رؤية VISION 2030
المملكة العربية السعودية
KINGDOM OF SAUDI ARABIA

هيئة تنمية البحث والتطوير والابتكار
Research, Development & Innovation Authority



تقرير التقنيات الحديثة 2026

تقرير سنوي يصدر عن هيئة تنمية البحث والتطوير والابتكار

هيـــــئة تنـــــمية البحـث والتطــوير والابتــكار

The Research, Development & Innovation Authority

المحتـويات

01 المقـدمـة 06
02 النقلات التقنية المرصودة 08

صحـــــة الإنســـــان 10

1 أدوية الجيل القادم من الببتيد الشبيه بالغلوكاجون 1 (GLP-1) 12
2 العلاجات الرقمية 14
3 واجهات الدماغ والحاسوب 16
4 الطباعة الحيوية ثلاثية الأبعاد 18
5 الأحياء التركيبية 20

اســـتدامة البيـــئة والاحتياجات الأساسية 22

6 التقاط الكربون وتخزينه 24
7 الزراعة الدقيقة 26
8 المعالجة البيولوجية 28
9 المواد القابلة للتحلل الحيوي 30
10 الوقود الحيوي 32





الطاقة والصناعة 34

11 الجيل القادم من تقنيات الهيدروجين 36
12 تخزين الطاقة المتجددة 38
13 مراكز البيانات المزودة بالطاقة النووية 40
14 المواد ثنائية الأبعاد 42
15 المواد المستجيبة 44

اقتصاديات المستقبل 46

16 تشفير ما بعد الكم 48
17 الرقائق الكمية الضوئية 50
18 حوسبة التشكيل العصبي 52
19 أشباه الموصلات لتطبيقات الجيل السادس 54
20 التمويل اللامركزي 56

03 الخاتمة 58
ملحق | منهجية التقرير 60





المقدمة

يُعدُّ **الاستشراف التقني** أداةً محوريةً لاستكشاف آفاق المستقبل، وفهم التحولات الجذرية التي تشكّل قطاعات حيوية عدّة؛ حيث أصبح من الضروري تبني منهجية موثوقة لرصد الاتجاهات الناشئة، وتحليل تأثيراتها المحتملة. يهدف هذا التقرير إلى تقديم مجموعة من النقلات التقنية التي تعيد تعريف حدود المعرفة والإمكانات، وتضع أمام صناع القرار والمبتكرين تصورًا للتعامل مع عالم متغير.

وانطلاقًا من أحد أدوار هيئة تنمية البحث والتطوير والابتكار في التنسيق مع الجهات ذات العلاقة؛ لتحديد سُبل الاستغلال الأمثل للتقنيات الحديثة التي تُرصد بما يتوافق مع التطلعات الوطنية للقطاع، يقدم المرصد الوطني للبحث والتطوير والابتكار هذا التقرير الذي يتضمن تحليل 20 نقلة تقنية تغطي الأولويات الوطنية للبحث والتطوير والابتكار: صحة الإنسان، استدامة البيئة والاحتياجات الأساسية، الريادة في الطاقة والصناعة، واقتصاديات المستقبل؛ حيث اختيرت هذه النقلات التقنية نظرًا لأثرها الممتد وأهميتها التحويلية.

ففي أولوية **صحة الإنسان**، نشهد تحولاً نموذجياً بظهور أدوية الجيل القادم مثل منبهات البتيدات متعددة الأهداف، والعلاجات الرقمية التي تقدِّم تدخُّلات قائمة على البرمجيات، وواجهات الدماغ والحاسوب التي تعيد الوظائف المفقودة، والطباعة الحيوية ثلاثية الأبعاد لاستبدال الأنسجة، وعلم الأحياء التركيبي لتصميم أنظمة بيولوجية جديدة. هذه التطورات تَعِدُ بطبٍّ أكثر تخصيصًا وفعالية، لكنها تكتنف تحدياتٍ أخلاقية، وقضايًا تنظيمية، وآثارًا اقتصادية.

أما في أولوية **استدامة البيئة والاحتياجات الأساسية**، فتظهر تقنيات مثل التقاط الكربون وتخزينه، والزراعة الدقيقة القائمة على البيانات، والمعالجة البيولوجية للملوثات، والمواد القابلة للتحلل الحيوي، والوقود الحيوي المتقدم. تشكل هذه الابتكارات حزمةً متكاملةً للانتقال نحو اقتصاد دائري يضع في الاعتبار تغير المناخ، مع الحاجة لتقييم آثارها طويلة المدى على النظم البيئية وسلاسل الإمداد.

وفي أولوية **الطاقة والصناعة**، تمثّل تقنيات الجيل القادم للهيدروجين، وحلول تخزين الطاقة المتقدمة، ومراكز البيانات المدعومة بالطاقة النووية، والمواد ثنائية الأبعاد والمواد المستجيبة، نقلاتٍ في البُنى التحتية والتصنيع. هذه التقنيات تعد باستدامة وكفاءة نوعية، لكنها تتطلب استثمارات ضخمة وتطوير أطر تعاونية بين القطاعين العام والخاص.

وأخيراً، تهدف تقنيات **اقتصاديات المستقبل** إلى إعادة هندسة النظم الرقمية والمالية عبر التشفير المقاوم للحوسبة الكمية، والرقائق الكمية الضوئية، وحوسبة التشكيل العصبي، وأشباه الموصلات لتطبيقات الجيل السادس، ونظم التمويل اللامركزي. هذه التقنيات قد تحدد معالم المنافسة والقدرة السيادية في العقد القادم، وتفرض إعادة نظر جذرية في مفاهيم الأمان والخصوصية والكفاءة الحاسوبية.

يمكن أن يسهم تبني هذه التقنيات في تحقيق أهداف رؤية المملكة العربية السعودية 2030، لا سيما في التنويع الاقتصادي، تحسين جودة الحياة، وتعزيز الابتكار. يدعو التقرير إلى تكثيف الاستثمارات في البحث والتطوير، بناء القدرات البشرية، وتعزيز التعاون الدولي لاستشراف المستقبل التقني. يُعتبر الاستعداد لهذه التحولات التقنية عبر تبني الابتكار وتطوير الأطر التنظيمية بمثابة الخطوة الأساسية نحو مستقبل مزدهر ومستدام.



03 | النقلات التقنية المرصودة

صحـــــــــــــة الإنســـــان



اســـــتدامة البيـــــئة والاحتياجات الأساسية




الطاقة
والصناعة


اقتصاديات
المستقبل



صحـــــة الإنســـــان





1

أدوية الجيل القادم من البتيد الشبيه بالغلوكاجون1 (GLP-1)

تُمثّل أدوية GLP-1 من الجيل القادم نقلة في علاج السمنة والسكري، مع توسّع دورها ليشمل الحماية القلبية الوعائية وتقليل الالتهاب والمخاطر العصبية التنكسية. تتجه التطورات نحو منبهات متعددة الأهداف (ثنائية وثلاثية) مثل تيرزيباتيد (Tirzepatide) وريتاتروتايد (Retatrutide)، والعلاجات الجينية تحت التحريب مثل ريجوفا (Rejuva)، والعلاجات المركّبة مثل كاغريسيما (CagriSema) ، ما يعزز فقدان الوزن وضبط السكر بفعالية أكبر من الأدوية أحادية الهدف. بالتوازي، تدفع الابتكارات في التوصيل الفموي والأجهزة الذكية والغرسات ذات الإطلاق المستمر، إضافة إلى الطب الشخصي المعتمد على العلامات الحيوية والجينوميات، نحو علاجات أكثر ديمومة وتكيّفًا مع خصائص كل مريض، مع استمرار التركيز على الآثار الجانبية طويلة المدى والسلامة. تتفاوت مستويات الجاهزية التقنية داخل هذا المجال؛ إذ وصلت بعض ناهضات مستقبلات GLP-1 إلى الاستخدام السريري، بينما لا تزال النُّهج المركبة والجينية الأحدث في مراحل سريرية أو قبل سريرية متفاوتة.

نقلات تقنية في استعمالات الببتيد الشبيه بالغلوكاجون 1 (GLP-1)

TRL: 4-9

أدوية GLP-1 للأمراض العصبية التنكسية

على الرغم من الإشادة بها في البداية باعتبارها إنجازًا كبيرًا في علاج داء السكري وفقدان الوزن، إلا أن أدوية مثل أوزيمبيك (Ozempic) وويغوفي (Wegovy) تُظهر نتائج محتملة في علاج الأمراض العصبية التنكسية مثل الزهايمر وباركنسون. ولا يزال هذا الاستعمال تحت الدراسة. تشير دراسات قبل سريرية ونتائج أولية إلى آليات محتملة تشمل خفض الالتهاب والتأثير في تراكم بعض البروتينات، لكن الفعالية السريرية لم تثبت بعد.[1]

العلاجات المركبة

تُوظف ناهضات مستقبلات GLP-1 أيضًا في العلاجات المُركَّبة. تُطوِّر شركة نوفو نورديسك (Novo Nordisk) دواء كاغريسيما (CagriSema)، وهو مزيج من سيماغلوتايد وكاجريلينتايد (مُحفِّز لمستقبلات الأميلين). الأميلين (Amylin) هرمون يُعزِّز الشعور بالشبع ويُبطئ إفراغ المعدة، وعند دمجه مع GLP-1، يُظهِر فقدانًا أفضل للوزن مُقارنةً بسيماغلوتايد وحده.[2]

ومن المتوقع أن تعمل هذه الأدوية من الجيل التالي على تحويل السوق من خلال تقديم فعالية أفضل، وطرق توصيل أكثر ملاءمة، ومجموعة أوسع من الفوائد التي تتجاوز فقدان الوزن وإدارة مرض السكري.

الابتكارات في تقنيات توصيل GLP-1

شهدت تقنيات توصيل GLP-1 تطورًا كبيرًا، منها التركيبات الفموية مثل ريبالسس (Rybelsus)، وأجهزة الحقن الذكية، وكبسولات روبوتية قابلة للبلع مثل رانيبِل (RaniPill) . هذه الابتكارات تعزز التزام المرضى بالعلاج من خلال تقليل عدد الحقن وتحسين الامتصاص. كما أن الغرسات ذات الإطلاق المستمر والنمذجة المعتمدة على الذكاء الاصطناعي تساهم في تحسين النتائج العلاجية وسهولة الاستخدام.[3]

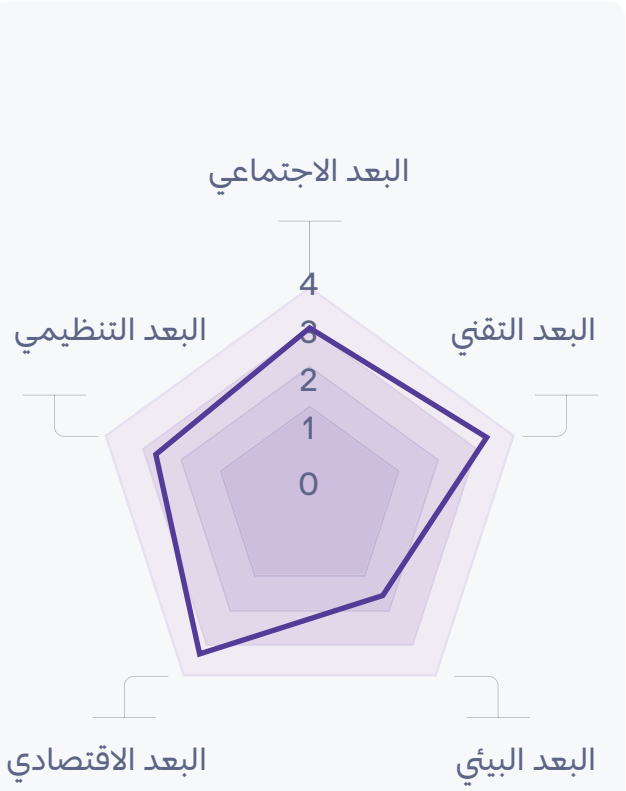
الطب الشخصي والعلامات الحيوية

تشمل التطورات في تخصيص أدوية GLP-1 اختبارات جينية مثل مايفينوم (MyPhenome) التي تتنبأ باستجابة المريض بناءً على أنماط الشبع. كما تساهم أدوات الذكاء الاصطناعي مثل (PGxAI) في تحليل المتغيرات الجينية لتحديد الجرعة المثلى وتقليل الآثار الجانبية. وتُسرّع تقنيات الميتابولومكس (metabolomics) المعتمدة على العلامات الحيوية من تطوير الأدوية وتحسين دقة العلاج.[4]

1. Nature Mental Health
2. Visible Alpha
3. Journal of Pharmaceutical Investigation

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة

الجيل القادم من أدوية GLP-1



حجم السوق العالمي[5]

قدر حجم السوق العالمي لـ GLP-1 بـ

46.09 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

107.85 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 18.53

4. Phenomix Sciences
5. PitchBook



2

العلاجات الرقميـــة

تُمثّل العلاجات الرقمية (Digital Therapeutics) تدخلات علاجية قائمة على البرمجيات ومبنية على الأدلة، تهدف للوقاية من الأمراض أو إدارتها أو علاجها، وتخضع لتجارب سريرية ومراجعة تنظيمية بخلاف تطبيقات العافية العامة. تتوسع استخداماتها في الصحة النفسية، والأمراض المزمنة، والحالات العصبية، مع قدرة عالية على توسيع الوصول للرعاية وتقديم طب شخصي قائم على البيانات في الزمن الحقيقي. تدفع تقنيات الذكاء الاصطناعي، والتحليلات التنبؤية، والواقعين الافتراضي والمعزز، والمؤشرات الحيوية الرقمية والتوائم الرقمية، موجةً جديدة من العلاجات التكيفية. وقد صنّفت إدارة الغذاء والدواء الأمريكية (FDA) الجهاز الرقمي CT-132 ضمن الأجهزة الطبية من الفئة الثانية، لاستخدامه بوصفة طبية علاجًا سلوكيًا محوسبًا مساعدًا للوقاية من الصداع النصفي العرضي لدى البالغين.

نقلات تقنية في العلاجات الرقمية

TRL: 7-9

التخصيص الفائق

يتيح الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة مستوىً جديدًا من العلاج المُخصص من خلال تحليل بيانات المرضى آنيًّا من الأجهزة القابلة للارتداء والتطبيقات ومصادر أخرى. يتيح هذا للعلاجات الرقمية تعديل خطط العلاج ديناميكيًّا، مثل تقديم تدريب مُخصص، وإرسال تذكيرات مُحددة، وحتى التنبؤ بالمشاكل الصحية المُحتملة قبل حدوثها.[1]

التحليلات التنبؤية

يُستخدم الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بكيفية استجابة المريض لتدخل علاجي محدد. ويمثل هذا نقلة نوعية مقارنةً بالبرامج العلاجية التقليدية. وتُظهر الدراسات أن هذه الخوارزميات المدعومة بالذكاء الاصطناعي تتفوق على استراتيجيات العلاج التقليدية في التنبؤ بالنتائج وتعديل مسار العلاج.[2]

الذكاء الاصطناعي التوليدي للدعم

يجري حاليًا استكشاف استخدام الذكاء الاصطناعي التوليدي في روبوتات الدردشة العلاجية القادرة على تقديم الدعم والتوجيه. وبينما تُظهر الدراسات الأولية نتائج واعدة في مجالات مثل الاكتئاب والقلق، ينصبُّ التركيز على تطوير هذه الأدوات بشكل آمن وأخلاقي، مع التركيز بشكل كبير على التدقيق التنظيمي.[3]

الواقع الافتراضي والواقع المعزز (VR/AR)

يتوسع الاستخدام المتخصص للواقع الافتراضي والواقع المعزز في العلاج الغامر، وخاصة لعلاج الرُّهاب، واضطراب ما بعد الصدمة، وإدارة الألم، مما يوفر بيئات جذابة وخاضعة للرقابة لتقديم العلاج.

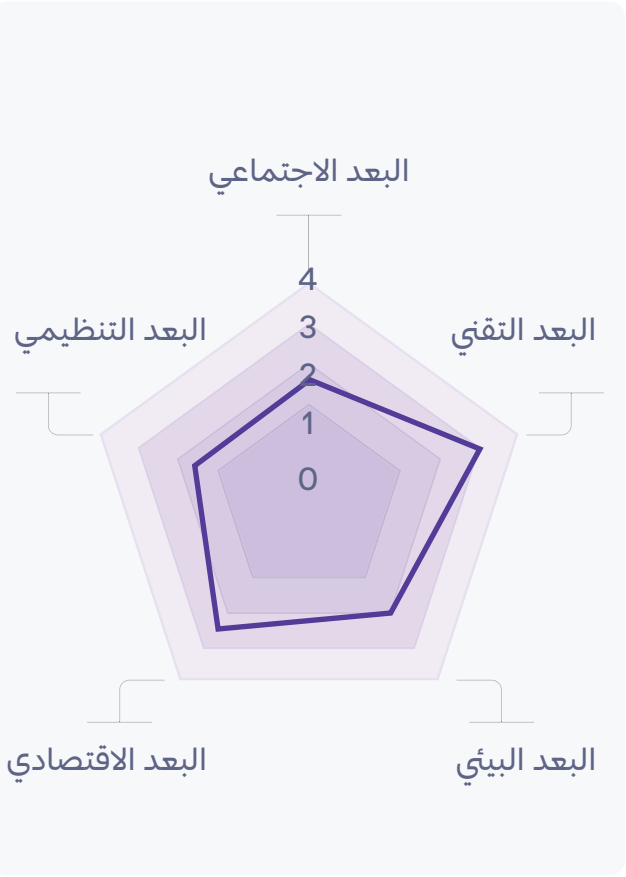
المؤشرات الحيوية الرقمية

التي تُجمع عبر الأجهزة القابلة للارتداء، وأجهزة الاستشعار، والمراقبة عن بُعد؛ حيث توفر بيانات واقعية مستمرة لتعزيز فعالية العلاج الرقمي المباشر، وحلقات المراقبة وردود الفعل (monitoring and feedback loops).[4]

استخدام التوائم الرقمية في التجارب السريرية

ظهرت نماذج افتراضية للمرضى تُحاكي وظائف الأعضاء، وتُحسّن تصميم التجارب، وتكشف عن الآثار الجانبية مبكرًا.[5]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
العلاجات الرقمية



حجم السوق العالمي[6]

قدر حجم السوق العالمي للعلاجات الرقمية بـ

12.14 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

38.41 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 25.91

1. Clinical Leader
2. Towards Healthcare
3. Medscape
4. BioSupply Trends Quarterly
5. npj Systems Biology and Applications
6. PitchBook



3

واجهات الدماغ والحاسوب

واجهات الدماغ والحاسوب (BCIs) تمكّن من تحويل نشاط الدماغ إلى أوامر للتحكم في أطراف وأجهزة رقمية، مع تقدم سريع بفضل تقنيات التسجيل العصبي عالية الدقة وخوارزميات الذكاء الاصطناعي. تُحدث هذه الواجهات تحولات عميقة في الرعاية الصحية حيث تتيح للمصابين بالشلل التحكم في الأطراف الاصطناعية أو استعادة التواصل عبر فك تشفير إشارات الكلام بدقة عالية، كما تُستخدم في إدارة أمراض مثل باركنسون والصرع، من خلال تقديم أنظمة حلقة مغلقة مع تغذية حسية راجعة وتحفيز دماغي متكيّف. أحدثت الغرسات عالية النطاق الترددي، والواجهات ثنائية الاتجاه المعتمدة على رقائق الذاكرة نقلةً في توسيع التجارب السريرية والاقتراب من الاستخدام الواسع، مع بقاء تحديات الموافقات التنظيمية وحماية خصوصية البيانات في صدارة الأولويات.

نقلات تقنية في واجهات الدماغ والحاسوب

TRL: 5-8

استعادة الكلام

من أهم الإنجازات تطوير واجهات الدماغ والحاسوب (BCIs) القادرة على ترجمة إشارات الدماغ مباشرةً إلى كلام. وقد أظهرت دراسة رائدة أُجريت عام 2025 وفازت بجائزة «أفضل عشرة إنجازات بحثية سريرية»، نظامًا قادرًا على ترجمة كلام الشخص المقصود إلى نص بدقة تصل إلى 97 % في ظروف معينة. وهذا يُقدم أملًا غير مسبوق للأشخاص الذين يعانون من حالات مثل التصلب الجانبي الضموري (ALS) والذين فقدوا القدرة على الكلام.[1]

فك تشفير الكلام الداخلي باستخدام الأمان «كلمة مرور العقل» (Mind Password)

طوّر علماء جامعة ستانفورد واجهة دماغية حاسوبية (BCI) قادرة على فك تشفير الكلام الداخلي الصامت من خلال تمييز أنماط تفكير فريدة. ولحماية الخصوصية، لا يُفعّل الجهاز إلا بعد إدخال «كلمة مرور» ذهنية. يُمثّل هذا إنجازًا جديدًا في مجال التواصل الآمن القائم على التفكير.[2]

لمسة واقعية في التحكم باليد الآلية

نجح فريقٌ بقيادة جامعة شيكاغو (UChicago) في تمكين المشاركين من التحكم بيدٍ آلية، مع الشعور أيضًا بملمس كالحواف والأشكال. ويَعِدُ هذا التطور في مجال التغذية الحسية بتحكمٍ اصطناعيٍّ أكثر طبيعيةً وبداهة.[3]

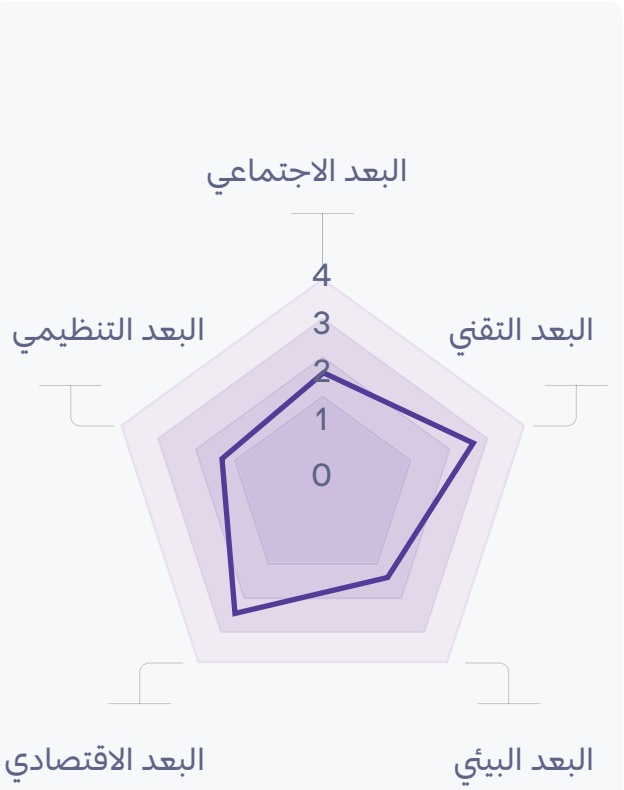
التحكم الآلي في الأطراف المستقر بالذكاء الاصطناعي

في جامعة كاليفورنيا سان فرانسيسكو (UCSF)، استخدم شخص مشلول واجهة دماغ حاسوبية للتحكم بذراع آلية باستخدام أفكاره. حافظ نظام الذكاء الاصطناعي، الذي يتكيف آنيًا، على وظائفه لمدة سبعة أشهر دون الحاجة إلى إعادة معايرة، وهي خطوة حاسمة نحو قابلية الاستخدام على المدى الطويل.[4]

دفع تقنيات BCI على المستوى الوطني من خلال السياسات

وضعت الصين خطة وطنية للريادة في تقنية واجهة الدماغ والحاسوب، مع أهداف حتى عامي 2027 و 2030 تتضمن رقائق فك تشفير الإشارات المتقدمة، والتصنيع الضخم، والتطبيقات التي تتراوح من المساعدة الطبية إلى مراقبة يقظة السائق.[5]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
واجهات الدماغ والحاسوب



حجم السوق العالمي[6]

قدر حجم السوق العالمي لواجهات الدماغ والحاسوب بـ

2.70 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

6.03 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 17.43

1. UC Davis
2. Live Science
3. Financial Times
4. CELL
5. WIRED
6. PitchBook



4

الطباعة الحيوية ثلاثية الأبعاد

تُستخدم الطباعة الحيوية ثلاثية الأبعاد (3D Bioprinting) لطباعة هياكل ثلاثية الأبعاد تحاكي بيئة الجسم، باستخدام أحبار حيوية تحتوي خلايا وبوليمرات حيوية لتجديد الأنسجة واختبار الأدوية. تتقدم التقنية من البحوث المختبرية نحو التطبيقات قبل السريرية، مع إحراز تقدم في طباعة أنسجة معقدة تتضمن شبكات وعائية لأغراض نمذجة الأمراض واختبار الأدوية، إلا أن زرع هذه الأنسجة الحية المعقدة في البشر لا يزال في مراحل بحثية محدودة. وفي المقابل، وصلت الطباعة ثلاثية الأبعاد لبعض الأطراف والغرسات غير الحية والنماذج الجراحية المخصصة إلى تطبيقات سريرية فعلية. تقود تقنيات الطباعة السريعة المعتمدة على الضوء، إلى جانب الطباعة في الفضاء، نحو إنتاج أنسجة كبيرة في ثوانٍ مع حفاظ على الخلايا وتعقيد هندسي أكبر، بينما تُمهّد الطباعة الحيوية رباعية الأبعاد (4D Bioprinting) —باستخدام مواد ذكية مستجيبة للمحفزات— الطريق لهياكل ديناميكية تتشكل داخل الجسم.

نقلات تقنية في الطباعة الحيوية ثلاثية الأبعاد

TRL: 4-6

الطباعة الحيوية للأنسجة الحية لعلاج مرض السكري

نجح باحثون من جامعة كارنيجي ميلون (Carnegie Mellon) في طباعة نسيج بنكرياسي معقد وعملي يحتوي على عُضيّات (أعضاء صغيرة) «organoids» وشبكة أوعية دموية مدمجة. تحتوي الأنسجة المطبوعة حيويًّا على عُضيّات جزرية (islet organoids) منتجة للأنسولين، مشتقة من خلايا جذعية بشرية. واستخدم العلماء تقنيةً لطباعة شبكة من الأوعية الدموية إلى جانب هذه العضيات في آنٍ واحد. يُعد هذا النظام الوعائي أساسيًا لتوصيل الأكسجين والمغذيات إلى الخلايا، ولنقل الهرمونات التي تنتجها.[1]

- بالنسبة لمرض السكري من النوع الأول، يمكن أن يعمل هذا النسيج كزرع بنكرياسي مصمم بيولوجيًا ليحل محل خلايا الجزر المدمرة (destroyed islet cells)، مما قد يؤدي إلى استعادة قدرة الجسم الطبيعية على إنتاج الأنسولين استجابة لمستويات السكر في الدم.
- قد توفر هذه الأنسجة منصة بحثية لدراسة وظائف البنكرياس واختبار علاجات محتملة للسكري، إلا أن استخدامها علاجًا للمرضى لم يُثبت سريريًا بعد. تُمثل الأوعية الدموية المُدمجة تحدّيًا رئيسيًا يجب التغلب عليه، إذ تضمن بقاء الخلايا المزروعة ووظائفها على المدى الطويل.

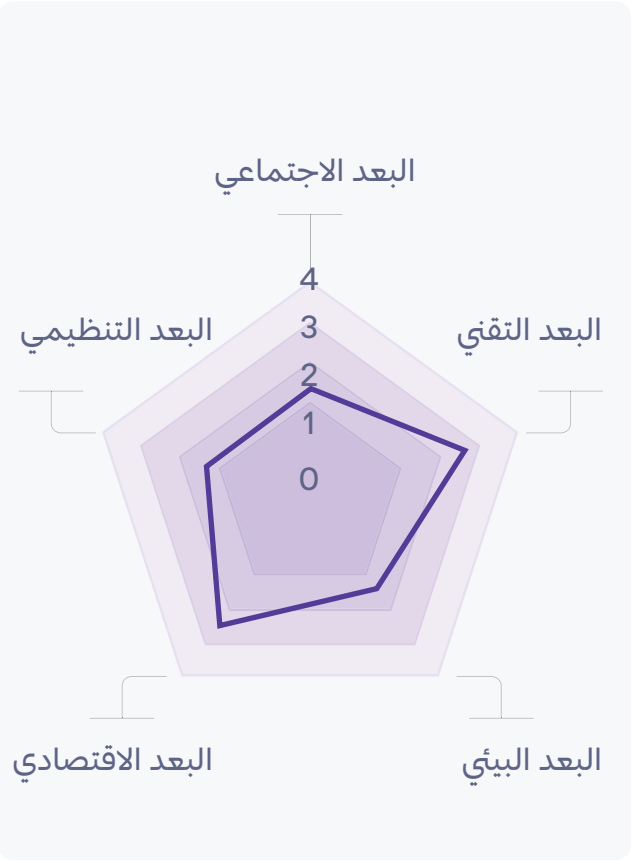
تُعد هذه التقنية بمثابة مخطط لإنشاء أنسجة أعضاء معقدة أخرى، مما يدفع المجال إلى الاقتراب من استبدال الأعضاء القابلة للتطبيق.[2]

الطباعة الحيوية للأعضاء والأنسجة

طوّر فريق من جامعة ملبورن (University of Melbourne) تقنية جديدة فائقة السرعة للطباعة الحيوية تُسمى «الطباعة الحيوية باستخدام الليثوغرافيا الضوئية» (Bioprinting by Light-Sheet Lithography). تُمكّن هذه الطريقة من إنشاء هياكل معقدة غنية بالخلايا في دقائق بدلاً من الساعات التي تتطلبها التقنيات الحالية.[3]

مع التنويه بأن هناك فرقًا بين "الطباعة ثلاثية الأبعاد لأجهزة أو غرسات غير حية" و"الطباعة الحيوية لأنسجة حية وخلايا"؛ حيث إن الاستخدامات السريرية للأنسجة الحية المعقدة والمزودة بأوعية لا تزال محدودة.

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
الطباعة الحيوية ثلاثية الأبعاد



حجم السوق العالمي[4]

قدر حجم السوق العالمي للطباعة الحيوية ثلاثية الأبعاد بـ

2.53 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

5.70 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 17.64

1. SciTechDaily
2. Science
3. University of Melbourne
4. PitchBook



5

الأحيـــاء التـــركيبية

يُعيد علـم الأحيـاء التركـيبي (Synthetic Biology) تعريـف كيفيـة تصميـم الأنظمـة البيولوجية، عبر بناء دوائر وخلايا ومواد حية جديدة أو مُعاد تصميمها لأغراض طبية، صناعيـة وبيئيـة، اعتمـادًا على مبـادئ هندسـية وأدوات مثـل تركيـب الحمـض النـووي وتعديل الجينوم والنمذجة الحاسوبية. تتوسع تطبيقاته من علاجات خلوية ولقاحات ومحاصيـل مقاومـة للجفـاف ووقـود ومـواد حيويـة مسـتدامة، وصـولًا إلى مستشـعرات ومواد حية مُهندَسة لمعالجة التلوث وبناء جيل جديد من مواد البناء والمنسوجات. تتقاطـع الأحيـاء التركيبيـة مـع مجـالات متقدمـة تشـمل هندسـة الخلايـا المناعيـة، والعضيـات، وبدائـل الـدم والهندسـة الجزيئيـة، بدرجـات متفاوتـة مـن الارتبـاط المبـاشر بـأدوات الأحيـاء التركيبيـة، ممـا يعمّـق الأثـر المتوقـع لهـذا المجـال على الطـب والاقتصـاد الحيـوي العالمـي.

نقلات تقنية في الأحياء التركيبية

TRL: 3-8

هندسة الخلايا الاصطناعية

- أحد أهم الاختراقات المستقبلية هو إنشاء الخلايا الاصطناعية - وهي أنظمة بيولوجية هندسية تحاكي الخلايا الطبيعية ولكنها قادرة على أداء وظائف جديدة تمامًا.[1]
- أدت التطورات الحديثة في هندسة الخلايا الاصطناعية (synthetic cells) من الأسفل إلى الأعلى (bottom-up) إلى إنشاء مفاعلات كيميائية حيوية مقسمة قوية ذات قدرات تشبه قدرات الخلايا، مما دفع حدود القدرات الجمعية للخلايا الاصطناعية في التطبيقات الطبية الحيوية.[2]
- يهدف مشروع SynHG، المدعوم من صندوق ويلكوم (Wellcome) بتمويل قدره 10 ملايين جنيه إسترليني، إلى بناء الحمض النووي البشري من مواد كيميائية خام، بدءًا من كروموسوم بشري اصطناعي واحد. ويمثل هذا تحولًا جذريًا عن تعديل الجينومات بصورته الحالية.[3]

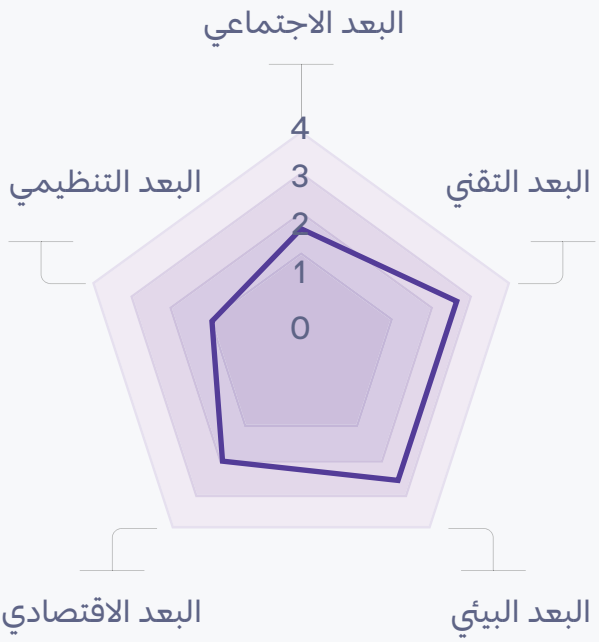
الرعاية الصحية والطب

- **الطب الشخصي:** على سبيل المثال، تُستخدم الخلايا المناعية المُهندَسة، كما في العلاج بالخلايا التائية (CAR-T)، لمكافحة السرطان، ويُستخدم الذكاء الاصطناعي لتصميم علاجات مُخصصة للأمراض الوراثية.[4]
- **الأعضاء والهندسة النسيجية:** يستخدم الباحثون عُضيّات (أعضاء مصغرة «organoids») وأنسجة معقدة في المختبر لنمذجة الأمراض واختبار الأدوية، ومن المحتمل لعمليات زراعة الأعضاء في المستقبل.[5]
- **بدائل خلايا الدم الحمراء:** ابتكر باحثون يابانيون من جامعة نارا الطبية (Nara Medical University) حويصلات هيموغلوبين صناعية تعمل بديلًا مؤقتًا لخلايا الدم الحمراء في نقل الأكسجين، وتمتاز بعدم احتوائها على مستضدات فصائل الدم التقليدية وإمكان تخزينها مدة أطول، إلا أنها لا تمثل دمًا كاملًا بديلًا بجميع مكوناته.[6]

الهندسة الجزيئية

طوّر علماء من معهد ماكس بلانك للأبحاث الطبية (Max Planck Institute for Medical Research) طريقة جديدة لإنشاء عقد جزيئية (molecular knots) دقيقة ومستقرة على المستوى النانوي باستخدام طريقة «اللف والحلقة والطي» (twist-loop-fold). يتيح هذا الاكتشاف دراسة كيفية تأثير العقد على خصائص المواد، مما يُتيح ابتكار تصاميم جديدة في مجال تقنية النانو وعلم الأحياء التركيبية.[7]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
الأحياء التركيبية



حجم السوق العالمي[8]

قدر حجم السوق العالمي للأحياء التركيبية بـ

15.25 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

54.36 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 28.94

1. Sequence BioTech
2. Nature
3. The Guardian
4. tech4future
5. frontiers
6. Tokyo Weekender
7. Nature Nanotechnology
8. PitchBook



استدامة البيئة والاحتـــياجات الأساســـية





6

التقاط الكربون وتخزينـــــه

يتضمن مجال التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه (CCUS) مجموعة تقنيات تلتقط ثاني أكسيد الكربون من مصادر صناعية كبيرة أو من الهواء، ثم تنقله وتخزنه تحت الأرض بشكل آمن في خزانات جيولوجية عميقة أو استخدامة؛ للمساعدة في تحقيق أهداف الحياد الصفري. تتسارع الابتكارات في هذا المجال عبر مواد ماصة وهجينة جديدة، وتقنيات مثل الالتقاط بالتبريد العميق، والمراقبة القائمة على التوائم/ الظلال الرقمية، والتكامل مع إنتاج الهيدروجين والاستخدامات الصناعية، إضافةً إلى أغشية نانوية مطوّرة حديثًا تزيد كفاءة الالتقاط بنحو ستة أضعاف عن الطرق التقليدية، وتخفض التكاليف بنسبة قد تصل إلى نحو 20-30%، ما يعزّز جدوى نشر هذه التقنيات على نطاق أوسع في الصناعات كثيفة الكربون.

نقلات تقنية في التقاط الكربون وتخزينه

TRL: 3-8

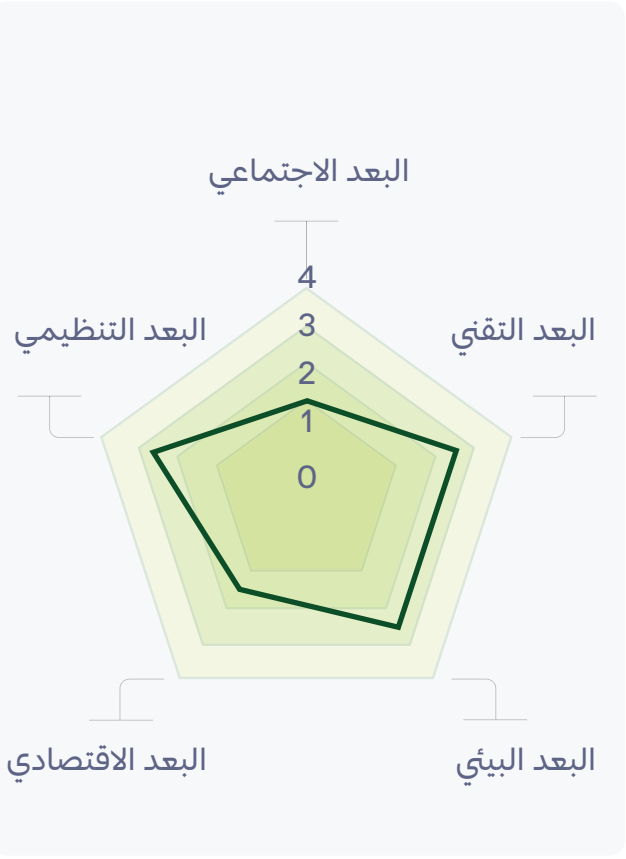
المواد وعمليات الالتقاط المتقدمة

- **الأقطاب الكهربائية-الكيميائية أو الأقطاب الكهربائية المتأرجحة، المواد البوليمرية/الموصلة:** يجري تطوير أقطاب بوليمرية مسامية تجمع بين رغوة الميلامين والبوليمرات، وأنابيب الكربون النانوية، وجزيئات الكينون (quinone)، وغيرها، لالتقاط ثاني أكسيد الكربون من مصادر منخفضة التركيز بكفاءة أكبر.[1]
- **تحسينات الأمين/المذيب (Amine / solvent):** يجري العمل على مذيبات أحدث ذات استهلاك طاقة أقل، وقابلية تآكل أقل، وخصائص تجديد أفضل. ومن الأمثلة على ذلك مذيبات "إزالة الخلط" (demixing) (ثنائية الطور عند ملامسة ثاني أكسيد الكربون) مثل عملية (DMX) من شركة أكسنز (Axens).[2]

ابتكارات جديدة في مجال التقاط الكربون وعملياته

- **التقاط الكربون بالتبريد العميق Cryogenic Carbon Capture (CCC):** يجري حاليًا اختبار تقنيات لتبريد تيارات الغاز الغنية بثاني أكسيد الكربون لتكثيفه أو تجميده (أو فصله بالتبريد). وقد أجرت جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية اختبارات تجريبية على تقنية الالتقاط بالتبريد العميق.[3]
- **تقنية النانو لخفض تكاليف التقاط الكربون:** طوّر باحثون في معهد ماساتشوستس للتقنية (MIT) أغشية ترشيح نانوية جديدة تفصل الأيونات المستخدمة في أنظمة التقاط الكربون وتخزينه (CCS)، مما يمنع تكوّن الماء الذي يقلل كفاءة العملية. يسهم هذا الابتكار في زيادة كفاءة الأنظمة حتى ستة أضعاف، وخفض استهلاك الطاقة، وتقليل تكاليف التقاط الكربون بنسبة قد تصل إلى 30 %.[4]
- **مواد البناء الحية لالتقاط ثاني أكسيد الكربون من الهواء:** ابتكر باحثون -كما في ورقة نُشرت في نيتشر مؤخرًا- هلامًا حيًا قابلًا للطباعة، مُشبّعًا بالبكتيريا الزرقاء (cyanobacteria). تعمل هذه المادة المبتكرة كمصرف كربون مزدوج الغرض: تستخدم البكتيريا عملية التمثيل الضوئي لإنتاج الكتلة الحيوية، كما تُحفّز عملية تمعدن ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بشكل دائم. تُحفظ البكتيريا في هلام مائي (hydrogel) مُصمّم خصيصًا، وتبقى قابلة للحياة لفترات طويلة. وقد طُبّقت هذه التقنية بالفعل في منشآت معمارية واقعية، حيث تمتزج التقنية الحيوية مع التصميم المستدام.[5]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
التقاط الكربون وتخزينه



حجم السوق العالمي[6]

قدر حجم السوق العالمي لالتقاط الكربون وتخزينه بـ

5.25 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

5.92 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 2.43

1. Tech Xplore
2. Journal of Petroleum Technology
3. Global CCS Institute
4. carboncredits
5. Nature Communications
6. PitchBook



7

الزراعـــــة الدقيـقة

الزراعة الدقيقة (Precision Agriculture) هي نهج زراعي قائم على البيانات يستخدم أدوات مثل نظام تحديد المواقع العالمي (GPS)، وأجهزة الاستشعار، والطائرات بدون طيار، والذكاء الاصطناعي لإدارة الحقول على مستوى المناطق الصغيرة، مما يتيح قرارات أكثر دقة حول البَذر والري والتسميد والحصاد. تؤدي هذه المقاربة إلى زيادة الغلة والربحية، وتقليل استهلاك المدخلات والوقود، والحد من الأثر البيئي عبر ترشيد استخدام الأسمدة والمبيدات وتحسين صحة التربة. تشهد الزراعة الدقيقة نقلة نوعية بدخول نماذج التعلم العميق، والاستشعار عن بعد عالي الدقة، والروبوتات والآلات ذاتية التشغيل، التي تمكّن من التنبؤ بالغلة والآفات، وتنفيذ تدخلات مستهدفة آليًا، وتعزيز استدامة النظم الزراعية على المدى الطويل.

نقلات تقنية في الزراعة الدقيقة

TRL: 7-9

دمج الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة

يؤدي استخدام الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة إلى تحويل الزراعة الدقيقة من خلال تمكين تحليل مجموعات البيانات الضخمة والمعقدة المتعلقة بالتربة والمناخ ونمو المحاصيل:

- **نماذج التعلم العميق:** تُستخدم خوارزميات التعلم العميق، مثل الشبكات العصبية التلافيفية (CNNs) والشبكات العصبية المتكررة (RNNs)، للتنبؤ بغلة المحاصيل بدقة أكبر. تستطيع هذه النماذج معالجة البيانات المكانية والزمانية من مصادر مثل صور الأقمار الصناعية والطائرات بدون طيار لتحديد الأنماط التي تؤثر على صحة المحاصيل وإنتاجيتها. على سبيل المثال، تُستخدم الشبكات العصبية التلافيفية ثلاثية الأبعاد (3D-CNNs) لتحليل البيانات متعددة الأزمنة للتنبؤ بالغلة، بينما أظهر الجمع بين الشبكات العصبية التلافيفية وشبكات الذاكرة قصيرة المدى المطولة (LSTM) نتائج واعدة في تقدير محاصيل القمح.[1]
- **التحليلات التنبؤية:** تساعد النماذج التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي المزارعين على توقع مشاكل مثل تفشي الآفات ونقص العناصر الغذائية قبل أن تؤثر على الغلة. من خلال تحليل البيانات التاريخية واللحظية، يمكن لهذه الأنظمة اقتراح تدخلات محددة، مما يُحسّن استخدام الموارد مثل الأسمدة والمبيدات الحشرية.[2]

التطورات في الاستشعار عن بعد

توفر تقنيات الاستشعار عن بعد بيانات فعالة من حيث التكلفة وفي الوقت المناسب لمراقبة ظروف المحاصيل على مساحات واسعة:

- **صور الأقمار الصناعية والطائرات بدون طيار:** تُستخدم صور الأقمار الصناعية عالية الدقة من مصادر مثل سنتينل-2 (Sentinel-2) ولاندسات (Landsat)، إلى جانب بيانات الطائرات بدون طيار، لتقييم نمو المحاصيل وتحديد التباين داخل الحقول. تُساعد مؤشرات الغطاء النباتي، مثل مؤشر الفرق الطبيعي للغطاء النباتي (NDVI)، المُستمدة من هذه الصور في مراقبة صحة المحاصيل وتقدير الكتلة الحيوية.
- **التصوير الطيفي الفائق:** يتزايد استخدام أجهزة الاستشعار الطيفي الفائق في الزراعة الدقيقة. تستطيع هذه الأجهزة رصد التغيرات الدقيقة في الكيمياء الحيوية للأوراق، مما يسمح بالكشف المبكر عن الآفات والأمراض ونقص العناصر الغذائية.

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
الزراعة الدقيقة



حجم السوق العالمي[3]

قدر حجم السوق العالمي للزراعة الدقيقة بـ

10.96 مليار دولار

في عـــام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

21.55 مليار دولار

فـي عـــام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 14.48

1. Frontiers in Agronomy
2. omdena
3. PitchBook



8

المعـــــالجة البيولوجية

المعالجة البيولوجية أو الحيوية (Bioremediation) هي عملية تستخدم فيها الكائنات الحية، خصوصًا البكتيريا والفطريات والطحالب والنباتات، لتحليل الملوثات في التربة والمياه والهواء أو تحويلها إلى أشكال أقل سمية، معتمدة على الإنزيمات والعمليات الأيضية الطبيعية لهذه الكائنات. تمثل هذه التقنية خيارًا منخفض التكلفة وأكثر استدامة مقارنة بالطرق الكيميائية أو الفيزيائية التقليدية، وتُطبَّق اليوم لمعالجة النفايات الصناعية والزراعية، ومياه الصرف، والتلوث بالبترول والمعادن الثقيلة والملوثات الناشئة مثل المبيدات والمستحضرات الصيدلانية، مع تطور ملحوظ في استخدام البكتيريا الشعاعية، والأغشية الحيوية، والتقنيات الجزيئية وتقنية النانو والذكاء الاصطناعي لتعزيز الكفاءة واستهداف ملوثات معقدة مثل السلفونات المشبعة بالفلور ألكيل (PFAS).

نقلات تقنية في المعالجة البيولوجية

TRL: 6-8

تُركز التطورات الحديثة في مجال المعالجة البيولوجية (Bioremediation) على إيجاد حلول أكفأ وأكثر استدامةً وتخصصًا لتنظيف البيئة. تدمج هذه الابتكارات علم الأحياء الدقيقة مع مجالات علمية أخرى، مثل الهندسة الوراثية وتقنية النانو؛ لمعالجة مجموعة واسعة من الملوثات، بما في ذلك تلك التي يصعب تحليلها.[1]

كما يتضمن ذلك معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام كائنات دقيقة هوائية ولاهوائية، مما ينتج عنه مياه صرف مُصفّاة وفصل الرواسب المحتوية على كتلة ميكروبية مع الملوثات. وتُستخدم عمليات المعالجة البيولوجية إلى جانب العمليات الميكانيكية والتقنيات المتقدمة لتحقيق معالجة أكثر كفاءة للملوثات.[2]

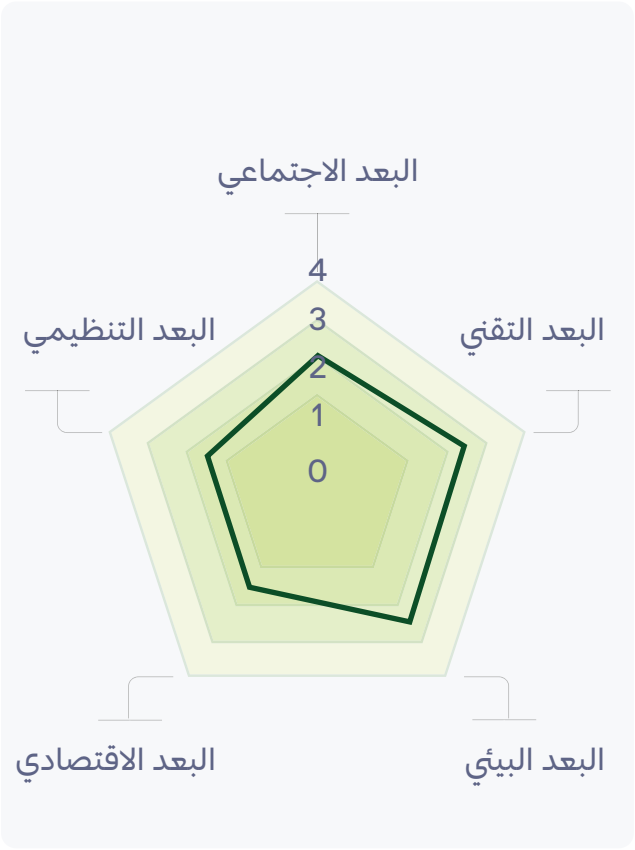
الأساليب الميكروبية والإنزيمية المحسنة

- **البكتيريا الشعاعية:** تكتسب هذه الميكروبات اهتمامًا متزايدًا بفضل مرونتها الأيضية وقدرتها على البقاء في البيئات القاسية. فهي تُنتج إنزيمات ومستقلبات ثانوية قادرة على إزالة وحصر مجموعة متنوعة من الملوثات الخطرة، بما في ذلك المبيدات الحشرية والمعادن الثقيلة والملوثات البترولية.[3]

دمج التقنيات المتقدمة

- **تقنيات "الأوميكس" (Omics):** تُوفر مجالات مثل "الميتاجينوميكس" (Metagenomics)، وتحليل النسخ الجيني "الميتاترانسكريبتومكس" (Meta-transcriptomics)، وتحليل البروتينات "الميتابروتومكس" (Meta-proteomics) رؤىً عميقة في المسارات الجينية والأيضية التي تستخدمها الكائنات الدقيقة لتحليل الملوثات. تُتيح هذه المعرفة تطوير سلالات مُحسّنة وراثيًا ذات قدرات تنظيف مُحسّنة.[4]
- **تقنية النانو:** يُعد دمج المواد النانوية مع العمليات الميكروبية نهجًا جديدًا يعزز كفاءة معالجة مياه الصرف الصحي. تُستخدم المواد النانوية الكربونية (مثل أكسيد الغرافين) والمواد النانوية المعدنية لإزالة الملوثات من خلال عمليات مثل الامتزاز والتحلل الضوئي.[5]
- **مواد البيرفلورو ألكيل والبولي فلورو ألكيل (PFAS):** لا تزال هذه المواد- التي يُطلق عليها الكيماويات الأبدية (Forever Chemicals) - تُشكل تحديًا كبيرًا نظرًا لمقاومتها للتحلل. تُركز الأبحاث الحالية على استراتيجيات مُتقدمة، تشمل استخدام المعالجات الفيزيائية والكيميائية المُسبقة والمحاليل الميكروبية المُهندَسة، لتفكيك هذه المواد الكيميائية المُستعصية.[6]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
المعالجة البيولوجية



حجم السوق العالمي[7]

قدر حجم السوق العالمي للمعالجة البيولوجية بـ

19.78 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

30.30 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 8.90

1. Frontiers in Microbiology
2. UNESCWA
3. Biodegradation
4. Waste Management Bulletin
5. Sustainable Chemistry for Climate Action
6. Soil & Environmental Health
7. PitchBook



9

المـــواد القابـــلة للتحلـل الحيوي

المـواد القابلـة للتحلـل الحيـوي والدائريـة (Biodegradable and Circular Materials) تقـود تحـولًا مـن اقتصـاد خطـي قائـم على "الاستخراج-الاسـتخدام-التخلص" إلى اقتصـاد دائري يُبقي المواد في أعلى قيمة ممكنة، ويُقلل النفايات والتلوث عبر تصميم منتجات يمكن إعادة استخدامها أو تدويرها أو تحللها بأمان في البيئة. تمكّن البوليمرات الحيوية والمكونـات المشـتقة مـن النباتـات والميكروبـات مـن اسـتبدال البلاسـتيك التقليـدي وتغذيـة سلاسـل قيمـة جديـدة قائمـة على تدويـر المـوارد وتحويـل النفايـات إلى مـواد أوليـة. تشـهد السـنوات الأخيرة نقلـة نوعيـة مـع ابتـكارات مثـل الألياف الإلكترونيـة القابلـة للتحلـل، وطـرق الطباعـة ثلاثيـة الأبعـاد للبوليمـرات الحيويـة المسـتخدمة في الإلكترونيـات، وبلاسـتيك حيـوي مبتكَـر، إلى جانـب دراسـات تفصيليـة لتـأثير اللدائـن الدقيقـة القابلـة للتحلـل في النظـم الزراعيـة، مـا يعمّـق فهـم الأثـر البـيئي ويفتـح فرصًـا لمـواد أكثر أمانًـا واسـتدامة.

نقلات تقنية في المواد القابلة للتحلل الحيوي

TRL: 3-8

الألياف الالكترونية القابلة للتحلل الحيوي (Biodegradable Fiber Electronics)

طور باحثون في جامعة سيول الوطنية (Seoul National University) بكوريا الجنوبية أليافًا موصلة قابلة للتحلل الحيوي بالكامل تعالج كلًا من النفايات الإلكترونية ونفايات النسيج من خلال العمل كمادة إلكترونية أثناء الاستخدام، ثم تتحلل طبيعيًا في التربة أو البيئات الغنية بالإنزيمات بعد انتهاء عمرها الافتراضي.[1]

تُصنع الألياف عن طريق دمج جسيمات تنجستن (Tungsten) دقيقة مع بوليمر (PBAT) القابل للتحلل الحيوي، وتُغطى بمادة بوليانهايدرايد (PBTPA). وقد أظهرت الألياف أداءً متفوقًا مع توصيل كهربائي يقارب 2,500 سيمنز/متر، وقدرة على التمدد بنسبة 38%، ومتانة عبر أكثر من 20 دورة غسيل و5,000 انحناء. نجح الفريق في إنشاء كُمّ (Sleeve) وظيفي مزود بأجهزة استشعار لدرجة الحرارة، وأقطاب كهربائية لتخطيط العضلات (EMG)، وملف طاقة لاسلكي يعمل بفعالية أثناء الاستخدام ثم يتحلل بيولوجيًا بالكامل خلال بضعة أشهر، مما يُقدّم حلاً مستدامًا لمشكلة نفايات النسيج العالمية، التي تُقدّر بـ 92 مليون طن سنويًا.[2]

طريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد للبوليمرات القابلة للتحلل الحيوي

طور فريق بحثي في جامعة سنغافورة للتقنية والتصميم (Singapore University of Technology and Design) طريقة مبتكرة للطباعة ثلاثية الأبعاد تحول المواد القابلة للتحلل الحيوي، وتحديدًا أسيتات السليلوز (cellulose acetate) (بلاستيك مشتق من النباتات)، إلى هياكل موصلة كهربائيًا تستخدم في تصنيع الإلكترونيات المستدامة. يُعد هذا الإنجاز تقدمًا مهمًا في التغلب على التحدي الذي تطرحه أسيتات السليلوز؛ إذ إنها لا تتحمل درجات الحرارة العالية التي تتطلبها الطباعة ثلاثية الأبعاد التقليدية مثل النمذجة بالترسيب المنصهر دون أن تتحلل.[3]

تُظهر الدراسة كيف تُتيح هذه الطريقة الجديدة تصنيع الأجهزة الإلكترونية مباشرةً باستخدام مواد مستدامة، مما يمثل خطوة كبيرة نحو إيجاد بدائل صديقة للبيئة للبوليمرات الصناعية التقليدية المستخدمة في صناعة الإلكترونيات.[4]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
المواد القابلة للتحلل الحيوي



حجم السوق العالمي[5]

قدر حجم السوق العالمي للمواد القابلة للتحلل الحيوي بـ

9.12 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

13.10 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 7.51

1. TechXplore
2. Nature
3. TechXplore
4. ACS Applied Engineering Materials
5. PitchBook



10

الـوقـــــود الحيـــوي

الوقـود الحيـوي (Biofuel) هـو وقـود متجـدد يُنتَج مـن الكتلـة الحيويـة مثـل النباتـات والمخلفـات الزراعيـة والنفايـات العضويـة، ويعمـل ضمـن دورة كربونيـة أقصر مـن الوقـود التقليـدي، ممـا يساعـد على خفـض صافي انبعاثـات الغـازات الدفيئـة مـع تعزيـز أمـن الطاقـة والتنميـة الريفيـة. يتركـز اسـتخدامه حاليًـا في النقـل عبـر الإيثانـول الحيـوي والديـزل الحيـوي ووقـود الطيـران المسـتدام، مـع توسـع في التدفئـة وتوليـد الكهربـاء، بينمـا تدفـع الابتـكارات في وقـود الطحالـب مـن الجيـل الثالـث، والمعالجـة الحيويـة المتكاملـة للكتلـة الحيويـة الليغنوسـيلولوزية (Lignocellulosic Biomass)، وتقنيـات تحويـل النفايـات واللدائـن إلى زيـوت حيويـة، ومحفـزات جديـدة منخفضـة الطاقـة لإنتـاج الديـزل الحيـوي، نحـو وقـود أكفأ وأكثـر اسـتدامةً وقابليـةً للتوسـع التجـاري.

نقلات تقنية في الوقود الحيوي

TRL: 3-9

تحسين الكفاءة الاقتصادية للجيل الثالث من الوقود الحيوي القائم على الطحالب

في عام 2025، حسّنت منشآت الوقود الحيوي القائم على الطحالب من الجيل الثالث كفاءتها الاقتصادية بعد سنوات من البحث والتطوير. تم تحقيق هذا الإنجاز بفضل التقدم في تطوير سلالات الطحالب المعدلة وراثيًا التي تحتوي على ضعف كمية الزيت مقارنة بالأجيال السابقة، كما هو الحال مع شركة فيريدوس (Viridos) .

بالإضافة إلى ذلك، أدت التصاميم المبتكرة لـ "أحواض الطحالب" التي تستخدم ثاني أكسيد الكربون الملتقط من المصانع إلى جعل العملية أكثر استدامة وأقل تأثيرًا على البيئة، حيث أصبحت العملية ذات أثر كربوني سلبي. وبذلك، لم تعد هذه المنشآت مجرد تجارب مختبرية، بل تحولت إلى عمليات تجارية تحقق أرباحًا. [1]

أيضًا، تحرز شركات مثل (BRK Technology) تقدمًا ملحوظًا في تطوير الوقود الحيوي من الطحالب، والتي تعتبر موادًّا واعدةً نظرًا لإمكانية زراعتها على أراضٍ غير صالحة للزراعة وعدم منافستها للمحاصيل الغذائية، مما يجعلها خيارًا مستدامًا لتصنيع الوقود الحيوي. [2]

نقلة في إنتاج الديزل الحيوي تَعِدُ بوقود مستدام بتكلفة منخفضة

طوّر باحثون في جامعة كاليفورنيا سانتا كروز (University of California, Santa Cruz)، طريقةً جديدةً لإنتاج الديزل الحيوي من نفايات الزيوت النباتية، وهي طريقة أكثر كفاءةً في استخدام الطاقة، وفعاليةً من حيث التكلفة، وقابلة للتطوير مقارنةً بالعمليات التقليدية. وتستخدم هذه الطريقة مُحفِّز رباعي ميثوكسي بورات الصوديوم ($NaB(OMe)_4$) لتحويل نفايات الزيوت عند درجة حرارة منخفضة (حوالي 40 درجة مئوية) وفي أقل من ساعة، وهي مدة أقل بكثير من درجات الحرارة العالية المُعتادة في إنتاج الديزل الحيوي الحالي.

يُبسّط هذا النهج عملية فصل الديزل الحيوي عن المنتجات الثانوية، مما يُقلّل الحاجة إلى التنقية المُستهلِكة للطاقة. والأهم من ذلك، أنه يُمكن تجديد المُحفِّز المُكلِّف عبر المنتجات الثانوية، مما يُخفِّض التكاليف على المدى الطويل. تُحقِّق هذه العملية تحويلًا يصل إلى حوالي 85 % من الزيوت النباتية المُستخدَمة إلى ديزل حيوي، حيث يُلبّي هذا الوقود معظم معايير الصناعة تقريبًا لاستخدامه في المركبات الثقيلة، على الرغم من أن محتواه المائي لا يزال مرتفعًا بعض الشيء ويحتاج إلى تكرير على نطاق صناعي. [3]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
الوقود الحيوي



حجم السوق العالمي [4]

قدر حجم السوق العالمي للوقود الحيوي بـ

146.66 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

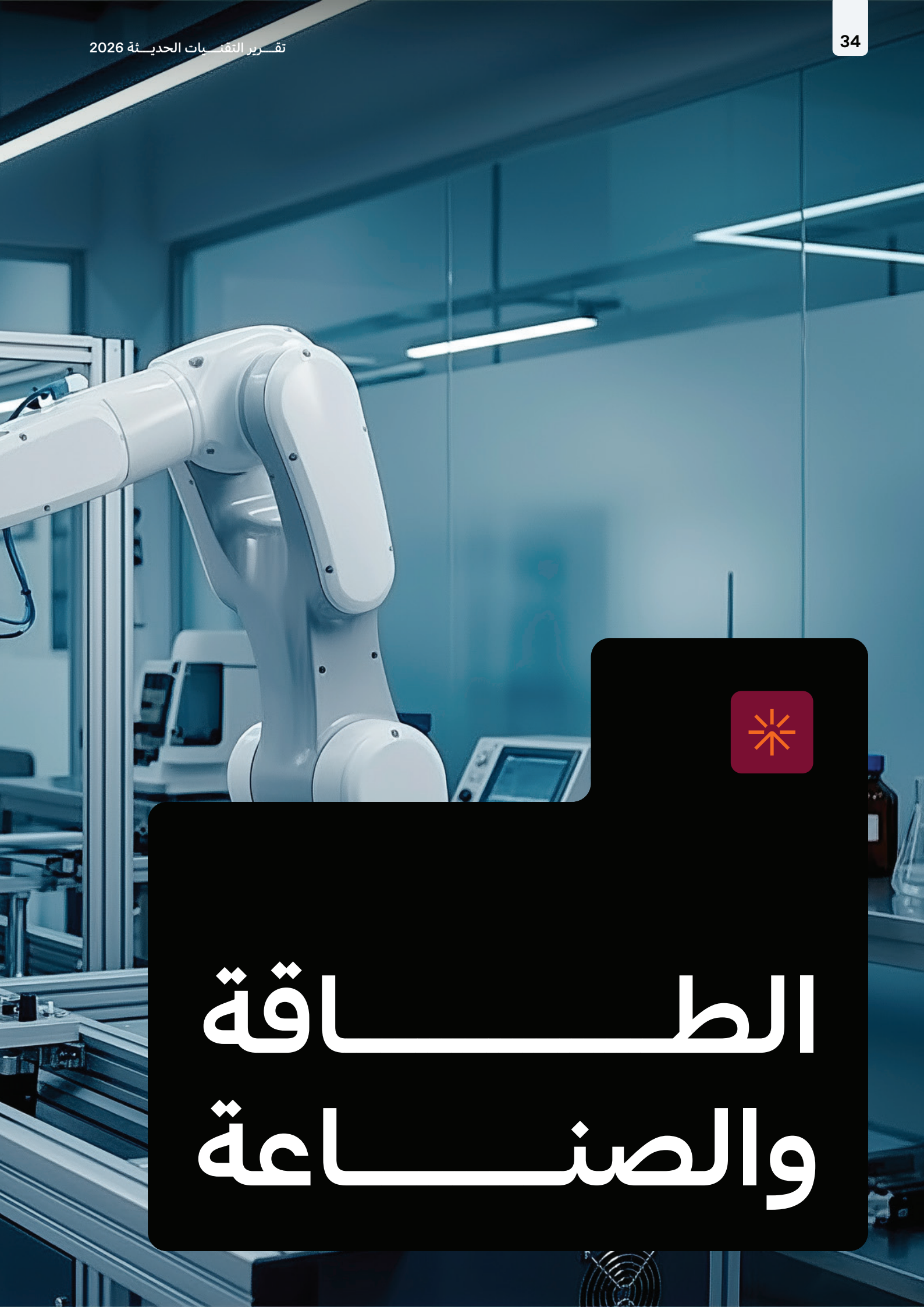
162.53 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 2.07

1. esgtoday
2. Biofuels-News
3. Bioenergy, Biofuels, and Biorefinery
4. PitchBook



الطـــــاقة والصنـــــاعة





11

الجيـل القادمـ مـــن تقنيـــات الهيـدروجين

تقنيات الهيدروجين من الجيل القادمـ تعيد تشكيل سلسلة القيمة بالكامل، من الإنتاج إلى التخزين والاستخدامـ، عبر مسارات جديدة مثل الهيدروجين الجيولوجي الطبيعي، والتحويل الحراري بالموجات الدقيقة للنفايات البلاستيكية، والتحليل الكهربائي المباشر لمياه البحر من دون تحلية مسبقة. كما تُحسّن المفاعلات الشمسية الحرارية عالية الحرارة، والأغشية المعدنية الرقيقة، والحفّازات قليلة البلاتين كفاءة التحليل الكهربائي وخفض تكلفته، بينما توفّر أنظمة التخزين بالحالة الصلبة (هيدريدات معدنية أشبه بـ "بطارية هيدروجين") حلولًا أكثر أمانًا وكثافة للطاقة. كما تستخدمـ أغشية البلاديومـ فائقة الرقة لتحسين كفاءة إنتاج الهيدروجين وخفض تكلفته بشكل كبير؛ مما يعزز جدوى دمج الهيدروجين في أنظمة الطاقة المتجددة على نطاق واسع.

نقلات تقنية في الجيل القادم من تقنيات الهيدروجين

TRL: 6-8

احتياطيات هائلة من الهيدروجين الطبيعي "الذهبي"

تشير الأبحاث إلى أن الأرض تُنتج وتُخزن كميات هائلة من الهيدروجين، المعروف باسم الهيدروجين "الذهبي" أو "الهيدروجين الجيولوجي"، بشكل طبيعي من خلال تفاعلات الماء والصخور في أعماق الأرض. وبخلاف الهيدروجين المُصنّع (الأخضر والأزرق وغيرهما)، يُعدّ هذا الهيدروجين موردًا طبيعيًا يُمكن استخراجه، على غرار الغاز الطبيعي. وتشير التقديرات الأولية إلى أن الاحتياطيات العالمية قد تصل إلى ملايين الأطنان، مما يُمثل مصدرًا وفيرًا للطاقة النظيفة. وإذا أمكن استخراج نسبة صغيرة منه، فقد يُوفر طاقة كافية لمئات الآلاف من السنين، مُوفرًا مصدر وقود نظيف رخيص ووفير لا يتطلب طاقة لإنتاجه، بل فقط لاستخراجه.[1]

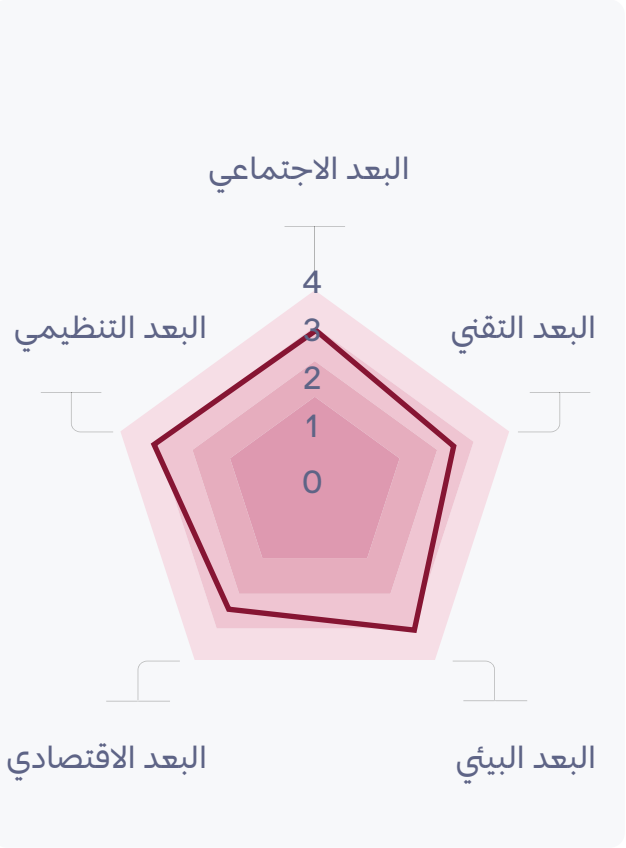
حفّاز عالي الكفاءة يستخدم كمية أقل من البلاتينيوم

تُشكل التكلفة العالية للبلاتينيوم عائقًا رئيسيًا أمام انتشار استخدام خلايا وقود الهيدروجين. وقد طوّر فريق بحثي كوري حفّازًا (catalyst) رائدًا من خلال إنشاء بنية نانوية تُرتّب فيها ذرات البلاتينيوم والكوبالت في نمط طبقي مُحدد. تُعزز هذه البنية الفريدة النشاط التحفيزي لكل ذرة بلاتينيوم على حدة، مما يزيد من كفاءة التفاعل. نتيجةً لذلك، يستخدم هذا المحفز ثلث كمية المعدن الثمين فقط، متفوقًا في أدائه على الحفّازات التجارية الحالية من حيث الفعالية والمتانة، مما يمهد الطريق لمركبات خلايا الوقود بأسعار معقولة.[2]

تخزين الهيدروجين ببطارية الحالة الصلبة

طور مهندسو معهد ماساتشوستس للتقنية (MIT) طريقةً تستخدم أغشية البلاديوم فائقة الرقة لتحسين كفاءة إنتاج الهيدروجين وخفض تكلفته بشكل كبير. في التحليل الكهربائي التقليدي، يلزم وجود غشاء للحفاظ على فصل الأكسجين والهيدروجين الناتجين. يتميز غشاء رقائق البلاديوم الجديد برقته الفائقة وانتقائيته العالية، حيث يسمح بمرور الهيدروجين النقي فقط، ويمنع الغازات الأخرى بفعالية. ينتج عن ذلك إنتاج هيدروجين أنقى، ويُقلل من الجهد الزائد، وهو مصدر رئيسي لهدر الطاقة في أجهزة التحليل الكهربائي. يمكن أن يؤدي هذا الابتكار إلى أنظمة تحليل كهربائي أصغر حجمًا وأكثر كفاءةً وأقل تكلفة.[3]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
الجيل القادم من تقنيات الهيدروجين



حجم السوق العالمي[4]

قدر حجم السوق العالمي لتوليد الهيدروجين بـ

170.7 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

268.3 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 9.46

1. Nature Reviews Earth & Environment
2. Energy & Environmental Science
3. MIT
4. PitchBook



12

تخزين الطاقة المتجددة

تخزين الطاقة المتجددة يتطور نحو حلول طويلة الأمد ومنخفضة التكلفة لدعم الانتشار الواسع للطاقة الشمسية والرياح، عبر بطاريات الحديد-الهواء (Iron-Air Batteries)، وبطاريات التدفق (Flow Batteries)، وأنظمة هجينة تجمع البطاريات مع المكثفات الفائقة لتحسين الاستجابة واستقرار الشبكة. تُعزَّز هذه المنظومات بابتكارات في بطاريات الحالة الصلبة للصوديوم والزنك، ومُضافات جديدة لبطاريات التدفق، إضافة إلى تطوير بطاريات ليثيوم-ثاني أكسيد الكربون التي لا تقتصر على تخزين الطاقة فحسب، بل تمتص أيضًا ثاني أكسيد الكربون الجوي أثناء التفريغ، واستكشاف إمكانات الأمونيا كناقل للطاقة المتجددة طويل الأمد وعالي الكثافة، مع تطبيق استراتيجيات تحكم متقدمة في أنظمة هجينة على مستوى الشبكة لتحقيق استقرار أعلى في التردد والجُهد في نظم الطاقة منخفضة الكربون.

نقلات تقنية في تخزين الطاقة المتجددة

TRL: 3-8

مادة مضافة مُهندَسة تُتيح تخزين الطاقة المتجددة بتكلفة منخفضة

صمّم باحثون في جامعة ويسكونسن-ماديسون (University of Wisconsin–Madison) مادة مضافة (additive) صائدة (trapper) ثنائية الاستقطاب (zwitterionic) قابلة للذوبان في الماء، تُحسّن أداء بطاريات التدفق المائي البروميدي (bromide aqueous flow batteries). تربط هذه المادة أيونات البروميد في مُركّبات أكبر لا تستطيع عبور الغشاء (membrane)، وتُثبّط الترسيبَ أو تكوُّنَ الغازات، وتُثبّت الإلكتروليت. بفضل هذه المادة، عملت خلايا البطارية لما يقارب شهرين دون تحلُّل، مُقارنةً بأيامٍ عادةً، مما يفتح آفاقًا جديدةً لتخزين التدفق على نطاق الشبكة الكهربائية بتكلفة اقتصادية.[1]

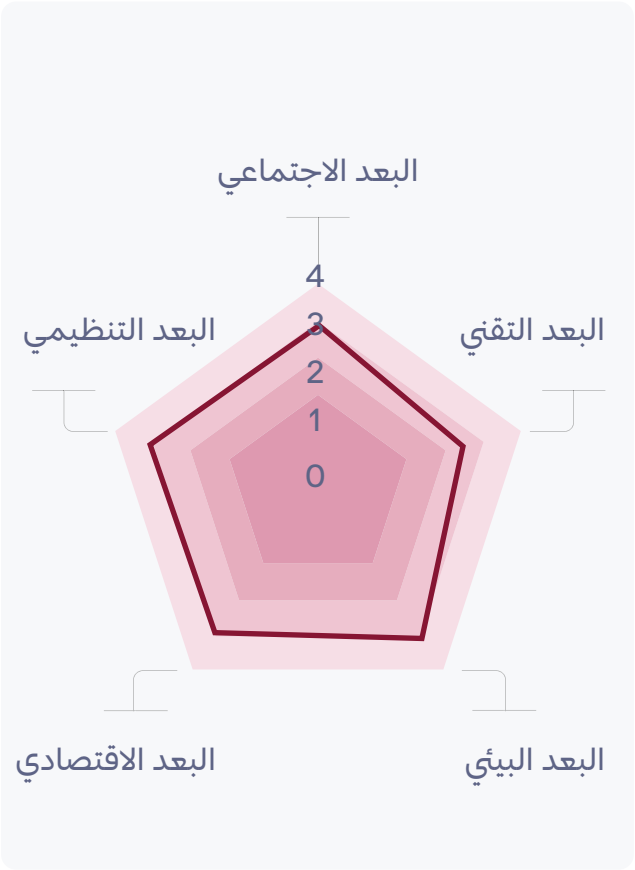
نظام طاقة متجددة هجين باستراتيجيات تحكم متقدمة لتحسين استقرار الشبكة وجودة الطاقة

تقدم دراسة نُشرت في تقارير نيتشر العلمية (Nature Scientific Reports) بنية هجينة لأنظمة الطاقة المتجددة والشبكة (RES–grid)، تجمع بين البطاريات، والمكثفات الفائقة، وأنظمة نقل التيار المتردد المرنة Flexible AC Transmission Systems (FACTS) ومحددات تيار الخلل فائقة التوصيل (superconducting fault current limiters)، ويتم التحكم فيها جميعًا بواسطة خوارزمية قصور ذاتي تكيفي تناسبي-تكاملي-افتراضي (adaptive PI-virtual inertia algorithm). تُظهر عمليات المحاكاة (والتحقق من صحتها باستخدام بيانات الشبكة المصغرة الحقيقية) تشوهًا توافقيًا كليًا (THD) أقل من 1.8%، وانحرافات الجهد ±2.1%، وانحرافات التردد ±0.1 هرتز، واستقرار أسرع بنسبة 40% من التحكم التنبؤي (Model Predictive Control (MPC). يوفر هذا النظام إطار تحكم موحدًا وقابلًا للتطوير لشبكات الطاقة المتجددة عالية الاختراق.[2]

تقدّمٌ كبيرٌ في عمر بطاريات أيونات الزنك عبر التثبيت الهيكلي

قدّم باحثون في جامعة سيدني للتقنية (The University of Technology Sydney) وجامعة مانشستر (The University of Manchester) طريقةً تعتمد على هندسة تأثير جان-تيلر (Jahn-Teller effect) التعاونية لتحقيق استقرار (stabilize) مهبط بطاريات أيونات الزنك المائية (cathode of aqueous zinc-ion batteries). تدوم هذه البطارية لأكثر من 5000 دورة شحن/تفريغ عند 5 درجات مئوية، مع احتفاظٍ بسعةٍ تبلغ حوالي 165 مللي أمبير-ساعة/غرام - أي أطول بنحو 50% من الأنظمة السابقة - مما يُوفّر بديلاً أكثر أمانًا ومنخفض التكلفة للتخزين على نطاق الشبكة.[3]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
تخزين الطاقة المتجددة



حجم السوق العالمي[4]

قدر حجم السوق العالمي لتخزين الطاقة المتجددة بـ

164.48 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

505.98 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 25.20

1. Nature
2. Nature Scientific Reports
3. Energy Storage
4. PitchBook



13

مراكز البيـــانات المزودة بالطاقة النوويـة

مراكـز البيانـات المـزودة بالطاقـة النوويـة تسـتخدم مفـاعلات، خصوصًـا المفـاعلات المعيارية الصغيرة (SMRs)، لتوفير طاقة أساسية مستقرة ومنخفضة الكربون لأحمال الحوسبة والـذكاء الاصطناعـي المتزايـدة. تشير تحليلات حديثة إلى أن التوسع في القـدرة النووية الجديدة يمكن أن يسهم في تلبية نحو 10% من نمو استهلاك الطاقة في مراكز البيانات خلال العقد المقبل، مع خطط لإضافة عشرات الجيجاواط من القدرة النووية عالميًـا. بالتـوازي، تُبرم شركات التقنيـة الـكبرى مثـل مايكروسـوفت وأمـازون وجوجـل اتفاقـات طويلـة الأجـل مـع مشـغلي المحطـات النوويـة أو تسـتثمر في مفـاعلات متقدمـة وميكرويـة مخصصـة لمراكـز البيانـات، مـا يرسـخ دور الطاقـة النوويـة كمصـدر موثـوق لتغذيـة البنيـة التحتيـة الرقميـة المسـتقبلية بالطاقـة.

نقلات تقنية في مراكز البيانات المزودة بالطاقة النووية

TRL: 4-6

اتفاق مايكروسوفت (Microsoft) وكونستليشن إنيرجي (Constellation Energy)

أبرمت شركة مايكروسوفت (Microsoft) اتفاقًا طويل الأجل مدته عشرون عامًا مع شركة كونستليشن إنيرجي (Constellation Energy) لإعادة تشغيل الوحدة الأولى من محطة الطاقة النووية في جزيرة ثري مايل (Three Mile Island) بولاية بنسلفانيا. ومن المقرر أن تستأنف هذه المنشأة، التي تُعرف حاليًا باسم "مركز كرين للطاقة النظيفة"، عملياتها في عام 2027، لتزوّد مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي التابعة لمايكروسوفت بالطاقة ضمن شبكة PJM الإقليمية. [1]

عقد أمازون ويب سيرفيسز (AWS) وتالين إنيرجي (Talen Energy)

وقّعت شركة أمازون ويب سيرفيسز (AWS) عقدًا لشراء حصة من إنتاج الطاقة تقدر بـ 960 ميجاواط من الطاقة من محطة سسكويهانا (Susquehanna) للطاقة النووية التابعة لشركة تالين إنيرجي (Talen Energy) في بنسلفانيا. ويتضمن هذا الاتفاق توفير مصدر طاقة مخصص ومنخفض الكربون لمراكز بيانات أمازون، بما يتماشى مع أهداف الاستدامة. [2]

مبادرات جوجل (Google) الاستراتيجية للطاقة النووية

أعلنت شركة جوجل (Google) عن خطط لتطوير ثلاثة مشاريع متقدمة للطاقة النووية، تبلغ سعة كل منها 600 ميجاواط، بهدف تشغيل مراكز بياناتها. [3] كما عقدت جوجل شراكة مع شركة كايروس باور (Kairos Power) لتطوير مفاعلات نووية متقدمة تخدم مراكز البيانات التابعة لها. ومن المتوقع أن يُنتج المشروع الأول، "هيرمس 2" (Hermes 2)، نحو 50 ميجاواط من الطاقة تُضاف إلى شبكة هيئة وادي تينيسي (Tennessee Valley Authority)، مما سيسهم في دعم مراكز بيانات جوجل في ولايتي ألاباما وتينيسي. [4]

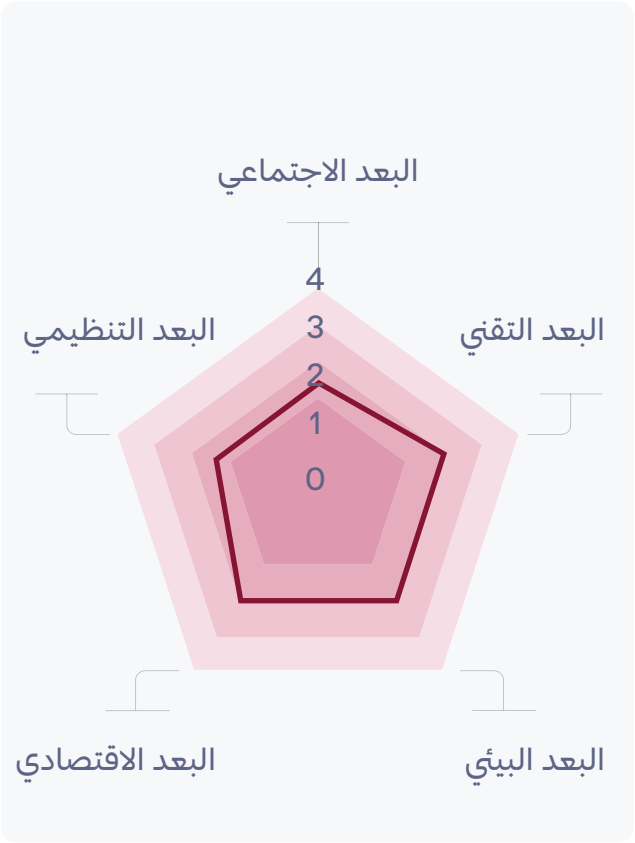
مفاعل MK60 من شركة ديب أتوميك (Deep Atomic)

أعلنت شركة ديب أتوميك (Deep Atomic) عن مفاعل MK60، وهو مفاعل معياري صغير مصمم خصيصًا لتلبية احتياجات مراكز البيانات من الطاقة والتبريد. ويهدف هذا المفاعل المبتكر إلى توفير حل طاقة موثوق وقابل للتوسع لتلبية الاحتياجات المتزايدة للبنية التحتية الرقمية. [5]

مفاعل آلو بود (Aalo Pod) الميكروي (Microreactor) من آلو أتوميكس (Aalo Atomics)

أطلقت شركة آلو أتوميكس (Aalo Atomics) مفاعل آلو بود (Aalo Pod)، وهو مفاعل "معياري فائق" بقدرة 50 ميجاواط كهربائية، مصمم خصيصًا لتطبيقات مراكز البيانات. يعتمد المفاعل على تقنية المفاعل المتقدم Aalo-1، ويوفر مصدر طاقة مدمج وفعال يلبي المتطلبات المتزايدة للطاقة في مراكز البيانات الحديثة. [6]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
مراكز البيانات المزودة بالطاقة النووية



حجم السوق العالمي [7]

قدر حجم السوق العالمي لمراكز البيانات بـ

281.75 مليار دولار

في عـــام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

519.43 مليار دولار

في عـــام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 13.01

1. Reuters
2. U.S. Energy Information Administration
3. Neutron Bytes
4. CNBC
5. World Nuclear News
6. World Nuclear News
7. PitchBook



14

المواد ثنائية الأبعاد

المـواد ثنائيـة الأبعـاد (2D Materials) تـعبّر عـن طبقـات ذرّيـة أو شـبه ذرّيـة تتمتـع بخصائص إلكترونية وميكانيكية وبصرية استثنائية، تقود موجة جديدة من الابتكارات في الإلكترونيات والضوئيات، وتخزين الطاقة، والمواد المركّبة، والتطبيقات الطبية الحيوية. يشـهد المجـال نـقلات بحثيـة بـارزة تشـمل اكتشـاف مـواد جديـدة مثـل بوريـد النحـاس، وتصميـم مـواد هجينة مثـل "الغـلافين" (Glaphene)، وتطوير بنى غير متجانسة لأجهزة التيراهيرتـز، وتحكمًـا كمّيًـا في الإكسـيتونات (excitons) والباعثـات الضوئيـة، إلى جانـب تقـدم في طـرق التخليـق القابلـة للتوسـع واسـتخدام العيـوب الدورانيـة (spin defects) في نيتريـد البـورون السـداسي (h-BN) كمستشـعرات كمّيـة في درجـة حـرارة الغرفـة، ممـا يمهّـد لـعصر أشـباه مـوصلات وواجهـات كمّيـة تتجـاوز حـدود السـيليكون التقليـدي.

نقلات تقنية في المواد ثنائية الأبعاد

TRL: 3-5

اكتشاف بوريد النحاس (Copper Boride) كمادة ثنائية الأبعاد جديدة

أكّد باحثون في جامعة رايس (Rice University) تنبؤًا يعود إلى عقد من الزمن من خلال اكتشاف مادة ثنائية الأبعاد جديدة تُعرف باسم بوريد النحاس (Copper Boride). وعلى خلاف الفرضيات السابقة، تُشكّل ذرات البورون مركبًا ثنائي الأبعاد مميزًا مع النحاس عند ترسيبها على ركائز نحاسية، مما يفتح آفاقًا جديدة لتطبيقات محتملة في مجالات الإلكترونيات، والطاقة، والتحفيز الكيميائي. [1]

تطوير مواد هجينة ثنائية الأبعاد لتطبيقات الإلكترونيات والكمّيات

تمكّن فريق بحثي في جامعة رايس من ابتكار مادة هجينة ثنائية الأبعاد حقيقية أطلق عليها اسم "الغلافين" (Glaphene)، والتي تجمع بين الغرافين ونيتريد البورون السداسي (h-BN) . ويُعد هذا التطور خطوة أساسية نحو تصميم مواد هجينة ثنائية الأبعاد مُخصصة لتلبية احتياجات التطبيقات الإلكترونية والتقنيات الكمّية. [2]

تطوير حساس غاز الأمونيا عالي الأداء

طور فريق بحثي حساسًا عالي الأداء لغاز الأمونيا (NH_3) باستخدام مركب من ثنائي سيلينيد الموليبدينوم ($MoSe_2$)، والبولي أنيلين (PANI)، و($Ti_3C_2T_x$ MXene). ويُظهر هذا الحساس إمكانيات واعدة للتطبيقات في مجالات التشخيص الطبي والمراقبة الصناعية. [3]

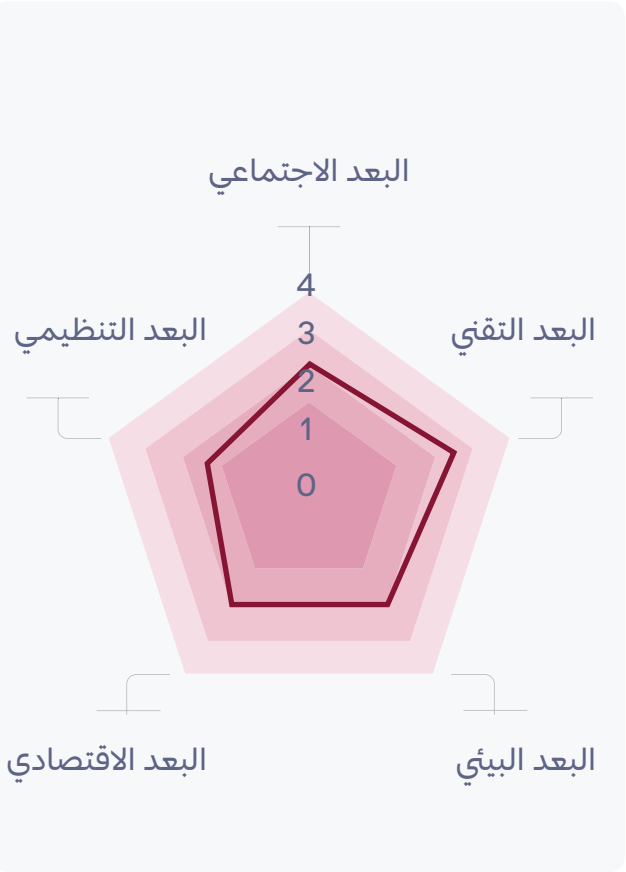
تركيب مغاير من الغرافين ونيتريد البورون السداسي لأجهزة التيراهيرتز

قدّم فريق بحثي من أستراليا بنية مغايرة أو غير متجانسة (Heterostructure) من الغرافين ونيتريد البورون السداسي (h-BN) بتفاعلات فان ديرفالس (van der Waals)، والذي يُمكّن من ضبط كهربائي فائق(< 30 ديسيبل) في أجهزة التيراهيرتز، مما يُظهر تقدمًا في الكواشف الضوئية القابلة للضبط ضمن نطاق التيراهيرتز. [4]

الاستشعار الكمّي باستخدام المواد ثنائية الأبعاد

أظهر فيزيائيون في جامعة كامبريدج (University of Cambridge) إمكانية استخدام العيوب الدورانية (spin defects) في نيتريد البورون السداسي (h-BN) كمستشعرات قوية تعمل في درجة حرارة الغرفة، وقادرة على كشف الحقول المغناطيسية الاتجاهية على مقياس النانومتر، مما يُمثّل خطوة مهمة نحو تطبيقات عملية لتقنيات الكمّ. [5]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
المواد ثنائية الأبعاد



حجم السوق العالمي [6]

قدر حجم السوق العالمي للمواد ثنائية الأبعاد بـ

2.67 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

3.24 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 2.89

1. Science Advances
2. Rice University
3. npj 2D Materials and Applications
4. npj 2D Materials and Applications
5. ScienceDaily
6. precedenceresearch



15

المواد المستجيبة

المواد المستجيبة (Responsive Materials) هي مواد ذكية تغيّر خصائصها الفيزيائية أو الكيميائية بطريقة قابلة للتحكم استجابةً لمحفزات مثل الحرارة والضوء والرقم الهيدروجيني والحقول الكهربائية أو المغناطيسية، مستندةً إلى بوليمرات وجزيئات مُصمَّمة بدقة. يفتح هذا السلوك التكيفي المجال لتطبيقات واسعة في توصيل الأدوية المستهدِف، وهندسة الأنسجة، والاستشعار الحيوي، والطلاءات والمنسوجات الذكية، وتحفيز المعالجات البيئية، إضافةً إلى أنظمة ميكانيكية وطاقة متقدمة. تُبرز التطورات الحديثة مفاهيم رائدة مثل المواد الروبوتية القابلة لإعادة التشكيل، والطلاءات ذاتية المعالجة، والمواد الفائقة الميكانيكية، وأنظمة حصد الطاقة من الطرق، والروبوتات اللينة القابلة للارتداء، ما يمهّد لتقنيات بنى تحتية وأجهزة أكثر استدامة وذكاءً.

نقلات تقنية في المواد المستجيبة

TRL: 3-8

الطلاءات المضادة للتآكل ذاتية المعالجة

تُمكّن التطورات في تقنيات الطلاء الآن أسطحًا قادرة على إصلاح نفسها ذاتيًا بعد التلف، مما يزيد من متانتها في البيئات التآكلية. تدمج هذه الطلاءات مواد كيميائية مستجيبة تُحفّز تفاعلات المعالجة عند حدوث خدوش أو شقوق دقيقة، مما يُعيد وظيفة الحماية دون تدخل بشري. تُعد هذه القدرة بالغة الأهمية لخطوط الأنابيب والسفن البحرية والبنية التحتية الصناعية؛ حيث تُعدّ مقاومة التآكل أمرًا بالغ الأهمية للسلامة وخفض تكاليف الصيانة. ويُحدد البحث المنشور في مجلة (Coatings) الخطوات الرئيسية اللازمة للانتقال من التجارب المعملية إلى التطبيق الصناعي.[1]

المواد الفائقة الميكانيكية

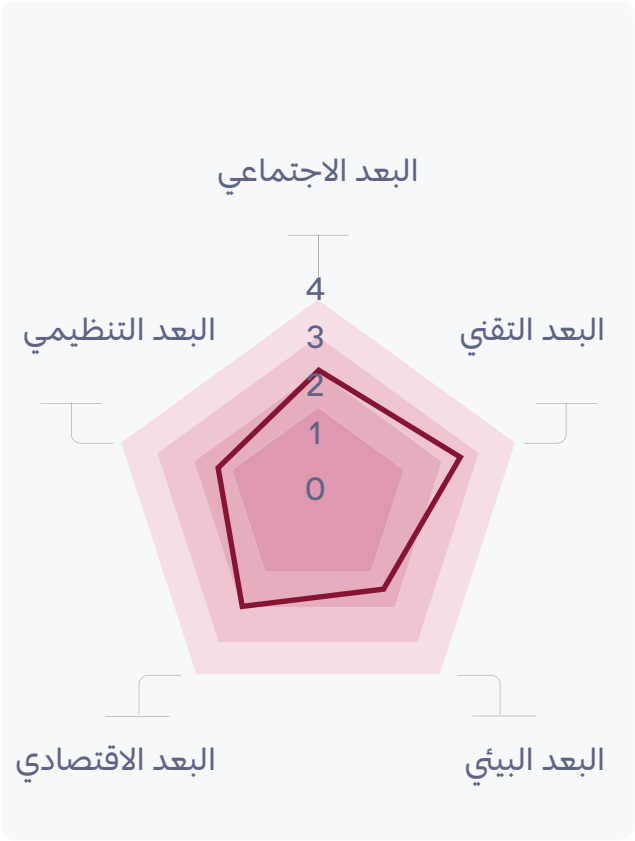
المواد الفائقة الميكانيكية القابلة للانطباق (snap-through metamaterials) هي هياكل هندسية قادرة على التبديل بسرعة بين حالتي توازن أو أكثر، مما يُنتج تغييرات سريعة وكبيرة وقابلة للبرمجة في الشكل. مؤخرًا، وسّع الباحثون نطاق تصميم هذه الأنظمة، مُبرزين قدرتها على امتصاص الطاقة، وتخفيف الصدمات، والعمل كوحدات تحكم عالية الاستجابة. ونظرًا لسلوكها الفريد المدفوع بعدم الاستقرار، يُنظر حاليًا في استخدام هذه المواد في الجيل القادم من الروبوتات اللينة، وأنظمة الطيران والفضاء القابلة للنشر، والهياكل الوقائية. [2]

وقد تم تطوير مواد بناء مصممة للتكيف بفعالية مع الظروف المناخية المتغيرة، مع التركيز على كفاءة الطاقة وراحة السكان. تتميز هذه المواد بقدرتها على تنظيم انتقال الحرارة بشكل ديناميكي، والاستجابة للرطوبة، ودمج خصائص الطاقة المتجددة، مما يجعلها حيوية للعمارة المقاومة لتغير المناخ. ومن شأن اعتمادها أن يُسهم في خفض استهلاك الطاقة في المباني بشكل كبير، ودعم التنمية الحضرية المستدامة، ومواءمة ممارسات البناء مع أهداف المناخ العالمية.[3]

تحسين حصد الطاقة من خلال دمج المواد الذكية في البنية التحتية للطرق

قدمت دراسة حديثة نظامًا هجينًا جديدًا يدمج سبائك الذاكرة الشكلية (SMAs) مع مواد كهروضغطية (piezoelectric) لتحسين تجميع الطاقة من أسطح الطرق. تُولّد المواد الكهروضغطية الكهرباء من الاهتزازات الميكانيكية، لكنها تفقد كفاءتها تحت ضغط غير منتظم. تُثبّت سبائك الذاكرة الشكلية، بفضل تشوّهها القابل للانعكاس تحت تأثير الإجهاد وتغيرات درجة الحرارة، الاهتزازات وتُحسّن تجميع الطاقة. تُظهر المحاكاة العددية أن هذا النظام الهجين يُمكنه زيادة إنتاج الكهرباء بنسبة 36 % وإطالة عمره الافتراضي بنسبة 67 % من خلال تقليل تقلبات الإجهاد.[4]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
المواد المستجيبة



حجم السوق العالمي [6]

قدر حجم السوق العالمي للمواد الذكية بـ

71.91 مليار دولار

في عـــام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

126.07 مليار دولار

في عـــام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 11.88

1. Coatings
2. Responsive Materials
3. Discover Applied Sciences
4. Journal of Engineering Research
5. PitchBook



اقتصاديـــات المستـــقبل





16

تشـــفير ما بعد الكم

تشفير ما بعد الكم (PQC) يطوّر خوارزميات مفتاح عام (Public-Key Algorithms) كلاسيكية جديدة مقاومة لهجمات الحواسيب الكمية، ليحل محل خوارزميات RSA و ECC أو يعززهما ضمن بروتوكولات مثل TLS وVPN وأنظمة إدارة المفاتيح السحابية، مع دعم نشر هجين يجمع بين الخوارزميات الحالية وخوارزميات PQC لضمان التوافق المرحلي. شهد هذا المجال مؤخرًا خطوات حاسمة نحو التبني العملي، مع إقرار معايير جديدة تشمل آليات تغليف المفاتيح (KEM) والتوقيع الرقمي المقاوِمة للحواسيب الكمية. يُطلق مزودو الخدمات السحابية وشركات التقنية حلولًا هجينة تجمع بين الخوارزميات التقليدية والمقاوِمة للكم لتعزيز الأمان تدريجيًا، وقد بدأ انتشار هذه الحلول في بروتوكولات الإنترنت وتطبيقات الاتصالات. كما يواصل الباحثون تحسين الموثوقية وكشف الهجمات الجانبية المحتملة، مع استكشاف أدوات توليد العشوائية الكمية لتعزيز الأمان المستقبلي.

نقلات تقنية في تشفير ما بعد الكم

TRL: 6-8

المعهد الوطني للمعايير والتقنية يعتمد معايير جديدة للتشفير ما بعد الكمي

اختار المعهد الوطني للمعايير والتقنية في الولايات المتحدة (NIST) ثلاث خوارزميات لاعتمادها كمعايير اتحادية لمعالجة المعلومات (FIPS):

- آلية تغليف المفاتيح القائمة على الشبكة النمطية Module-Lattice–based Key Encapsulation Mechanism (ML-KEM) مبنية على خوارزمية (CRYSTALS-Kyber).
- خوارزمية التوقيع الرقمي القائمة على الشبكة النمطية Module-Lattice–based Digital Signature Algorithm (ML-DSA) مبنية على خوارزمية توقيع رقمي مقاومة للحوسبة الكمية (CRYSTALS-Dilithium).[1]
- خوارزمية التوقيع الرقمي القائمة على الدوالّ التجزئية عديمة الحالة Stateless Hash-based Digital Signature Algorithm (SLH-DSA) مبنية على خوارزمية توقيع رقمي مقاومة للحوسبة الكمّية (SPHINCS+).

تمثل هذه المعايير خطوة مهمة نحو الاستعداد لمواجهة الهجمات المعادية ذات القدرات الكمية.

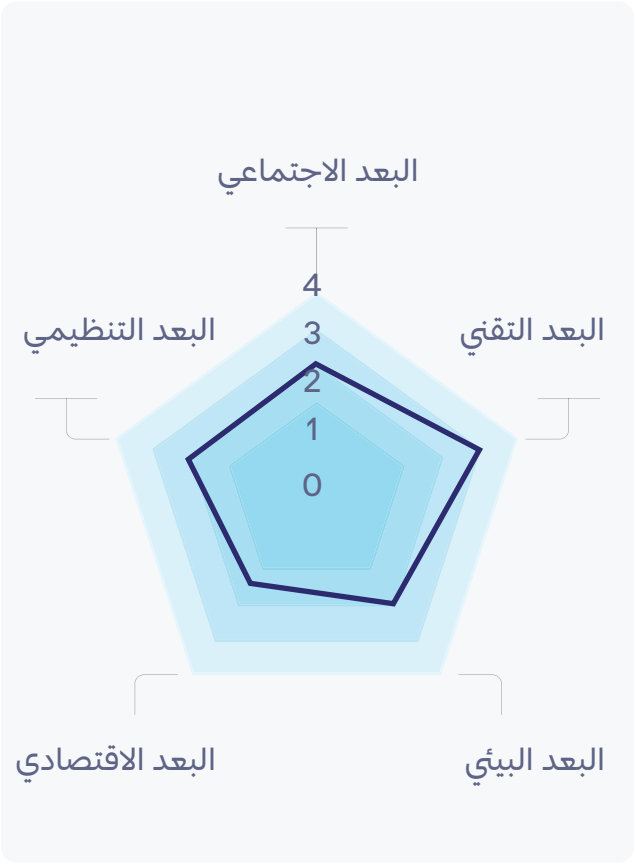
المعهد الوطني للمعايير والتقنية في الولايات المتحدة يعلن عن 14 نظامًا مرشحًا لمعايير التوقيع الإضافية (الجولة الثانية)

أعلن المعهد الوطني للمعايير والتقنية (NIST) عن تأهل 14 نظامًا للتوقيع الرقمي إلى الجولة الثانية ضمن برنامج "أنظمة التوقيع الرقمي الإضافية" (Additional Digital Signature Schemes) ضمن عملية توحيد معايير تشفير ما بعد الكم.

خرائط الطريق / التقدم في السياسات والترحيل

- وصف معهد فراونهوفر آيزيك (Fraunhofer AISEC) سبعة تطورات رئيسية، من بينها تطوير جداول زمنية للهجرة أو الترحيل (migration) إلى أنظمة تشفير ما بعد الكم داخل الاتحاد الأوروبي (مثل تأمين الأنظمة عالية المخاطر ضد الهجمات الكمية بحلول عام 2030، والانتقال الكامل بحلول عام 2035 تقريبًا)، إلى جانب المزيد من التقدم في مجالي التقييس وإصدار الشهادات.[2]
- تقوم شركة كلاودفلير (Cloudflare) بدمج تشفير ما بعد الكم في مجموعة بروتوكولات الثقة الصفرية (Zero-Trust) وبروتوكول الانترنت (IP) الخاصة بها لتوسيع استخدام تشفير ما بعد الكم عمليًا.[3]
- اعتمدت شركة اكسبرس في بي إن (ExpressVPN) آلية تغليف المفاتيح القائمة على الشبكة النمطية (ML-KEM) في تطبيق وايرغارد (WireGuard) الخاص بها، وذلك كخطوة عملية لنشر تقنيات تشفير ما بعد الكم.[4]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
تشفير ما بعد الكم



حجم السوق العالمي[5]

قدر حجم السوق العالمي لتشفير ما بعد الكم بـ

0.44 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

9.88 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 86.32

1. AWS
2. Fraunhofer AISEC
3. Barron's
4. techradar.com
5. PitchBook



17

الرقائق الكمية الضوئية

الرقائـق الكميـة الضوئيـة (Photonic Quantum Chips) هـي شرائـح تسـتخدم الفوتونـات بـدل الإلكترونـات لتمثيـل ومعالجـة "الكيوبتـات" (qubits)، ويمكـن تصنيعهـا في مصانـع أشـباه المـوصلات الحاليـة والعمـل في درجـة حـرارة الغرفـة، ممـا يمنحهـا قابليـة عاليـة للتوسـع وكفـاءة في اسـتهلاك الطاقـة. أبـرز التطـورات تشـمل أولَ شريحـة كميـة إلكترونيـة-فوتونيـة متكاملـة تُنتـج أزواج فوتونـات مترابطـة على شريحـة سـيليكون تجاريـة، وتحقيـقَ تشـابك كمـي واسـع النطـاق و"حـالات مجموعـات" (cluster states) على رقائـق مدمجـة، وتقدمًـا كبيرًا في مـواد منخفضـة الفقـد للغايـة (Ultra-Low-Loss Materials) وتصنيـع رقائـق معـدّة لـملايين الكيوبتـات، إضافـة إلى رقائـق فوتونيـة قابلـة للبرمجـة وتطبيقـات مبكـرة تحسّـن خوارزميـات تعلـم الآلـة وتخفـض اسـتهلاك الطاقـة.

نقلات تقنية في الرقائق الكمية الضوئية

TRL: 3-5

التشابك الكمي القابل للتوسع وحالات المجموعات

حقق علماء من جامعة بكين (Peking University) وجامعة شانشي (Shanxi University) قفزة نوعية في تحقيق التشابك الكمي (quantum entanglement) واسع النطاق على الرقائق الضوئية. وعرض الباحثون أول تشابك كمي متعدد الأجزاء "مستمر التغير" وحالات مجموعات (cluster states) على رقاقة متكاملة.

يُرسي هذا الإنجاز التقني الأساس لأجهزة حاسب كمية وشبكات كمية أكثر تطورًا. [1]

التطورات في التصنيع والمواد

أُحرز تقدمٌ أيضًا في المواد وعمليات تصنيع الرقائق الكمية الفوتونية:

- التصنيع بكميات كبيرة: طورت الشركة الناشئة "ساي كوانتم" (PsiQuantum) عملية تصنيع بكميات كبيرة لشريحتها الفوتونية الكمية "أوميغا" (Omega)، المصممة لأنظمة مليون كيوبت. طُوّرت هذه العملية في منشأة تصنيع تابعة لشركة "غلوبال فاوندريز" (GlobalFoundries)، وتستخدم أدلة موجية (waveguides) من نيتريد السيليكون (silicon nitride) ومفاتيح تيتانات الباريوم (barium titanate switches). [2]
- مواد منخفضة الفقد للغاية (Ultra-Low-Loss Materials): حققت شركتا زانادو (Xanadu) و هايبرلايت (HyperLight) معيارًا جديدًا في الحوسبة الكمية الفوتونية من خلال عرض نيوبات الليثيوم (lithium niobate) الرقيقة منخفضة الفقد للغاية. تُعد هذه التطورات حاسمة للتغلب على القيود الحالية في توسيع نطاق الأجهزة الكمية الفوتونية. [3]

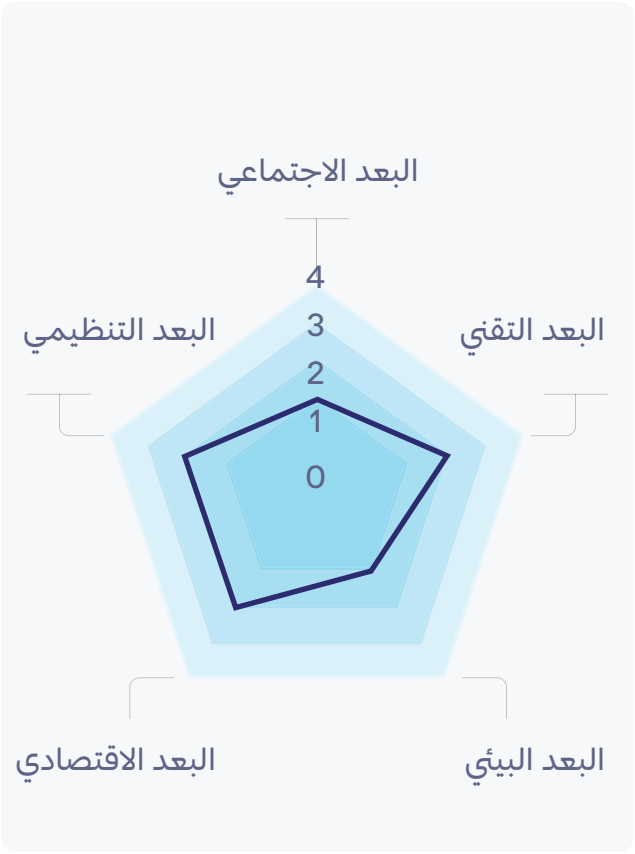
الفوتونيات القابلة للبرمجة وتطبيقات الذكاء الاصطناعي

تشمل التطورات نوعين متمايزين: رقائق فوتونية تقليدية لمعالجة الإشارات والحوسبة، ورقائق كمية ضوئية تستخدم حالات كمية للضوء في تنفيذ العمليات الكمية.

- الرقائق القابلة للبرمجة: طورت الشركة الناشئة في وادي السيليكون، إن تي تي ريسيرش (NTT Research)، بالتعاون مع جامعتي كورنيل وستانفورد، رقاقة فوتونية غير خطية قابلة للبرمجة، متجاوزةً بذلك قيود "جهاز واحد، وظيفة واحدة" التي كانت سائدة في التصاميم السابقة. [4]
- تحسين الذكاء الاصطناعي: أظهر فريق من الباحثين من جامعة فيينا (University of Vienna) أنه حتى الحواسيب الكمية صغيرة الحجم يمكنها تحسين أداء تعلم الآلة، باستخدام دائرة كمية فوتونية جديدة. تشير النتائج إلى أن تقنية الكم اليوم ليست تجريبية فحسب، بل يمكنها بالفعل التفوق على الأنظمة التقليدية في مهام محددة. والجدير بالذكر أن هذا النهج الضوئي يمكن أن يقلل بشكل كبير من استهلاك الطاقة، مما يوفر مسارًا مستدامًا للمضي قدمًا مع تزايد احتياجات تعلم الآلة للطاقة. [5]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة

الرقائق الكمية الضوئية



حجم السوق العالمي [6]

قدر حجم السوق العالمي للضوئيات الكمية بـ

0.54 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

1.78 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 26.94

1. SCIO
2. PsiQuantum
3. Xanadu
4. TheQuantumInsider
5. Nature Photonics
6. precedenceresearch



18

حوسبة التشكيل العصبي

حوسبة التشكيل العصبي (Neuromorphic Computing) تستخدم دوائر وعناصر إلكترونية تحاكي طريقة عمل الدماغ، خاصةً الإشارات النابضة والذاكرة المدمجة مع الحوسبة، لتقديم معالجة مستمرة وموفرة للطاقة في الزمن الفعلي. حدثت مؤخرًا نقلات نوعية مع نضج أدوات التدريب للشبكات العصبية النابضة (Spiking Neural Networks)، وتقدُّم الدوائر ذات الإشارات المختلطة (mixed-signal) وتصميمات الدوائر في الذاكرة (in-memory)، وظهور شرائح ومنصات عملية مثل حاسوب «هالا بوينت» فائق السعة من إنتل (Intel)، ومعالجات للحافة من شركات مثل BrainChip وInnatera، ومستشعرات رؤية عصبية من SynSense، إلى جانب شرائح حوسبة في الذاكرة ومقاومات ذاكرية (memristor) ثنائية الأبعاد، ما يمهّد لجعل هذا النمط «نموذج الحوسبة الثالث» في تطبيقات إنترنت الأشياء، والروبوتات، والأجهزة القابلة للارتداء.

نقلات تقنية في حوسبة التشكيل العصبي

TRL: 4-8

"حوسبة التشكيل العصبي على نطاق واسع" مراجعة بحثية في مجلة نيتشر

نُشرت في يناير 2025 دراسة موسعة بعنوان "حوسبة التشكيل العصبي على نطاق واسع"، أجراها 23 باحثًا، تُحدد خارطة طريق لبناء أنظمة تشكيل عصبي واسعة النطاق: تحسين التفرُّق أو التبدُّد (optimizing sparsity)، والترابطات الفعالة، والاستفادة من المواد الناشئة، والتصميم المشترك للأجهزة والبرمجيات، والبنى القائمة على التطبيقات. وتضع الدراسة هذا المجال في مرحلة انتقالية حاسمة نحو التبني التجاري، مُسلّطةً الضوء على ما هو مطلوب لجعل عمليات النشر واسعة النطاق لـ "حوسبة التشكيل العصبي" ممكنة.[1]

"هالا بوينت" من إنتل: أكبر نظام تشكيل عصبي في العالم

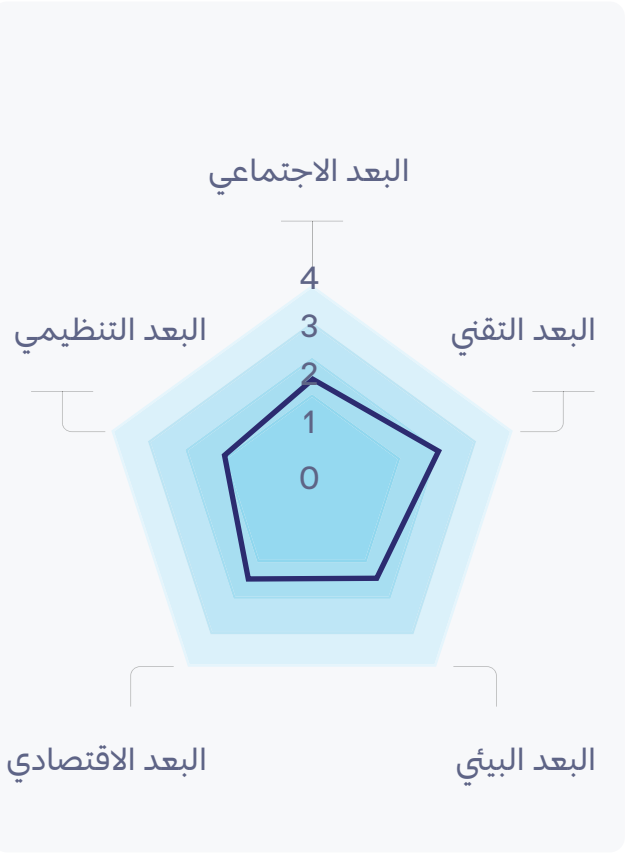
كشفت إنتل (Intel) عن "هالا بوينت" (Hala Point)، وهو أكبر نظام حوسبة تشكيل عصبي (neuromorphic) في العالم، يحتوي على نحو 1.15 مليار خلية عصبية صناعية، ويضم 1152 شريحة بحثية من الجيل الثاني (Loihi 2). يدعم النظام تنفيذ ما يصل إلى 20 كوادرليون عملية في الثانية، مع كفاءة طاقة تتجاوز 15 تريليون عملية تُمانية-البت في الثانية لكل واط عند تشغيل شبكات عميقة تقليدية، بما يقدّم كفاءة طاقة متفوقة على وحدات المعالجة الرسومية ووحدات المعالجة المركزية في عدد من أحمال عمل الذكاء الاصطناعي الأساسية. يمثّل "هالا بوينت" خطوة مهمة نحو توسيع نطاق الذكاء الاصطناعي المستلهم من الدماغ، مع تطبيقات بحثية محتملة في الروبوتات، والنمذجة العلمية والهندسية، والحوسبة الإدراكية، وأحمال العمل كبيرة المقياس ذات الكثافة الحسابية العالية.[2]

معالج الذكاء الاصطناعي (Akida 2.0) من (BrainChip)

يُوفر نظام (Akida 2.0) من (BrainChip)، المُدمج على الشريحة، معالجةً عصبيةً لأجهزة الحافة (edge devices) التجارية، مُحسّنًا كفاءة الطاقة بمقدار 16 ضعفًا للمستشعرات دائمة التشغيل (always-on sensors) وخاصية التعرف على الصوت (voice recognition). يدعم النظام نماذج الذكاء الاصطناعي التقليدية والذكاء الاصطناعي النابض (Spiking AI) في آنٍ واحد، مما يجعله مُناسبًا لإنترنت الأشياء الصناعي (Industrial IoT)، والأجهزة القابلة للارتداء، وسلامة السيارات. تُجسّد بنية Akida 2.0 الهجينة "القائمة على الأحداث والتعلم العميق" (event-based + deep learning) بين التصميم العصبي والذكاء الاصطناعي السائد.[3]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة

حوسبة التشكيل العصبي



حجم السوق العالمي[4]

قدر حجم السوق العالمي لحوسبة التشكيل العصبي بـ

0.33 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

4.94 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 71.81

1. nature
2. intel
3. brainchip
4. PitchBook



19

أشباه الموصلات لتطبيقات الجيل السادس

أشباه الموصلات لتطبيقات الجيل السادس (6G) هي الجيل القادم من المكونات الإلكترونية التي تستهدف دعم شبكات لاسلكية بسرعات تقترب من التيرابت في الثانية، بزمن استجابة شبه لحظي واتصال مكثف لمليارات الأجهزة، مع الاعتماد على ترددات دون التيراهرتز ومواد مركّبة متقدمة مثل نيتريد الغاليوم وفوسفيد الإنديوم. أحدث التطورات تشمل أول شريحة 6G متعددة الترددات مبنية على نيوبات الليثيوم تغطي نطاقًا واسعًا حتى 115 جيجاهرتز، ومعالجًا فوتونيًا لمعالجة الإشارات اللاسلكية بكفاءة أعلى، وترانزستورات ومضخمات طاقة متقدمة من نيتريد الغاليوم، إلى جانب مبادرات صناعية مثل مشاريع شركات اتصالات كبرى واتحادات بحثية لتطوير مضخمات عالية الكفاءة لترددات الجيل السادس (6G).

نقـلات تقنـيـة في أشبـــاه الموصـلات لتطبيقات الجيل السادس

TRL: 4-6

أول شريحة 6G "متعددة الترددات" في العالم

كشف فريق من الباحثين، بقيادة علماء من جامعة بكين (Peking University) وجامعة مدينة هونغ كونغ (City University of Hong Kong) وجامعة كاليفورنيا في سانتا باربرا (University of California, Santa Barbara)، عن أول شريحة من الجيل السادس (6G chip) "متعددة الترددات" (All-Frequency) في العالم. هذه الشريحة، المصنوعة من نيوبات الليثيوم الرقيق (TFLN)، قادرة على العمل عبر نطاق ترددي واسع يتراوح بين 0.5 جيجاهرتز و115 جيجاهرتز، وهو طيف يتطلب عادةً تسعة أنظمة راديو منفصلة. يمثل هذا التطور خطوة مهمة نحو شبكات لاسلكية كاملة الطيف، مما يتيح اتصالات قابلة لإعادة التكوين مع تحسين عرض النطاق الترددي ومعدلات البيانات. أظهرت المنصة في ظروف تجريبية إمكانية دعم معدلات نقل بيانات تتجاوز 100 جيجابت في الثانية، بما يبرز إمكاناتها للاتصالات اللاسلكية المستقبلية.[1]

معالج فوتوني لمعالجة الإشارات اللاسلكية لشبكات الجيل السادس

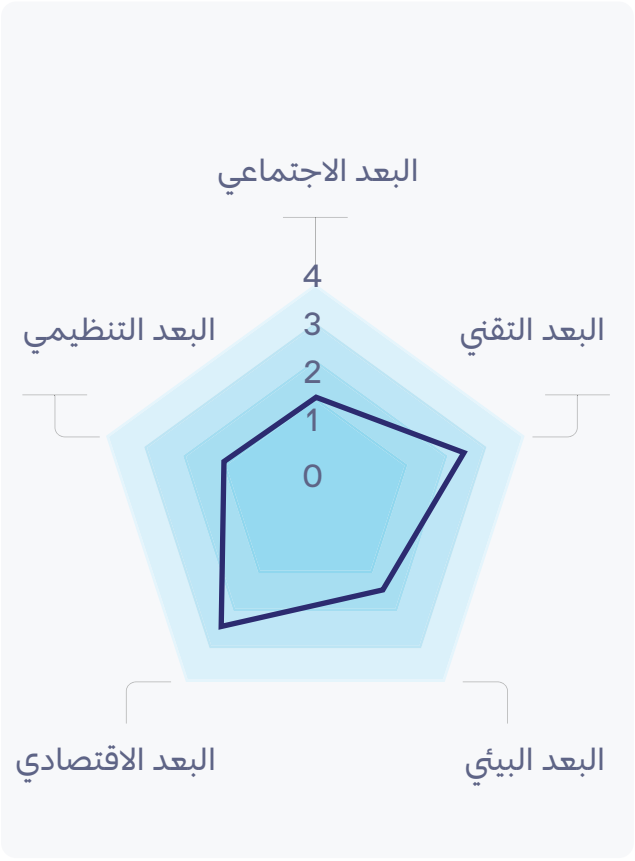
طور باحثون في معهد ماساتشوستس للتقنية (MIT) معالجًا فوتونيًا (Photonic Processor) مصممًا خصيصًا لمعالجة الإشارات اللاسلكية في شبكات الجيل السادس.[2] يستخدم هذا المعالج الضوء بدلاً من الكهرباء لمعالجة الإشارات، مما قد يقلل من زمن الوصول واستهلاك الطاقة في الشبكات اللاسلكية المستقبلية. قد يُمكّن دمج المعالجات الفوتونية من بناء بنية تحتية أكفأ وأكثر وقابلية للتوسع لشبكات الجيل السادس.[3]

مضخمات التردد اللاسلكي من نتريد الغاليوم

نتريد الغاليوم مركب شبه موصل ذو فجوة نطاق واسعة، يتميز بكفاءة عالية وكثافة طاقة عالية، مما يجعله مناسبًا لتطبيقات التردد العالي في شبكات الجيل السادس.[4] وقد طوّر فريق من جامعة بريستول (University of Bristol) ترانزستورات تأثير المجال فائقة الشبكة (SLCFETs)، وهي بنية ترانزستور متطورة تستفيد من تأثير المزلاج (latch effect) في مواد نتريد الغاليوم لتعزيز السرعة والقوة، مما يُسهم في تطوير مستقبل الجيل السادس. يُمكن لهذا الابتكار تمكين السيارات ذاتية القيادة، والتشخيصات الطبية الفورية عن بُعد، وتطبيقات الجيل السادس المستقبلية الأخرى.[5]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة

أشبـاه الموصـلات لتطبيـقات الجيل السادس



حجم السوق العالمي[6]

قدر حجم السوق العالمي لأشباه الموصلات بـ

652.01 مليار دولار

في عـــام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

841.64 مليار دولار

في عـــام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 5.24

1. TechXplore
2. MIT News
3. Nature
4. ScienceDaily
5. Nature Electronics
6. PitchBook



20

التمـــويـــل اللامركـزي

التمويـل اللامركـزي (DeFi) هـو نظـام مـالي مـبني على سلاسـل الكتـل (blockchain) يسمح بتنفيذ خدمات مثل الإقراض والتداول والاستثمار مباشرة بين الأفراد عبر عقود ذكية، مـن دون بنـوك أو وسـطاء تقليـديين، مـع شـفافية عاليـة واحتفـاظ المسـتخدمين بأصولهـم. في التمويـل اللامركـزي تتركّـز أهـم التطـورات التقنيـة حاليًـا في عـدة جوانـب. يجري الانتقال مـن سلسلة كتل واحـدة "شاملة" إلى حزمـة معيارية تعتمـد على حلـول مـن الطبقة الثانية مثل تجميعات إثبات المعرفة الصفرية، مع طبقات مخصصة لتوافر البيانـات، ممـا يرفـع القـدرة الاسـتيعابية ويخفـض الرسـوم بشـكل كـبير. يتوسـع كذلـك مجـال المشـتقات والعقـود الآجلـة الدائمـة عبر نمـاذج سـيولة جديـدة (مثـل مجمعـات السـيولة المشتركـة والأصـول الاصطناعيـة)، بينمـا تُجـرَّب آليـات إقـراض بضمانـات أقـل مبنيـة على السـمعة وبيانـات السـجل على السلسـلة، إضافـة إلى بنى هجينـة تربـط تـرميز الأصـول الواقعيـة بالتمويـل التقليـدي مـع الحفـاظ على أتمتـة العقـود الذكيـة.

نقلات تقنية في التمويل اللامركزي

TRL: 6-8

البنية المعيارية لسلاسل الكتل

من التطورات الملحوظة الانتقال من سلسلة كتل أحادية متكاملة إلى بنية معيارية توزّع وظائف التنفيذ والتسوية والأمان وتوافر البيانات بين طبقات متخصصة. تهدف هذه البنية المعيارية إلى معالجة بعض تحديات قابلية التوسع من خلال توزيع الوظائف بين طبقات متخصصة. تتضمن التقنيات الرئيسة ما يلي:

- **التجميعات Rollups (المتفائلة Optimistic وذات المعرفة الصفرية Zero-Knowledge):** تُعد هذه التقنيات حلولًا رائدة من الطبقة الثانية (Layer 2). تنفذ التجميعات المعاملات خارج السلسلة الرئيسة، ثم ترسل إليها البيانات اللازمة للتحقق؛ إذ تعتمد التجميعات المتفائلة على إمكان تقديم إثباتات الاحتيال، بينما تعتمد تجميعات المعرفة الصفرية على إثباتات الصلاحية، مما يسهم في زيادة القدرة الاستيعابية وخفض رسوم المعاملات.
- **طبقات توافر البيانات:** تقدم مشاريع مثل Celestia و EigenDA توافرَ بياناتٍ مُخصص ومنخفض التكلفة، وهو مُكوّن أساسي لعمليات التجميع (Rollups).

تسهم البنية المعيارية في تحسين قابلية التوسع وتقليل الرسوم، لكنها لا تلغي بصورة كاملة المفاضلات القائمة بين الأمان واللامركزية والأداء.

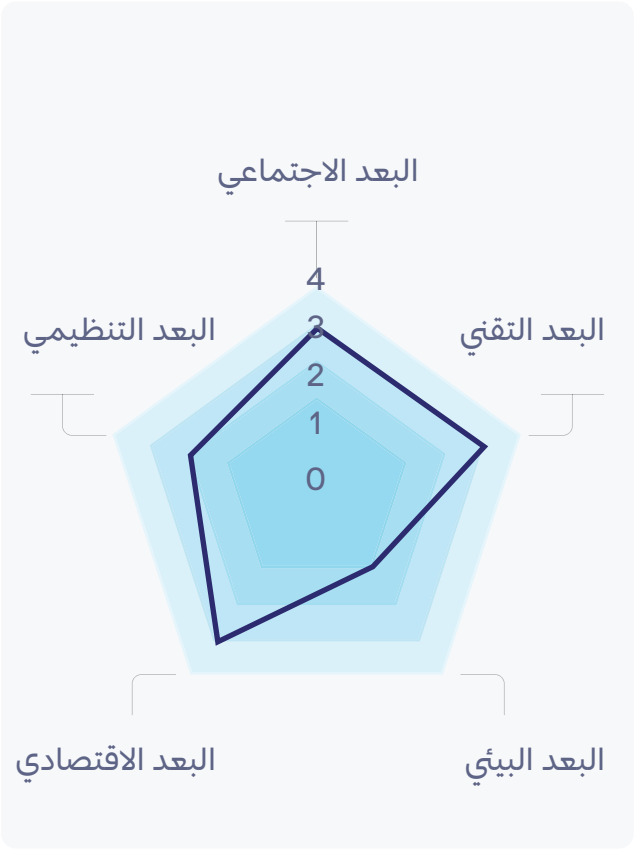
صعود العقود الآجلة اللامركزية والمشتقات

يشهد سوق الأدوات المالية المتطورة نموًا يتجاوز مجرد التداول الفوري والإقراض، ليصبح مجالًا رئيسيًا. ومن أبرز هذه الابتكارات: العقود الآجلة اللامركزية (Perps). تُقدم بروتوكولات مثل dYdX وGMX وGains Network عقودًا آجلة دائمة -وهي منتج مشتق كان حكرًا على البورصات المركزية- بطريقة لامركزية. تستخدم هذه البروتوكولات نماذج مبتكرة مثل:

- سيولة من نظير إلى مجمع (Peer-to-Pool Liquidity): حيث يُشكّل مقدمو السيولة مجمعًا مشتركًا يعمل عليه جميع المتداولين.
- سكّ الأصول الاصطناعية (Synthetic Asset Minting): إنشاء أصول اصطناعية تتتبّع أسعار الأصول الحقيقية دون الحاجة إلى حفظ مباشر.

وقد يُوسّع هذا النطاق من قدرة التمويل اللامركزي (DeFi) لتشمل استراتيجيات التحوُّط والمضاربة المعقدة، مما يجعله نظامًا ماليًّا أكثر اكتمالًا.[1]

تقييم جاهزية المنظومة في المملكة
التمويل اللامركزي



حجم السوق العالمي[2]

قدر حجم السوق العالمي للتمويل اللامركزي بـ

34.50 مليار دولار

في عام 2025

ومن المتوقع أن يصل إلى

186.07 مليار دولار

في عام 2030

معدل النمو السنوي المركب خلال فترة التنبؤ يقدر بـ

% 40.08

1. Risk Financial Management

2. PitchBook



03
الخاتمة

استعرض التقرير 20 نقلة تقنية تغطي الأولويات الوطنية الأربع للبحث والتطوير والابتكار. وأظهرت النتائج تنوعًا في مستويات نضج هذه التقنيات وجاهزية البيئات المحيطة بها، إلى جانب تفاوت آثارها المتوقعة من النواحي الاجتماعية والتقنية والبيئية والاقتصادية والتنظيمية. ففي مجال صحة الإنسان، تنمو توجهات نحو العلاجات الأكثر تخصيصًا والحلول الصحية الرقمية والتقنيات الحيوية المتقدمة. وفي مجال استدامة البيئة والاحتياجات الأساسية، تتزايد أهمية التقنيات الداعمة لخفض الانبعاثات، ورفع كفاءة استخدام الموارد، وتحسين الإنتاج الزراعي، ومعالجة الملوثات. أما في الطاقة والصناعة، فتشير النتائج إلى فرص مرتبطة بالطاقة منخفضة الكربون، وتخزين الطاقة المتجددة، والمواد الذكية، واستدامة الطاقة لمراكز البيانات. وفي اقتصاديات المستقبل، تتسارع التطورات في الحوسبة المتقدمة، والتشفير والتقنيات الكمية، وأشباه الموصلات للجيل القادم من الاتصالات، والتمويل اللامركزي المبني على سلاسل الكتل.

ويَخلُص التقرير إلى أن الاستفادة من هذه التقنيات لا تعتمد على نضجها التقني وحده، بل تتأثر كذلك بتوافر الكفاءات البشرية، والبنية التحتية، والجدوى الاقتصادية، والأطر التنظيمية الداعمة. كما أن اختلاف مستويات الجاهزية والأثر بين التقنيات يستدعي التعامل معها وفق طبيعة كل تقنية ومسار تطورها، بدلًا من تبني نهجٍ موحَّد تجاه جميع التقنيات المرصودة.

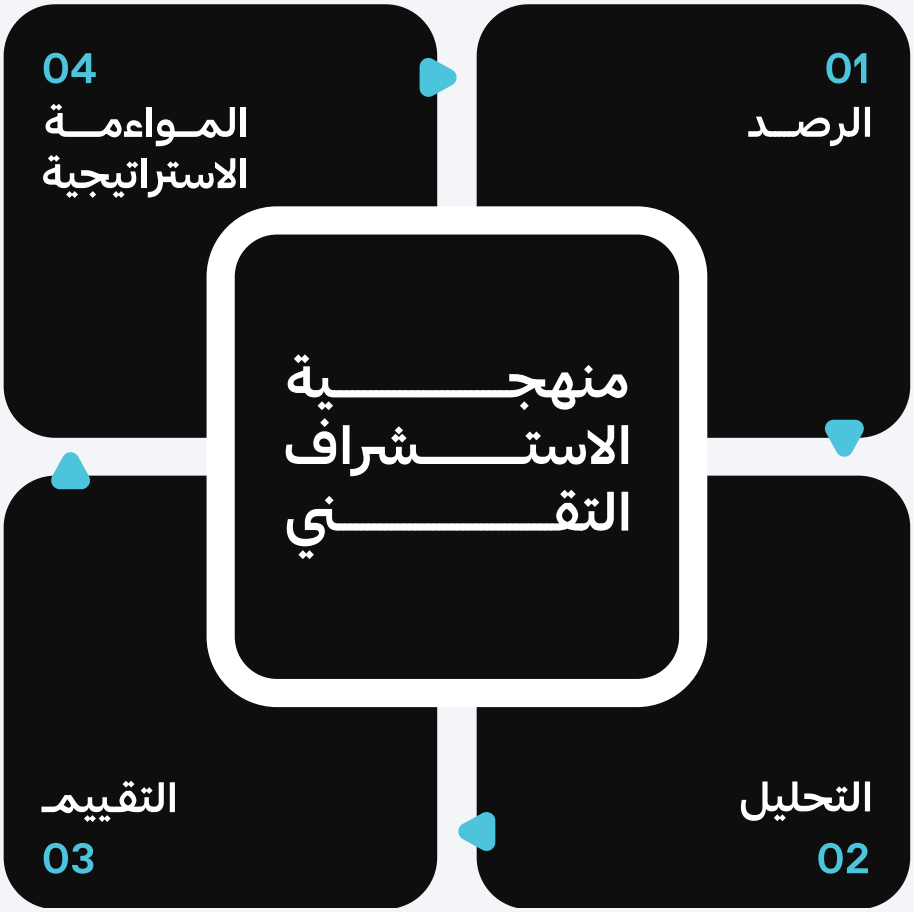
ويمكن أن تمثل نتائج التقرير مدخلًا لإجراء تحليلات أكثر تفصيلًا للتقنيات الأعلى أثرًا، واستكشاف حالات استخدامها المحلية، ودراسة الفجوات والفرص المرتبطة بها. كما يمكن الاستفادة منها في دعم النقاش بين الجهات ذات الصلة، وتحديد المجالات المناسبة للبحث والتطوير، التجريب أو التبني، أو مجرد المتابعة والرصد، مع مراعاة المتطلبات التنظيمية ذات العلاقة.

وفي ظل التسارع المستمر في التطورات العلمية والتقنية، تظل نتائج التقرير مرتبطة بالمعطيات المتاحة وقت إعداده، وهو ما يؤكد أهمية تحديث الرصد والتحليل بصورة دورية، ومتابعة التحولات في مستويات النضج والاستثمار والتطبيق. وبذلك يعتبر التقرير عرضًا لجزء من المشهد التقني الراهن، واستشرافًا للفرص المحتملة، بما يدعم مواءمة الجهود المستقبلية مع الأولويات الوطنية ومستهدفات رؤية السعودية 2030، مما يرسخ مكانة المملكة كمركز إقليمي وعالمي للبحث والتطوير والابتكار.



ملحق | منهجية التقرير

تعتمد منهجية هذا التقرير على أربعة محاور رئيسة: الرصد، التحليل، التقييم، والمواءمة الاستراتيجية؛ على النحو التالي:



تبدأ المنهجية برصد الإشارات التقنية المبكرة والتطورات المتسارعة من مصادر علمية واقتصادية وتنظيمية متعددة، ثم تخضع التقنيات المرصودة لعملية تحليل أولي لتحديد طبيعتها، ومستوى نضجها، وسرعة تطورها، والقطاعات المتوقع تأثرها بها. بعد ذلك، تُقيّم التقنيات وفق أبعاد الجاهزية، والأثر المتوقع، ثم ربط النتائج بالأولويات الوطنية.



ملحق | منهجية التقرير

1. الرصد

يُعدّ الرصد خطوة محورية يُدمج فيها بين نهجين متكاملين: الرصد الاستباقي والرصد التفاعلي، بهدف التقاط الإشارات التقنية مبكرًا وتحديث التوقعات بناءً على البيانات المستجدة.

الرصـــــد الاســـــتباقي (Proactive Monitoring)

الذي يركّز على توقع النقلات التقنية قبل انتشارها الواسع، وذلك عبر:

- مسح الأفق باستخدام التحليل الببليومتري والذكاء الاصطناعي وخرائط الطريق التقنية.
- تحليل الاتجاهات التاريخية للتنبؤ بمنحنيات التطور.
- تتبع مستوى الجاهزية التقنية (TRL) لتحديد مرحلة نضج التقنية.

الرصـــــد التفـــــاعلي (Reactive Monitoring)

حيث تُعالج التطورات فور حدوثها وتُحدّث التوقعات بناءً على البيانات الفعلية:

- جمع البيانات في الوقت الفعلي حول الإطلاقات الجديدة والتشريعات والتحولات السوقية.
- اكتشاف الإشارات الدالة على الزخم التقني ومؤشرات التبني للتقنية.
- تحليل الأخبار التقنية والاقتصادية ووسائل التواصل الاجتماعي لرصد التصورات العامة.
- تقييم الأداء بعد الإطلاق عبر مؤشرات النمو وحجم السوق.

دمـــج الرصـــد الاستـــباقي والرصـــد التفـــــاعلي

يعتمد المرصد نموذجًا متكيفًا يدمج النهجين السابقين عبر:

- إطار تنبؤ متكيف (Adaptive Forecasting): يبدأ بالتوقع الاستباقي ويُحدَّث دوريًا ببيانات تفاعلية لضمان دقة ومرونة التوقعات.
- استخدام المؤشرات المتقدمة والمتأخرة (Leading and Lagging Indicators): حيث يستخدم الرصدُ الاستباقي المؤشرات المتقدمة السابقة على إطلاق المنتج مثل: الأوراق البحثية، براءات الاختراع، والنقلات الابتكارية. بينما يستخدم الرصدُ التفاعلي المؤشراتَ المتأخرة اللاحقة بعد الإطلاق مثل: أداء المنتج، بيانات المبيعات، وغيرها. ويوفّر تتبُّع كلا النوعين رؤيةً متكاملة لمسارات التقنية ومستوى زخمها الفعلي والمحتمل.

يسهم هذا الدمج في بناء قائمة شاملة للنقلات التقنية من مصادر متنوعة تشمل: الأبحاث، براءات الاختراع، الشركات الناشئة، التوجهات التجارية، والمصادر الإخبارية والحكومية، مما يضمن التقاط أكبر قدر ممكن من الإشارات المهمة وتعزيز قدرة الاستشراف على التنبؤ والتكيف.

ولتطبيق «الرصد التقني» عمليًا، استُخدم أسلوب تجريف/استخلاص البيانات من المواقع (Web Scraping) الذي يُعدّ عملية آلية تهدف إلى جمع المعلومات من صفحات الإنترنت واستخراجها بطريقة منظَّمة، بحيث يمكن استخدامها وتحليلها لاحقًا. وتعتمد هذه العملية على أدوات أو خوارزميات تقوم بقراءة محتوى المواقع -مثل الأخبار، المقالات، البيانات التقنية، براءات الاختراع، أو معلومات الشركات- ثم تحويلها إلى بيانات قابلة للمعالجة في قواعد بيانات أو أنظمة تحليل.

ولضمان مشاركة أوسع من قبل المجتمع العلمي في صياغة هذا التقرير، تم إرسال استبيان إلى قرابة 84 وحدة من وحدات البحث والتطوير والابتكار في الجهات المختلفة في المملكة. وتم استقبال قرابة 188 مشاركة لترشيح التقنيات الحديثة الواعدة، والتي استفيد من مرئياتها بالإضافة إلى التحليل الكمي والنصي لقائمة بلغت أكثر من 5000 نقلة تقنية جُمعت من خلال استخلاص البيانات من المواقع.

2. التحليل

يشمل نشاط التحليل في المرصد الوطني للبحث والتطوير والابتكار ثلاثة عناصر رئيسة:

- التحليل التقني: تقديم وصف موجز للمجال الذي تنتمي إليه النقلة التقنية، وعرض مبادئها ومزاياها، وعوامل تفوقها مقارنة بالتقنيات المنافسة أو البديلة.
- التحليل الاقتصادي: تقدير حجم السوقين العالمي والمحلي، وتحديد العوامل الدافعة، وأبرز الشركات المؤثرة، وتحليل الأثر الاقتصادي للتقنية، بما في ذلك الفرص الجديدة أو التأثيرات المزعزِعة على الأسواق القائمة.
- تحليل المخاطر والتحديات: تقييم الجوانب الأخلاقية والقانونية والبيئية والاجتماعية المرتبطة بالتقنية الناشئة -إن وجدت-.

3. التقييم

لأجل تقييم التقنيات الواردة في هذا التقييم من محاور عدة، أضيفت خارطة جاهزية المنظومة (Ecosystem Readiness Map)؛ حيث قيّم أعضاء اللجنة العلمية للمرصد الوطني للبحث والتطوير والابتكار هذه التقنيات عبر خمسة أبعاد رئيسة تعبر عن تحليل STEER، وهي: الاجتماعي، والتقني، والبيئي، والاقتصادي، والتنظيمي.

1. البعد الاجتماعي (Social): الذي يشمل مستوى الوعي العام، ودرجة تقبّل المجتمع للتقنية، ومستويات التعليم، والقيم الثقافية الداعمة، إضافة إلى جاهزية القدرات البشرية من حيث توفر المهارات والخبرات اللازمة.
2. البعد التقني (Technological): الذي يُقيّم نضج التقنيات الأساسية الداعمة، والاحتياجات البحثية، ومدى جاهزية سلاسل الإمداد، وكذلك جاهزية البنية التحتية البحثية وقدرتها على دعم التطوير والابتكار.
3. البعد البيئي (Environmental): الذي يركّز على توفر الموارد اللازمة، واستدامة المواد المستخدمة، ومدى توافق التقنية مع اللوائح والمعايير البيئية.
4. البعد الاقتصادي (Economic): الذي يتناول حجم الطلب السوقي المتوقع، واتجاهات الاستثمار، وجدوى نماذج الأعمال المرتبطة بالتقنية.
5. البعد التنظيمي (Regulatory): الذي يتعلق بالأنظمة والتشريعات المنظمة للتقنية، ومدى مواءمتها مع السياسات الوطنية في المملكة، بما في ذلك وضوح الأطر التنظيمية وتسريع اعتماد التقنية.

وتم تقييم كل بُعد باستخدام مقياس يتراوح من (0): جاهزية منعدمة، إلى (4): جاهزية عالية. كما عُرضت النتائج في شكل مخططات رادارية (Radar Charts) لتوضيح مستوى الجاهزية لكل تقنية عبر الأبعاد الخمسة بشكل بصري. وقد تم هذا التقييم بواسطة اللجنة العلمية للمرصد الوطني للبحث والتطوير والابتكار، والمكونة من ثمانية أعضاء.

4. المواءمة الاستراتيجية

تُربط النتائج المستخلصة من الاستشراف التقني بتحقيق الأهداف الفرعية لرؤية المملكة 2030، والبرامج الوطنية والاستراتيجيات الحكومية ذات العلاقة.

ثم يقدم التقرير عرضًا وتحليلًا لأهم النقلات التقنية المرصودة في هذا التقرير والتي تتضمن 20 تقنية ناشئة، مرتبة حسب الأولويات الوطنية للبحث والتطوير والابتكار.





© 2026 هيئة تنمية البحث والتطوير والابتكار. جميع الحقوق محفوظة.