبني التقنية محليًا:** مع تزايد النفايات الإلكترونية في المملكة التي تُقدّر بـ 550,000 طن سنوياً وفقاً للمركز الوطني لإدارة النفايات لعام 2024م، تمثل هذه النفايات فرصة ذهبية لاستخراج المعادن الحرجة مثل الكوبالت والليثيوم.*

متطلبات التوطين

- **التحديات الماثلة أمام سياسات النفايات الإلكترونية:** تواجه إدارة النفايات الإلكترونية في المملكة العربية السعودية تحديات تشغيلية وتنظيمية في الجمع والتصنيف والمعالجة والرقابة، ما يؤثر بشكل مباشر على التنفيذ اليومي وكفاءة أنشطة التعدين الحضري واسترداد المعادن. Journal of Hazardous Materials Advances

- **قيود التكامل التقني:** مع تقدم المملكة العربية السعودية في مسيرة التحول نحو تبني مصادر الطاقة المتجددة، تزداد الحاجة إلى تعزيز التكامل التقني وتحسين القدرات المؤسسية، وذلك لتهيئة الأنظمة الهيدروميتالورجية المعقدة التي تتطلب خبرات متخصصة ومستوىً عاليًا من التنسيق التشغيلي. APC

- **الفجوات في إطار السياسات:** تسهم الفجوات الأوسع في السياسات والأطر المؤسسية بما في ذلك عدم اتساق سياسات البيئة والطاقة والصناعة والاقتصاد الدائري، وعدم وضوح الأدوار المؤسسية في إعاقة التنسيق طويل الأمد وتقديم الدعم الاستراتيجي لمبادرات التعدين الحضري. Next Energy

*رؤى أخذ بها من الخبراء في قطاع البيئة

آفاق التقنية

يتجه كلٌّ من التعدين الحضري وتقنية الهيدروميتالورجيا نحو الأنظمة المؤتمتة والتي تعتمد على الذكاء الاصطناعي مع كفاءة أعلى في استعادة المعادن، غير أن قابلية التوسع والجدوى الاقتصادية لا تزالان غير مؤكدتين في الأسواق الناشئة.

التوجه المستقبلي

- **الثورة في مجال الأتمتة:** يشهد قطاع التعدين تقدمًا كبيرًا في تقنيات الأتمتة والروبوتات التي تعمل على تحسين عمليات استخراج الموارد، الأمر الذي يعزز كفاءة عمليات التعدين الحضري ودقها ويقلل من نسبة التدخل البشري ويحسن بروتوكولات السلامة. Journal of Safety and Sustainability

- **التحسين القائم على الذكاء الاصطناعي:** تعمل تقنيات إنترنت الاشياء والتعلم الآلي على إحداث ثورة في إدارة النفايات الحضرية من خلال الأنظمة الذكية التي تعمل على تحسين عمليات الجمع والفرز وإعادة التدوير، مما يخلق مسارات أكثر ذكاءً لاستعادة المعادن من مصادر النفايات الإلكترونية. Results in Engineering

- **إدماج نهج الاقتصاد الدائري:** تسهم الابتكارات الميتالورجية المستدامة في مجال المعالجة الخضراء وإعادة التدوير بتعزيز ممارسات الاقتصاد الدائري عبر آليات الاستخراج الموفرة للطاقة، وتطوير السبائك الصديقة للبيئة والتي تقلل من البصمة الكربونية وتضمن كفاءة الموارد. Zenodo

أوجه عدم اليقين الرئيسة

- **المخاوف المتعلقة بالجدوى الاقتصادية:** على الرغم من وفورات التكلفة التي يحققها التعدين الحضري مقارنة بالتعدين التقليدي، إلا أن ربحيته لا تزال محلّ شك نتيجة تأثر الأداء الاقتصادي بالتغير المستمر لأسعار المعادن، وهو الأمر الذي يتطلب تعزيز الأطر التنظيمية لتعزيز تطبيق ممارسات الاقتصاد الدائري. Oxford University Press eBooks

- **الفجوات في الإطار التنظيمي:** تعاني بنية سلاسل الإمداد وإدارة المخاطر في التعدين الحضري من الغموض التشريعي، إذ لا تزال دول مثل كوريا تعمل على إعداد أطر قانونية متكاملة لتنظيم التعدين الحضري ووضع المعايير الموحدة لإعادة تدوير الموارد. SCHOLAR

- **القيود المتعلقة بالعمليات الفنية:** تواجه تقنيات التعويم وغيرها من تقنيات الفصل تحديات كبيرة عند تطبيقها في تطوير التعدين الحضري، مما يخلق حالة من عدم الوضوح بشأن الأساليب المثلى لمعالجة تراكيب النفايات الإلكترونية المعقدة. J-STAGE

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

دراسة الحالة المحلية

مشروع الشراكة بين شركتي أرامكو ومعادن لاستخراج الليثيوم

أنشأت شركة أرامكو السعودية وشركة معادن مشروعًا مشتركًا رائدًا لاستخراج الليثيوم من المحلول الملحي في حقول النفط في أول تطبيق تجاري في المملكة لعمليات الهيدروميتالورجيا لاستعادة المعادن الحيوية من مخلفات قطاع البترول. وتلبي هذه الشراكة حاجة المملكة الاستراتيجية إلى التنويع خارج نطاق النفط مع الاستفادة من احتياطيات المحلول الملحي الغنية بالليثيوم والموجودة في حقول نفط أرامكو، مما يهيئ المملكة لتكون موردًا رئيسًا في سوق المعادن الانتقالي العالمي. ويدعم هذا المشروع بصورة مباشرة مستهدفات رؤية السعودية 2030 عبر تحويل المنتجات النفطية الثانوية إلى موارد ذات قيمة، تُسهم في تصنيع بطاريات المركبات الكهربائية وأنظمة تخزين الطاقة المتجددة (Mining Technology، Journal of Hazardous Materials Advances).

ويقدم الحل الهيدروميتالورجي فوائد اقتصادية وبيئية ملموسة من خلال تحويل المحلول الملحي من حقول النفط -المُهمل سابقًا- إلى مصدر ليثيوم عالي القيمة باستخدام تقنيات الاستخراج المباشر، مع إلغاء الحاجة إلى أحواض التبخير التقليدية وتقليل استهلاك المياه وتقليص الأثر البيئي، إضافةً إلى رفع نسب الاستخراج وتسريع عمليات المعالجة. ومن المتوقع أن يلبي الإنتاج التجاري الطلب المحلي على الليثيوم، والذي يُرجّح أن يرتفع بمقدار عشرين ضعفًا، بما يدعم تصنيع ٥٠٠ ألف بطارية للمركبات الكهربائية، وتطوير ما يصل إلى ١١٠ جيجاواط من البنية التحتية للطاقة المتجددة، وهو الأمر الذي يسهم في خفض الاعتماد على الواردات وخلق مصادر إيرادات جديدة من العمليات البترولية القائمة (mining.com).

هذا ويتضمن التنفيذ التشغيلي تركيب معدات متقدمة للاستخراج المباشر لليثيوم وربطها بالبنية التحتية الحالية في الحقول النفطية، مع الاستفادة من عمليات الامتزاز الانتقائي وتقنيات التحويل الكهروكيميائي لفصل الليثيوم من المصادر المعقدة في المحلول الملحي. وتعتمد أرامكو على قواعد بياناتها الجغرافية الضخمة وخبراتها المتقدمة لتحديد المناطق ذات التراكيز المرتفعة من الليثيوم في حقول نفطية متعددة، بينما توفر معادن خبراتها في المعالجة الميتالورجية وإمكانية الوصول إلى الأسواق من خلال شبكتها التشغيلية المتخصصة. ويتضمن نطاق الشراكة هذ إعداد برنامج تجريبي وخطة نشر على المستوى التجاري، من المقرر تنفيذها قبل نهاية العقد، مع استمرار الجهود لتحسين التقنية لرفع كفاءة الاستخراج وتعزيز نقاء المنتج. (mining-journal.com، Journal of Water Process Engineering)

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؟

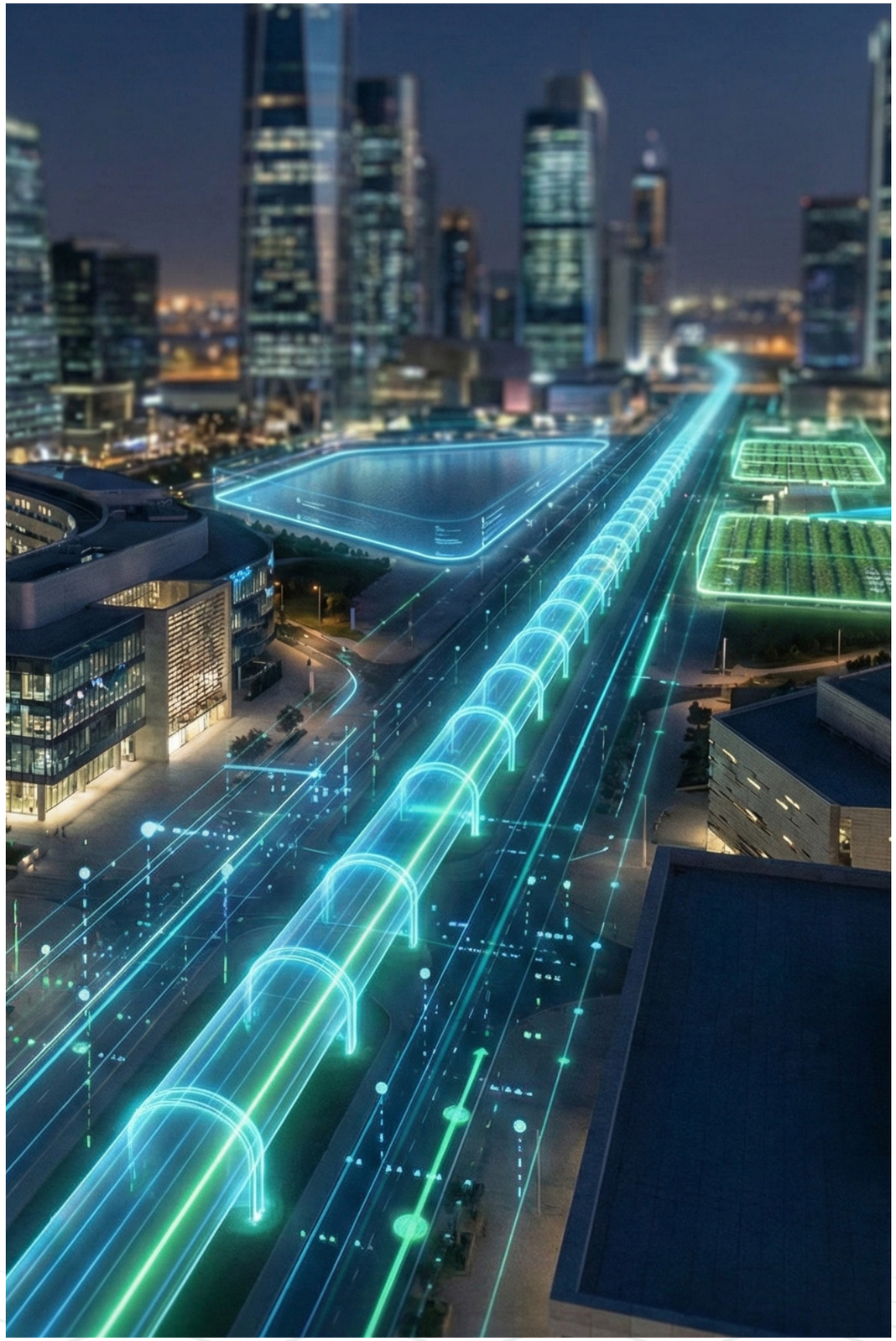
خلال السنوات الخمس إلى العشر القادمة، سينتقل قطاع تحلية المياه في المملكة العربية السعودية من مجرد التوسّع الكمي في الإنتاج إلى تحقيق مفهوم "المياه المحايدة طاقيًا"، عبر تكامل تقني جذري وشامل. وبحلول عام 2030، تستهدف المملكة تشغيل 50% من طاقتها التحلية باستخدام مصادر الطاقة المتجددة، على أن تشهد السنوات 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)			
01	أنظمة الفرز الروبوتية المدعومة بالذكاء الاصطناعي	الاستدامة الموسمية وتحول موسم الحج نحو ممارسات مستدامة	8	36
02	إعادة التدوير الكيميائي المتقدم للبلاستيك (التحلل الحراري، إزالة البلمرة)	التحول في الفرز الدقيق وإعادة التدوير	7	51
03	وحدات التقاط الكربون النموذجية لتحويل النفايات إلى طاقة	التطبيق الذكي ورقمنة القطاعات	7	30
04	تقنية التحويل إلى غاز عالي الحرارة/ تحويل النفايات إلى طاقة باستخدام البلازما	التطبيق الذكي ورقمنة القطاعات	8	7
05	تتبع البيانات الإلكترونية للبيان الإلكتروني عبر سلسلة الكتل	الاستدامة الموسمية وتحول موسم الحج نحو ممارسات مستدامة	6	22
06	حاويات النفايات الذكية المدعومة بإنترنت الأشياء	الاستدامة الموسمية وتحول موسم الحج نحو ممارسات مستدامة	9	37
07	الهضم اللاهوائي اللامركزي	قيادة التغيير في تصميم المواد والمنتجات	7	14
08	المرافق الذكية لإعادة تدوير الموارد	أنظمة الفرز والتجميع الذكية	8	32
09	إنتاج الهيدروجين من النفايات البلاستيكية	الاستدامة الموسمية وتحول موسم الحج نحو ممارسات مستدامة	6	64
10	التعدين الحضري والهيدروميتالورجيا	التطبيق الذكي ورقمنة القطاعات	8	66
11	التعدين وإعادة تدوير المواد من مكبات النفايات	التطبيق الذكي ورقمنة القطاعات	7	13
12	إعادة تدوير البلاستيك الأنزيمي	التحول في الفرز الدقيق وإعادة التدوير	7	42
13	الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام مخلفات البناء القابلة لإعادة التدوير	التحول في الفرز الدقيق وإعادة التدوير	6	28
14	أنابيب النفايات الهوائية	قيادة التغيير في تصميم المواد والمنتجات	8	9
15	إعادة التدوير عن طريق الألعاب	الاستدامة الموسمية وتحول موسم الحج نحو ممارسات مستدامة	9	34



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	TRL6	TRL7	TRL8	TRL9
أبحاث تقنيّة أساسية	أبحاث تطبيقية	وظائف مهمة	اختبارات معملية من مكون النموذج الأولي أو العملية	اختبارات معملية للنظام المُدمج	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	CRL6	CRL7	CRL8	CRL9
• 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	• 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 إدارة النفايات

	المصطلح	الوصف
1	أنظمة الفرز الروبوتية المدعومة بالذكاء الاصطناعي	أذرع روبوتية مدعومة بالذكاء الاصطناعي ومزوّدة بكاميرات عالية الدقة وأجهزة استشعار فائقة الطيف تقوم بالتعرف الآلي على تدفقات نفايات البلدية المختلطة والتقاطها وفرزها بمعدّل 60–100 عملية التقاط في الدقيقة، مما يعزّز إعادة تدوير المواد، ويسهم بخفض معدلات التلوّث، وتقليل تكاليف العمالة، وتمكين التشغيل على مدار الساعة (7/24) في مرافق إعادة تدوير المواد وخطوط إعداد المواد الأولية المطابقة لمواصفات التصدير.
2	إعادة التدوير الكيميائي المتقدم للبلاستيك (التحلل الحراري، إزالة البلمرة)	تقوم عمليات إزالة البلمرة الحرارية الكيميائية أو التحفيزية بتكسير النفايات البلاستيكية المختلطة أو الملوّثة وإعادتها إلى مونومرات أو نفث أو زيوت اصطناعية، مما يتيح تنفيذ عمليات إعادة التدوير مغلقة الحلقة لكل من البولي أوليفينات والبولي إيثيلين تيرفثالات، وهي مواد كان مصيرها الطمر. وتدمج المشروعات التجارية التجريبية حاليًا مفاعلات مستمرة، وأنظمة فورية لضبط الجودة، إلى جانب التوافق مع وحدات التكسير بالبخار، بهدف جذب اتفاقيات الشراء من شركات البتروكيماويات على المستوى العالمي.
3	وحدات التقاط الكربون النموذجية لتحويل النفايات إلى طاقة	وحدات التقاط قائمة على الأمينات أو الكربونات، تُركّبة على هياكل جاهزة (Skid Mounted)، تُثبّت على مواقع تحويل النفايات إلى طاقة، حيث تُمكّن من إزالة ما يصل إلى 95% من ثاني أكسيد الكربون (CO_2) المنبعث بعد عملية الاحتراق. ويُضغط الغاز الملتقط بكفاءة اقتصادية لاستخدامه أو عزله، مما يتيح لمرافق حرق النفايات الالتزام باللوائح المناخية الدقيقة دون الحاجة إلى إعادة بناء المحطة بشكل كامل، مع فتح مصادر الإيرادات الجديدة من خلال أسواق الكربون.
4	تقنية التحويل إلى غاز عالي الحرارة/ تحويل النفايات إلى طاقة باستخدام البلازما	مفاعلات غير معتمدة على نوعية المادة الأولية (Feedstock Agnostic) تقوم بتسخين تيارات المخلفات إلى درجات حرارة تتجاوز 1500 درجة مئوية في ظروف محدودة الأكسجين، مما يؤدي إلى تحويل المواد الصلبة إلى غاز اصطناعي (Syngas) ومخلفات زجاجية (Vitrified Slag). ويُنقّى الغاز الاصطناعي (Syngas) لاستخدامه في توليد الطاقة، أو إنتاج الهيدروجين، أو الصناعات الكيميائية، مما يحقق خفضًا كبيرًا في انبعاثات الديوكسينات مقارنة بالترميد وإعادة تدوير المعادن، بما يضمن الامتثال لمعايير الانبعاثات الصارمة المعتمدة في الاتحاد الأوروبي ودول مجلس التعاون الخليجي. علمًا بأن هذه التقنية قد اعتُمدت ونُشرت تجاريًا حول العالم.
5	تتبع البيانات الإلكترونية للبيان الإلكتروني عبر سلسلة الكتل	تقوم منصات السجلات الموزعة بوسم كل شحنة من النفايات ببيانات الموقع الجغرافي، والختم الزمني، وبيانات المواد، مع تسجيل جميع عمليات النقل من جهة التوليد إلى مرافق التخلص ضمن مجموعات موثوقة وآمنة. وتعمل العقود الذكية على أتمتة عمليات التحقق من الامتثال وتسوية الرسوم، مما يعزز الشفافية، ويحد من مخاطر الاحتيال، ويمكّن الجهات الرقابية من تطبيق مبدأ مسؤولية المنتج الممتدة وإنفاذ القواعد الدولية المرتبطة بالنفايات.
6	حاويات النفايات الذكية المدعومة بإنترنت الأشياء	تُزوَّد حاويات النفايات في الشوارع أو المنشآت بأجهزة استشعار لمستوى الامتلاء تعمل بالموجات فوق الصوتية أو بالأشعة تحت الحمراء، إضافة إلى أنظمة تحديد المواقع ووحدات اتصال إنترنت الأشياء ضيق النطاق، وذلك لنقل بيانات السعة إلى خوارزميات التوجيه الذكية والتي تعمل على تحسين جداول جمع النفايات بصورة متغيرة. وتشمل النتائج المحققة خفض مسافات سير شاحنات جمع النفايات بنسبة تتراوح بين 20–40%، وتحسين نظافة الأماكن العامة، وتقليل التكاليف الإجمالية للوقود بشكل ملحوظ، إلى جانب توفير تحليلات تفصيلية لمعدلات توليد النفايات لدعم أعمال التخطيط.
7	الهضم اللاهوائي اللامركزي	هاضمات صغيرة ومدمجة ضمن حاويات موجودة في نفس الموقع في المزارع أو الفنادق أو الأسواق، تقوم بتخمير مخلفات الطعام والمخلفات العضوية لإنتاج الغاز الحيوي، حيث تقوم وحدات الترقية في الموقع بتنقيته لإنتاج الغاز الحيوي المضغوط (Bio CNG) أو توليد الكهرباء لتغذية الشبكات المصغّرة، حيث يستخدم ناتج الهضم كسماد، مما يُغلق دورات المغذيات، ويقلل الانبعاثات الناتجة عن النقل، ويحقق عوائد من أرصدة الوقود المتجدد حتى عند أحجام المواد الأولية التي تقل عن 5 أطنان يوميًا.
8	المرافق الذكية لإعادة تدوير الموارد	تدمج مرافق فرز المواد من الجيل التالي بين الرؤية المعتمدة على الذكاء الاصطناعي، والروبوتات، وأجهزة الفرز البصري، وأنظمة النقل المتقدمة ضمن أنظمة التحكم المتكاملة. وتتمتع بقدرة معالجة تتجاوز 50 طنًا في الساعة مع نقاء أعلى للمواد المفروزة، واعتماد أقل على العمالة، وصيانة تنبؤية، ولوحات مؤشرات أداء رئيسة مباشرة، مما يوفر المواد الأولية المناسبة لإعادة التدوير معزز القيمة، ويقلل مخاطر رفض الشحنات المصدّرة، ويحقق عوائد أعلى من مبيعات المواد القابلة للتدوير.
9	إنتاج الهيدروجين من النفايات البلاستيكية	تقوم مفاعلات التحلل الحراري التحفيزي بتفكيك نفايات البلاستيك إلى غاز اصطناعي غني بالهيدروجين والكربون الصلب. ومؤخرًا، تُنفَّذ العمليات عند درجات حرارة تقل عن 800 درجة مئوية، وتستخدم طاقة الموجات الحقيقة أو البلازما، مع دمج مصادر الطاقة الخالية من ثاني أكسيد الكربون، مما يوفر مصدرًا للهيدروجين مع تحويل البلاستيك غير القابل لإعادة التدوير بعيدًا عن المكبات أو المحارق. وتهدف المشاريع التجريبية إلى الوصول إلى تكلفة تبلغ 2 دولار أمريكي لكل كيلوجرام من الهيدروجين بحلول عام 2030.
10	التعدين الحضري والهيدروميتالوريجيا	تؤدي المعالجة الميكانيكية المسبقة، يليها الاستخلاص الانتقائي، إلى إذابة المعادن من النفايات الإلكترونية، والبطاريات، أو نواتج غربلة مخلفات البناء. وتُمكّن أنظمة استرجاع الأحماض ذات الحلقة المغلقة وأنظمة الاستخلاص بالمذيبات من استعادة النحاس والليثيوم والعناصر الأرضية النادرة والمعادن الثمينة بمستويات أقل من استهلاك طاقة والأضرار البيئية مقارنة بالتعدين الأولي، مما يحوّل المدن إلى خزانات للموارد ويُسهم في جذب الاستثمارات العالمية.

	المصطلح	الوصف
11	التعدين وإعادة تدوير المواد من مكبات النفايات	تتيح أعمال الحفر الهندسي لخلايا المكبات القديمة استرجاع المعادن والبلاستيك والوقود المشتق من النفايات والتربة. وتقوم خطوط الفرز المتنقلة بفصل المواد ذات القيمة، بينما تثبّت الكسور الدقيقة لاستخدامها كمواد ردم إنشائية. وتسهم هذه الممارسة في استصلاح الأراضي، والحد من انبعاثات الميثان، وتمويل نفسها عبر المواد المعاد تدويرها، وأرصدة الكربون، وتكاليف الرعاية اللاحقة للمكبات التي جرى تجنبها. حيث أظهرت المشاريع التجريبية المنفذة في أوروبا تحقيق ربحية من استرداد الطاقة.
12	إعادة تدوير البلاستيك الأنزيمي	تقوم الإنزيمات المُهندسة بتفكيك (إزالة بلمرة) منسوجات خليط البولي إيثيلين تيرفثالات والبولي أميد والسليلوز عند درجات حرارة منخفضة، منتجةً مونومرات بجودة المواد البكر خلال ساعات. وتتوسع التقنيات عبر المفاعلات الحيوية المستمرة، والإنزيمات المُثبتة، وهندسة البروتين الموجهة بالذكاء الاصطناعي للوصول إلى منشآت بسعات بالآلاف من الأطنان، مما يسهم بتقليل استهلاك الطاقة وتحقيق دائرية جزيئية حقيقية لمخلفات الألياف المختلطة والبلاستيك، وذلك على مستوى النماذج الصناعية الأولية.
13	الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام مخلفات البناء القابلة لإعادة التدوير	تقوم أنظمة التصنيع الإضافي بقذف خلطات من الخرسانة المكسّرة، والرماد المتطاير، والركام المعاد تدويره لتصنيع الجدران والعناصر الإنشائية في الموقع. وتسهم هذه التقنية في تحويل مخلفات الهدم كبيرة الحجم بعيدًا عن المكبات، وتقليل الطلب على الأسمنت، وتسريع فترات البناء، وتمكين الأشكال الهندسية المعقّدة، بما يدعم البناء منخفض الكربون والدائري. وقد أظهرت المنازل التجريبية امتثالها لمتطلبات مقاومة الزلازل وتحقيق الخفض في الانبعاثات بنسبة تصل إلى 50%.
14	أنابيب النفايات الهوائية	تنقل شبكات أنابيب التفريغ تحت الأرض النفايات المنزلية أو التجارية بسرعة تصل إلى 70 كم/ساعة إلى مراكز التجميع المركزية، مما يُلغي شاحنات الجمع على الأرصفة، ويخفض انبعاثات الديزل، ويقلل الآفات، ويُفسح المجال أمام المساحات الحضرية. وتُمكّن منافذ الإدخال المؤتمتة من احتساب الرسوم حسب الحجم، وتحسّن إعادة التدوير من خلال فصل تيارات النفايات عند المصدر، وقد أظهرت التجارب خفض الانبعاثات بنسبة 90%.
15	إعادة التدوير عن طريق الألعاب	تُوظّف التطبيقات الذكية والأكشاك الرقمية آليات التحفيز القائمة على الألعاب -مثل النقاط، ولوحات المتصدرين، والمسابقات- لتشجيع الفرز الصحيح وإعادة المواد القابلة للتدوير. ويسهم توفير التغذية الراجعة الفورية في توجيه السلوك المجتمعي، ورفع معدلات المشاركة بنسبة تتراوح بين 20–30%، إضافة إلى توليد البيانات التفصيلية لدعم البلديات، كما يمكن دمج هذه الحلول مع أنظمة الهوية الرقمية والمحافظ الإلكترونية من خلال مسابقات إعادة التدوير المجتمعية.

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 السيليكونية.
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

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

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

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
مـــوان MWAN
المركز الوطني لإدارة النفايات
National Center for Waste Management
نبراس
NPRAS
المنصة الوطنية لاستشراف البحث والابتكار للاستدامة
National Platform of R&I Analytics for Sustainability