وزارة البيئة والمياه والزراعة
Ministry of Environment Water & Agriculture

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

المركز الوطني لتنمية الغطاء النباتي ومكافحة التصحر

توجهات الابتكار في قطاع البيئة

الأراضي والنباتات والتصحر

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

م. أحمد بن صالح العيادة

الرئيس التنفيذي المكلّف للمركز الوطني لتنمية الغطاء النباتي ومكافحة التصحر

يأتي اهتمام المملكة العربية السعودية بالقطاع البيئي امتدادًا لرؤيتها الاستراتيجية نحو مستقبل أكثر استدامة، إذ أصبح الحفاظ على البيئة وتنمية مواردها الطبيعية أحد المرتكزات الرئيسة لمسيرة التنمية التي تقودها رؤية السعودية 2030. ومع ما يشهده العالم من تحولات متسارعة في مجالات التقنية والابتكار والتحول الرقمي، تبرز أهمية توظيف المعرفة والتقنيات الحديثة لتعزيز استدامة الموارد الطبيعية ورفع كفاءة إدارتها بما يحقق التوازن بين التنمية الاقتصادية والمحافظة على البيئة.

وفي هذا السياق، أُنشئ المركز الوطني لتنمية الغطاء النباتي ومكافحة التصحر ليكون إحدى الركائز المؤسسية الداعمة لتطوير القطاع البيئي في المملكة، من خلال تنمية وإدارة الغطاء النباتي، والحد من تدهور الأراضي، وتعزيز استدامة النظم البيئية في البيئات الجافة وشبه الجافة التي تتميز بها المملكة، إلى جانب دعم الجهود الوطنية لحماية التنوع الحيوي وتنمية الموارد النباتية وتعزيز دورها في دعم الاستقرار البيئي والاقتصادي.

وانطلاقًا من إيمان المركز بأهمية الابتكار بوصفه محركًا رئيسًا للتنمية المستدامة، فإنه يحرص على تعزيز منظومة البحث والتطوير وتبني الحلول التقنية المتقدمة، والاستفادة من التحول الرقمي والبيانات والذكاء الاصطناعي وتقنيات الاستشعار عن بعد في تطوير أدوات مراقبة الغطاء النباتي وإدارة الموارد الطبيعية، كما يسعى إلى تطوير حلول مبتكرة تسهم في رفع كفاءة إدارة الأراضي والمراعي والغابات والمتنزهات الوطنية، وتعزيز القدرة على مواجهة تحديات التصحر وتدهور الأراضي والتغيرات البيئية.

ويمثل القطاع البيئي اليوم مجالًا واعدًا تتكامل فيه الأبعاد البيئية والاقتصادية والتقنية، بما يفتح فرصًا جديدة للابتكار والاستثمار، ويعزز كفاءة استخدام الموارد الطبيعية واستدامتها للأجيال القادمة.

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

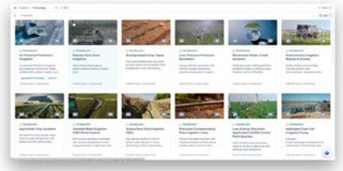
- الوصول لاحتياجات القطاعات الوطنية
- بيانات فرص الشراكات والتمويل للتقنيات الواعدة
- إبراز الحلول المبتكرة

الباحثون والعلماء

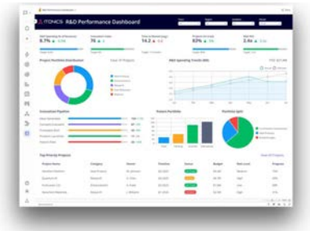
- بيانات أبرز العلماء والباحثين
- تحديد الفجوات والأولويات البحثية
- بيانات تعزز التعاون لتطبيق نتائج الأبحاث

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" 08
نبذة عامة حول التقرير 12
الفهرس 15

2

الملخص التنفيذي 16
المقدمة 18
نطاق التقرير 20
المنهجية 28

3

مجموعتين التقنيات ذات الأولوية 30
3.1 إدارة أراضي الرعي 32
3.1.1 التقنيات البارزة (أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي) 42
3.2 تقنيات الري المبتكرة للأشجار والنباتات البرية 54
3.2.1 التقنيات البارزة (منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي) 64

4

رؤى القادة 76

5

الملحق 84
بطاقة تقييم معايير الاختيار 102
قاموس المصطلحات 104
شركاؤنا 114

الملخص التنفيذي

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

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

ويعتمد تقرير توجهات الابتكار في قطاع البيئة على تقرير خارطة طريق تبني التقنيات في قطاع البيئة في المملكة العربية السعودية، والذي سيسلط الضوء على القطاعات التقنية الرئيسة في كل مجموعة من مجموعات التقنيات ذات الأولوية، مع الإشارة إلى التقنيات المتصلة في كل مجال تقني من ضمن مجموعات التقنيات ذات الأولوية. وسيساعد الرسم البياني في اختيار أفضل التقنيات، حيث تُقيّم كل منها بناءً على درجات الابتكار والاهتمام (يرجى الاطّلاع على الشكل [4]. سيركز هذا التقرير على مجموعتين من التقنيات ذات أولوية (إدارة أراضي الرعي و تقنيات الري المبتكرة للأشجار والنباتات البرية)، من خلال تسليط الضوء على تقنيتين رئيسية مختارة ضمن هذه المجموعتين، وهم: أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي من مجموعة إدارة أراضي الرعي و منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي من مجموعة تقنيات الري المبتكرة للأشجار والنباتات البرية.

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

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

مستوى جاهزية التقنية (TRL) درجة تسليط الضوء*

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

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

المقدمة

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

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

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

نطاق التقرير (4/1)

يركز هذا التقرير على النهوض بقطاع البيئة في المملكة العربية السعودية من خلال دراسة مجموعتين من تقنيات ذات أولوية: **" إدارة أراضي الرعي و تقنيات الري المبتكرة للأشجار والنباتات البرية ".** إذ يستعرض التقرير أهم الجهات الرئيسة الفاعلة، ومستوى جاهزية القدرات، ومستوى جاهزية التقنية، ومزايا التقنية وعيوبها، والمؤشرات والحقائق الرئيسة، والوضع الحالي، والتوطين، والمسار المستهدف، وأوجه عدم اليقين الرئيسة، ودراسات الحالة المحلية.

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

الجمهور المستهدف

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

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

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

المستثمرون
الجهات الممولة للمشاريع التقنية في قطاعات البيئة والمياه والزراعة

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

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

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

نطاق التقرير (4/2)

المواءمة مع الأهداف الوطنية

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

إدارة أراضي الرعي

تتيح التقنيات والحلول المبتكرة في هذه المجموعة التقنية الاستفادة المثلى من المراعي الطبيعية، مع منع الإفراط في الرعي وتدهور الأراضي. حيث تعد هذه الابتكارات ضرورية للحفاظ على إنتاجية الأنظمة الرعوية الواسعة في المملكة العربية السعودية، والتي تغطي أجزاء كبيرة من أراضي المملكة. فمن خلال تطبيق تقنيات إدارة الرعي الذكية يمكن للمملكة العربية السعودية تعزيز إنتاجية الماشية، واستعادة المراعي المتردية، والمساهمة في جهود عزل الكربون. وتدعم هذه المجموعة التقنية بشكل مباشر أهداف الاستدامة الزراعية لبرنامج التحول الوطني، وأهداف استعادة الأراضي الخاصة بمبادرة السعودية الخضراء، مما يضمن تطور الممارسات الرعوية التقليدية لتلبية المعايير البيئية الحديثة.

تقنيات الري المبتكرة للأشجار والنباتات البرية

تسهم تقنيات هذه المجموعة في تمكين طموحات المملكة غير المسبوقة في إعادة زراعة الغابات واستعادة الموائل الطبيعية في إطار رؤية السعودية 2030. كما تعالج التحدي الأساسي المتمثل في إنشاء الغطاء النباتي المحلي وصيانته في البيئات القاحلة، مما يدعم أهداف التشجير الضخمة لمبادرة السعودية الخضراء مع تحسين الموارد المائية النادرة. **وتعد أنظمة الري المتقدمة ضرورية للنجاح في إنشاء النظم البيئية المحلية عبر المناظر الطبيعية المتردية.** وتمتد الأهمية الاستراتيجية لهذه المجموعة التقنية إلى ما هو أبعد من استعادة البيئة، لتشمل التخفيف من آثار تغير المناخ، وتحسين جودة الهواء، وإنشاء الممرات الخضراء التي تعزز إمكانية العيش في المناطق الحضرية. وتعد هذه التقنيات أساسية لتحقيق أهداف الاستدامة البيئية لرؤية السعودية 2030 مع دعم التحول الأوسع في المشهد الطبيعي والمرونة المناخية للمملكة العربية السعودية.

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"**

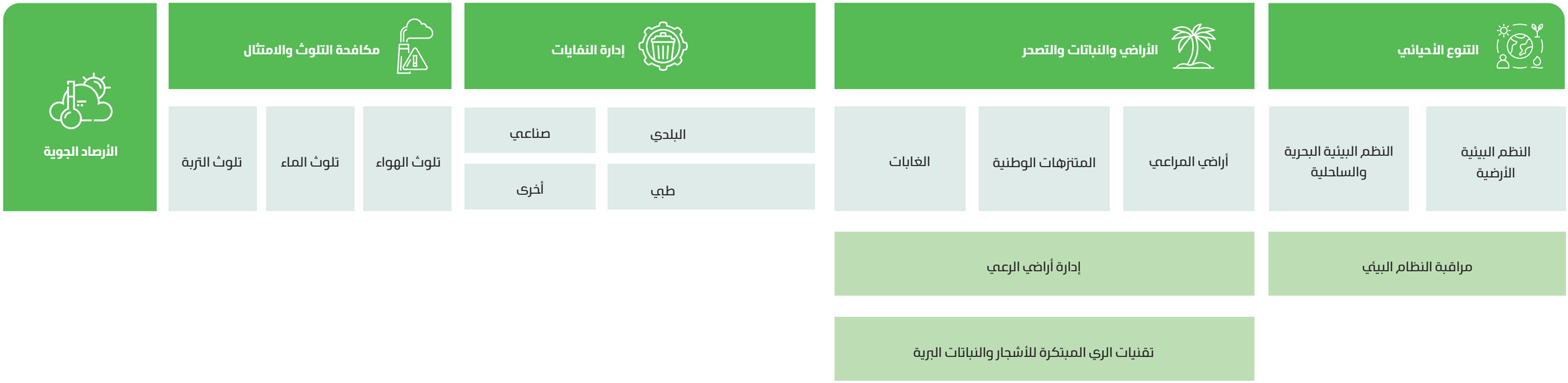
التنوع الأحيائي	الأراضي والنباتات والتصحر	إدارة النفايات	مكافحة التلوث والامتثال	الأرصاد الجوية
استعادة النظم البيئية البرية وتعزيز استدامتها	الحماية من الرعي الجائر	تقليل حجم المخلفات الناتجة	خفض مستويات الانبعاثات	تحسين التنبؤات والقدرات المناخية الإنذار المبكر
استعادة النظم البيئية البحرية والساحلية 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 أراضي الرعي و تقنيات الري المبتكرة للأشجار والنباتات البرية) 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).

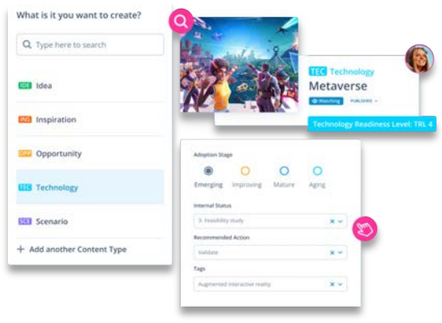
4. التحقق والأخذ بمرئيات الخبراء

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.

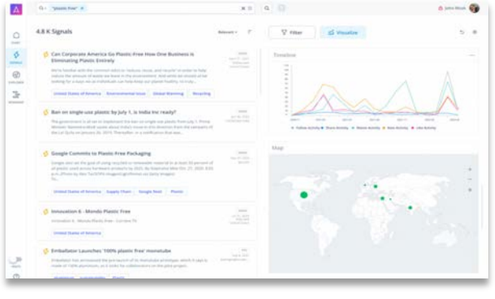
رادار التقنية

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.

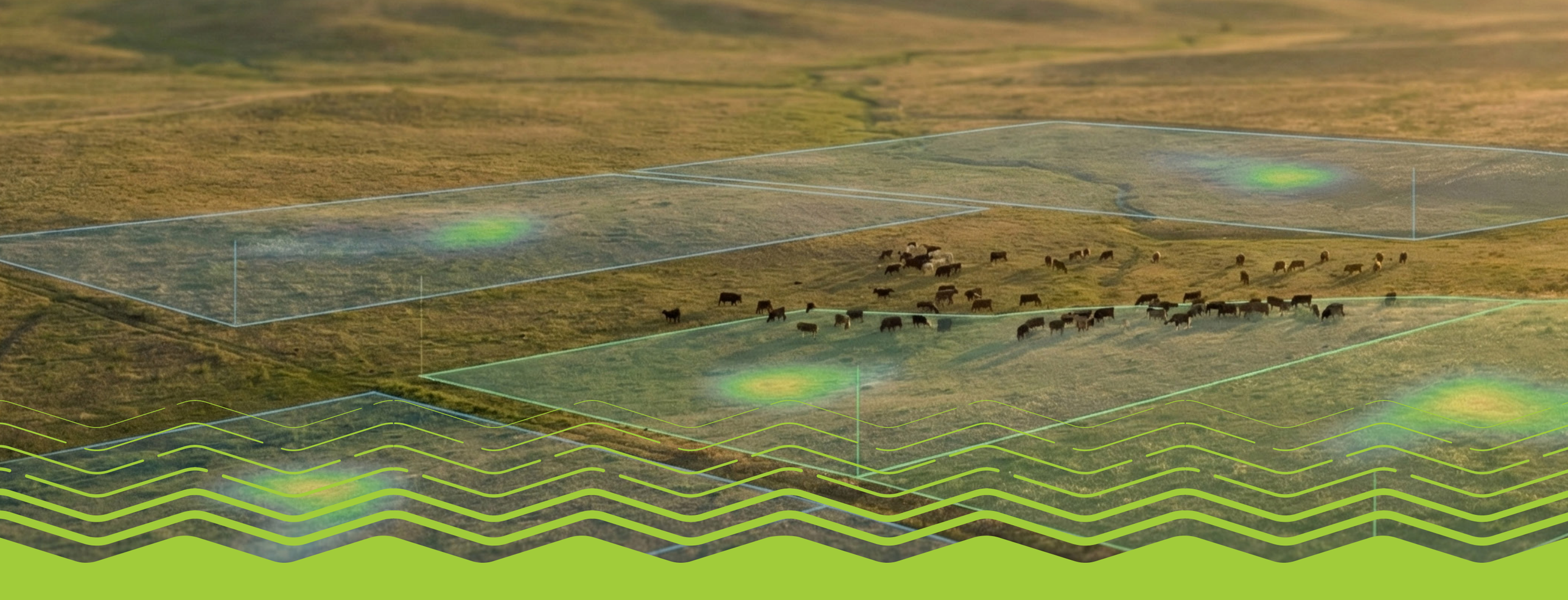


المراقبة الآلية

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

مجموعتين التقنيات ذات الأولوية



محور التركيز ضمن مجموعات التقنيات ذات الأولوية

3.1 إدارة أراضي الرعي

تهدف تقنيات إدارة أراضي الرعي إلى الإدارة المستدامة للمراعي وأراضي الرعي المفتوحة، وحمايتها من الرعي الجائر والتصحر. ويشمل ذلك تقنيات مراقبة الرعي وتقنيات التغذية. تشمل نظامين مترابطين: مراقبة صحة المراعي (حالة الغطاء النباتي، نسبة تغطية الأرض، ومخاطر التدهور) ومراقبة إنتاجية ورفاهية الماشية (الحركة، والإجهاد الحراري، ومؤشرات الأداء). تُعد إدارة الرعي الفعّالة في جوهرها مسألة قدرة استيعابية وتحكم، وتتطلب تحديد معدلات التخزين المناسبة، وجداول التناوب، واستجابات تكيفية لتقلبات الأمطار. في البيئات القاحلة، تؤثر العوامل مثل الغبار، والإجهاد الحراري، وقلة الكتلة الحيوية، وهطول الأمطار المتقطع بشكل كبير على أداء التقنية والجدوى التشغيلية مقارنة بسياقات النشر في المناطق المعتدلة.

التقنيات الرائدة في إدارة أراضي الرعي

أنظمة المراقبة الرقمية للثروة الحيوانية
Digital Livestock Monitoring Systems

التحليلات والمعلومات الاستخباراتية عن المراعي
Pasture Intelligence & Analytics

إنتاج العلف والأعلاف المستدام
Sustainable Feed & Forage Production

التحسين الوراثي والحيوي
Genetic & Biological Enhancement

الأطواق الذكية بنظام تحديد المواقع العالمي والسياج الافتراضي

Smart GPS Collars & Virtual Fencing
(TRL 9)

عمليات المراقبة والإبلاغ والتحقق من الكربون في التربة عبر الأقمار الصناعية

Satellite-Based Soil Carbon MRV
(TRL 7)

وحدات الأعلاف المائية المعبأة في حاويات

Containerised Hydroponic Fodder Units
(TRL 9)

الأعلاف الرعوية المتحملة للجفاف والملوحة والمعدّلة بتقنية كريسبر

CRISPR-Edited Drought / Salt-Tolerant Forage Grasses
(TRL 6)

كبسولات المعدة وأجهزة الاستشعار الصحية القائمة على الذكاء الاصطناعي الطرفي

Edge-AI rumen Bolus & health sensors
(TRL 7)

تحليلات الكتلة الحيوية للمراعي

Pasture-biomass analytics
(TRL 8)

إنتاج البروتين أحادي الخلية

Single-Cell Protein Production
(TRL 7)

ملقحات المنشّطات الحيوية الميكروبيومية للمراعي القاحلة

Microbiome Biostimulant Inoculants for Arid Pastures
(TRL 8)

التقنيات القابلة للارتداء للحد من انبعاثات غاز الميثان

Methane mitigation wearables
(TRL 6)

محسنات معدل التخزين

Stocking-rate optimisers
(TRL 8)

زراعة الحشرات من أجل الإنتاج المستدام للماشية

Insect Farming for Sustainable Livestock Production
(TRL 8)

تتبّع الثروة الحيوانية باستخدام تقنية سلسلة الكتل

Blockchain Livestock Traceability
(TRL 7)

آلات تغذية ومراعي مستقلة

Autonomous pasture rovers & feeders
(TRL 7)

أتمتة المضخات المعتمدة على إنترنت الأشياء عبر الأقمار الصناعية

SatIoT Pump Automation
(TRL 8)

أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي

Agrivoltaic “Solar Grazing” Systems
(TRL 8)

تعاريف التقنيات مدرجة في قسم قاموس المصطلحات

الابتكار والاهتمام والاستثمار في التقنية

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

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

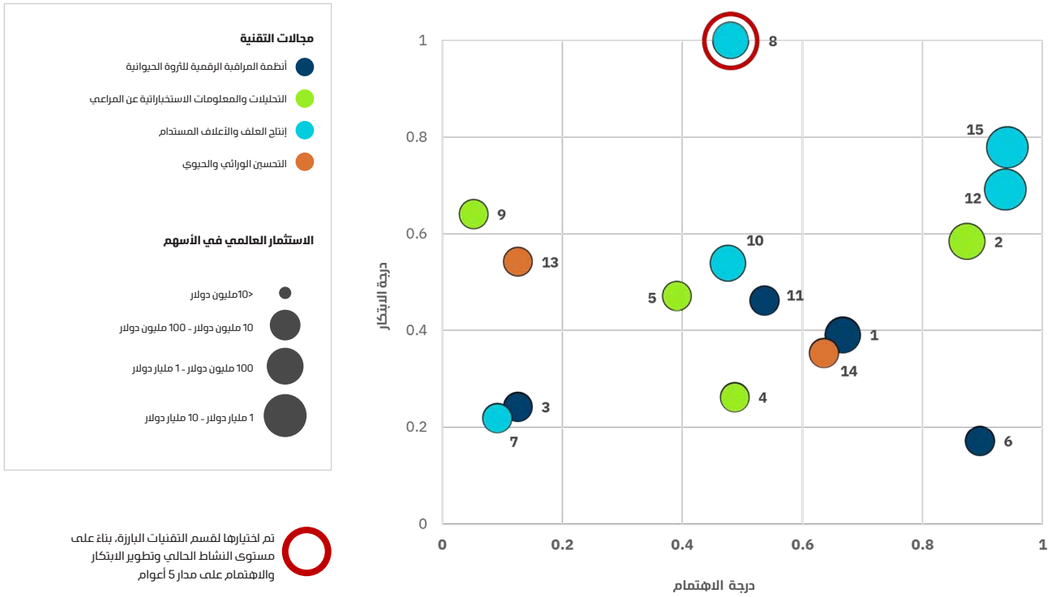
تجمع درجة الابتكار (Innovation Score) بين براءات الاختراع ودرجات الأبحاث. بينما تعتمد درجة براءات الاختراع على مقياس ملفات براءات الاختراع، وتعتمد درجة البحث على مقياس المنشورات البحثية.

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

يوضح الاستثمار (Investment) تدفقات التمويل إلى الشركات المرتبطة بالتقنية، كزيادة رأس المال في السوق الخاص والسوق العام (رأس المال الاستثماري وعمليات الاندماج والاستحواذ المؤسسية والاستراتيجية، بما في ذلك المشاريع المشتركة)، والأسهم الخاصة (كعمليات الاستحواذ والاستثمار الخاص في الأسهم العامة)، والاستثمارات العامة (كالاكتتاب 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 (9): يوضح المخطط البياني درجة الابتكار مقابل درجة الاهتمام على مستوى جميع التقنيات الـ 15



1. الأطواق الذكية بنظام تحديد المواقع العالمي والسياج الافتراضي
2. عمليات المراقبة والإبلاغ والتحقق من الكربون في التربة عبر الأقمار الصناعية
3. التقنيات القابلة للارتداء للحد من انبعاثات غاز الميثان
4. تحليلات الكتلة الحيوية للمراعي
5. محسنات معدل التخزين
6. كبسولات المعدة وأجهزة الاستشعار الصحية القائمة على الذكاء الاصطناعي الطرفي
7. أتمتة المضخات المعتمدة على إنترنت الأشياء عبر الأقمار الصناعية
8. أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي
9. آلات تغذية ومراعي مستقلة
10. وحدات الأعلاف المائية المعبأة في حاويات
11. تتبع الثروة الحيوانية باستخدام تقنية سلسلة الكتل
12. إنتاج الروتيفر أحادي الخلية
13. الأعلاف الرعوية المتحملة للجفاف والملوحة والمعدّلة بتقنية كريسبر
14. ملفحات المنشطات الحيوية الميكروبيومية للمراعي الفاخلة
15. زراعة الحشرات من أجل الإنتاج المستدام للماشية

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 التي شملتها الدراسة على مدار السنوات الخمس الماضية، يتجلى بوضوح الزخم المتسارع خصوصًا في مجال التقنية **"التحليلات والمعلومات الاستخباراتية عن المراعي"** و **"إنتاج العلف والأعلاف المستدام"**. حيث تظهر التقنيات التالية معدلات نمو مرتفعة عبر جميع المقاييس قيد الدراسة:

التقنيات القابلة للارتداء للحد من انبعاثات غاز الميثان

هي أجهزة ذكية للثروة الحيوانية تراقب انبعاثات الميثان وتقلّل منها، من خلال التتبع في الوقت الفعلي والتدخلات الموجّهة

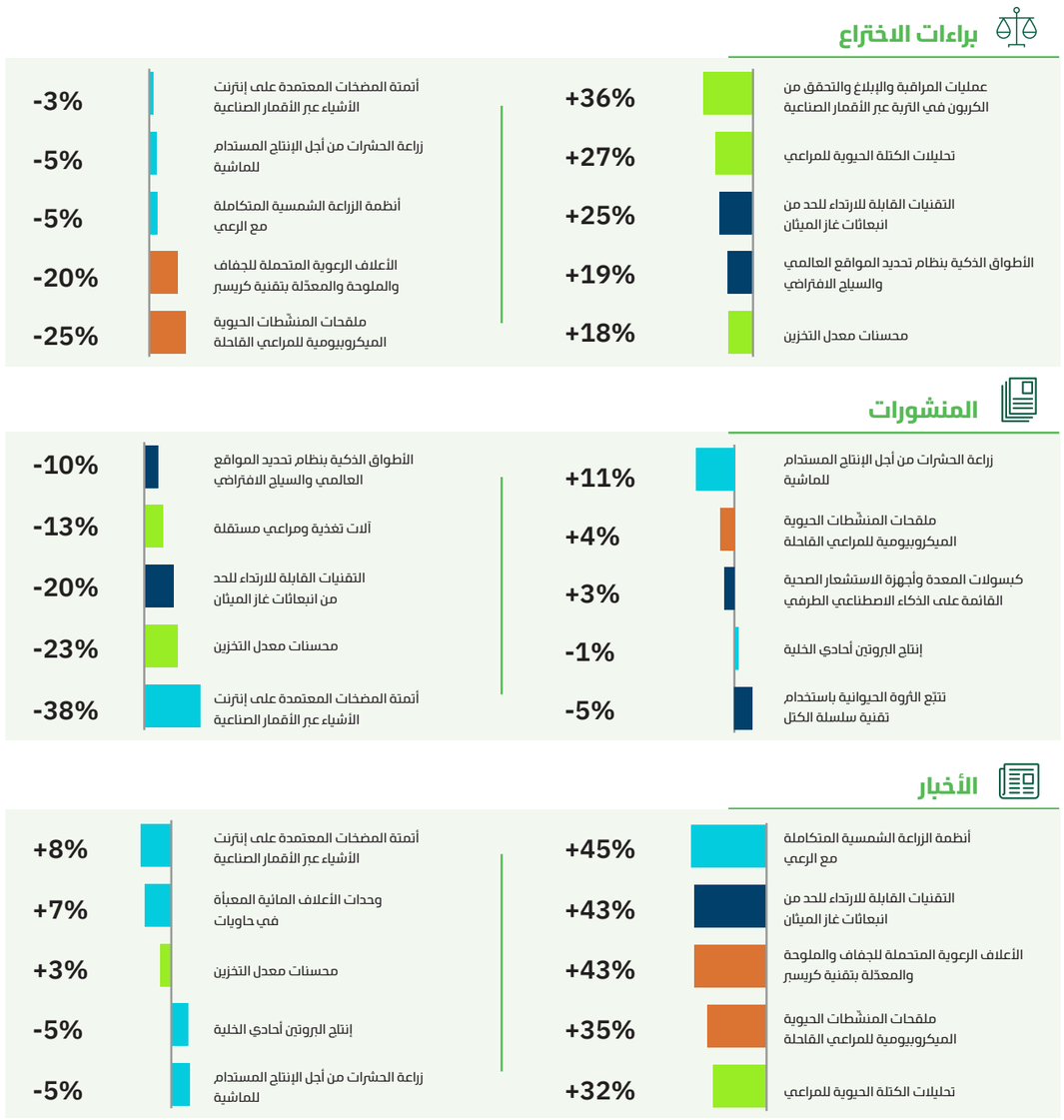
عمليات المراقبة والإبلاغ والتحقق من الكربون في التربة عبر الأقمار الصناعية

وهي أنظمة استشعار عن بُعد تراقب مخزونات كربون التربة وتتحقق منها، لدعم برامج التخفيف المناخي

أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي

وهي منشآت للطاقة المتجددة والمزدوجة الاستخدام، والتي تجمع بين الألواح الشمسية المثبتة أرضيًا ورعي الماشية على الأراضي المشتركة

الشكل (10): معدل النمو السنوي المستمر لبراءات الاختراع والمنشورات والأخبار (2019–2024) — أعلى خمس تقنيات وأدناها



نبذة عن مجال البحث والتطوير والابتكار على المستوى الوطني

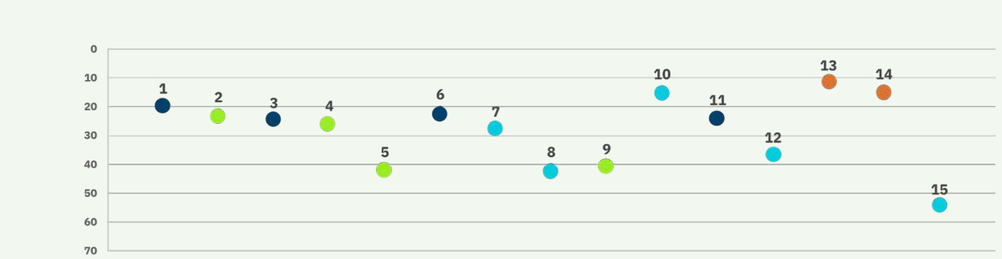
تتمتع المملكة العربية السعودية بمكانة تنافسية جيدة في التقنيات التي شملها التحقيق. ففيما يتعلق **ببراءات الاختراع -ومقارنةً بالمرتبة العالمية الإجمالية للمملكة** - فإن المملكة تُصنّف ضمن أفضل 10 دول عالميًا في اثنتين من التقنيات التي شملتها الدراسة، كما جاءت ضمن أفضل 20 دولة في اثنتين من التقنيات الناشئة الرئيسة في هذا المجال. إذ تبدو بلادنا الأكثر تنافسية في تقنية **محسّنات معدل التخزين.**

أما فيما يخص **المنشورات** فيبدو الوضع شبيهًا، حيث دخلت أربع تقنيات ضمن قائمة أفضل 20دولة، ودخلت نحو نصف التقنيات ضمن قائمة أفضل 20 دولة. والأبرز من ذلك أن المملكة العربية السعودية في وضع جيد فيما يتعلق بتقنيات **"الأعلاف الرعوية المتحملة للجفاف والملوحة والمعدّلة بتقنية كريسبر" و "ملقحات المنشطات الحيوية الميكروبيومية للبيئات القاحلة" و "وحدات الأعلاف المائية المُعلّبة (الهيدروبونيك)".**

الشكل (11): ترتيب المملكة العربية السعودية فيما يخص التقنيات الناشئة، الترتيب العالمي في عدد براءات الاختراع والمنشورات (2019-2024)

براءات الاختراع

المنشورات



1. الأطواق الذكية بنظام تحديد المواقع العالمي والسياج الافتراضي
2. عمليات المراقبة والإبلاغ والتحقق من الكربون في التربة عبر الأقمار الصناعية
3. التقنيات القابلة للارتداء للحد من انبعاثات غاز الميثان
4. تحليلات الكتلة الحيوية للمراعي
5. محسنات معدل التخزين
6. كبسولات المعدة وأجهزة الاستشعار الصحية القائمة على الذكاء الاصطناعي الطرفي
7. أتمتة المضخات المعتمدة على إنترنت الأشياء عبر الأقمار الصناعية
8. أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي
9. آلات تغذية ومراعي مستقلة
10. وحدات الأعلاف المائية المعبأة في حاويات
11. تتبع الثروة الحيوانية باستخدام تقنية سلسلة الكتل
12. إنتاج البروتين أحادي الخلية
13. الأعلاف الرعوية المتحملة للجفاف والملوحة والمعدّلة بتقنية كريسبر
14. ملقحات المنشطات الحيوية الميكروبيومية للمراعي القاحلة
15. زراعة الحشرات من أجل الإنتاج المستدام للماشية

مجالات التقنية

- أنظمة المراقبة الرقمية للثروة الحيوانية
- التحليلات والمعلومات الاستخباراتية عن المراعي
- إنتاج العلف والأعلاف المستدام
- التحسين الوراثي والحيوي

3.1.1 أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي

أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي هي منشآت للطاقة المتجددة والمزدوجة الاستخدام والتي تجمع بين الألواح الشمسية المثبتة أرضيًا ورعي الماشية على نفس الأرض. حيث تُرفع الألواح عاليًا بما فيه الكفاية أو تُباعَد على نطاق واسع للسماح للحيوانات (خاصة الأغنام) بالرعي تحتها أثناء توليد الكهرباء. ويمكن هذا النهج الزراعة والطاقة الشمسية من مشاركة نفس أشعة الشمس والأرض، مما يوفر للمزارعين فوائد الطاقة المتجددة، وتغطية الماشية، وتقليل استهلاك المياه، وتحقيق الدخل الثانوي مع الحفاظ على الإنتاجية الزراعية.

أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي

تمثل أنظمة "الرعي الشمسي" الزراعية نهجًا ذا استخدام مزدوج، يجمع بين إنتاج الطاقة الشمسية ورعي الماشية على نفس الأرض. وتتميز هذه الأنظمة بالألواح الشمسية المرتفعة والمثبتة على ارتفاعات تسمح الأغنام وغيرها من الماشية بالرعي تحتها، مما يخلق فوائد تعاونية لكل من إنتاج الطاقة والزراعة (NREL، DOE).

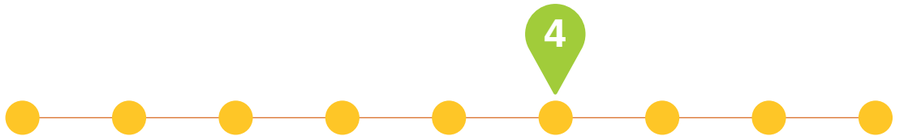
ويعالج هذا النهج المبتكر النزاعات المتعلقة باستخدام الأراضي مع توفيره لمصادر الدخل المتعددة للمزارعين، وذلك بتوليد الطاقة المتجددة والإنتاج الزراعي المستمر. وتظهر الأبحاث أن هذه الأنظمة يمكن أن تزيد من إنتاجية الأراضي بنسبة تصل إلى 70% مقارنةً بالعمليات المنفصلة للطاقة الشمسية والرعي. حيث يقلل الظل الناتج عن الألواح من متطلبات المياه للغطاء النباتي ويوفر التبريد للماشية، بينما تحافظ حيوانات الرعي بشكل طبيعي على الغطاء النباتي حول الألواح، مما يقلل من تكاليف الصيانة (Science Direct، MDPI).

التقنية ونضج القدرات الوطنية

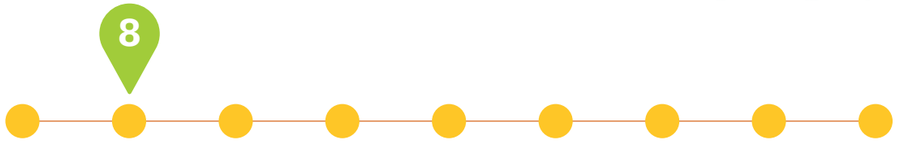
تُظهر أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي مستوى جاهزية تقني مرتفعًا من المستوى الثامن (TRL 8)، مما يشير إلى عرض النموذج الأولي للنظام في بيئة تشغيلية حق اكتمال النظام واعتماده. وتؤكد الأبحاث الأكاديمية أن هذه الأنظمة قد تقدمت إلى ما بعد الاختبار المخبري، مع إجراء الدراسات الشاملة والتي توثق الأطر التشغيلية المعمول بها للجمع بين الإنتاج الزراعي وتوليد الطاقة الكهروضوئية على نفس مساحة الأرض، مثل بروتوكولات تكامل الماشية والجدوى التجارية المثبتة (Sci-enceDirect، SpringerNature).

وبالنسبة لسياق المملكة العربية السعودية، فقد حققت التقنية المستوى الرابع (CRL 4)، مما يمثل الجاهزية المتوسطة وإمكانات التطوير الكبيرة. وبما أن المملكة تمتلك بنية تحتية قوية للطاقة الشمسية تتماشى مع أولويات إدارة أراضي الرعي، إلا أن الأبحاث التي راجعها النظراء تشير إلى محدودية العمل الميداني التأسيسي، ولا تزال هناك حاجة إلى إجراء دراسات متعددة التخصصات لتحديد الآثار البيئية، وتحسين تكامل الخلايا الكهروضوئية والأثرة الحيوانية من منظور رعاية الحيوانات والبنية التحتية (APC، MDPI).

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 Lightsource BP

02 EDF power solutions

03 RWE

04 enel Green Power

05 BayWa r.e.

06 Sun Farming

07 Clearway Energy Group

08 Silicon Ranch

إمكانيات التقنية

تمثل أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي تقنية تحويلية مزدوجة الاستخدام، تزيد من إنتاجية الأراضي من خلال الجمع بين توليد الطاقة المتجددة ورعي الماشية، مما يوفر الفوائد البيئية والاقتصادية الكبيرة للزراعة المستدامة.

المزايا

- **تعزيز إنتاجية الأراضي:** حيث تحقق الأنظمة الزراعية مصادر الدخل المزدوجة مع الحفاظ على الوظائف الزراعية، إذ أظهرت الدراسات مخرجات الطاقة والقي تصل إلى 1.5 ميجا واط لكل هكتار إلى جانب العمليات المستمرة للماشية. EMU Dspace

- **مزايا الاستدامة متعددة التخصصات:** تشير المراجعات الأكاديمية الشاملة إلى أن الرعي الزراعي الفولاذي يعالج النزاعات المتعلقة باستخدام الأراضي بالإضافة إلى توفير الفوائد البيئية المشتركة، مما يدعم كلًا من توسيع الطاقة المتجددة وممارسات الإدارة المستدامة للمراعي. Earth's Future

- **مزايا رعاية المواشي:** توفّر الألواح الشمسية ظلاً يقلّل من الإجهاد الحراري واستهلاك المياه للماشية الرعوية، وفي الوقت نفسه تلغي الحاجة إلى عمليات الجز المكلفة عبر نحو 100,000 فدان من مزارع الطاقة الشمسية في الولايات المتحدة. farms.com

العيوب

- **تكاليف رأسمالية مبدئية:** تتطلب أنظمة الزراعة نفقات رأسمالية وتشغيلية أعلى بكثير مقارنةً بالأنظمة الشمسية التقليدية، وذلك بسبب الحاجة إلى هياكل تركيب متخصصة، ومسافات فصل أكبر، ومتطلبات دمج أكثر تعقيدًا، وتكاليف صيانة مرتفعة. كما أن التنظيف المنتظم للألواح الشمسية يستلزم استهلاكًا كبيرًا للمياه وتوظيف عمالة مخصصة أو استخدام أنظمة روبوتية، مما يزيد من التكاليف التشغيلية بشكل إضافي*. MDPI

- **الثغرات الهيكلية في أحمال طاقة الرياح:** تواجه الأنظمة تحديات كبيرة بسبب الإجهاد الهيكلي الناجم عن الرياح، مما يتطلب حلولًا هندسية متخصصة للتخميد والتوزيع الشامل، حيث تظهر معايير التصميم الحالية التناقضات بين المتطلبات النظرية والعملية. Advanced Energy and Sustainability Research

- **انخفاض الأداء الزراعي:** يمكن أن يؤدي التظليل من الألواح إلى تقليل غلة المحاصيل والتحخل في الظروف المتنامية، في حين أن نهج الاستخدام المزدوج للأراضي يعقد العمليات الزراعية وقد يتطلب تعديلات على الممارسات الزراعية التقليدية والوصول إلى المعدات. nature.com

*رؤى أخذ بها من الخبراء في قطاع البيئة

آخر التطورات

لوحظ التقدم التقني السريع، مع تركيز الابتكارات على تعزيز كفاءة الاستخدام المزدوج، وتقنيات التكامل الذكية، وتوسيع نطاق توافق الماشية لتحسين الأراضي بشكل مستدام.

مؤشرات الابتكار الرئيسة

- **التحقق من تحسين الإنتاجية:** تظهر دراسات الحالة العالمية زيادة إنتاجية المحاصيل بأكثر من 10 % تحت التظليل الجزئي، حيث تصل مخرجات الطاقة إلى 1.5 ميجا واط لكل هكتار من خلال تهيئة الألواح المحسنة. EMU Dspace

- **تكامل الطاقة الهجينة:** تعمل الأنظمة الهجينة بين الطاقة الشمسية والرياح والكتلة الحيوية على زيادة استمرارية المنشآت الزراعية الشمسية وقابلية توسعها، مع تقليل استهلاك المياه وانبعاثات الكربون لتعزيز أداء الاستدامة. Environmental Challenges

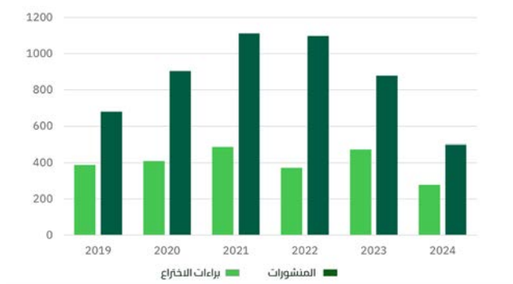
- **التركيز على التكامل الأكاديمي:** تبرز جلسات المسار المخصص في الاجتماع السنوي لجمعية الزراعة الأمريكية (AAEA) لعام 2025 تزايد التعاون بين الأوساط الأكاديمية والصناعية لتطوير دمج الزراعة الشمسية في تطبيقات الأراضي الزراعية. AgriTechTomorrow.com

- **إطار البحث متعدد التخصصات:** تحدد المراجعة الشاملة ست فجوات بحثية ذات أولوية، مثل تكامل الخلايا الكهروضوئية والثروة الحيوانية، واعتبارات رعاية الحيوانات، والنمذجة الكيميائية الحيوية لتحسين تصميم النظام. Earth's Future

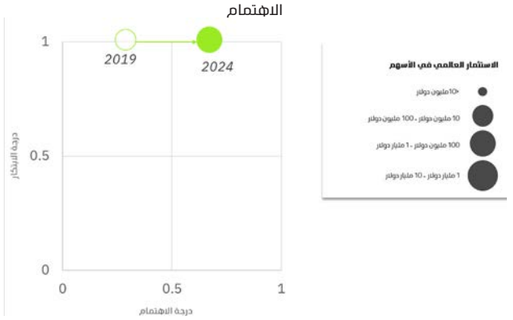
- **توسيع دمج الثروة الحيوانية:** أصبح الرعي الشمسي يستوعب الآن 80,000 خروف على مساحة 100,000 فدان في الولايات المتحدة، مع تعديلات الألواح والقي تتيح رعي الأبقار عبر التركيبات المرتفعة، وتقديم فوائد الظل المحسّنة. Farms.com

- **التقنيات ثنائية الوجه والذكية:** تُعزز الوحدات الشمسية ثنائية الوجه الشفافة المبتكرة، وأنظمة التتبع الآلية، وتكامل إنترنت الأشياء مع الذكاء الاصطناعي كفاءة الطاقة، بالإضافة إلى تحسين إنتاجية المحاصيل من خلال تطبيقات الزراعة الدقيقة. Environmental Challenges

الشكل (12): عدد براءات الاختراع والمنشورات (2019-2024) لأنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي



الشكل (13): تطور حجم استثمارات التقنية بناء على درجة الابتكار ودرجة الاهتمام



الرؤى والإحصائيات

تمثّل أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي نهجًا مزدوج الاستخدام وسريع التوسع، حيث يجمع بين توليد الطاقة المتجددة وإدارة الثروة الحيوانية، مما يوفر الفوائد الاقتصادية والبيئية الكبيرة، وفي الوقت نفسه يتناول التنافس على استخدام الأراضي بين الزراعة وتطوير الطاقة الشمسية.

الإحصائيات والحقائق الرئيسة

- **انخفاض تكلفة الكهرباء الموحدة بنسبة 55%:** تُظهر أنظمة الزراعة الشمسية تكلفة الكهرباء الموحدة (**LCOE**) والتي انخفضت بشكل ملحوظ مقارنة بالتركيبات الشمسية المثبتة على الأرض، مما يجعل التكوينات مزدوجة الاستخدام أكثر جاذبية اقتصاديًا من الأنظمة التقليدية الأرضية. Solar Compass

- **تسهم مصادر الدخل المزدوج في تعزيز الجدوى الاقتصادية:** توفر الأنظمة الزراعية الشمسية للمزارعين الإيرادات المجمعة من إنتاج المحاصيل وتوليد الطاقة، مما يخلق مصادر الدخل المتنوعة والتي تعزز المرونة المالية وإنتاجية الأراضي. OpenAlex

- **تشمل دراسات الحالة العالمية أربع قارات:** تظهر أمثلة التنفيذ من اليابان وفرنسا وأفريقيا وأمريكا اللاتينية قابلية التطبيق على مستوى العالم، والتكيف الناجح مع الظروف المناخية والزراعية المتنوعة. EMU Dspace

- **انخفاض استهلاك المياه بنسبة 50% تقريبًا:** تقلل الأنظمة الزراعية الشمسية من متطلبات الري بشكل كبير مقارنة بالممارسات الزراعية التقليدية مع الحفاظ على الأمن الغذائي، مما يدل على الإمكانات الكبيرة للحفاظ على المياه في المناطق القاحلة. MDPI

- **فئات السعة المتاحة المتعددة:** تتراوح الأنظمة من المنشآت الصغيرة التي تصل إلى 500 كيلوواط إلى مشاريع المرافق الكبيرة والتي تتجاوز قدرتها واحد ميجاواط، مما يوفر حلولا قابلة للتطوير لمختلف العمليات الزراعية ومتطلبات الطاقة. AgriTechTomorrow.com

- **تحقيق 1.5 تناسب التكلفة إلى العائد:** توضح دراسة الحالة الزراعية الهندية العوائد الاقتصادية الإيجابية مع تحقيق أرباح زراعية بقيمة 161,907 روبية هندية وهوامش مالية إجمالية قدرها 316,907 روبية هندية، مما يؤكد الجدوى التجارية. Solar Compass

تبني التقنيات

بينما تكتسب أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي قوة دفع على مستوى العالم من خلال عمليات النشر الناجحة في أوروبا وأفريقيا والولايات المتحدة واليابان، فإن تبني المملكة العربية السعودية يعتمد على تحديات ندرة المياه، وأهداف الطاقة المتجددة لرؤية السعودية 2030، والحاجة إلى الأطر التنظيمية والتي تدعم سياسات الاستخدام المزدوج للأراضي.

الوضع الراهن

- **تعزيز كفاءة الاستخدام المزدوج:** تظهر الأنظمة الزراعية الشمسية إنتاجية أعلى للأراضي مقارنةً بالمنشآت الشمسية والزراعية المنفصلة، مع تزايد الاعتماد التجاري عبر العمليات الزراعية المتنوعة. AgriTechTomorrow.com

- **يعمل الرعاة في مجال الطاقة الشمسية على إنشاء نماذج أعمال مربحة:** توفر خدمات الرعي المهنية في مزارع الطاقة الشمسية مصادر إيرادات كبيرة لمشغلي الماشية، مع توفير إدارة فاعلة من حيث التكلفة للمنشآت ذات الطاقة المتجددة. The Conversation

- **تعمل أنظمة الحقول المفتوحة على توسيع نطاق التكامل الزراعي:** تظهر استراتيجيات النشر الشاملة للمنشآت الزراعية الشمسية في الحقول المفتوحة مزيجًا ناجحًا من إنتاج الطاقة والأنشطة الزراعية المتنوعة عبر مختلف البيئات الزراعية وأنواع المحاصيل. Sustainable Energy Technologies and Assessments

- **فرصة مثالية لتبني التقنية محليًا:** المراعي الشاسعة في المناطق الشمالية (مثل تبوك والجوف) تمثل فرصة مثالية لتطبيق الزراعة الضوئية نظراً لوفرة الإشعاع الشمسي واتساع الأراضي.*

متطلبات التوطين

- **تسهم المواءمة مع رؤية السعودية 2030 في تسريع عملية النشر:** يخلق إطار الاستثمار في الطاقة المتجددة في المملكة العربية السعودية بموجب رؤية السعودية 2030 ظروفًا مواتية للأنظمة الزراعية الشمسية، مع دعم الحكومة لحلول الطاقة الشمسية المبتكرة والتي تدعم أهداف الاستدامة الزراعية. Alexandria Engineering Journal

- **تتطلب أطر الحوكمة الزراعية التكيف:** تحتاج هياكل إدارة المخاطر والحوكمة الحالية في قطاع الزراعة السعودي إلى تحسين استيعاب أنظمة الأراضي ذات الاستخدام المزدوج، مما يتطلب تحسينات في الجاهزية المؤسسية للموافقة على المشاريع الزراعية الشمسية والإشراف عليها. ResearchGate

- **تظهر البنية التحتية الإقليمية الجدوى الفنية:** يثبت نجاح تنفيذ نظام الطاقة الكهروضوئية بقدرة 500 كيلوواط في الخرج جاهزية البنية التحتية في المملكة لتطبيقات الطاقة الشمسية الزراعية، مع دعم التحليل الاقتصادي لنشر الطاقة الزراعية الشمسية على نطاق واسع. IEEE Xplore

- **قيود التنفيذ المادية:** تشمل تراكم الأتربة والغبار (وما يترتب عليه من خسائر في الطاقة ومتطلبات التنظيف)، واحتياجات رفاهية الماشية (توفير التهوية والمياه)، وتكاليف الأسوار وإدارة الحيوانات المفترسة، إضافةً إلى قيود الربط بالشبكة الكهربائية في المراعي النائية*.

*رؤى أخذ بها من الخبراء في قطاع البيئة

آفاق التقنية

تتوسع أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي بسرعة نحو تبني الزراعة السائدة، حيث تجذب مكاسب كفاءة الاستخدام المزدوج كلًا من مطوري الطاقة المتجددة ومشغلي الماشية، على الرغم من أن الآثار البيئية طويلة الأجل على صحة التربة وأنماط الرعي لا تزال غير واضحة.

التوجه المستقبلي

- **تكامل التقنيات المتقدمة:** ستتضمن الأنظمة المستقبلية الذكاء الاصطناعي، وأجهزة استشعار إنترنت الأشياء، وحلول تخزين الطاقة، والروبوتات المستقلة لتعزيز قابلية التوسع والمرونة والكفاءة التشغيلية في مختلف الظروف الزراعية. Solar RRL
- **تحسين خدمات المنظومة:** ستعطي الأنظمة الزراعية الشمسية المستقبلية الأولوية لاستراتيجيات تعزيز الموائل لتعظيم فوائد التنوع الحيوي وخدمات المنظومة، وتحويل المنشآت الشمسية إلى مناظر طبيعية متعددة الوظائف تدعم الحفاظ على الحياة البرية إلى جانب إنتاج الطاقة. Renewable and Sustainable Energy Reviews
- **التركيز على المرونة المناخية:** ستركز عملية التطوير على تعزيز القدرة على التكيف مع تغير المناخ، مع مساهمة الأنظمة الزراعية الشمسية في عزل الكربون في التربة، وتعزيز الأمن الغذائي، وممارسات الزراعة المتجددة لتحقيق الاستدامة على المدى الطويل. SpringerNature

أوجه عدم اليقين الرئيسة

- **الآثار البيئية طويلة المدى:** لا يزال الفهم الشامل لكيفية تأثير الأنظمة الزراعية الشمسية على صحة التربة والتنوع الحيوي ومرونة النظام البيئي على مدى فترات طويلة محدودا، مما يتطلب العمل الميداني التأسيسي لوصف الآثار البيئية متعددة المستويات. Earth's Future
- **الفجوات في السياسات وتوحيد المعايير:** تُعيق العقبات المستمرة مثل قبول الجمهور، وتناقض السياسات، وغياب معايير التصميم الموحدة الانتشار الواسع، رغم التطورات التقنية الواعدة والدراسات العملية العالمية. Advanced Energy and Sustainability Research
- **تكامل رعاية الحيوانات:** لا يزال فهم تكامل الطاقة الكهروضوئية والثروة الحيوانية من منظور رعاية الحيوانات والتوافق مع البنية التحتية غير متطور، مما يتطلب إجراء بحث شامل حول الآثار السلوكية واعتبارات السلامة التشغيلية. Earth's Future

توجهات الابتكار في قطاع البيئة

Source: ACWA

دراسة الحالة المحلية

مشروع دمج الطاقة الشمسية التابع لشركة أكوا باور

على الرغم من أن المملكة العربية السعودية لم تطبق بعد أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي التي تدمج إدارة الماشية مباشرة مع التركيبات الكهروضوئية، فقد طورت المملكة بنية تحتية مهمة للطاقة المتجددة تدعم التطبيقات الزراعية، بما في ذلك مشاريع تجريبية للتكامل في المنطقة الشرقية. ومشروع "مراعي المستقبل" التابع لمركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) الذي يختبر أنظمة رعي ذكية في نجد.* مع ذلك نفذت شركة أكوا باور، بالشراكة مع شركة المياه والكهرباء القابضة "بديل" وشركة أرامكو السعودية للطاقة "سابكو"، واحدة من أكبر محافظ الطاقة المتجددة في العالم لدعم التنمية الزراعية في المناطق الصحراوية في المملكة العربية السعودية. وقد حصل الاتحاد على تمويل بقيمة ٨,٢ مليار دولار لتطوير الطاقة المتجددة بقدرة ١٥ جيجاواط من خلال سبعة مشاريع رئيسة، مثل محطتي الطاقة الشمسية الكهروضوئية (٢ جيجاواط لكل منهما) في منطقة الرياض، والمصممتين خصيصًا لدعم جهود التحديث الزراعي في المملكة في إطار رؤية السعودية 2030. وتمثل هذه المنشآت تكاملًا استراتيجيًا للبنية التحتية للطاقة المتجددة مع مبادرات الزراعة الصحراوية، مما يعني أن استخدام الطاقة الشمسية على نطاق واسع سيؤدي إلى تمكين الإنتاج الغذائي المستدام في البيئات القاحلة (marketscreener.com).

أما من الناحية التشغيلية فتعمل منشآت الطاقة الشمسية هذه على تشغيل أنظمة الزراعة البيئية المتقدمة والخاضعة للرقابة، بما في ذلك مرافق انبعاثات غازات الدفيئة وشبكات الري الدقيقة التي تمكن من إنتاج المحاصيل على مدار السنة في الظروف الصحراوية. وتستخدم هذه المشاريع الأنظمة المتطورة لإدارة الطاقة والتي تعمل على تحسين توزيع الطاقة بين إمدادات الشبكة والعمليات الزراعية، مما يضمن توفر الطاقة بشكل متسق للبيئات الزراعية الخاضعة للتحكم المناخي. كما تدعم البنية التحتية للطاقة الشمسية مرافق تحلية المياه ومعالجتها والتي توفر المياه عالية الجودة الضرورية لأنظمة الزراعة المائية وغير الساحلية، في حين تتبع تقنيات المراقبة المتقدمة أنماط استهلاك الطاقة لتعظيم الإنتاجية الزراعية لكل وحدة من الطاقة المتجددة المولدة (Renewable Energy and Sustainable Development, Sustainable Futures).

هذا وتمتد الأهمية الاستراتيجية لهذا النشر إلى ما هو أبعد من توليد الطاقة؛ لتشمل أهداف الأمن الغذائي والتنويع الاقتصادي والتي تعد محورية في استراتيجية التنمية الوطنية للمملكة العربية السعودية، وتوضح هذه المشاريع كيف يمكن للبنية التحتية للطاقة المتجددة تمكين الاكتفاء الذاتي الزراعي في البيئات الصحراوية، مما يقلل من الاعتماد على الواردات الغذائية مع توفير الآلاف من فرص العمل في المجتمعات الريفية. ويشكل دمج الطاقة الشمسية مع التقنيات الزراعية المتقدمة أساسًا لتوسيع نطاق الزراعة البيئية الخاضعة للرقابة في جميع أنحاء الأراضي الصحراوية الشاسعة في المملكة، مما يضع المملكة العربية السعودية كرائدة إقليمية في تقنيات الزراعة الصحراوية المستدامة وأنظمة إنتاج الأغذية التي تعمل بالطاقة المتجددة. (Acta Horticulturae)

*رؤى أخذ بها من الخبراء في قطاع البيئة

3.2 تقنيات الري المبتكرة للأشجار والنباتات البرية

تشتمل تقنيات الريّ المبتكرة للأشجار والنباتات البرية على مجموعة متنوعة من الأنظمة التي تهدف إلى مساعدة الغطاء النباتي الطبيعي على النمو، مع تحسين استخدام مياه الري وزيادة كفاءتها؛ وذلك لإدارة الموارد المائية بفاعلية. فهي تمكن من ترشيد مياه الري دون التأثير على نمو النباتات وذلك بتخصيص عملية الري وفقًا لاحتياجات نباتات معينة، وبحسب خصائص الأرض. بالنسبة للأشجار والنباتات البرية، يُقاس نجاح الري عادةً من خلال معدلات البقاء والنمو الثابت (تطور الجذور ومقاومة الجفاف) بدلاً من الإنتاج الزراعي؛ لذلك غالبًا ما تكون هناك حاجة إلى أنظمة ري عميق، وجدولة دورية للري، وتصميم أحواض تجمع مياه دقيقة خلال مراحل التأسيس.

التقنيات الرائدة في تقنيات الري المبتكرة للأشجار والنباتات البرية

تحسين التربة والمياه
Soil & Water Enhancement

محسّنات تربة تعتمد على الهيدروجل فائق الامتصاص

Super-absorbent hydrogel soil amendments
(TRL 7)

الأحواض المحسّنة بالفحم الحيوي

Biochar-amended basins
(TRL 7)

أنظمة الري الدقيقة المصغرة
Precision Micro-Irrigation Systems

أنظمة الري (بالتنقيط السطحي أو تحت السطحي) المزودة بوحدات التنقيط القائمة على ضخ الهواء وتعويض الضغط

SSD / SDI with air-injection PC emitters
(TRL 9)

وحدات التنقيط الدقيقة ذات الضغط المنخفض

Ultra-low-pressure precision micro-emitters
(TRL 8)

أنظمة حصاد المياه في الغلاف الجوي
Atmospheric Water Harvesting Systems

أنظمة الري الدقيقة من الرطوبة الجوية

AWG-fed micro-irrigation
(TRL 7)

شبكات تجميع مياه الضباب

Fog-harvesting mesh arrays
(TRL 7)

التحكم الآلي في الري الذكي
Smart Automated Irrigation Control

الطائرات المسيّرة المستقلة للري

Autonomous irrigation drones
(TRL 6)

منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

AI-driven smart-irrigation platforms
(TRL 8)

حاضنات الشتلات ذاتية الري بتقنية الشرنقة

Cocoon passive-irrigation planters
(TRL 8)

تقنية الري بالموزعات الطينية المسامية

Porous-clay diffuser irrigation
(TRL 8)

الري بمياه الندى والتكاثف عبر التبريد الإشعاعي

Radiative-cooling dew & condensate irrigation
(TRL 6)

مياه الري المحملة بفقاعات الأكسجين النانوية

Nanobubble-oxygenated irrigation water
(TRL 6)

أجهزة الري البطيء بالخاصية الشعرية

Capillary-wick slow-release devices
(TRL 8)

تحلية المياه بالطاقة الشمسية لأغراض التشجير

Solar-powered desalination for afforestation
(TRL 7)

التجفيف الجزئي لمنطقة الجذور

Partial Root-Zone Drying (PRD)
(TRL 7)

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:

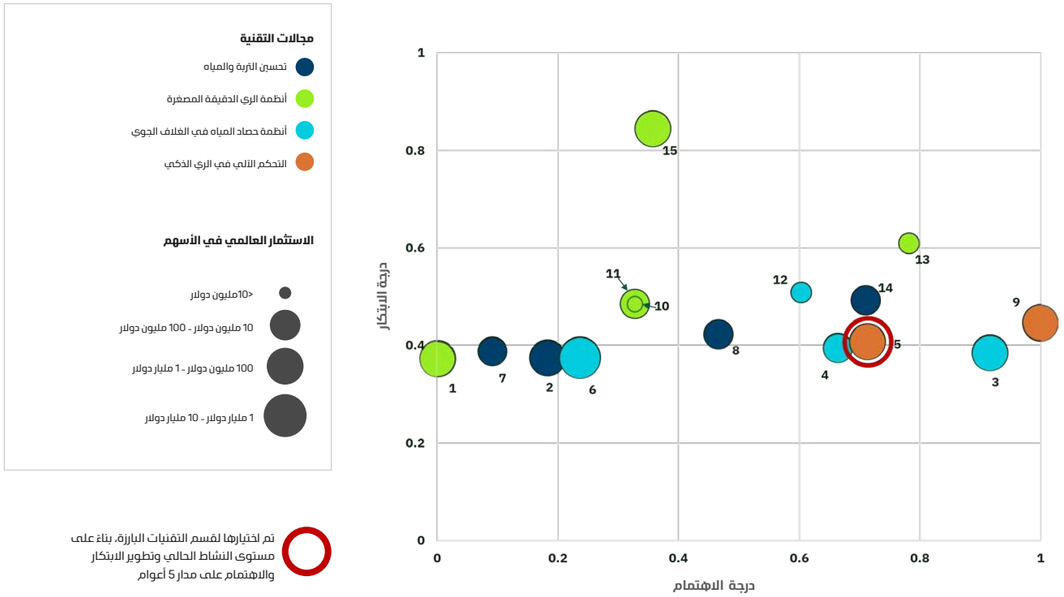
تجمع درجة الابتكار (Innovation Score) بين براءات الاختراع ودرجات الأبحاث. بينما تعتمد درجة براءات الاختراع على مقياس ملفات براءات الاختراع، وتعتمد درجة البحث على مقياس المنشورات البحثية.

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، كزيادة رأس المال في السوق الخاص والسوق العام (رأس المال الاستثماري وعمليات الاندماج والاستحواذ المؤسسية والاستراتيجية، بما في ذلك المشاريع المشتركة)، والأسهم الخاصة (كعمليات الاستحواذ والاستثمار الخاص في الأسهم العامة)، والاستثمارات العامة (كالاكتتاب 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 (19): يوضح المخطط البياني درجة الابتكار مقابل درجة الاهتمام على مستوى جميع التقنيات الـ 15



1. أنظمة الري (بالتنقيط السطحي أو تحت السطحي) المزودة بوحدات التنقيط القائمة على ضخ الهواء وتعويض الضغط
2. محسّنات تربة تعتمد على الهيدروجل فائق الامتصاص
3. أنظمة الري الدقيقة من الرطوبة الجوية
4. شبكات تجميع مياه الضباب
5. منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي
6. تحلية المياه بالطاقة الشمسية لأغراض التشجير
7. حاضنات الشتلات ذاتية الري بتقنية الشرنقة
8. الأحواض المحسّنة بالفحم الحيوي
9. الطائرات المسيّرة المستقلة للري
10. تقنية الري بالموزعات الطينية المسامية
11. التجفيف الجزئي لمنطقة الجذور
12. الري بمياه الندى والتكاثف عبر التبريد الإشعاعي
13. أجهزة الري البطيء بالخاصية الشعرية
14. مياه الري المحملة بفقاعات الأكسجين النانوية
15. وحدات التنقيط الدقيقة ذات الضغط المنخفض

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 التي شملتها الدراسة على مدار السنوات الخمس الماضية، يتجلى بوضوح الزخم المتسارع خصوصًا في مجال التقنية " التحكم الآلي في الري الذكي "، حيث تظهر التقنيات التالية معدلات نمو مرتفعة عبر جميع المقاييس قيد الدراسة:

مياه الري المحملة بفقاعات الأكسجين النانوية

وهي ضخ فقاعات أكسجين متناهية الصغر داخل أنظمة الري لتعزيز صحة جذور النباتات ورفع كفاءة امتصاص العناصر الغذائية.

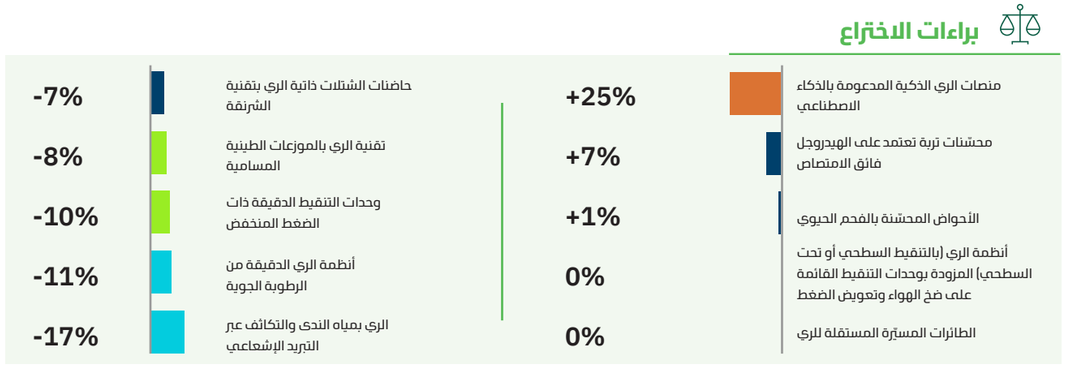
تحلية المياه بالطاقة الشمسية لأغراض التشجير

وهي معالجة مياه البحر باستخدام مصادر الطاقة المتجددة لإنتاج مياه عذبة مخصصة لمشاريع التشجير.

منصّات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

وهي أنظمة زراعية متقدمة توظّف الذكاء الاصطناعي وأجهزة الاستشعار القائمة على إنترنت الأشياء والبيانات المناخية لتعزيز كفاءة استخدام المياه.

الشكل (20): معدل النمو السنوي المستمر لبراءات الاختراع والمنشورات والأخبار (2019–2024) – إذ يوضح أعلى خمس تقنيات وأدنى خمس تقنيات



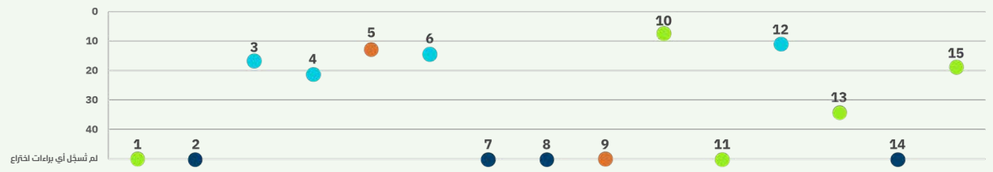
نبذة عن مجال البحث والتطوير والابتكار على المستوى الوطني

تتمتع المملكة العربية السعودية بمكانة تنافسية جيدة في التقنيات التي شملها التحقيق. وفيما يتعلق **ببراءات الاختراع** - **ومقارنة بالمرتبة العالمية الإجمالية للمملكة**- فإن المملكة تُصنّف ضمن أفضل 20 دولة عالميًا في خمسة من التقنيات التي شملها المسح، وضمن قائمة أفضل 10 دول في حوالي 35% من التقنيات الناشئة الرئيسة في المجال. ومن الجدير بالذكر أن المملكة تحتل المرتبة الثامنة عالميًا في تقنية **الري بالموزعات الطينية المسامية** من حيث براءات الاختراع المسجلة خلال الفترة (2019 و2024).

أما فيما يتعلق **بالمنشورات** فإن الوضع واعد بشكل أكبر، حيث دخلت المملكة قائمة أفضل 10 دول في 20% من التقنيات المحددة، وقائمة أفضل 20 دولة في أكثر من نصف التقنيات المرصودة. وتتبين المكانة بشكل أكبر خاصة في مجال **أنظمة حصاد المياه في الغلاف الجوي**. وبالإضافة إلى ذلك تحتل المملكة ترتيبًا ضمن أفضل عشرين دولة عالميًا لجميع التقنيات في مجال أنظمة **الري الدقيقة المصغرة**، مما يشير إلى التطور الملحوظ في تقنيات المياه المبتكرة.

الشكل (21): ترتيب المملكة العربية السعودية فيما يخص التقنيات الناشئة، الترتيب العالمي في عدد براءات الاختراع والمنشورات (2019-2024)

براءات الاختراع



المنشورات

1. أنظمة الري (بالتنقيط السطحي أو تحت السطحي) المزودة بوحدات التنقيط القائمة على ضخ الهواء وتعويض الضغط
2. محسّنات تربة تعتمد على الهيدروجل فائق الامتصاص
3. أنظمة الري الدقيقة من الرطوبة الجوية
4. شبكات تجميع مياه الضباب
5. منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي
6. تحلية المياه بالطاقة الشمسية لأغراض التشجير
7. حاضنات الشتلات ذاتية الري بتقنية الشرنقة
8. الأحواض المحسّنة بالفحم الحيوي
9. الطائرات المسيّرة المستقلة للري
10. تقنية الري بالموزعات الطينية المسامية
11. التجفيف الجزئي لمنطقة الجذور
12. الري بمياه الندى والتكاثف عبر التبريد الإشعاعي
13. أجهزة الري البطيء بالخاصية الشعرية
14. مياه الري المحملة بفقاعات الأكسجين النانوية
15. وحدات التنقيط الدقيقة ذات الضغط المنخفض

مجالات التقنية

تحسين التربة والمياه · أنظمة الري الدقيقة المصغرة · أنظمة حصاد المياه في الغلاف الجوي · التحكم الآلي في الري الذكي

3.2.1 منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

تعتبر منصّات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي أنظمة زراعية متقدمة توظّف الذكاء الاصطناعي وأجهزة الاستشعار القائمة على إنترنت الأشياء والبيانات المناخية لتعزيز كفاءة استخدام المياه في الزراعة. وتعمل هذه المنصات على تحليل مستويات الرطوبة في التربة والاحتياجات المائية للمحاصيل والتنبؤات الجوية والبيانات السابقة، وذلك لضبط مواعيد الري وتوزيع المياه تلقائيًا، مما يسهم في تقليل الفاقد من المياه ورفع إنتاجية المحاصيل وتحسين كفاءة استغلال الموارد.

منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

تمثل منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي نهجًا تحوليًا في إدارة المياه الزراعية، حيث تجمع بين تقنيات الذكاء الاصطناعي، وأجهزة الاستشعار القائمة على إنترنت الأشياء، والتحليلات التنبؤية بهدف تعزيز كفاءة استخدام المياه بدقة غير مسبوقة، وتعمل هذه الأنظمة على مراقبة الظروف البيئية بشكل مستمر، كمستوى رطوبة التربة ودرجة الحرارة والرطوبة الجوية وبيانات الطقس، وذلك من خلال الشبكات المترابطة من أجهزة الاستشعار والتي تنقل البيانات الآنية إلى خوارزميات التعلم الآلي التي تقوم بدورها باختيار مواعيد الري الأنسب لأنواع المحاصيل وطبيعة التربة المختلفة (goldncloud-publication، Zenodo).

وتكمن أهمية هذه التقنية في قدرتها على معالجة التحديات الحرجة المرتبطة بندرة المياه، مع الحفاظ في الوقت نفسه على صحة النباتات واستدامة النظم البيئية. وتُظهر الأبحاث أن هذه الأنظمة الذكية قادرة على تحقيق وفورات مائية تتراوح ما بين 35% و 45% مقارنةً بأساليب الري التقليدية، مع الحفاظ على معدلات نمو النباتات أو تحسينها، وهذا ما يجعلها تقنيات أساسية لتحقيق الاستدامة في مجالات التشجير واستعادة النظم البيئية في المناطق التي تعاني من ندرة المياه، كما تسهم في دعم الحفاظ على التنوع الحيوي وتعزيز القدرة على التكيف مع التغير المناخي (Zenodo) تُظهر التطبيقات الميدانية عادةً تحقيق وفورات في استهلاك المياه تتراوح بين 20% و50%، وذلك حسب طريقة الري الأساسية، ونوع الغطاء النباتي، وتصميم أجهزة الاستشعار والتحكم، وممارسات التشغيل، وهذا ما يجعلها تقنيات أساسية لتحقيق الاستدامة في مجالات التشجير واستعادة النظم البيئية في المناطق التي تعاني من ندرة المياه، كما تسهم في دعم الحفاظ على التنوع الحيوي وتعزيز القدرة على التكيف مع التغير المناخي (Zenodo)

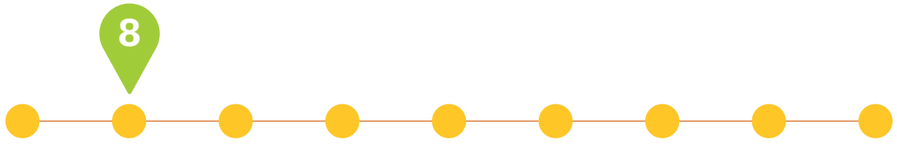
التقنية ونضج القدرات الوطنية

تتمتع منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي بجاهزية تقنية من المستوى الثامن (TRL 8)، إذ أثبتت النماذج الأولية للنظام نجاحها في البيئات التشغيلية الحقيقية للزراعة، وتشير نتائج الفحوصات المخبرية والمرحلة التجريبية إلى تحقيق تخفيضات ملموسة في استهلاك المياه، إلى جانب النجاح في دمج أجهزة الاستشعار القائمة على إنترنت الأشياء، وخوارزميات التعلم الآلي، وأنظمة التحكم الآلي. وعلى الرغم من كفاءة أداء هذه التقنية تحت الظروف الزراعية الفعلية، إلا أن ثمة حاجة إلى إجراء المزيد من التوسع في التطبيق، وتوحيد المعايير، وتحسين التكاليف، بما يتيح الانتقال إلى مرحلة النشر التجاري واسع النطاق (goldncloudpublication، Zenodo).

صُنّفت تقنية منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي داخل المملكة في المستوى الرابع من حيث مستوى جاهزية القدرات (CRL 5)، وذلك عن طريق مبادرات رؤية السعودية 2030 التي تدمج ابتكارات الذكاء الاصطناعي لإدارة المياه المستدامة والأنظمة الزراعية الدقيقة. إلّا أن المملكة تواصل تعزيز قدراتها التقنية، وتطوير ممارسات ضمان جودة البيانات، وبناء أطر الحوكمة الشاملة، والتي تُعد جميعها ممكنات أساسية لتنفيذ هذه التقنيات على نطاق وطني واسع. (International Journal of Science and Research Archive، Sustainable Futures).

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 Netafim

02 Lindsay Corporation

03 CropX

04 Rachio

05 Arable

06 Fasal

07 Jain Irrigation Systems

08 Rain Bird

09 Manna Irrigation

إمكانيات التقنية

تمثل منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي نهجًا تحوليًا في الزراعة الدقيقة، حيث تسهم في خفض استهلاك المياه وزيادة إنتاجية المحاصيل من خلال المراقبة الآنية للظروف البيئية وتطبيق التحليلات التنبؤية.

المزايا

- **كفاءة عالية في استهلاك المياه:** تؤدي أجهزة الاستشعار القائمة على إنترنت الأشياء وخوارزميات التعلم الآلي المتقدمة دورًا محوريًا في تطبيق تقنيات الري الدقيقة بالاستناد إلى البيانات الآنية حول مستوى رطوبة التربة والتنبؤات الجوية واحتياجات المحاصيل، وهذا يسهم في ترشيد الاستهلاك في المناطق التي تعاني من شح المياه. Smart agriculture
- **العمليات الآلية لاتخاذ القرارات:** تقوم نماذج التعلم الآلي بتحليل المعايير البيئية والبيانات السابقة بشكل مستمر لتحسين مواعيد الري بأقل تدخل بشري، مما يتيح التكيف مع الأنماط المناخية المتغيرة وظروف التربة لتعزيز الموثوقية. goldncloudpublication
- **تعزيز إنتاجية المحاصيل:** يتيح تكامل واجهات التنبؤات الجوية مع أنظمة المراقبة القائمة على إنترنت الأشياء اتخاذ القرارات المستنيرة فيما يتعلق بالري، مما يسهم في تعزيز إنتاجية المحاصيل، وخفض التكاليف التشغيلية، ودعم ممارسات الزراعة المستدامة. SpringerNature

العيوب

- **ارتفاع تكاليف التنفيذ:** تتطلب أنظمة الري الذكية استثمارات أولية كبيرة لأجهزة الاستشعار ومعدات الأتمتة والبنية التحتية المتخصصة، مما يخلق حواجز كبيرة أمام أصحاب المزارع الصغيرة ويحد من قابلية تبني هذه التقنية في المناطق الزراعية النامية. Contribuciones a las Ciencias Sociales
- **الثغرات الأمنية السيبرانية:** تواجه منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي مخاطر أمنية مستمرة، ومخاوف تتعلق بخصوصية البيانات، حيث يعتمد المزارعون غالبًا على أنظمة مغلقة لا يدركون آليات عملها بشكل كامل، مما يثير المشكلات التي تتعلق بالمساءلة عند حدوث أعطال في النظام وفقًا للخبراء في القطاع البيئي فإن الهجمات السيبرانية على أنظمة الري الذكية تمثل تهديداً وجودياً للأمن الغذائي، مما يستدعي تطبيق معايير أمن سيبراني صارمة مثل (ISO/IEC 27001) Analecta Technica Szegedinensia
- **درجة تعقيد إدارة البيانات:** تُعد إدارة البيانات الضخمة الواردة من أجهزة الاستشعار -إلى جانب ضمان جودة البيانات وحل المشكلات المتعلقة بالربط والحفاظ على موثوقية النظام- من التحديات التقنية المستمرة التي قد تحد من فاعلية هذه التقنية وصحة عمليات اتخاذ القرارات. CRC Press eBooks

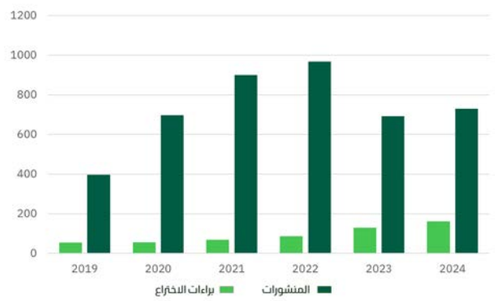
آخر التطورات

ركّزت أحدث التطورات خلال العام 2025 في منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي على إحداث التكامل بين النماذج المدمجة للتعلم الآلي وسلسلة الكتل والأنظمة متعددة الحساسات، لخلق حلول أكثر استقلالية واستدامة لإدارة الموارد المائية.

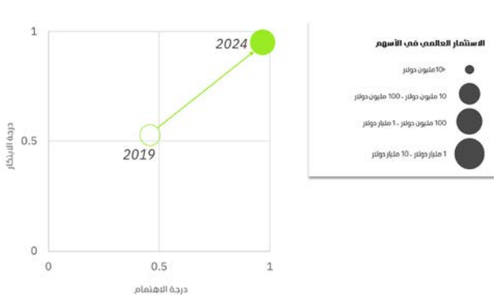
مؤشرات الابتكار الرئيسة

- **تكامل الحلول المدمجة للتعلم الآلي:** تجمع الأنظمة المتقدمة بين عدة خوارزميات للذكاء الاصطناعي، كتقنيات التعلم المتعمق، وأجهزة الاستشعار القائمة على إنترنت الأشياء، لدعم أساليب الزراعة الدقيقة المتقدمة، مما يتيح تحسين القدرات المرتبطة بترشيد المياه ومراقبة المحاصيل. Springernature
- **المعالجة الفورية للحوسبة الطرفية:** تعمل أنظمة الحوسبة الطرفية المدعومة بإنترنت الأشياء على إحداث ثورة في الزراعة الآنية من خلال معالجة بيانات الري محليًا، مما يقلل من زمن الاستجابة، ويعزز الاستجابات الآلية الفورية للظروف البيئية المتغيرة دون الاعتماد على السحابة. IEEE Xplore
- **إدارة الموارد المائية باستخدام الطائرات المسيرة:** تجمع أحدث التطورات بين الروبوتات والطائرات المسيرة والاستشعار عن بعد وأنظمة الري المدعومة بالذكاء الاصطناعي، مما يتيح المراقبة الميدانية الشاملة وتوزيع المياه آليًا للمناطق الزراعية الكبيرة. Smart agriculture
- **تعزيز تحليلات البيانات الضخمة:** تعتمد منصات الري الذكية الحديثة على التقنيات المتقدمة في تحليل البيانات الضخمة وخوارزميات التعلم الآلي لمعالجة الكميات الضخمة من البيانات الزراعية، مما يسهم في تحسين دقة اتخاذ القرار وتعزيز كفاءة ترشيد استهلاك المياه. Sustainable development goals series
- **أنظمة الري الذاتية المدعومة بالذكاء الاصطناعي:** تركز الابتكارات الحديثة على أنظمة الري المستقلة بالكامل والتي تجمع ما بين الذكاء الاصطناعي وشبكات إنترنت الأشياء، وتُحدث نقلةً نوعيةً في الكفاءة الزراعية من خلال إدارة المياه بنهج تكيفي فوري دون الحاجة للتدخل البشري. IEEE Xplore
- **دمج تقنيات الزراعة النانوية:** أدت التطورات المتقدمة إلى دمج تقنيات الزراعة النانوية مع أنظمة الزراعة الذكية، وهو الأمر الذي ساهم في إنشاء منصات الري المتطورة والتي توظف تقنيات النانو لتعزيز كفاءة إيصال المغذيات وتحقيق المستويات العالية من الدقة في إدارة المياه. Journal of Biosystems Engineering

الشكل (22): عدد براءات الاختراع والمنشورات (2019-2024) لمنصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي



الشكل (23): تطور حجم استثمارات التقنية بناء على درجة الابتكار ودرجة الاهتمام



الرؤى والإحصائيات

أشارت تحليلات السوق مؤخرًا إلى أن منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي تشهد نموًا سريعًا، إذ حققت إنجازات كبيرة في الحفاظ على المياه، وكان لها تأثير اقتصادي كبير في الأسواق الزراعية العالمية.

الإحصائيات والحقائق الرئيسة

- **أثر ترشيد استهلاك المياه:** تُسهم تقنيات الري الذكي في خفض استهلاك المياه بنسبة تصل إلى 30%، إلى جانب رفع الإنتاجية الزراعية بما يصل إلى 125%، مع تحقيق وفورات مائية تبلغ حوالي 78% في المناطق شبه القاحلة. Contribuciones a las Ciencias Sociales
- **الإطار الأمني لتقنية سلسلة الكتل الخفيفة:** يعد "**LightAgro**" نموذجًا متقدمًا للمصادقة القائمة على تقنيات البلوك تشين باستخدام منحنيات "secp256k1"، وذلك لحماية بيانات الري المعتمدة على إنترنت الأشياء، إذ تصل دقته إلى 85.26% في تطبيقات التعلم الآلي باستخدام خوارزمية التعزيز التدرجي، مع تعزيز الاستجابة للمخاطر السيبرانية في أنظمة الزراعة الذكية. Journal of Mobile Multimedia
- **تنامي القيمة السوقية:** قُدرت القيمة السوقية لأنظمة الري الدقيقة - والمرتبطة ارتباطًا وثيقًا بتقنيات الري الذكية - بنحو 9.9 مليارات دولار أمريكي في عام 2024، ومن المتوقع أن ترتفع إلى ما يقارب 25.1 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2034. AgriTechTomorrow.com
- **دمج خوارزميات التعلم الآلي المتقدمة:** تُحقق خوارزمية (**ISOA ASVM**) نسبة دقة تبلغ 99.3% في تطبيقات الري الدقيق، وذلك من خلال توظيف نماذج الحوسبة المتوازية ودمجها مع المعالجة الفورية للبيانات الواردة من أجهزة الاستشعار، مما يمكّن الكشف الآلي عن الآفات، ويعزز القدرة على التكيف مع التغيرات المناخية لتحسين إدارة الموارد المائية. Research Square
- **تحسين إنتاجية المحاصيل:** أثبتت النماذج التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي كفاءتها في تحسين إنتاجية المحاصيل بنسبة 26%، وترشيد استهلاك المياه بنسبة 41%، وتقليل استخدام المواد الكيميائية بنسبة 33% من خلال تحسين الممارسات الزراعية وإدارة الموارد. Journal of Asian Development Studies
- **مسار نمو السوق:** من المتوقع أن يشهد السوق العالمي للري الذكي نموًا متسارعًا، بمعدل نمو سنوي مركب يُقدَّر بنحو 12% حتى عام 2031، مدفوعًا بالتوسع في تبني التقنيات القائمة على إنترنت الأشياء، إلى جانب المبادرات الهادفة إلى تعزيز المرونة المناخية. natlawreview.com

تبني التقنيات

على الرغم من التسارع العالمي في تبني تقنيات الري الذكي نتيجة دمج تقنيات إنترنت الأشياء وتزايد التحديات المناخية، فإن فاعلية تطبيق هذه الحلول في المملكة ترتبط بالقدرة على معالجة الفجوات الفنية والبنية التحتية الأمنية ومواءمة السياسات مع مستهدفات ترشيد استهلاك المياه ضمن رؤية السعودية 2030.

الوضع الراهن

- **تكامل التقنيات المتعددة:** تعتمد الممارسات الزراعية الذكية في الوقت الراهن على حزم التقنية المتكاملة والتي تجمع بين الروبوتات، والطائرات المسيرة، وتقنيات الاستشعار عن بُعد، ونظم المعلومات الجغرافية، والذكاء الاصطناعي، وأدوات إنترنت الأشياء، وذلك لدعم تكامل العمليات الزراعية وتطوير الأنظمة المتقدمة لإدارة الموارد المائية. Smart agriculture
- **الاعتماد على البنية التحتية الرقمية:** تتطلب أنظمة الري الذكية توافر بنية تحتية رقمية متكاملة تشمل أجهزة إنترنت الأشياء، وأدوات الاستشعار الذكية، ومنصات التحليل المعتمدة على الذكاء الاصطناعي، وممارسات الأتمتة، ويعتمد نجاح تبني هذه الأنظمة على توفر خدمات الاتصال عريض النطاق، إضافةً إلى وجود الأطر المؤسسية الداعمة. Zenod
- **التفاوت الإقليمي في مستويات التبني:** يُظهر تبنّي تقنيات الزراعة الذكية تفاوتًا ملحوظًا بين المناطق الجغرافية، حيث تحقق الدول ذات الدخل المرتفع تقدمًا كبيرًا في تطبيق هذه الحلول، في حين تواجه المناطق الأقل نموًا تحديات في ضعف الثقافة الرقمية، وقصور البنية التحتية، ومحدودية الميزانيات. Plant Science Today

متطلبات التوطين

- **مواءمة السياسات مع رؤية السعودية 2030:** يجب أن تتماشى منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي مع إطار رؤية السعودية 2030، وهو الأمر الذي يستلزم إعداد هياكل الحوكمة التشاركية وتعزيز نماذج الشراكة بين القطاعين العام والخاص، بما يضمن أن تسهم الحلول التقنية المقدمة في حماية البيئة، وتعزيز المرونة الاقتصادية، ودعم التزامات المملكة الدولية في مجال الاستدامة. IJSRA
- **العوائق المالية والتعليمية:** على الرغم من أن نحو 60% من المزارعين في السعودية يستخدمون تقنيات إنترنت الأشياء، إلا أن التوسع في تطبيق هذه التقنيات لا يزال محدودًا بسبب ارتفاع التكاليف والتحديات التعليمية، وهو الأمر الذي يستدعي تنفيذ البرامج الموجهة لبناء القدرات، إلى جانب توفير آليات الدعم المالي لتمكين النشر واسع النطاق. arXiv Cornell University
- **التكيّف مع المناخ الجاف:** يتطلب تطبيق أنظمة الري الذكية في المملكة العربية السعودية مواءمةً خاصة مع الظروف المناخية شديدة الجفاف، وذلك من خلال توظيف تقنيات الري الدقيق، إلى جانب الأنظمة الزراعية في البيئات المراقبة، مما يسهم في تعزيز الأمن الغذائي مع الإدارة الفاعلة لتحديات شح المياه. Sustainable Futures
- **الشروط المُمكّنة**: تشمل أنظمة القياس والمحاسبة المائية، وإجراءات إدارة الملوحة، والتصميم المقاوم للغبار والحرارة، وفرص التكامل مع إعادة استخدام مياه الصرف المعالجة عند الحاجة*.

*رؤى أخذ بها من الخبراء في قطاع البيئة

آفاق التقنية

تتجه منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي نحو أنظمة ذاتية التشغيل تعتمد على دمج التحليلات التنبؤية والحوسبة الطرفية والتحكم التكيفي الفوري، إلّا أن تحديات التوسع وتوحيد المعايير لا تزال قائمة.

التوجه المستقبلي

- **دمج التقنيات الزراعية النانوية:** تتجه التقنيات الزراعية الحديثة نحو تطبيقات الزراعة النانوية المدمجة مع حلول الذكاء الاصطناعي وتحليلات البيانات الضخمة، مما يعزز درجة الدقة في نقل المغذيات على مستوى الجزيئات، ويتيح متابعة صحة النباتات، وبالتالي يسهم بتعزيز الكفاءة الزراعية بصورة غير مسبوقة. Journal of Biosystems Engineering

- **المواءمة بين التقنيات المتعددة:** ستعتمد أنظمة الري الذكية المستقبلية على المنصات المتكاملة والتي تجمع بين خوارزميات التعلم الآلي وبيانات الاستشعار والتحليلات التنبؤية، لبناء أطر توفر المياه وتستجيب بشكل عملي لاحتياجات المحاصيل والظروف البيئية. SHS Web of Conferences .

- **الحلول القابلة للتوسع وغير المرتبطة بمجالات محددة:** تركّز التوجهات البحثية على تطوير الحلول القابلة للتوسع وغير المرتبطة بمجال محدد، بهدف تمكين معالجة البيانات طويلة الأجل، وسد الفجوات المرتبطة بتوحيد المعايير، وبالتالي زيادة نسبة تبني التقنيات في مختلف المجالات الزراعية. MDPI

أوجه عدم اليقين الرئيسة

- **تحديات تكامل البيانات:** لا تزال هناك بعض التحديات المرتبطة بتكامل البيانات وموثوقية الشبكات وقابلية التوسع في الأنظمة المعتمدة على إنترنت الأشياء، وهو الأمر الذي يشكل عوائق رئيسة أمام التوسع في تطبيق هذه الحلول، ويؤثر على كفاءتها في البيئات الزراعية والتشغيلية المتنوعة. International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering

- **متطلبات الاستثمار في البنية التحتية:** يمثل دمج أنظمة الذكاء الاصطناعي مع البنية التحتية القائمة للري والممارسات الزراعية الحالية مشاكل صعبة، وهو الأمر الذي يستلزم استثمارات كبيرة في الأجهزة والمعدات والبرمجيات، في ظل عدم وضوح الأطر الزمنية لتحقيق العائد على الاستثمار لصالح جهات التشغيل الزراعية. Journal of Environmental & Earth Sciences

- **صعوبات معالجة البيانات طويلة الأجل:** تواجه عمليات معالجة البيانات الزراعية طويلة الأجل تحديات مرتبطة بعدم الوضوح؛ نتيجة غياب مجموعات البيانات المعنونة ذات الصلة، وعدم توافر بروتوكولات توحيد المعايير، وهو الأمر الذي يحول دون بناء النماذج التنبؤية المتكاملة لمختلف الظروف البيئية. MDPI

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

دراسة الحالة المحلية

مبادرة المؤسسة العامة للري في تعزيز القدرات في مجال الري الذكي

يمثل شح المياه وكفاءة الري تحديات مستمرة للقطاع الزراعي في المملكة العربية السعودية، ولا سيما في المناطق التي تعتمد على المياه الجوفية وهطول الأمطار الموسمية. واستجابةً لهذه التحديات نفذت المؤسسة العامة للري بالتعاون مع منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (FAO) برنامجًا تدريبيًا في بلجرشي لتعزيز القدرات التطبيقية في مجال الري الذكي. وتناولت هذه المبادرة مسألة الحاجة للانتقال من ممارسات الري التقليدية إلى المنهجيات المعتمدة على البيانات، وذلك بتعريف المزارعين وموظفي الإرشاد بمفاهيم الري الذكي الحديثة، كأنظمة المراقبة المعتمدة على أجهزة الاستشعار وأنظمة دعم اتخاذ القرار الملائمة للبيئات القاحلة وشبه القاحلة (Fao ،MDPI).

وركز الحل المطروح ضمن المبادرة على إبراز القيمة العملية لمنصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي وانترنت الأشياء -كما ورد في أحدث المنشورات العلمية- حيث تجمع هذه المنصات بين أجهزة استشعار رطوبة التربة، والبيانات المناخية، والنماذج التحليلية لتحسين مواعيد الري وتقليل الفاقد المائي. وتشير الدراسات إلى أن هذه الأنظمة تسهم في تحسين كفاءة استهلاك المياه، ودعم تقدير الاحتياجات المائية للمحاصيل، وتعزيز جودة اتخاذ القرارات في ظل ظروف ندرة المياه المشابهة لتلك السائدة في المملكة. وقد جسدت مبادرة بلجرشي الفوائد في سياق محلي، من خلال توضيح كيفية توظيف تحليلات الري المتقدمة لدعم الأهداف الوطنية للحفاظ على الموارد المائية وتعزيز الاستدامة الزراعية (ScienceDirect، Results in Engineering).

ومن الناحية التشغيلية ركزت المبادرة على تجهيز المزارع للتطبيق العملي الواقعي بدلًا من الإطلاق الفوري على نطاق واسع، وقد سلطت الدورات التدريبية والعروض التوضيحية الضوء على كيفية عمل أنظمة الري الذكية، بما في ذلك جمع البيانات بشكل مستمر من أجهزة الاستشعار الميدانية، وتحليل التربة والظروف المناخية، وتحويل نتائج التحليلات إلى قرارات متعلقة بإجراءات الري. وتنطبق هذه المبادئ التشغيلية بشكل مباشر على المحاصيل المعمرة مثل مزارع نخيل العزيزيّة في منطقة حائل، حيث تُعد دقة الري أمرًا بالغ الأهمية نظرًا لارتفاع الطلب على المياه وطول دورة حياة المحصول. ومن خلال بناء الفهم التقني وتعزيز الجاهزية التشغيلية، أرست المؤسسة العامة للري أساسًا عمليًا لتبني منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي في كل من المزارع التجارية والمزارع الصغيرة. (Smart Agricultur-al Technology، MDPI).

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 وندرة 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 ضُمّمت 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 (2)				
01	الأطواق الذكية بنظام تحديد المواقع العالمي والسياج الافتراضي	أنظمة المراقبة الرقمية للثروة الحيوانية	9	39
02	عمليات المراقبة والإبلاغ والتحقق من الكربون في التربة عبر الأقمار الصناعية	التحليلات والمعلومات الاستخباراتية عن المراعي	7	55
03	التقنيات القابلة للارتداء للحد من انبعاثات غاز الميثان	أنظمة المراقبة الرقمية للثروة الحيوانية	6	31
04	تحليلات الكتلة الحيوية للمراعي	التحليلات والمعلومات الاستخباراتية عن المراعي	8	39
05	محسنات معدل التخزين	التحليلات والمعلومات الاستخباراتية عن المراعي	8	30
06	كبسولات المعدة وأجهزة الاستشعار الصحية القائمة على الذكاء الاصطناعي الطرفي	أنظمة المراقبة الرقمية للثروة الحيوانية	7	33
07	أتمتة المضخات المعتمدة على إنترنت الأشياء عبر الأقمار الصناعية	إنتاج العلف والأعلاف المستدامة	8	9
08	أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي	إنتاج العلف والأعلاف المستدامة	8	75
09	آلات التغذية والمراعي المستقلة	التحليلات والمعلومات الاستخباراتية عن المراعي	7	33
10	وحدات الأعلاف المائية المعبأة في حاويات	إنتاج العلف والأعلاف المستدامة	9	33
11	تتبّع الثروة الحيوانية باستخدام تقنية سلسلة الكتل	أنظمة المراقبة الرقمية للثروة الحيوانية	7	36
12	إنتاج البروتين أحادي الخلية	إنتاج العلف والأعلاف المستدامة	7	52
13	الأعلاف الرعوية المتحملة للجفاف والملوحة والمعدّلة بتقنية كريسبر	التحسين الوراثي والحيوي	6	30
14	ملقحات المنشّطات الحيوية الميكروبيومية للبيئات القاحلة	التحسين الوراثي والحيوي	8	28
15	زراعة الحشرات من أجل الإنتاج المستدام للماشية	إنتاج العلف والأعلاف المستدامة	8	58

	التقنية	مجال التقنية	مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)	درجة تسليط الضوء
مجموعة التقنية ذات الأولوية (4)				
16	أنظمة الري (بالتنقيط السطحي أو تحت السطحي) المزودة بوحدات التنقيط القائمة على ضخ الهواء وتعويض الضغط	أنظمة الري الدقيقة المصغرة	9	32
17	محسّنات التربة المعتمدة على الهيدروجل فائق الامتصاص	تحسين التربة والمياه	7	35
18	أنظمة الري الدقيقة من الرطوبة الجوية	أنظمة حصاد المياه في الغلاف الجوي	7	14
19	شبكات تجميع مياه الضباب	أنظمة حصاد المياه في الغلاف الجوي	7	19
20	منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي	التحكم الآلي بالري الذكي	8	89
21	تحلية المياه بالطاقة الشمسية لأغراض التشجير	أنظمة حصاد المياه في الغلاف الجوي	7	22
22	حاضنات الشتلات ذاتية الري بتقنية الشرنقة	تحسين التربة والمياه	8	13
23	الأحواض المحسّنة بالفحم الحيوي	تحسين التربة والمياه	7	28
24	الطائرات المسيّرة المستقلة للري	التحكم الآلي بالري الذكي	6	25
25	تقنية الري بالموزعات الطينية المسامية	أنظمة الري الدقيقة المصغرة	8	21
26	التجفيف الجزئي لمنطقة الجذور	أنظمة الري الدقيقة المصغرة	7	24
27	الري بمياه الندى والتكاثف عبر التبريد الإشعاعي	أنظمة حصاد المياه في الغلاف الجوي	6	0
28	أجهزة الري البطيء بالخاصية الشعرية	أنظمة الري الدقيقة المصغرة	8	49
29	مياه الري المحملة بفقاعات الأكسجين النانوية	تحسين التربة والمياه	6	19
30	الرشاشات الدقيقة ذات الضغط المنخفض	أنظمة الري الدقيقة المصغرة	8	59

قاموس المصطلحات

مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)

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

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

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

مستوى جاهزية القدرات (CRL)

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

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

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

المصادر:

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

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

قاموس المصطلحات

3.2 إدارة أراضي الرعي

	المصطلح	الوصف
1	الأطواق الذكية بنظام تحديد المواقع العالمي والسياج الافتراضي	تُستخدم الأطواق المزوّدة بأنظمة تحديد المواقع (GPS)، ومقاييس التسارع، والإشارات الصوتية والملموسة، إلى جانب البرمجيات السحابية لإنشاء حدود افتراضية وقابلة للبرمجة. ويُمكّن ذلك المعنيين من إدارة المراعي عن بُعد عبر الهواتف الذكية، وأتمتة أنماط الرعي التكيفي، وحماية المناطق الحساسة بيئيًا مثل الضفاف أو مناطق التشجير، دون الحاجة إلى إنشاء أسوار تقليدية مرتفعة التكلفة. وتسهم البيانات في تحسين كفاءة الرعي، ورفع إنتاجية العمالة، وتعزيز صحة المراعي في مناطق الرعي الصحراوية في المملكة العربية السعودية.
2	عمليات المراقبة والإبلاغ والتحقق من الكربون في التربة عبر الأقمار الصناعية	تتكامل مجموعات الأقمار الصناعية متعددة الأطياف والرادارية مع نماذج التعلّم الآلي وعدد محدود من العينات الحقلية المرجعية لتقدير مخزون الكربون العضوي في التربة على مستوى الهكتارات. وتوفّر هذه الخدمة أنظمة للقياس والإبلاغ والتحقق جاهزة للتدقيق لأسواق الكربون خلال أيام، بدلًا من الأشهر المستغرقة في عمليات أخذ العينات. كما تُسهم المؤشرات الدقيقة والقابلة للتكرار في تفعيل حوافز الرعي التجديدي ودعم إعداد تقارير رأس المال الطبيعي.
3	التقنيات القابلة للارتداء للحد من انبعاثات غاز الميثان	أجهزة تُثبت على الأنف أو تُدمج ضمن أطواق الحيوانات وتستخدم لأكسدة غاز الميثان المنبعث مع الزفير باستخدام المرشحات التحفيزية والتي تعمل على جمع بيانات انبعاثات كل حيوان وتسجيلها بشكل فردي. وقد أظهرت التجارب إمكانية خفض انبعاثات الميثان المعوي بنسبة تصل إلى 60% دون التأثير على الإنتاجية. وتوفّر أجهزة الاستشعار المتكاملة تحليلات دقيقة لصحة الحيوانات، وتُسهم في احتساب أرصدة الكربون، ما يتيح لمربي الماشية تحقيق العوائد المالية مع دعم الالتزامات الوطنية في مجال المناخ في الوقت ذاته.
4	تحليلات الكتلة الحيوية للمراعي	تدمج نماذج الذكاء الاصطناعي صور البعثة الفضائية "Sentinel 2"مع التصوير الجوي بالطائرات المسيّرة وأجهزة الاستشعار فوق الصوتية للتنبؤ بدقة عالية بارتفاع الغطاء الرعوي، والكتلة الحيوية، والقيمة الغذائية على نحو فوري تقريبًا. وتُظهر لوحات المعلومات أوجه القصور، وتوجّه توقيت دورات الرعي، وتقدّر ميزانيات الأعلاف، بما يتيح اتخاذ قرارات قائمة على البيانات بشأن المخزون، وذلك لتفادي الرعي الجائر والحد من مخاطر الجفاف وتحسين زيادة وزن المواشي.
5	محسنات معدل التخزين	تعمل المنصّات السحابية مثل "StockSmart" على دمج بيانات الكتلة الحيوية، وتوقّعات الطقس، والبيانات السابقة للمخزون، وخصائص التضاريس لمحاكاة عرض الأعلاف مقابل الطلب. وتقدّم الخوارزميات توصيات يومية بشأن تحريك القطعان وأعداد الحيوانات المناسبة، بما يتيح إعداد خطط رعي تكيفية تعزز الاستفادة من الموارد مع الحفاظ على الحدود البيئية. ويُمكّن ذلك مديري المراعي من إعداد الخرائط القابلة للتنفيذ، ما يقلّل الوقت اللازم للتخطيط، ويحدّ من تراكم الوقود النباتي المسبّب للحرائق.
6	كبسولات المعدة وأجهزة الاستشعار الصحية القائمة على الذكاء الاصطناعي الطرفي	أقراص سيراميكية داخلية طويلة الأمد تعمل بالتحريض وتستخدم لقياس درجة حرارة الكرش، ومستوى الحموضة، والنشاط، والتوصيلية الكهربائية بشكل مستمر. وتقوم أدوات التحكم الدقيقة المدمجة برصد حالات المرض قبل ظهور الأعراض السريرية. وتسهم عمليات التحميل عبر تقنية البلوتوث أو التردد بعيد المدى "LoRa" في تغذية لوحات المتابعة القائمة على الذكاء الاصطناعي والتي تتنبأ بالإجهاد الناتج عن الحرارة والحموضة والولادة، مما يقلل من الوفيات واستخدام المضادات الحيوية. ويضمن التصميم طويل الصلاحية تحقيق المكاسب والوفورات لسنوات طويلة قد تتجاوز العقد.
7	أتمتة المضخات المعتمدة على إنترنت الأشياء عبر الأقمار الصناعية	أجهزة استشعار فوق صوتية متصلة بالأقمار الصناعية لقياس مستويات المياه في الأحواض، وتُفعّل المضخّات الشمسية أو ترسل تنبيهات فورية عند انخفاضها عن الحدود المحددة. وتعتمد هذه الأنظمة على الوحدات المنخفضة الاستهلاك للطاقة والتي تستخدم الاتصال المباشر بالأقمار الصناعية، متجاوزةً ضعف أو انعدام تغطية شبكات الاتصالات الخلوية. وتسهم هذه الحلول في تقليل الرحلات الميدانية لمتابعة المياه، ومنع تعرض الحيوانات للجفاف، إضافةً إلى توليد البيانات التشغيلية التي تدعم التخطيط طويل الأمد للجفاف، واتخاذ القرارات بشأن تطوير البنية التحتية لمياه المراعي.
8	أنظمة الزراعة الشمسية المتكاملة مع الرعي	تدمج مزارع الطاقة الشمسية مزدوجة الاستخدام الرعي الدوراني للماشية تحت الألواح الكهروضوئية، إذ توفر هذه الألواح الظل ومصدّات الرياح، مما يحسن رطوبة المراعي بينما تحافظ الأغنام على الغطاء النباتي، وتقلل تكاليف جز الأعشاب. وتُظهر الدراسات ارتفاعًا في الكربون العضوي في التربة وتنويعًا في مصادر الدخل لمالكي الأراضي. كما تُسهم التصاميم المحسنة في إنشاء مناخات محلية دقيقة تعزّز إنتاجية الأعلاف في المناطق الجافة مثل مراعي المملكة العربية السعودية.
9	آلات التغذية والمراعي المستقلة	روبوتات ذاتية القيادة لجميع التضاريس تعمل على نقل الأعلاف وتوزيعها، وجمع صور المراعي بتقنيات الرؤية الحاسوبية وبيانات حركة القطيع خلال كل دورة تشغيل. وتعتمد على أدوات الذكاء الاصطناعي المركبة على منصّتها لتجنّب العوائق والتنقل عبر المسارات المحددة مسبقًا حسب الخرائط السحابية. وبالتالي، تسهم بالاستغناء عن التشغيل اليومي للجرارات، بالإضافة إلى توفير العمالة والوقود وتقليل انضغاط التربة، في حين تدعم أجهزة الاستشعار الرعي التكيفي والكشف المبكر عن الحيوانات المفترسة.
10	وحدات الأعلاف المائية المعبأة في حاويات	حاويات بطول أربعين قدمًا تقوم بتحويل الحبوب إلى أعلاف خضراء طازجة خلال سبعة أيام باستخدام الأرفف المتراكبة للزراعة المائية، وإضاءة (LED)، وأنظمة الرذاذ. وتتحكّم الأتمتة في الإضاءة ودرجة الحرارة ودورات المغذّيات، مما يوفّر ثمانية كيلوغرامات من العلف لكل كيلوغرام من البذور مع الاستهلاك المحدود للمياه. وتضمن الوحدات القابلة للنقل إنتاج الأعلاف على مدار العام بغضّ النظر عن تقلبات هطول الأمطار.

	المصطلح	الوصف
11	تتبّع الثروة الحيوانية باستخدام تقنية سلسلة الكتل	توثق السجلات الموزّعة بيانات هوية الحيوانات، والمعالجات الصحية، وتصاريح التنقّل، وبيانات الذبح مع الختم الزمني وبصورة غير قابلة للتلاعب. وترتبط رموز (QR) أو شرائح (RFID) الذبائح بمؤشرات الاستدامة، بما يلبي متطلبات التصدير، والذبح الحلال، والحد من التصحر. وتعمل العقود الذكية على أتمتة إعداد تقارير الامتثال وإصدار أرصدة الكربون، مما يعزّز ثقة المستهلك ويتيح الوصول إلى الأسواق العالمية.
12	إنتاج البروتين أحادي الخلية	تعمل تقنيات التخمر الغازي أو الكائنات الحية الدقيقة غير ذاتية التغذية على تحويل الميثان أو الميثانول أو الركائز القائمة على الكربون إلى كتلة حيوية ميكروبية عالية المحتوى البروتيني. وتتيح المفاعلات الحيوية العاملة على مدار العام، وباستخدام حدٍّ أدنى من الأراضي والمياه، توفير بروتين مستدام يُستخدم في أعلاف الاسترزاع السمكي وأغذية الحيوانات الأليفة، إضافة إلى تطبيقات ناشئة لتغذية المجترات في المناطق التي تعاني من شح الموارد المائية.
13	الأعلاف الرعوية المتحملة للجفاف والملوحة والمعدّلة بتقنية كريسبر	تُسهم تقنيات تحرير الجينوم في تعديل مسارات الاستجابة للإجهاد في محاصيل الأعلاف مثل البرسيم الحجازي، والراي غراس، والذرة الرفيعة، بما يعزز قدرتها على تحمّل نقص المياه والملوحة. وقد أظهرت السلالات المُحرَّرة تحسنًا في استقرار الكتلة الحيوية تحت ظروف الجفاف أو الملوحة في التجارب المُحكَمة والتجارب الحقلية المبكرة، مما يدعم إنتاج أعلاف أكثر مرونة وقدرة على التكيّف مع تغيّر المناخ.
14	ملقحات المنشّطات الحيوية الميكروبيومية للبيئات القاحلة	تُطبّق تجمعات ميكروبية متكيفة مع الجفاف على المراعي المتدهورة لتعزيز إتاحة المغذّيات، وتحسين تماسك بنية التربة، ودعم نمو الجذور. وتسهم هذه المنشّطات الحيوية في زيادة قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه ورفع إنتاجية المراعي، مع الحد من الاعتماد على الأسمدة الاصطناعية في النظم الجافة وشبه الجافة.
15	زراعة الحشرات من أجل الإنتاج المستدام للماشية	تُسهم النظم المعتمدة على الحشرات، ولا سيما يرقات ذبابة الجندي الأسود، في تحويل النفايات العضوية إلى دقيق بروتيني عالي القيمة ودهون تُستخدم في أعلاف الحيوانات. ويوفّر هذا النمط الإنتاجي كفاءة عالية في تدوير المغذّيات، وتقليلًا لاستخدام الأراضي، إلى جانب منتجات ثانوية مثل سماد الـ"فراس"، بما يدعم سلاسل إمداد الثروة الحيوانية ضمن إطار الاقتصاد الحيوي الدائري.

قاموس المصطلحات

3.4 تقنيات الري المبتكرة للأشجار والنباتات البرية

	المصطلح	الوصف
1	أنظمة الري (بالتنقيط السطحي أو تحت السطحي) المزودة بوحدات التنقيط القائمة على ضخ الهواء وتعويض الضغط	تعتمد خطوط الري بالتنقيط تحت السطحية والمزوّدة بنقاطات معادلة للضغط على حقن المياه الممزوجة بالفقاعات الدقيقة مباشرةً في مناطق الجذور، مما يقلل التبخر السطحي، ويعزز الأكسجين، ويخفض الطاقة المستهلكة بالضخ، ويوفر رطوبة موحدة في التربة الرملية. وتُظهر المشاريع التجريبية في المناطق الصحراوية تحقيق وفورات مائية بنسبة 40% وتسارعًا في تطور الكتلة الحيوية الجذرية مقارنةً بأنظمة الري بالتنقيط السطحي التقليدية.
2	محسّنات التربة المعتمدة على الهيدروجل فائق الامتصاص	تقوم الهيدروجيلات المصنوعة من بوليمرات متشابكة أو بوليمرات حيوية، والممزوجة بالتربة أو المستخدمة في تغليف البذور، بامتصاص كميات من الماء تصل إلى مئات أضعاف وزنها، ثم تطلق الرطوبة تدريجيًا عند جفاف التربة. وتُسهم التركيبات المعتمدة على النشا والغوار والسيليكا في تحسين بقاء الشتلات، وخفض وتيرة الري إلى النصف، وتقليل رشح الأسمدة، مما يؤدي إلى نجاح عمليات التشجير في البيئات الرملية الجافة.
3	أنظمة الري الدقيقة من الرطوبة الجوية	تقوم وحدات التجفيف أو التكثيف العاملة بالطاقة الشمسية بالتقاط الرطوبة الجوية، وتخزين المياه في خزانات تغذي أنظمة الري منخفضة التدفق بالتنقيط أو عبر شبكات التنقيط. وتعمل الأنظمة التي تنتج ما بين 500 و5000 لتر يوميًا دون الحاجة للكهرباء، مما يحدّ من الاعتماد على صهاريج نقل المياه، ويخفض انبعاثات الديزل، ويوفر مصدرًا موثوقًا ومرنًا لمياه الري لممرات التشجير التابعة لمبادرة السعودية الخضراء في المناطق النائية.
4	شبكات تجميع مياه الضباب	تعمل الشبكات الرأسية المصنوعة من البولي بروبيلين أو المحاكية للطبيعة على تكثيف قطرات الضباب التي تنقلها الرياح، وتوجيه المياه النظيفة إلى خزانات تعمل بالجاذبية. وتتيح أقطار الألياف المحسّنة والطلاءات الكارهة للماء تحقيق معدلات التجميع التي تصل إلى تسعة لترات لكل متر مربع يوميًا في مناطق الضباب الساحلية أو الجبلية، مما يوفر مصدر ري إضافي لا يحتاج للطاقة للأشجار والشجيرات في جبال المملكة وواحاتها.
5	منصات الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي	شبكات تتألف من أجهزة لاستشعار رطوبة التربة وأجهزة استشعار جوية تعمل على نقل البيانات إلى الخوارزميات الطرفية أو السحابية، حيث تُدمج صور الأقمار الصناعية والتنبؤات المناخية باستخدام تقنيات التعلم الآلي. وتقوم المنصات بإصدار أوامر الري على مستوى المناطق، مما يخفض استهلاك المياه بنسبة تتراوح بين 20% و40%، ويمنع الإفراط في استخدام مياه الري، ويتكامل مع مضخات الطاقة الشمسية في مشاريع بناء الحدائق في المواقع الحضرية وأعمال الاستصلاح البيئي.
6	تحلية المياه بالطاقة الشمسية لأغراض التشجير	تعمل محطات التناضح العكسي المدفوعة بالطاقة الكهروضوئية أو الطاقة الشمسية الحرارية على تحلية المياه المالحة أو مياه البحر، وضخّها عبر شبكات الري بالتنقيط عالية الكفاءة. ويؤدي استخدام الطاقة المتجددة إلى خفض البصمة الكربونية التشغيلية بشكل كبير، في حين تعمل تقنية التسميد عبر الري على تحسين إيصال العناصر الغذائية. وتُظهر المشاريع التجريبية على سواحل البحر الأحمر ريّ غابات المانغروف وأشجار الأكاسيا دون الضغط على مخزونات المياه الجوفية الأحفورية، بما يدعم الزراعة الصحراوية المستدامة.
7	حاضنات الشتلات ذاتية الري بتقنية الشرنقة	خزانات قابلة لإعادة الاستخدام على شكل حلقة تحيط بالشتلات، حيث تجمع مياه الهطول والتكاثف، ثم تطلق جرعات يومية صغيرة من المياه عن طريق الفتائل. وتتحلل المركبات العضوية القابلة للتحلل الحيوي بعد تكوّن الجذور. وتتجاوز معدلات البقاء 90% مع خفض استهلاك مياه الري بنسبة تصل إلى 90%، مما يجعلها خيارًا جاذبًا لبرامج التشجير وحملات زراعة الأشجار الحضرية في المملكة، مع توفير الحماية والعزل الحراري للجذور.
8	الأحواض المحسّنة بالفحم الحيوي	يُستخدم الفحم الحيوي المُنتَج محليًا والممزوج بالرمل في تشكيل أحواض للزراعة تُعزّز قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه والمغذّيات، وتنشّط النشاط الميكروبي، كما تسهم البنية المسامية للفحم الحيوي في تحسين تهوية منطقة الجذور، والحد من فقدان المغذّيات بالغسل، واحتجاز الكربون المستقر، مما يدعم تحسّن استقرار الشتلات وتقليل الاحتياج للري في التجارب الحقلية المنفذة في البيئات الجافة.
9	الطائرات المسيّرة المستقلة للري	تقوم مركبات جوية أو أرضية مسيرة، ومزودة بكاميرات متعددة الأطياف وتقنيات ليدار وأنظمة الرش ذات المعدلات المتغيرة، بدوريات ذاتية داخل المزارع والغابات المزروعة، حيث ترصد مؤشرات الإجهاد المائي بدقة عالية، وتضخ كميات دقيقة من المياه أو المغذيات حسب الحاجة. وتسهم هذه الأتمتة في خفض الاعتماد على العمالة، والحد من انضغاط التربة، وإلى الاستجابة السريعة لبؤر الإجهاد الحراري أو المائي في مناطق الزراعة الواسعة والنائية، مما يتيح التدخل الفاعل في الوقت المناسب.
10	تقنية الري بالموزعات الطينية المسامية	تعتمد هذه التقنية على استخدام أوعية فخارية غير مطلية أو موزعات خزفية تحت سطح الأرض تطلق المياه ببطء وبشكل جانبي إلى التربة المحيطة، مما يحافظ على مستوى الرطوبة في مناطق الجذور العميقة مع تقليل الفاقد بالتبخر. وقد أسهمت التصاميم الهندسية الحديثة، إلى جانب منظمات الضغط، في توسيع نطاق تطبيق هذه الأنظمة لتشمل الأراضي الصخرية وشبه الصخرية، وهو الأمر الذي أدى إلى خفض الاحتياجات المائية بنسبة تصل إلى 70% مقارنة بأنظمة الرش السطحي، وذلك في بساتين المناطق الجافة ومصدات الرياح في المملكة.

	المصطلح	الوصف
11	التجفيف الجزئي لمنطقة الجذور	تعمل صمامات الملف اللولبي على التناوب في ترطيب نصفَي منطقة الجذور، مع الحفاظ على الإمداد المائي الكافي للنبات. وتتابع أجهزة استشعار إنارتن الأشياء رطوبة التربة وتفعيل خاصية التبديل تلقائيًا عند بلوغ عتبات رطوبة محددة، مما يحفز الاستجابات الهرمونية داخل النبات والتي تؤدي إلى خفض معدلات النتح دون التأثير السلبي على الإنتاجية. وقد أظهرت التجارب التطبيقية على محاصيل الحمضيات ونخيل التمر تحقيق وفورات في مياه الري تصل إلى 35%، إلى جانب التحسن الملحوظ في تحمل الإجهاد المائي، وذلك ضمن المشاريع الزراعية المنفذة في البيئات الصحراوية.
12	الري بمياه الندى والتكاثف عبر التبريد الإشعاعي	تشع الأسطح الباعثة للأشعة تحت الحمراء، والمقترنة بطلاءات فائقة الكراهية للماء (Super hydrophobic)، الحرارة نحو السماء خلال الليل، مما يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة السطح إلى ما دون درجة حرارة الهواء المحيط، وبالتالي تكثيف الرطوبة الجوية. ويُستخدم الندى المتجمع في ريّ الشتلات بشكل غير مباشر. وتُظهر لوحات النماذج الأولية القدرة على جمع ما بين 0.3 إلى 0.5 لتر من المياه لكل متر مربع ليلًا عند رطوبة نسبية تبلغ نحو 40%، بما يسهم في دعم استدامة الشتلات خلال مواسم الجفاف.
13	أجهزة الري البطيء بالخاصية الشعرية	تعتمد هذه التقنية على الأكياس المملوءة بالمياه أو الخزانات تحت سطح الأرض والتي تقوم بتغذية فتائل قطنية تنقل المياه بالتنقيط إلى كرة الجذور على مدار عدة أيام. ويعمل هذا النظام البسيط المعتمد على الجاذبية دون الحاجة إلى طاقة أو ضغط تشغيلي، مما يقلل من عدد زيارات الري الميدانية، وقد أثبتت هذه الطريقة فاعليتها في ري الأشجار المزروعة على جوانب الطرق ومواقع الاستصلاح أو الاستعادة البيئية النائية التي تفتقر إلى البنية التحتية، مع تحقيق الخفض الملموس في تكاليف العمالة والصيانة.
14	مياه الري المحملة بفقاعات الأكسجين النانوية	تقوم المولدات الكهروكيميائية أو مولدات فنتوري (Venturi) بإذابة فقاعات نانوية من الأكسجين داخل مياه الري، مما يؤدي إلى رفع مستويات الأكسجين الذائب وتحفيز تنفس الجذور والنشاط الميكروبي. وقد أظهرت دراسات الدفيئة زيادة في الكتلة الحيوية بنسبة تصل إلى 15%، إلى جانب التحسّن الملحوظ في القدرة على مواجهة الجفاف، كما نُفّذت تجارب ميدانية دمجت وحدات حقن الفقاعات النانوية مباشرة داخل شبكات الري بالتنقيط في الأراضي الصحراوية عالية الملوحة، حيث أظهرت هذه الأنظمة أداءً مستقرًا وفاعلًا تحت الظروف المناخية الصحراوية.
15	الرشاشات الدقيقة ذات الضغط المنخفض	تعمل تقنية المرشّات الدقيقة منخفضة الطاقة (LEPA) على إيصال قطرات مائية كبيرة بالقرب من سطح التربة عبر أنابيب مخصصة تعمل تحت ضغط يعادل نحو عُشر الضغط المستخدم في أنظمة الرش التقليدية. وتسهم هذه التقنية في الحد من انجراف المياه بفعل الرياح، وخفض استهلاك الطاقة اللازمة للضخ بنسبة تصل إلى 40%، إلى جانب تحقيق كفاءة التطبيق والتي تتجاوز 90% في الأراضي الصحراوية المستوية أو ذات الانحدار الطفيف.

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

مـوان MWAN
المركز الوطني لإدارة النفايات
National Center for Waste Management

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

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
نبراس
NPRAS
المنصة الوطنية لاستشراف البحث والابتكار للاستدامة
National Platform of R&I Analytics for Sustainability
المركز الوطني لتنمية الغطاء النباتي ومكافحة التصحر