توجهات الابتكار في قطاع المياه

معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

كلمات افتتاحية

م. عبدالرحمن عبد المحسن الفضلي

معالي وزير البيئة والمياه والزراعة

لقد جاء إطلاق اللجنة العليا للبحث والابتكار في عام 2021 م إيمانًا من قيادة المملكة بأهمية هذا القطاع، وإكمالًا لمسيرة العمل لتنفيذ برامج رؤية السعودية 2030، والتي من مستهدفاتها الرئيسة دعم البحث العلمي وتمكين الابتكار، لبناء اقتصاد معرفي وتحقيق التنوع الحقيقي لموارد الدولة، وتعمل الوزارة على تمكين الشركاء في منظومة البحث والابتكار لتحفيز الابتكار وتوطين التقنيات ولتقديم الحلول الفعالة في مختلف قطاعاتها، وذلك 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

مثّل الابتكار ركيزة جوهرية في نجاح قطاع المياه بالمملكة، فقد شكّل الأساس الذي انطلقت منه رحلة الاستدامة ورسّخ مكانة المملكة وريادتها عالميًا في إدارة مواردها المائية بكفاءة واقتدار، في ظل دعم وتمكين القيادة الرشيدة – أيدها الله – والعمل الجاد من كفاءاتنا الوطنية الشغوفة وتبنّي النهج الابتكاري والتحسين المستمر، تحقيقًا لمستهدفاتنا الطموحة نحو مستقبل أكثر استدامة.

م. عبدالله بن إبراهيم العبدالكريم

معالي رئيس الهيئة السعودية للمياه

في ظل التحديات العالمية المرتبطة بالمياه وارتفاع الطلب، ينهض قطاع المياه في المملكة العربية السعودية اليوم، على أعمدة الابتكار بوصفه خياراً استراتيجياً وليس مجرد ميزة تنافسية. من هذا المنطلق، اعتمد القطاع توجهًا يرتكز على الابتكار بوصفه محرّكًا رئيسًا لتحقيق الاستدامة، وتعزيز الكفاءة التشغيلية، والقدرة على استباق المتغيرات، وتحويل التحديات إلى فرص ريادية. ويأتي هذا التقرير ليؤكد أن الابتكار في القطاع لم يكن خيارًا نظريًا، بل ممارسة مؤسسية تتجذّر، وتنمو، وتؤتي أُكُلها، وهو ما يجعل المملكة في طليعة الدول الساعية إلى مستقبل مائي مستدام، وقائم على المعرفة، ومفتوح على فرص التطور، وتحفيز الابتكار، وبناء الشراكات الوطنية والعالمية.

د. عبدالعزيز بن محارب الشيباني

وكيل وزارة البيئة والمياه والزراعة للمياه

تواجه المملكة تحديات عدة لمواكبة الطلب المتزايد على المياه في المملكة، نتيجة للتنمية الاقتصادية والمجتمعية، وشح مصادر المياه الطبيعية. مما يحتم علينا العمل جميعاً لضمان إدارة فاعلة ومتكاملة للموارد المائية لضمان استدامتها تحقيقاً لمستهدفات رؤية المملكة 2030. وانطلاقاً من أهمية الابتكار والتقنيات الحديثة في تعزيز الأمن المائي يأتي هذا التقرير ليقدم استعراضاً لأبرز التوجهات التقنية في قطاع المياه بهدف تسريع تبني حلول مبتكرة ومتكاملة وفعالة.

د. عبدالعزيز بن مالك المالك

وكيل وزارة البيئة والمياه والزراعة للبحث والابتكار

يمثل تبني التقنيات والابتكار في قطاع المياه محورًا أساسيًا لتحقيق مستهدفات الأمن المائي في المملكة، وتعمل الوزارة على دعم تبني التقنيات الحديثة من خلال تطوير منظومة البحث والابتكار، ويهدف هذا التقرير إلى استعراض أبرز التوجهات التقنية وتحديد الحلول التي يسهم تبنيها في تعزيز الكفاءة والاستدامة في هذا القطاع الحيوي.

نبذة عامة حول التقرير

يتطلب توجيه منظومة الابتكار القطاعية رصدا مستمرا وواسعا لأبرز توجهات التقنية والابتكار لتمكين أصحاب المصلحة من مختلف القطاعات الوطنية من تجويد سياساتهم وخططهم ذات العلاقة، وذلك لمواكبة عالم يزداد تعقيدا وتنافسية من الناحيتين التقنية والاقتصادية. وقد جاء تأسيس وزارة البيئة والمياه والزراعة لمنصة نبراس لتمكين استخدام أدوات ومنهجيات الرصد والاستطلاع التقفي لتوجيه منظومة الابتكار في قطاعات البيئة والمياه والزراعة نحو التركيز على التقنيات والابتكارات ذات الإمكانات القطاعية الكبرى.

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 بالتحديد على قطاع المياه من خلال النظر بعمق في مجموعة واحدة من أصل خمس مجموعات تقنية ذات إمكانات جيدة على امتداد سلسلة القيمة للقطاع، بما يطرح رؤى حول التوجهات والتطورات والفرص التي تُشكل مستقبل قطاع المياه.

أهداف سلسلة التقارير القطاعية:

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

2. **تسريع جهود توطين ونشر تقنيات المياه** وذلك بتسليط الضوء على التقنيات الأكثر جهوزية والتي من شأنها أن تعزز من كفاءة قطاع المياه واستدامته.

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

الفهرس

1

كلمات افتتاحية 2
نبذة عامة حول التقرير 3
الفهرس 4

2

الملخص التنفيذي 5
المقدمة 6
نطاق التقرير 7
المنهجية 10

3

مجموعات التقنيات ذات الأولوية 11
3.2 معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها 13
3.2.1 التقنيات البارزة 22
أ. تقنية التنظيف بالطحالب (Algal Turf Scrubber) (ATS) 24
ب. الفقاعات النانوية (Nanobubbles) 29
ج. الإفراغ الصفري للسوائل (Zero Liquid Discharge) (ZLD) 34
د. التحلل الحراري (Thermal Hydrolysis) 39
هـ. وسائل تحسين المعالجة القائمة على الذكاء الاصطناعي (AI-Enabled Treatment Optimization) 44

4

رؤى القادة 49

5

الملحق 51
المنهجية المفصلة 53
بطاقة تقييم معايير الاختيار 54
قاموس المصطلحات 55
شركاؤنا 59

الملخص التنفيذي

لدى إعداد هذا التقرير، حرص القائمون على منصة نبراس على أخذ الرؤى من مجموعة من الخبراء المتخصصين على مستوى القطاع لضمان دقة نتائجه من الناحية العلمية والأثر العملي. يُستفتح التقرير بنبذة عامة عن التحديات التي يواجهها قطاع المياه مع التركيز على مجموعة من التقنيات ذات الأولوية.

تندرج تحت مرحلة **معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها** ضمن سلسلة قيمة المياه (الاطلاع على الصفحة 12)، وتركز على تنقية المياه المستعملة لإزالة الملوثات منها، مما يتيح إمكانية استخدامها استخدامًا آمنًا في تغذية المياه الجوفية. ويسهم الحفاظ على المياه العذبة وتحويل مياه الصرف إلى مصدر موثوق للمياه في دعم التنمية المستدامة وتعزيز أمن المياه والقدرة على التكيف مع المناخ وتقليل التلوث، إضافة إلى تعزيز الاقتصاد الدائري وتقليل التكاليف التشغيلية وتحسين كفاءة البنية التحتية

استنادًا إلى ما سبق، يعتمد التقرير على منهجية فعالة من ثلاث مراحل متوافقة مع أفضل الممارسات العالمية، وتحديدًا إطار عمل منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD)، مما يضمن فعالية وشمولية نتائجه ورؤاه وإمكانية تطبيقها لتعزيز الابتكار وتطوير السياسات

وتتمثل المرحلة الأولى في إطار عمل منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية في الرصد المنهجي، إذ تتبع منصة نبراس في وزارة البيئة والمياه والزراعة أكثر من **10,000 مصدر** (منشورات علمية، وبراءات اختراع وتقارير القطاع والأخبار) بأكثر من **100 مليون نقطة بيانات** تُحدّث مرتين يوميًا لرصد التقنيات ذات الأهمية. بينما تمتاز المرحلة الثانية بتحليل توجهات التقنيات، إذ تُقيَّم التقنيات من حيث الزخم ومستوى النضج في الابتكار ومدى ملاءمتها لمواجهة التحديات الوطنية في قطاع المياه، و يُحدُّ التكرار من خلال جمع الابتكارات المتشابهة. إذ تُصنَّف الابتكارات المتقاربة في الفكرة أو الوظيفة ضمن مجموعات موحّدة لتفادي تكرار التقييم أو إدراج حلول متطابقة، مما يُسهم في تحسين دقة التحليل وكفاءته. وأخيرًا في المرحلة النهائية، تُقيَّم وتُختار التقنيات ذات الأثر المرتفع والتي تشهد تطورات سريعة، إذ تخضع لفحص دقيق لتقييم مدى أهميتها، مما يضمن اتخاذ قرارات مدروسة فيما يتعلق بالسياسات.

*يشير عام "2024" إلى السنة التقويمية الكاملة.

*تعريف مستوى جاهزية التقنية TRL مذكور في قسم قاموس المصطلحات

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

يستعرض التقرير التحولات في المجالات الاجتماعية والاقتصادية والسياسية لقطاع المياه بهدف ترتيب أولويات الاستثمارات في مجال البحث والتطوير والابتكار و خضعت ست توجهات رئيسة للدراسة لعام 2024* في معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها إذ تتكون توجهاتها من:

- طول فترة الجفاف ودرجات الحرارة القياسية
- اعتماد القطاع الصناعي لتقنيات إعادة تدوير المياه
- الاستثمارات في التقنيات الرقمية
- تطوير البنية التحتية وتوسيع القدرات
- تعزيز الأطر التنظيمية
- اللوائح الخاصة بتخفيف الملوثات الدقيقة

يسلط التقرير الضوء على المجالات التقنية الرئيسة ضمن مجموعة التقنيات ذات الأولوية، مُفصِلًا التقنيات الأكثر أهمية في كل مجال. يساعد المخطط في عملية اختيار أفضل التقنيات، إذ تُقيَّم كل تقنية بناءً على مستوى جاهزيتها (TRL)*، وسهولة تطبيقها، والأثر المحتمل. تمثل التقنيات الخمس الرئيسة التالية أفضل الخيارات ضمن كل مجال من المجالات التقنية:

- **تقنية التنظيف بالطحالب (ATS)** في مجال المعالجة البيولوجية
- **الفقاعات النانوية** في مجال المعالجة الكهروكيميائية والتحفيزية
- **الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD)** في مجال الأغشية والترشيح
- **التحلل الحراري** في مجال استعادة الموارد وتوليد الطاقة
- **وسائل تحسين المعالجة القائمة على الذكاء الاصطناعي** في مجال الرقمنة وتحقيق اللامركزية

في القسم التالي من التقرير يتناول قسم "التقنيات البارزة" رؤى تفصيلية حول كل تقنية مختارة في مجموعة التقنيات ذات الأولوية، مع التركيز على الجهات الفاعلة الرئيسة، ودراسات الحالة، ومستوى جاهزية السوق (MRL)، ومستوى جاهزية التقنية (TRL)، والأثر المتوقع. ويستكشف أبرز الحلول الناشئة، مثل نظم الرصد الآنية والتوائم الرقمية، استكشافًا متعمقًا مدعومًا بدراسات الحالة وتحليلات التوجهات ذات الصلة.
تستند معايير الاختيار المستخدمة في تصنيف التقنيات الخمس إلى المخطط التقني الموضح سابقًا. وتتضمن هذه المعايير الثلاثة ما يلي

- مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)
- الأثر المحتمل
- الزيادة في المؤشرات

ختامًا، يتضمن التقرير الرؤى التي جُمعت من المقابلات التي أجريت مع قادة الابتكار في القطاع الخاص، مما يقدم لمحة عامة حول الأولويات الرئيسة. إذ تمثل هذه الرؤى إطارًا توجيهيًا لصانعي السياسات وقادة القطاع والمستثمرين، وتمكنهم من تعزيز الابتكار والنهوض بالإدارة المستدامة للمياه بما يتماشى مع رؤية المملكة 2030.

المقدمة

إنّ التقنيات والابتكار أهم محرّكات لتحقيق أهداف المملكة لقطاع المياه، إذ تساعد على تعزيز الأمن والاستدامة والكفاءة. ومنطلقا من إدراك المملكة لحاجتها إلى حلول تحويلية، فإنها تعمل على تسريع تبني التقنيات الناشئة لمواجهة التحديات الحساسة وخلق فرص جديدة. واستنادًا إلى تقرير "الابتكار المائي بالمملكة العربية السعودية ، خارطة طريق تبني التقنيات" السابق، والذي حدد 20 مجموعة تقنية، من خلال حصر محور التركيز على مجموعة واحدة من الأولويات التقنية ذات التأثير الكبير ضمن هذا المشهد الأوسع. فإن هذه المجالات المُركزة تعالج تحدي فقدان المياه داخل شبكات التوزيع، وتتيح فرصة استعادة المياه وإعادة استخدامها من خلال المعالجة المُتقدمة وإعادة الاستخدام، بهدف تسريع اعتماد الحلول التحويلية في هذا القطاع.

يحدد التقرير ست توجهات رئيسة قطاعية بارزة لعام 2024، مع التركيز على ترشيد استهلاك المياه بصفتها أولوية بالغة الأهمية. في الوقت الحالي، تُدرك الشركات حول العالم المخاطر المالية المتزايدة والمُرتبطة بالتحديات المُتعلقة بالمياه، مما يدفع إلى زيادة الاستثمار في حلول إدارة المياه المستدامة. ومن أهم التطورات التبني السريع للعدادات الذكية، التي تتوسع عالميًا، ومن المتوقع أن تصل قيمتها السوقية إلى 7.36 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2031. كما تُكثّف الحكومات جهودها، باستثماراتٍ ضخمة في البنية التحتية للمياه لتطوير أنظمة المرافق وتحسينها، مثل تطوير البنية التحتية للمياه في الولايات المتحدة الأمريكية بقيمة 11.5 مليار دولار .

وتشمل الابتكارات التقنية الرئيسة التي تُحرّك هذا التحوّل أنظمة المراقبة في الوقت الفعلي، والتحليلات القائمة على الذكاء الاصطناعي، ومنصات التوأمة الرقمية، وشبكات المياه ذاتية التكيف. وتُحدث هذه التطورات ثورةً في آلية إدارة موارد المياه، مما يجعل الأنظمة أكثر كفاءةً ومرونة.

وتماشياً مع هذه التوجهات العالمية، تهدف الاستراتيجية الوطنية السعودية للمياه إلى تقليل الاعتماد على مصادر المياه غير المتجددة بشكل كبير. ومن الأهداف الأخرى خفض تكاليف إنتاج المياه بحلول عام 2035، مما يُؤكد التزام المملكة القوي بإدارة المياه المستدامة والفعّالة. وتعكس هذه المبادرات تحوّلاً عالمياً متزايداً نحو حلول إدارة مياه أكثر ذكاءً وكفاءةً بما يوازن بين الأولويات الاقتصادية والبيئية.

وقد ضُمم هذا التقرير ليقدم رؤىً مُنظّمة حول توجهات ابتكارات المياه والتقنيات الناشئة في المملكة العربية السعودية. يبدأ التقرير باستعراضٍ عامٍّ للتحديات الوطنية الرئيسة في قطاع المياه، يليه تحليلٌ للتطورات التقنية والفرص. وينقسم التقرير إلى أقسامٍ تستكشف وتُسلّط الضوء على التقنيات الناشئة، وتدرس جدوى تطبيقهم، وتأثيرهم المُحتمل. كما يُمكن للقراء تصفح تحليلات الخبراء، ودراسات الحالة، والتوجهات القطاعية، مما يضمن فهمًا شاملًا ومباشرًا للابتكارات التي تُشكّل مستقبل المياه في المملكة العربية السعودية. كما ضُمّم كل قسم لدعم صانعي السياسات، وقادة الصناعة، وأصحاب المصلحة في اتخاذ قراراتٍ مستنيرة تتماشى مع أهداف رؤية 2030 في مجال استدامة المياه.

نطاق التقرير (3/1)

يركز هذا التقرير على"معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها"، مستعرضًا التوجهات والتقنيات الناشئة لها. ويُقيّم التقرير هذه التقنيات وأهميتها، وتأثيرها المحتمل على قطاع المياه في المملكة بالإضافة إلى ذلك، يقدم التقرير رؤى عملية لتعزيز الابتكار والاستدامة.

الجمهور المستهدف:

صمم هذا التقرير لأصحاب المصلحة الذين يسهمون في تشكيل مستقبل قطاع المياه في المملكة العربية السعودية:

صانعو السياسات:

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

القادة وصُنّاع القرار:

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

المستثمرون:

الجهات الممولة للمشاريع التقنية في قطاعات البيئة والمياه والزراعة

الباحثون والعلماء:

المتخصصون في البحث العلمي الذين يسهمون في تطوير حلول وممارسات مستدامة في قطاعات البيئة والمياه والزراعة

المبتكرون ورواد الأعمال

الشركات الناشئة والمبتكرون الذين يقدمون حلولاً فعالة لمواجهة التحديات

يلخص التقرير التطورات الرئيسة في مجموعة معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها، ويستعرض البيانات المتعلقة بالتأثير الاقتصادي والبيئي لهدر المياه، مع التأكيد على الحاجة إلى استثمارات وأطر تنظيمية مستهدفة. وتتماشى هذه الرؤى مع جهود المملكة في إطار رؤية 2030، مما يعزز أهمية تبني التقنيات والتخطيط لتعزيز الأمن المائي على الصعيد الوطني.

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

يواجه قطاع المياه في المملكة العربية السعودية سلسلة من التحديات المتشابكة في سلسلة القيمة الخاصة به، بدءًا من الإمداد والنقل إلى التوزيع ومعالجة مياه الصرف وإدارة الطلب. ويعكس اعتماد المملكة على تحلية المياه ومصادرها المتجددة المحدودة الحاجة إلى حلول مبتكرة لتحسين استخدام الموارد، وخفض التكاليف وتعزيز الاستدامة. وتشمل التحديات الرئيسة ارتفاع حجم الطلب على الطاقة اللازمة لإنتاج المياه، والهدر الكبير في التوزيع، وقلة استخدام مياه الصرف، وزيادة الاستهلاك الحضري والصناعي للمياه وتتطلب هذه المسائل تدخلات تقنية موجهة لتحقيق أهداف الإدارة المستدامة للمياه المحددة في رؤية 2030.

يقدم هذا التقرير تحليلًا تفصيليًا لمجموعة محددة من التقنيات ذات الأولوية. كما يقدم تحليلًا تفصيليًا لتقنيات معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها والتي تندرج ضمن مرحلة معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها.

2 معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

زيادة إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة لتقليل الاعتماد على مصادر المياه غير المتجددة.

نطاق التقرير (3/2)

المواءمة مع الأهداف الوطنية

تماشيًا مع الأهداف الوطنية، يركز هذا التقرير على معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها، وهي مجموعة مهمة من التقنيات ذات الأولوية والتي تؤدي دورًا حاسمًا في تعزيز كفاءة استخدام المياه وتقليل الخسائر وتعزيز الاستدامة.

ويستند الاختيار على التأثير الذي تحدثه التقنية على القطاع وعلى النظام البيئي الأوسع للمياه، مما يضمن اتباع نهج شامل لإدارة موارد المياه بحيث تكون الفوائد اللاحقة متوافقة مع الأهداف الوطنية:

معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

- **الاستدامة والأمن المائي:** تسعى المملكة العربية السعودية إلى **النهوض بالاقتصاد الدائري للمياه**، إذ تؤدي معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها دورًا محوريًا في تأمين مصادر مياه بديلة للاستخدامات الزراعية والصناعية والحضرية.
- **التطورات التقنية وإمكانات الاستثمار:** تقدم الابتكارات في مجال معالجة مياه الصرف الصحي، مثل **الترشيح المتقدم، وأنظمة المعالجة الموفرة للطاقة، واسترداد الموارد**، فرصًا **للتوسع والانتشار.**

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

ومن الضروري مواجهة التحديات في سعينا نحو إدارة مستدامة للمياه، وتلعب تقنية معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها دورًا محوريًا في هذه الجهود، إذ تستهدف جوانب مختلفة ومتكاملة في دورة المياه. تستكشف الأقسام التالية كيفية إسهام هذه التقنية في تعزيز كفاءة المياه وموثوقيتها.

معالجة التحديات الرئيسة في سلسلة قيمة المياه

تسهم **تقنية معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها** مباشرة في **تحقيق الدورة المغلقة للمياه** وذلك بتطوير البنية التحتية لمياه الصرف الصحي، وزيادة كفاءة معالجتها، والتوسع في **استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة بصفتها مصدر مياه بديل ومستدام.**

وبناءً على ذلك، **أُدرجت خمس مجالات رئيسة**
لتقنيات معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها:

1. العلاج البيولوجي
2. المعالجة الكهروكيميائية والتحفيزية
3. الأغشية والترشيح
4. استعادة الموارد وتوليد الطاقة
5. الرقمنة واللامركزية

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

نطاق التقرير (3/3)

سلسلة القيمة	الإمداد	النقل والتخزين	التوزيع	معالجة مياه الصرف الصحي وإعادة استخدامها	الطلب	
مجموعات التقنيات ذات الأولوية	أنظمة التناضح العكسي المتقدمة	إدارة التسرب الذكية		معالجة مياه الصرف الصحي وإعادة استخدامها	الري المبتكر	الاستهلاك المبتكر للمياه في المنازل
توجهات رئيسية	تقليل تكاليف الطاقة الإنتاجية والتكاليف الرئيسية	تقليل تكاليف نقل المياه	تحسين تغطية شبكة المياه	تحسين شبكة مياه الصرف الصحي		تقليل مستويات استهلاك المياه في المناطق الحضرية [لتر للفرد في اليوم الواحد]
	تحقيق الأثر البيئي الأمثل لتحلية المياه	زيادة عدد أيام التخزين المتاحة	تقليل خسائر توزيع المياه	تحسين معالجة مياه الصرف الصحي		تقليل مستويات استهلاك المياه الصناعية
	زيادة استخدام المياه من المصادر غير المتجددة		ضمان إمدادات مياه موثوقة وبدون انقطاع	زيادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة		الحد من استخدام مصادر المياه غير المتجددة (استهلاك المياه الزراعية)
	تحسين المحافظة على جودة المياه الجوفية					

تتألف عملية جمع المعلومات حول التقنيات وتجميع التقرير من نهج ثلاثي المراحل - باتباع الممارسات المعمول بها مثل إطار الحوكمة الاستباقية للتقنيات الناشئة، الصادر عن منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية

الرصد المنهجي
تتبع منصة نبراس في وزارة البيئة والمياه والزراعة أكثر من **10,000 مصدر** (منشورات علمية، وبراءات اختراع وتقارير القطاع والأخبار) مع أكثر من **100 مليون نقطة بيانات** تُحدّث مرتين يوميًا لرصد التقنيات ذات الأهمية.

تحليل توجهات التقنيات
تُقيّم التقنيات من خلال سرعة التحول، وتكرار المؤشرات، وتوجهات التمويل، ومراحل الابتكار، وذلك لتحديد زخم تطورها.

تقييم التقنية
تُختار التقنيات التي تُظهر تأثيرًا مرتفعًا وسرعة في النضج لتخضع لتحليل تفصيلي يهدف إلى تقييم مدى جدواها في تعزيز السياسات العامة، وذلك وفقاً لمعايير تشمل قابلية التطبيق، والأثر المتوقع، ومستوى الجاهزية التقنية، بما يضمن دعم اتخاذ قرارات استراتيجية مبنية على أدلة موثوقة.

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

المنهجية

تم إعداد هذا التقرير وفق ثلاث مراحل ركزت على تحليل المؤشرات التقنية

1. جمع المؤشرات وتحديد التقنية

بالنظر إلى الممارسات الراسخة، مثل إطار الحوكمة الاستباقية للتقنيات الناشئة (OECD 2024)، فقد تضمنت الخطوة الأولى تحليل جمع المؤشرات وتقييمها تقيمًا منهجيًا لتحديد التقنيات ذات الصلة ولتحقيق ذلك اعتمد الفريق أسلوب مسح يجمع بين مزايا الخبرة البشرية والذكاء الاصطناعي، مستخدمًا قاعدة بيانات تحتوي على أكثر من 100 مليون نقطة بيانات (مثل براءات الاختراع وتقارير الصناعة والمنشورات العلمية، إلخ). وعلى مدار السنوات الخمس الماضية، حُصل على حوالي 27,000 إشارة متعلقة بمعالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها. وباستخدام الذكاء الاصطناعي لتوليد البيانات المعززة بالاسترجاع (RAG) والتحقق من صحة الخبراء البشريين، جُمعت قائمة طويلة تضم 132 تقنية مميزة مذكورة في معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها لإجراء تحليل متعمق.

2. تقييم التقنية والتعريف بالمشهد التقني

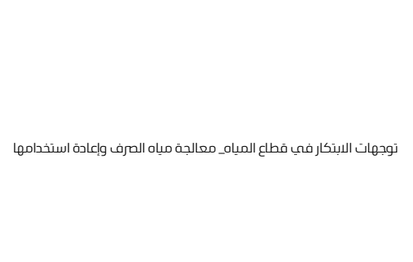
في الخطوة الثانية، أُنشئ مشهد تقني شامل من القائمة الطويلة للتقنيات المذكورة في المؤشرات. أولاً استبعاد كل التقنيات التي لا تعد ناشئة، كتلك التي دخلت بالفعل نطاق التبني السائد في الأسواق ذات الصلة، مثل: "عدادات المياه الذكية". كما قُلل التداخل المفاهيمي بين التقنيات وذلك بإدراج تقنيات متشابهة أو فريدة (مثل "المستشعرات الروبوتية"، و"السباحة الحرة"، و"الأنظمة غير المقيدة"). وأخيرًا، جُمعت التقنيات في مجالات تقنية وفقًا لغرض الاستخدام والخصائص الوظيفية. وأخيرًا قُيمت جميع التقنيات المدرجة في المشهد بناءً على مستوى النضج وإمكانية التأثير وسهولة التطبيق وفقًا للمعايير الموضحة في خارطة طريق تبني التقنيات المياه لوزارة البيئة والمياه والزراعة.

3. تحليل التفاصيل واختيار العناصر المميزة

في الخطوة الأخيرة، دُرست مؤشرات كل تقنية بالتفصيل. وبناءً على ذلك وُضعت أوصاف تقنية تشمل معلومات مثل الجهات الفاعلة الرئيسة عالميًا، والحالة الراهنة للاعتماد، وآفاق التطوير، ودراسات الحالة ذات الصلة. في هذا التقرير، وأُختيرت تقنية واحدة من كل مجال من المجالات التقنية المحددة لعرضها بصفتها عنصرًا محوريًا في هذا التقرير. وقد اعتُمد الاختيار من خلال تقييم ثلاثة معايير: نضج التقنية، وإمكانية التأثير في المملكة العربية السعودية، ونمو عدد المؤشرات وتأثيرها خلال عام ٢٠٢٤. وكان الأساس المنطقي لهذا النهج هو اختيار تقنيات واعدة للغاية ذات تطورات كبيرة تحققت خلال العام الماضي.

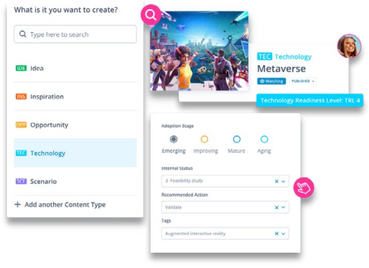
توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

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.



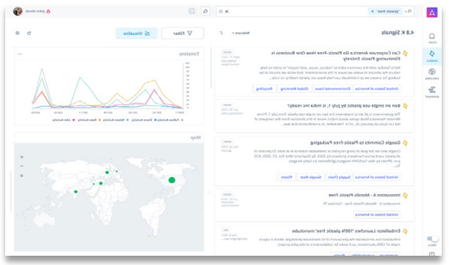
رادار التقنية

من خلال عرض راداري مرئي تفاعلي، يُمكن تحليل التقنيات الناشئة وتقييم أهميتها ومستوى نضجها وإمكانية تطبيقها. يُساعد 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 من التقييمات الذاتية، وتُسهّل تحديد فرص الابتكار وتقييم المخاطر بكفاءة.



المراقبة الآلية

تستخدم وظيفة الاستكشاف في المنصة تحليلات مدعومة 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

مجموعات التقنيات ذات الأولوية

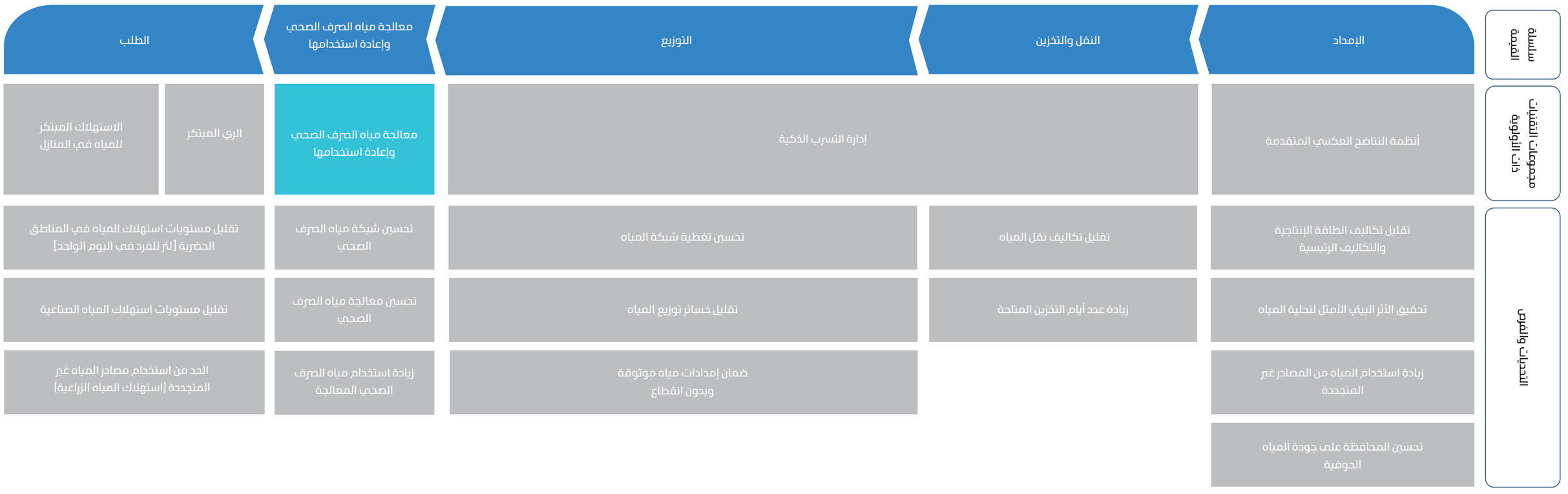
التحديات والفرص المتاحة في قطاع المياه

ينص بيان رؤية قطاع المياه على ما يلي:

> قطاع مائي مستدام ينمي موارد المياه ويحافظ عليها، ويحمي البيئة ويوفر إمدادات آمنة، وخدمات عالية الجودة وكفاءة تسهم في التنمية الاقتصادية والاجتماعية

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

يُعدّ الاستثمار في البحث والتطوير والابتكار في قطاع المياه أمرًا أساسيًا للتغلب على التحديات العالمية والوطنية. وتحقيق الإدارة المستدامة للمياه يتطلب تركيزًا استراتيجيًا على التقنيات التي تُعالج الأولويات في كل دولة، مع تعزيز التعاون بين القطاعين العام والخاص، ولتحقيق النجاح يُعدّ الرصد المستمر للتوجهات الوطنية والعالمية، والتقدم التقني والاحتياجات المتغيرة أمرًا بالغ الأهمية. ومن خلال مواءمة السياسات وجهود الابتكار، يُمكن للمملكة العربية السعودية إحداث تغييرًا مؤثرًا عبر سلسلة قيمة المياه. وكما هو موضح في مبادرة تطوير القطاع الزراعي والريفي، يتمثل الهدف الوطني في تقليل الاعتماد على مصادر المياه غير المتجددة وخفض تكاليف إنتاج المياه بحلول عام 2035.

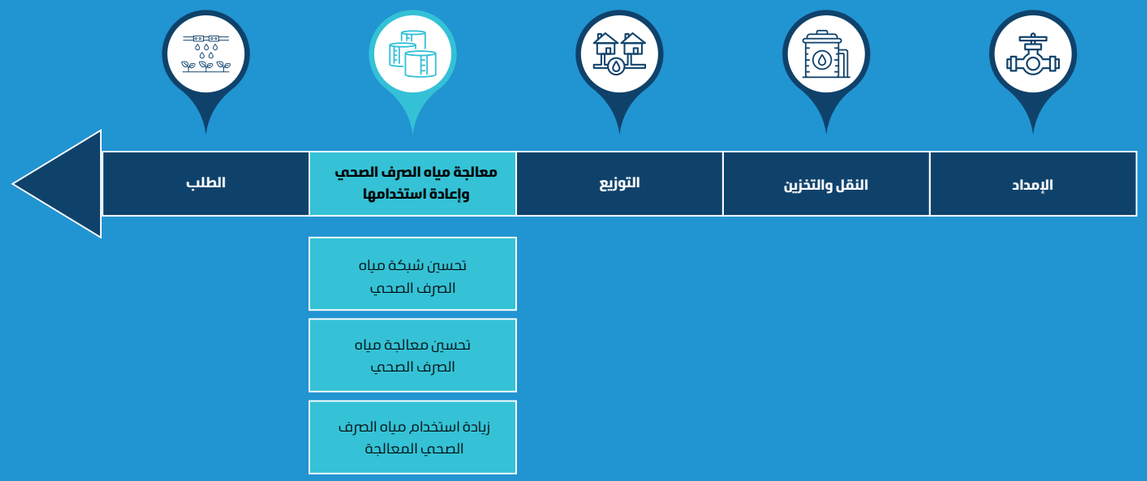


سلسلة القيمة المصدر: "الابتكار المائي في المملكة العربية السعودية، خارطة طريق تبني التقنيات" 2024

محور التركيز ضمن مجموعات التقنيات ذات الأولوية

3.1 معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

تعالج تقنية "معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها" تحديات مياه الصرف الصحي من خلال الاستفادة من حلول مثل مرشحات التربة واسعة النطاق، والأراضي الرطبة الإنشائية الهجينة والمعالجة القائمة على الإنزيمات. يمكن لهذه المجموعة التقنية ذات الأولوية أن تقلل من هدر المياه وتخفض التكاليف ذات الصلة.



معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

تتضمن معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها عملية معالجة مياه الصرف لإزالة الملوثات، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات مختلفة مثل الري الزراعي والعمليات الصناعية وتغذية المياه الجوفية.

وتؤدي هذه الممارسة دورًا حاسمًا في الحفاظ على موارد المياه العذبة، وحماية المنظومات، وتعزيز الأمن المائي، ولا سيما في المناطق القاحلة، وذلك بإعادة استخدام مياه الصرف المعالجة، وبذلك ينخفض الطلب على المياه العذبة، مما يدعم الإدارة المستدامة للمياه.

بالإضافة إلى ذلك، فإن معالجة مياه الصرف تسهم في حماية البيئة من خلال منع التلوث وتحسين جودة المياه واستعادة الموائل الطبيعية. ومن منظور اقتصادي، تستفيد القطاعات من خفض التكاليف من خلال تقليل نفقات شراء المياه وضمان الامتثال للوائح البيئية. وعلاوة على ذلك، توفر مصدرًا بديلاً موثوقًا للمياه، مما يزيد من القدرة على مواجهة التحديات المناخية مثل الجفاف.

وضعت المملكة العربية السعودية هدفًا طموحًا لتحقيق معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها في المناطق الحضرية بنسبة 100% بحلول عام 2025، وإعادة استخدامها في الري والتطبيقات الصناعية والمساحات الخضراء في المناطق الحضرية. وتعد هذه المبادرة عنصراً أساسياً في الاستراتيجية الوطنية للمياه في المملكة العربية السعودية ورؤية 2030، وتهدف إلى تعزيز استدامة المياه وتقليل الاعتماد على مصادر المياه غير المتجددة.

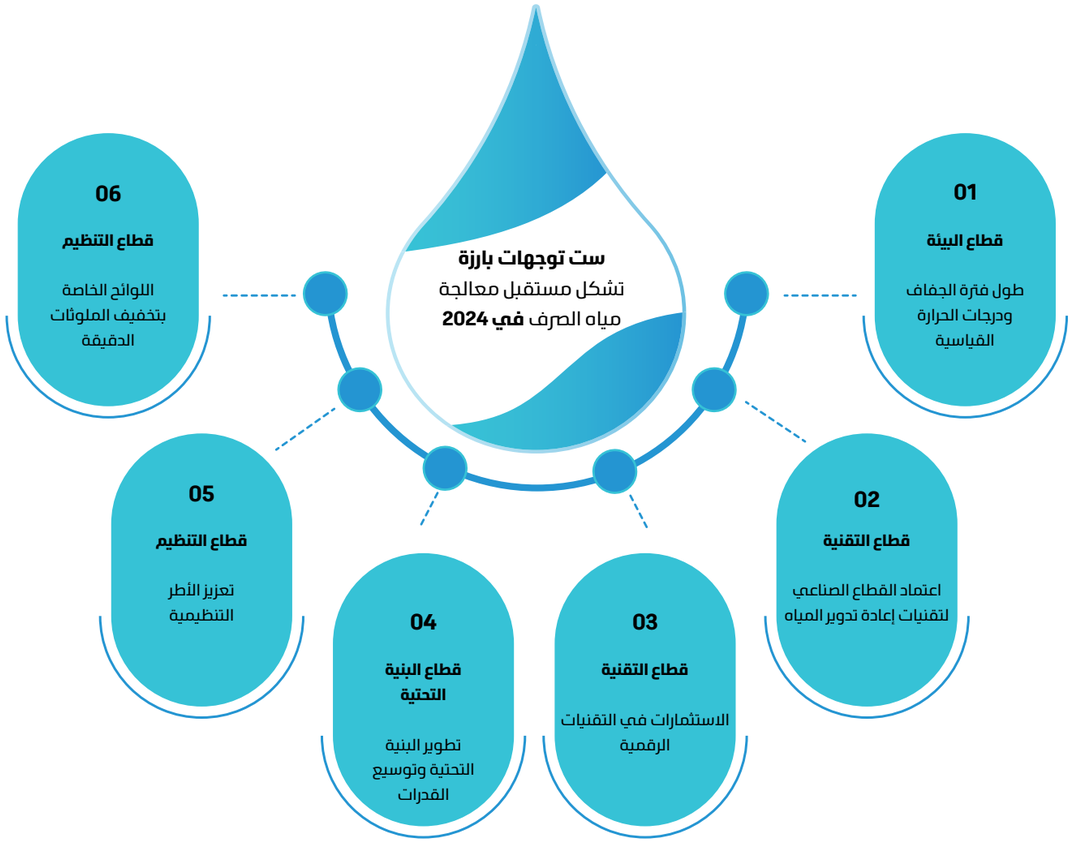
تلعب إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة دوراً حاسماً في تحسين تخصيص الموارد المائية. فمن خلال إعادة توجيه النفايات السائلة المعالجة عالية الجودة للاستخدامات غير الصالحة للشرب - مثل ري الحدائق، والمسطحات الخضراء، والحقول الزراعية - يقلل الطلب على مصادر المياه العذبة المحدودة. ويسمح هذا النهج بالحفاظ على المياه العذبة للاستخدامات المنزلية والصناعية الأساسية، بينما تدعم المياه المعالجة البنية التحتية الخضراء وإنتاج الغذاء.

مع زيادة ندرة المياه في العالم، فإن دمج معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها في استراتيجيات إدارة المياه أمر ضروري لتحقيق الاستدامة وكفاءة الموارد، والإشراف البيئي على المدى الطويل.

التوجهات القطاعية (3/1)

من الضروري تكوين فهم واضح للسياق القطاعي الأوسع نطاقًا وذلك لتحديد الفرص التقنية وترتيب أولويات الاستثمارات في مجال البحث والتطوير والابتكار، ويكشف تحليل التوجهات الحالية في قطاع المياه عن تحولات في المجالات الاجتماعية والاقتصادية والسياسية، مما **يشكل المشهد الذي تتأسس فيه التقنيات الناشئة.** إن استكشاف هذه البيئة المتغيرة عنصر أساسي للتنبؤ بالتطورات المستقبلية والاستعداد لها.

في سياق معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها، **تميزت ست توجهات رئيسة في عام 2024**، إما بتسريع التطورات الجارية أو تقديم سبل جديدة للتغيير، واستنادًا إلى المشهد التقني الموضح أعلاه، يسلط هذا القسم الضوء على أبرز التوجهات التي رُصدت والتي تشمل التوجهات الست في معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها في قطاعات البيئة والتقنية والتنظيم والبنية التحتية.



التوجهات القطاعية (3/2)

طول فترة الجفاف ودرجات الحرارة القياسية

تعزيز الحاجة إلى معالجة المياه وإعادة استخدامها

في عام 2024، **قامت الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي (NOAA)*** بقياس درجة حرارة غير مسبوقة، إذ بلغ متوسط درجات الحرارة العالمية 1.29 درجة مئوية فوق المعدل الطبيعي للقرن العشرين، مما يجعله العام الأكثر سخونة منذ بدء تسجيل درجات الحرارة في عام 1850، وأدت هذه الحرارة الشديدة إلى موجات جفاف شديدة، مما أثر سلبًا على النظم البيئية والاقتصادات المحلية. وأدت موجات الجفاف الطويلة وارتفاع درجات الحرارة إلى زيادة الحاجة إلى معالجة فاعلة لمياه الصرف وإعادة استخدامها مع تراجع مصادر المياه التقليدية ونمو الطلب على حلول إدارة المياه المستدامة. وسعت إسبانيا للحصول على موافقة الاتحاد الأوروبي لإعادة توجيه أكثر من مليار يورو من تمويلات التعافي لتعزيز قدرة فالنسيا على التكيف مع المناخ، مع التركيز على تحسين أنظمة المياه وتطوير محطات تحلية المياه بعد الفيضانات الشديدة. وفي الولايات المتحدة دفعت حالات الجفاف غير المعتادة الخبراء إلى الدعوة إلى إجراء تغييرات طويلة الأجل، كزيادة تجديد المياه الجوفية وإعادة استخدام مياه الصرف، لمنع وجود نقص حاد في المياه.

المؤشرات المحلية:

أعلنت المؤسسة العامة للري عن 96 مشروعًا جديدًا لتوسيع نطاق إعادة استخدام مياه الصرف المعالجة في القطاعات الزراعية والعمرانية والصناعية، وبالتالي تقليل الاعتماد على المياه العذبة. وتساعد هذه المبادرة على تعزيز القدرة على التكيف مع تغير المناخ، وضمان أمن المياه في ظل موجات الحر المتزايدة.

مجلة المياه الذكية

اعتماد القطاع الصناعي لتقنيات إعادة تدوير المياه

يُظهر وجود ارتفاع عالمي في أواخر عشرينيات وثلاثينيات القرن الحادي والعشرين

في عام 2024، تسارعت **وتيرة تبنّي القطاع الصناعي لتقنيات إعادة تدوير المياه**، إذ بلغت قيمة السوق العالمية لإعادة تدوير المياه وإعادة استخدامها 18.3 مليار دولار ومن المتوقع أن تنمو بمعدل نمو سنوي مركب بلغ 2.214 مليار حف عام 2034. وزاد القطاع الصناعي من معدلات تنفيذ أنظمة متقدمة لإعادة استخدام المياه لمعالجة ندرة المياه والمخاوف البيئية، فمثلاً تخطط أمازون ويب سيرفيسز لمضاعفة مراكز البيانات الخاصة بها باستخدام المياه المعاد تدويرها في الولايات المتحدة، بهدف الاستفادة من 800 مليون جالون سنويا بحلول عام 2030. وشهدت العديد من الصناعات، بما في ذلك صناعة أشباه الموصلات والتعدين والبلاستيك، زيادة كبيرة في الطلبات على أنظمة الاسترداد العالي وحلول الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) على مدى العامين الماضيين، مدفوعة بالضغوط التنظيمية وضرورة تقليل المخاطر.

المؤشرات المحلية:

أطلقت شركة المياه الوطنية ستة مشاريع شراكة بين القطاعين العام والخاص في عام 2024. وتهدف هذه المبادرات إلى توسيع نطاق إعادة استخدام المياه البلدية والصناعية غير الزراعية، وتعزيز الاستدامة وتقليل الاعتماد على المياه العذبة.

مجلة المياه الذكية

الاستثمارات في التقنيات الرقمية

تسارع وتيرة العمل في قطاع معالجة المياه

شهد قطاع معالجة المياه في عام 2024 طفرة كبيرة في الاستثمارات في التقنيات الرقمية، ومن المتوقع أن تخصص أمريكا الشمالية وحدها 169.5 مليار دولار أمريكي لحلول المياه الرقمية بين عامي 2024 و2033. ويشمل هذا التوجه اعتماد الأتمتة وإنترنت الأشياء وتحليلات البيانات لتعزيز كفاءة محطات معالجة مياه الصرف واستدامتها (WWTPs). على سبيل المثال، أظهر تنفيذ التوائم الرقمية - النسخ الافتراضية للأنظمة المادية – عائدًا على الاستثمار في غضون سنتين إلى ثلاث سنوات من خلال تحسين أداء المحطات وتقليل تكاليف الصيانة.

المؤشرات المحلية:

تعمل المملكة العربية السعودية على تسريع الاستثمارات في التقنيات الرقمية لمعالجة المياه مع إطلاق المركز الدولي لأبحاث المياه، وتركز هذه المبادرة على اقتصاديات المياه ومكافحة التلوث وأنظمة المتابعة الرقمية، مما يعزز التزام المملكة بمعالجة المياه الذكية.

وكالة الأنباء السعودية

*الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي (NOAA) هي وكالة علمية تابعة لوزارة التجارة الأمريكية، مسؤولة عن رصد وإدارة الأنشطة المتعلقة بالمحيطات والغلاف الجوي والمناخ. تُجري الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي أبحاثًا، وتُصدر تنبؤات جوية، وترصد التغيرات البيئية، وتدعم جهود الحفاظ على النظم البيئية البحرية.

التوجهات القطاعية (3/3)

تطوير البنية التحتية وتوسيع القدرات

تمهيد الطريق للابتكار التقني

شهدت **الاستثمارات العالمية** في تطوير البنية التحتية لمياه الصرف وتوسيع قدراتها ارتفاعًا كبيرًا، مما يمهد الطريق للابتكار التقني. وأفادت وكالة حماية البيئة الأمريكية أن هناك حاجة إلى تمويل بقيمة 630 مليار دولار على مدى العقدين المقبلين لتحديث أنظمة مياه الصرف، بزيادة 73% عن تقديرات عام 2012.

وبالمثل، من المتوقع أن تستثمر الدول الأوروبية ما يقرب من 476 مليار دولار أمريكي في البنية التحتية للمياه والصرف بين عامي 2024 و2030. ويهدف هذا الاستثمار الكبير إلى تجديد الأنظمة القديمة، وتقليل المياه غير المتجددة، ودمج التقنيات الذكية لتحسين مستويات المتابعة والتحكم.

المؤشرات المحلية:

في عام 2024، أكملت شركة المياه الوطنية 118 مشروعًا للمياه والصرف في المملكة، باستثمارات تجاوزت 5.57 مليار ريال سعودي (1.48 مليار دولار). وساهمت هذه المشاريع في توسيع قدرات معالجة مياه الصرف بمقدار 478 ألف متر مكعب يوميًا، وإنشاء سعة تخزينية إجمالية تتجاوز 250 ألف متر مكعب، يستفيد منها نحو 1.8 مليون نسمة.

شركة المياه الوطنية

تعزيز الأطر التنظيمية

التأكيد على أهمية تعزيز إدارة مياه الصرف الصحي

في عام 2024، **كثفت الهيئات التنظيمية العالمية جهودها لتعزيز إدارة مياه الصرف** من خلال أطر معززة. وقد راجع الاتحاد الأوروبي توجيهه الخاص بمعالجة مياه الصرف في المناطق العمرانية، ونتج عن ذلك التكليف بتنفيذ معالجات متقدمة لإزالة الملوثات مثل النيتروجين والفوسفور واللدائن الدقيقة بحلول عام 2039. وتهدف هذه المبادرة إلى تحقيق طموح "التلوث الصفري"، وضمان وجود مسطحات مائية أنظف وتحسين الصحة العامة. في الولايات المتحدة تهدف خطة إعادة استخدام المياه (WRAP) الصادرة عن وكالة حماية البيئة إلى تعزيز تخطيط إعادة استخدام المياه وتنفيذها في جميع أنحاء البلاد.

المؤشرات المحلية:

كشفت الشركة السعودية لشراكة المياه عن خطة شاملة مدتها سبع سنوات (2024-2030) لتعزيز قدرات معالجة مياه الصرف، وتهدف إلى زيادة تغطية الشبكة الوطنية لمياه الصرف من 64% إلى 95% بحلول عام 2030، مما يعزز جمع مياه الصرف ومعالجتها للتخفيف من الآثار البيئية.

الشركة السعودية لشراكات المياه

اللوائح الخاصة بتخفيف الملوثات الدقيقة

التأكيد على أعلى معايير جودة المياه والصحة العامة

في عام 2024، تكثفت الجهود العالمية للتخفيف من الملوثات الدقيقة في مياه الصرف، مع التركيز على الصحة العامة وحماية البيئة، وقد حددت وكالة حماية البيئة الأمريكية مخاطر كبيرة للإصابة بالسرطان مرتبطة بالمواد الكيميائية (PFAS) في حمأة الصرف المستخدمة كسماد، مما يسلط الضوء على الحاجة الملحة إلى وجود لوائح صارمة. وتتطلب هذه التطورات اعتماد تقنيات متقدمة لمعالجة مياه الصرف، مثل الترشيح بالكربون المنشط وعمليات الأكسدة المتقدمة، للقضاء بشكل فاعل على الملوثات الدقيقة الضارة وحماية جودة المياه.

المؤشرات المحلية:

طور الباحثون في جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية طريقة لإزالة الملوثات العضوية الدقيقة الضارة من مياه الصرف باستخدام الضوء النبضي عالي الكثافة (HIPL). ويؤدي هذا النهج إلى تحلل الملوثات بسرعة، بما في ذلك المستحضرات الصيدلانية والمواد الكيميائية الصناعية، وفي غضون أجزاء من الثانية، مما يوفر حلاً قابلاً للتطوير لتحسين جودة المياه والصحة العامة.

مجلة المياه الذكية

من التوجهات القطاعية إلى إحراز التقدم التقني

يتأثر المشهد المتغير لمعالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها بمجموعة من التوجهات البيئية والصناعية والتقنية العالمية، إذ أصبحت القدرة على التكيف مع المناخ محط تركيز بالغ الأهمية، إذ تواجه المناطق في جميع أنحاء العالم موجات جفاف طويلة وأنماط طقس لا يمكن التنبؤ بها إلى جانب تزايد ندرة المياه. وفي الوقت نفسه، تتجه القطاعات الصناعية بشكل متزايد إلى إعادة تدوير المياه وإعادة استخدامها لتقليل الاعتماد على مصادر المياه العذبة، وتقليل الأثر البيئي، وضمان الاستدامة التشغيلية. بالإضافة إلى ذلك، يُحدث التحول الرقمي ثورة في قطاع المياه، إذ أُستُحدثت المراقبة الذكية والتحليلات التنبؤية والأتمتة لتحسين عمليات معالجة مياه الصرف، كما تؤدي التطورات التنظيمية دورًا حاسمًا، إذ تؤدي السياسات الأكثر تشددًا إلى اعتماد حلول المعالجة المتقدمة لتحسين جودة المياه والحد من التلوث.

ولمواجهة هذه التحديات، تؤدي التطورات التقنية دورًا جوهريًا في تحويل معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها من المعالجات البيولوجية والتحفيزية إلى الرقمنة واستعادة الموارد، وتُحدث التقنيات المتطورة تغييرات ذات تأثير في كيفية معالجة المياه وإعادة استخدامها وإدارتها، ويستعرض القسم التالي هذه التقنيات ذات الإمكانات العالية، ويرسم خريطة لتأثيرها وجدواها في مواجهة التحديات التي تفرضها إدارة المياه اليوم.

تقنيات معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها التي تحقق الكفاءة والاستدامة

سيؤدي تكامل **تقنيات معالجة مياه الصرف الصحي الناشئة إلى تعزيز الكفاءة والاستدامة والقدرة على التكيف** في قطاع المياه في المملكة العربية السعودية، ودعم الجهود الرامية إلى **الحد من الاعتماد على المياه العذبة، وتوسيع البنية التحتية، وتعزيز المراقبة الرقمية.** ومن خلال تحسين **إزالة الملوثات واستعادة الموارد**، ستعزز هذه التطورات **جودة المياه والامتثال التنظيمي والقدرة على التكيف مع المناخ**. ومع تسارع وتيرة الاستثمارات، ستعمل هذه التقنيات على **تحسين المشاريع، ودفع عجلة الابتكار، وضمان الأمن المائي على المدى الطويل.** يقدم القسم التالي **نظرة عامة شاملة على الابتكارات الرئيسة**، وتوسيع نطاق الوعي، وإثراء التخطيط في مجال البحث والتطوير والابتكار، وتوجيه المزيد من الاستكشافات في مجال **معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها.**

و يضم المخطط البياني القادم على 40 **تقنية مبتكرة ذات إمكانات عالية ضمن مجموعة إدارة مياه الصرف الصحي**، تمتد من المكاسب قصيرة الأجل إلى الرؤية طويلة الأجل وتتراوح بين البحوث الاستكشافية والحلول الجاهزة. كما تحدد الأساليب الواعدة لتعزيز **كفاءة معالجة مياه الصرف الصحي، وتحسين استعادة الموارد وتكامل أنظمة المراقبة الذكية.** وعلاوة على النضج التقني، يقيّم المخطط **مدى التأثير وسهولة التنفيذ،** ويوازن بين **التقنيات عالية التأثير والحلول السريعة** التي تتطلب الحد الأدنى من التكيف. مما يضمن مزيجًا استراتيجيًا من التقنيات **الفعالة والمجدية للإدارة المستدامة للمياه.**

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

مجالات تقنيات معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

المعالجة البيولوجية (BIOLOGICAL TREATMENT)	المعالجة الكهروكيميائية والتحفيزية (ELECTROCHEMICAL & CATALYTIC TREATMENT)	الأغشية والترشيح (MEMBRANES & FILTRATION)	استعادة الموارد وتوليد الطاقة (RESOURCE RECOVERY & ENERGY GENERATION)	الرقمنة وتحقيق اللامركزية (DIGITALIZATION & DECENTRALIZATION)
تقنية التنظيف بالطحالب Algal Turf Scrubber (ATS) Technology (TRL 8-9)	التحليل الكهربائي Electrodialysis (ED) (TRL 8-9)	المفاعلات الحيوية الغشائية Membrane Bioreactors (MBRs) (TRL 8-9)	التحلل الحراري Thermal Hydrolysis (TRL 8-9)	وحدات معالجة مياه الصرف المتنقلة Mobile Wastewater Treatment Units (TRL 8-9)
الأراضي الرطبة الهجينة Hybrid Constructed Wetlands (TRL 8-9)	أكسدة الماء فوق الحرجة Supercritical Water Oxidation (SCWO) (TRL 8-9)	نهج تفريغ السوائل الصفرية Zero Liquid Discharge (ZLD) Systems(TRL 8-9)	استعادة ستروفايت Struvite Recovery (TRL 8-9)	مرافق المعالجة المشتركة Co-Treatment Facilities (TRL 8-9)
مفاعل الأغشية الحيوية المتحرك Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) (TRL 8-9)	مفاعلات الموجات فوق الصوتية Ultrasonic Reactors (TRL 8-9)	التناضح الأمامي Forward Osmosis (FO) (TRL 6-7)	محطات معالجة تعمل بالطاقة الشمسية Solar-powered Treatment Plants (TRL 8-9)	التوائم الرقمية لمحطات المعالجة Digital Twins of Treatment Plants (TRL 8-9)
أنظمة الحمأة الحبيبية الهوائية Aerobic Granular Sludge (AGS) Systems (TRL 8-9)	الفقاعات النانوية Nanobubbles (TRL 8-9)	المركبات البوليمرية Polymeric Composites (TRL 6-7)	الكربنة الحرارية المائية Hydrothermal Carbonization (HTC) (TRL 8-9)	أنظمة معالجة المياه الرمادية المعيارية Modular Graywater Treatment Systems (TRL 8-9)
أحواض الطحالب عالية المعدل High-Rate Algal Ponds (HRAPs) (TRL 6-7)	التحفيز الضوئي الشمسي Solar Photocatalysis (TRL 6-7)	التقطير الغشائي Membrane Distillation (MD) (TRL 6-7)	خلايا الوقود الميكروبية Microbial Fuel Cells (MFC) (TRL 6-7)	تعدين المجاري Sewer Mining (TRL 6-7)
مرشحات التربة واسعة النطاق Large-scale Soil Filters (TRL 6-7)	الأكسدة المتقدمة الكهروكيميائية Electrochemical Advanced Oxidation (EAOP) (TRL 6-7)	المفاعلات الحيوية ذات الأغشية التناضحية Osmotic Membrane Bio-reactors (OMBRs) (TRL 4-5)	استخلاص الغاز الحيوي إلى هيدروجين Biogas-to-Hydrogen Recovery (TRL 6-7)	شبكات الاستشعار الذكية Smart Sensor Networks (TRL 6-7)
المعالجة النباتية Phytoremediation (TRL 6-7)	التخثر الكهربائي Electrocoagulation (TRL 6-7)	أغشية الجرافين Graphene-based Membranes (TRL 4-5)		وسائل تحسين المعالجة القائمة على الذكاء الاصطناعي AI-Enabled Treatment Optimization (TRL 6-7)
المعالجة باستخدام الإنزيمات Enzyme-based Treatment (TRL 4-5)	الأنظمة الكهروكيميائية الميكروبية Microbial Electrochemical Systems (MES) (TRL 4-5)			
النانوسليلوز Nanocellulose (TRL 4-5)	الإزالة الاختزالية لـ PFAS PFAS Reductive Defluorination (PRD) (TRL 4-5)			
الكائنات الحية الدقيقة المحسنة وراثيًا Genetically-enhanced Microorganisms (TRL 4-5)	معالجة المياه باستخدام قوس البلازما Plasma Arc Water Treatment (TRL 4-5)			

توجد تعاريف التقنيات في قسم قاموس المصطلحات

مخطط التقنيات (سهولة التنفيذ مقارنةً بمستوى النضج)

بدأ هذا القسم بتحديد ست توجهات قطاعية رئيسة أثرت على الابتكار في قطاع المياه لعام 2024، مع تركيز على رؤية السعودية 2030 ودورها في تحويل إدارة المياه. كما سلط الضوء على التحديات في الاستدامة ومعالجة مياه الصرف الصحي مع التأكيد على الحاجة إلى التقنيات المتقدمة. ومع الحوافز التنظيمية وتطوير البنية التحتية التي تسرّع من عملية التبني، يبحث هذا القسم في التقنيات الناشئة في معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها ويقيّم سهولة تنفيذها مقارنةً بمستوى نضجها. يبدأ القسم التالي في توجيه تركيزه على التقنيات الخمس المختارة لاستكشاف وتقديم تحليل متعمق لكل واحدة منها.

يبدأ القسم التالي في توجيه تركيزه على التقنيات الخمس المختارة لاستكشاف وتقديم تحليل متعمق لكل واحدة منها.

توجد تعاريف سهولة التنفيذ والأثر المحتمل والأثر المترتب في قسم قاموس المصطلحات

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

يوضّح المخطط البياني تقنيات معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها وهي جزء أساسي من مرحلة معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها في سلسلة قيمة المياه.

يتم تصنيف هذه التقنيات ضمن خمس مجالات:

- المعالجة البيولوجية
- المعالجة الكهروكيميائية والتحفيزية
- الأغشية والترشيح
- استعادة الموارد وتوليد الطاقة
- الرقمنة وتحقيق اللامركزية

يتم تقييم كل تقنية بناءً على مستويات الجاهزية التقنية (TRL)، وسهولة التنفيذ، ومدى التأثير، مع توزيع التقنيات على أساس الجاهزية التقنية، بدءًا من التطوير المبكر إلى الطرح (المحور X) وسهولة التنفيذ (المحور Y).

تُظهر التقنيات الأعلى جاهزية والأسهل تنفيذًا والأعلى تأثيرًا إمكانات كبيرة ويمكن أن تُعطى الأولوية لنشرها على المدى القريب. أما التقنيات الأقل جاهزية والأعلى تأثيرًا، فتتطلب المزيد من الاستثمارات في مجال البحث والتطوير والتمويل والمنح والتعاون لتسريع تطويرها وتكاملها.

3.1.1 التقنيات البارزة

التقنيات الواعدة لمعالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

اختيرت التقنيات الواردة في هذه المجموعة بناءً على ثلاثة معايير رئيسة، لضمان الملاءمة والتأثير والتنوع في معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها:

التطورات الجديدة والبارزة

تمّ تقييم التقنيّات بناءً على التطورات الأخيرة، مع مراعاة الحداثة - احتمال تقديم ابتكارات غير مسبوقة - والتأثير، وهذه الأمور هي ما يقيس مساهمتها في التقدم نحو جاهزية السوق.

الملاءمة للتغلب على التحديات التي تواجهها المملكة

أعطيت الأولوية للتقنيات التي لديها القدرة على مواجهة تحديات إدارة مياه الصرف الصحي الفريدة في المملكة العربية السعودية.

تنوع التقنيّات

تم الحفاظ على اختيار متوازن من مجالات مختلفة من التقنيّة، مما يضمن التمثيل في المجموعة. ويأخذ الاختيار في الاعتبار أيضًا مزيجًا من التقنيات عالية النضج للتطبيق على المدى القريب والابتكارات الناشئة ذات الإمكانات طويلة الأجل.

توجد بطاقة تقييم معايير الاختيار في قسم المحلق

5 تقنيات احتلت مركز الصدارة

تتماشى تقنيات معالجة مياه الصرف المختارة مع المعايير الرئيسة للابتكار والأهمية والتنوع، إذ تتضمن أساليب متقدمة بيولوجية وكيميائية وترشيحية وحرارية تعتمد على الذكاء الاصطناعي لتعزيز إعادة استخدام المياه واستعادة الموارد وكفاءة المعالجة، وتدعم هذه التقنيات أهداف رؤية 2030 من خلال معالجة التحديات الحاسمة مثل ندرة المياه وكفاءة الطاقة والاستدامة، ويوازن الاختيار بين الحلول عالية النضج للنشر الفوري والابتكارات الناشئة لتحقيق تأثير طويل المدى.

مجالات التقنية	التقنية	النضج	المواءمة مع رؤية 2030
المعالجة البيولوجية (BIOLOGICAL TREATMENT)	تقنية التنظيف بالطحالب Algal Turf Scrubber (ATS)	TRL 8-9	تقديم نهج قائم على الطبيعة ومنخفض الطاقة، وفعّال بشكل خاص في إزالة المُغذيات وتعزيز خيارات إعادة الاستخدام.
المعالجة الكهروكيميائية والتحفيزية (Electro-chemical & Catalytic Treatment)	الفقاعات النانوية Nanobubbles	TRL 8-9	تحسين الأوكسجين في مياه الصرف بمستويات عالية من كفاءة الطاقة، مما يساعد على إعادة استخدام المياه وتحقيق الاستدامة البيئية.
الأغشية والترشيح (MEMBRANES & FILTRATION)	نهج تفريغ السوائل الصفرية Zero Liquid Discharge (ZLD)	TRL 8-9	معالجة المخاوف الشديدة المتعلقة بندرة المياه باستعادة كل المياه تقريبًا من مجاري مياه الصرف
استعادة الموارد وتوليد الطاقة (RESOURCE RECOVERY & ENERGY GENERATION)	التحلل الحراري	TRL 8-9	تعزيز استعادة الموارد (الغاز الحيوي)، وتقليل تكاليف التخلص، وضمان وجود مواد صلبة حيوية خالية من مسببات الأمراض للاستخدام الزراعي.
الرقمنة وتحقيق اللامركزية (DIGITALIZATION & DECENTRALIZATION)	وسائل تحسين المعالجة القائمة على الذكاء الاصطناعي	TRL 6-7	تعزيز الأداء العام للمحطة وإعادة استخدام المياه بتحسين معايير العمليات الرئيسة.

التقنيات البارزة

أ. تقنية التنظيف بالطحالب
Algal Turf Scrubber (ATS)

تستخدم تقنية التنظيف بالطحالب (ATS) الطحالب التي تنمو على الأسطح المائلة لامتصاص المُغذيات من مياه الصرف، مما يؤدي إلى تحسين جودة المياه مع إنتاج الكتلة الحيوية التي يمكن استخدامها في الوقود الحيوي والأسمدة وتطبيقات استعادة الموارد الأخرى.

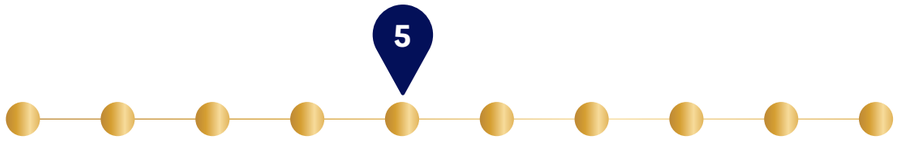
تقنية التنظيف بالطحالب (ATS)

تقنية التنظيف بالطحالب (ATS) هي عبارة عن أنظمة هندسية مصممة لزراعة غشاء حيوي من الطحالب على شاشات مائلة في أحواض ضحلة لمعالجة مياه الصرف الصحي. وعندما يتدفق الماء فوق الطحالب، تستوعب الطحالب بسرعة المُغذيات مثل النيتروجين والفوسفور أثناء إطلاق الأكسجين المذاب من خلال عملية التمثيل الضوئي. ولا تعمل هذه العملية على تحسين جودة المياه من خلال تقليل الأحمال الغذائية التي يمكن أن تسبب التغذية الزائدة فحسب، بل إنها تنتج أيضًا كتلة حيوية عالية الإنتاجية، والتي لها تطبيقات في الوقود الحيوي والأسمدة. وتمّ تنفيذ أنظمة ATS بنجاح في الصرف الزراعي ومعالجة مياه الصرف الصحي في المناطق الحضرية، مع مشاريع وتطبيقات تجريبية واعدة في الولايات المتحدة. وتركز التطورات المستقبلية على تحسين ظروف الزراعة وتوسيع نطاقها، على الرغم من استمرار التحديات في تحقيق أداء متسق في تركيبات مياه الصرف المختلفة. تشكل جدوى تقنية التنظيف بالطحالب في المناخ الجاف في المملكة العربية السعودية تحديات رئيسة. إذ قد يكون النمو الطبيعي للطحالب محدودًا بسبب درجات الحرارة المرتفعة وأشعة الشمس الشديدة والرطوبة المنخفضة مقارنةً بالأنظمة الاستوائية. ومع ذلك، مع البيئات الخاضعة للرقابة، وظروف التدفق الأمثل، والتكيفات التصميمية المعيارية (مثل التظليل وتنظيم درجة الحرارة)، يمكن أن تكون أنظمة التنظيف بالطحالب قابلة للتطبيق - خاصةً لإعادة الاستخدام غير الصالحة للشرب أو معالجة الجريان السطحي الزراعي في المناطق الريفية أو الصناعية.

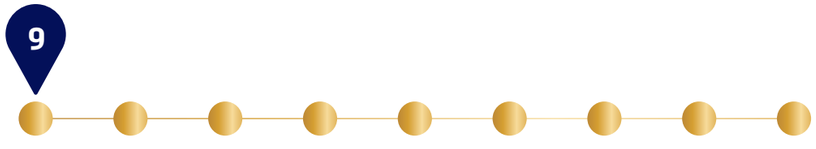
التقنيّة ونضج السوق

تتمتع تقنية التنظيف بالطحالب (ATS) بمستوى جاهزية تقنيّة عالٍ (TRL 9)، وذلك بعد عقود من الأبحاث التي تثبت فعاليتها في معالجة مياه الصرف الصحي واستعادة المُغذيات. ومع ذلك، لا يزال نضج السوق محدودًا (TRL 5)، إذ لا يزال اعتمادها التجاري واسع النطاق في مرحلة ناشئة. وتشمل التحديات الرئيسة تحسين كفاءة النظام في أنواع مختلفة من مياه الصرف الصحي، وخفض التكاليف التشغيلية، ودمج أنظمة التنظيف بالطحالب في البنية التحتية القائمة. وقد يؤدي التركيز التنظيمي المتزايد على تلوث المُغذيات إلى اعتمادها على نطاق أوسع في المستقبل القريب.

مستوى جاهزية السوق (MRL)



مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)



يوجد في قسم قاموس المصطلحات وصف مستوى جاهزية السوق (MRL) ومستوى جاهزية التقنية (TRL)

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

الجهات الفاعلة الرئيسة

1 شركة بيوهابيتاتس

2 مركز التقنيّات البيئية للطحالب بجامعة مريلاند

3 شركة هيدرومينتيا

4 مختبرات ساندیا الوطنية

5 جامعة ولاية نيويورك في بافالو

الرؤى والإحصائيات

تعمل أنظمة التنظيف بالطحالب على إزالة المُغذيات بكفاءة، وتحسين جودة المياه، وتوليد الكتلة الحيوية المتجددة للوقود الحيوي والأسمدة، مما يوفر حلًا قابلًا للتطوير وفعّالًا من حيث التكلفة لمعالجة مياه الصرف.

الأثر والإحصائيات

- **مستوى عالٍ لإزالة المُغذيات**: تتميز أنظمة التنظيف بالطحالب بفاعلية عالية في معالجة المُغذيات، فهي قادرة على إزالة ما يصل إلى 99% من إجمالي الفوسفور و100% من إجمالي النيتروجين في غضون سبعة أيام، متفوقة بشكل كبير على العديد من طرق معالجة مياه الصرف التقليدية. مجلة Front Bioeng
- **تحسين جودة المياه**: تعمل أنظمة التنظيف بالطحالب على تعزيز مستويات الأكسجين المذاب وتثبيت توازن الرقم الهيدروجيني في المياه المعالجة، وفي الدراسات الميدانية أظهرت المياه المعالجة بأنظمة التنظيف بالطحالب زيادة في تشبع الأكسجين تصل إلى 150% واستقرار الرقم الهيدروجيني ضمن النطاقات البيولوجية المثلى للنظم البيئية المائية. مجلة Front Bioeng
- **تطبيقات متعددة**: استُخدمت تقنية التنظيف بالطحالب بنجاح في سياقات متعددة لمعالجة مياه الصرف، كمحطات معالجة مياه الصرف البلدية، ومعالجة مياه الصرف الزراعي، ومعالجة مياه الأمطار، والمسطحات المائية المغذية. HydroMentia
- **قابلية التطوير**: استُخدمت أنظمة التنظيف بالطحالب الكاملة بقدرات معالجة تتراوح من مليون إلى 25 مليون جالون في اليوم، ويتيح تصميمها المعياري التوسع السريع مما يجعلها مناسبة لمكافحة التلوث الموضعي وعمليات معالجة المياه الكبيرة على مستوى البلدية. HydroMentia
- **إمكانات الطاقة المتجددة**: تنتج أنظمة التنظيف بالطحالب أحجامًا كبيرة من الكتلة الحيوية تعتبر من بين أعلى المعدلات المسجلة في النظم البيئية المدارة-إذ تتراوح من 5 إلى 30 جم/م2/يوم-مما يجعلها موردًا قيمًا للأسمدة والأعلاف الحيوانية والوقود الحيوي مثل الديزل الحيوي والغاز الحيوي والإيثانول من خلال التخمر اللاهوائي. تقارير Bioresource Technology
- **الجدوى الاقتصادية**: ثبت أن تقنيّة أنظمة التنظيف بالطحالب توفر نهجًا أكثر فاعلية من حيث التكلفة لمكافحة تلوث المغذيات-أرخص بنسبة 69% من بعض الحلول القائمة على الطبيعة، مثل الأراضي الرطبة المصممة هندسيًا، والتي غالبًا ما تتطلب تكاليف رأسمالية كبيرة بالإضافة إلى المتطلبات المتعلقة بالأراضي. جامعة فلوريدا

تبني التقنيّة

لا يزال اعتماد أنظمة التنظيف بالطحالب محدودًا، مع وجود مشاريع تجريبية في الولايات المتحدة لاستكشاف إزالة المغذيات، وتحسين جودة المياه، وقابلية التوسع لمعالجة مياه الصرف البلدية والزراعية والصناعية.

الوضع الراهن

- **التطبيقات البلدية**: قامت البلديات في فلوريدا وميريلاند ونورث كارولينا بتجربة تقنية أنظمة التنظيف بالطحالب لمكافحة تلوث المُغذيات، وفي عام 2023، دخلت جامعة جورجيا الجنوبية في شراكة مع محطة مياه الصرف البلدية لتنفيذ أنظمة التنظيف بالطحالب لإزالة المغذيات في الموقع.
- **إدارة مياه الصرف الزراعي**: تعمل أنظمة التنظيف بالطحالب على معالجة مياه الصرف الزراعي في المناطق الزراعية المكثفة، وأظهرت الأبحاث التي أجريت على الساحل الشرقي لميريلاند أن مسارات أنظمة التنظيف بالطحالب تعمل بشكل فاعل على تقليل أحمال المُغذيات قبل الوصول إلى النظم البيئية المائية الحساسة. جامعة ميريلاند
- **التطبيقات الصناعية**: تستكشف القطاعات الصناعية أنظمة التنظيف بالطحالب لمعالجة مياه الصرف، ولا سيما عندما تكون الطرق التقليدية غير كافية. وتسلط الدراسات الضوء على إمكانات أنظمة التنظيف بالطحالب واسعة النطاق في معالجة مياه الصرف الصناعية، وتُجرى أبحاث بصورة مستمرة لتحسين كفاءتها وقابليتها للتوسع. HydroMentia

الدروس المستفادة عالميًا

- **التخصيص الإقليمي لتحقيق أقصى قدر من التأثير**: تؤكد عمليات الاستخدام في البيئات الحضرية والزراعية والصناعية على الحاجة إلى التخصيص حسب الموقع، مثل تحسين التدرجات المنحدرة ودورات حصاد الطحالب لزيادة كفاءة المعالجة إلى أقصى حد. هيئة ميناء ميرلاند
- **الموازنة بين استخدام الأراضي وقدرة المعالجة**: تتطلب أنظمة التنظيف بالطحالب واسعة النطاق مساحة كبيرة من الأرض، مما يجعلها أكثر جدوى في المناطق الريفية أو الصناعية مقارنة بالبيئات الحضرية ذات المساحة المحدودة. وتساعد التكوينات المعيارية في معالجة هذه التحديات. BioScience
- **التكامل مع أنظمة الطاقة واستعادة الموارد**: تشير الدروس المستفادة من المشاريع التجريبية إلى أن الجمع بين أنظمة التنظيف بالطحالب وأنظمة التخمر اللاهوائي أو أنظمة الغاز الحيوي يمكن أن يعزز الجدوى الاقتصادية، على الرغم من أن تحسين إنتاجية الغاز الحيوي لا يزال بحاجة للتطوير بصورة أكبر. هيئة ميناء ميرلاند

آفاق التقنية

سيمكن التقدم في تقنيّة أنظمة التنظيف بالطحالب من اعتمادها على نطاق أوسع من خلال التصاميم القابلة للتطوير والمعيارية وإمكانات الوقود الحيوي، مما يجعلها بمثابة حل مستدام لمعالجة مياه الصرف واستعادة الموارد.

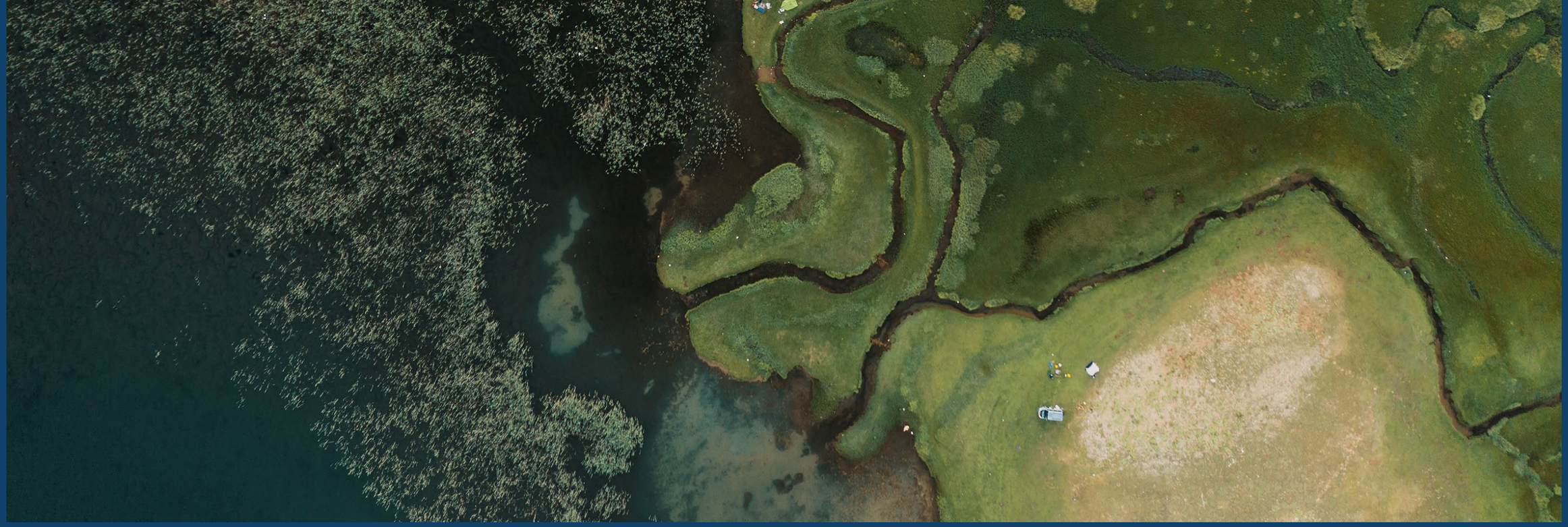
دلائل التغيير

- **دمج الطحالب في تربية الأحياء المائية:** تسلط الأبحاث الضوء على إمكانات مفاعلات الطحالب في نظام RAS لإزالة النيتروجين، ولكنها تواجه تحديات تتعلق بالكفاءة والتكلفة. وتساعد الابتكارات في تصميم المفاعلات والإضاءة على تعزيز الجدوى، وتحسين معالجة مياه الصرف والاستدامة. مجلة Front. Bioeng
- **تنقية المياه والوقود الحيوي:** يعمل الباحثون على تحسين تقنية أنظمة التنظيف بالطحالب من خلال تحسين المواد السطحية، وتحسين معدلات التدفق، ودمج عمليات تحويل الوقود الحيوي، ويمكن أن يؤدي تعزيز قابلية التوسع وخفض التكاليف إلى انتشار تبني التقنية على نطاق واسع. جامعة جورجيا الجنوبية
- **استعادة الطاقة من مياه الصرف:** تمكن باحثون من تحديد كيفية تأثير اللقاحات الميكروبية المختلفة على إنتاج الميثان من الطحالب، وكشفوا عن المفاضلات في الكفاءة التي يمكن أن تعمل على تحسين إنتاج الغاز الحيوي واستعادة الطاقة في محطات معالجة مياه الصرف. تحويل الكتلة الحيوية والتكرير الحيوي

التوجه المستقبلي

- **التكامل مع نماذج الاقتصاد الحيوي الدائرية:** ستتوافق أنظمة التنظيف بالطحالب بشكل متزايد مع مبادىء الاقتصاد الحيوي الدائري، مما يحول مغذيات مياه الصرف إلى وقود حيوي ومنتجات حيوية قيمة، مع تقليل انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري، وتدعم هذا التحول سياسات الاتحاد الأوروبي بشأن استعادة الفوسفور وأهداف صافي الانبعاثات الصفرية. تقنيات الفصل والتنقية
- **تعزيز قابلية التوسع من خلال تصميمات تقنيات التنظيف بالطحالب المعيارية:** ستعمل وحدات التنظيف بالطحالب المعيارية القابلة للتجميع على معالجة قيود المساحة في محطات معالجة مياه الصرف، وتحسين كفاءة إزالة المُغذيات مع تمكين التطبيقات اللامركزية في تربية الأحياء المائية والزراعة ومعالجة مياه الصرف الصناعي. مدوّنة Water Today
- **السياسات والحوافز السوقية التي تحفز تبني التقنية:** ستؤدي اللوائح الأكثر صرامة لتصريف مياه الصرف والحوافز المالية لاستعادة المغذيات وإنتاج الوقود الحيوي إلى تسريع اعتماد أنظمة التنظيف بالطحالب، مما يجعلها بديلاً تنافسيًا لعمليات النترجة وإزالة النتروجين التقليدية. المفوضية الأوروبية

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها



دراسة حالة

بحيرة إنديان ريفر (الولايات المتحدة)

في عام 2023، أطلقت فلوريدا أحد أكبر المشاريع التجريبية لأنظمة التنظيف بالطحالب (ATS) لمعالجة تلوث المغذيات في بحيرة نهر إنديان، وهو ممر مائي يعاني من كثرة الطحالب الضارة ونفوق الأسماك بسبب زيادة النيتروجين والفوسفور. وبالشراكة مع شركة HydroMentia ومؤسسات بحثية، استخدمت الولاية تقنيّة ATS كحل طبيعي فاعل من حيث التكلفة لمعالجة مياه الصرف.

نجح نظام ATS في إزالة 85-70% من النيتروجين و60-75% من الفوسفور، متفوقًا على طرق المعالجة التقليدية. وعولجت الطحالب المحصودة وحُوّلت إلى وقود حيوي، مما يدل على قابلية المسار للتطوير لتوليد الطاقة المتجددة، وأثبت المشروع أيضًا أنه أكثر فاعلية من حيث التكلفة مقارنة بعمليات التجريف والمعالجات الكيميائية، مما يجعل ATS بديلاً تنافسيًا لمكافحة تلوث المُغذيات على نطاق واسع.

وبفضل هذه النتائج، تفكر فلوريدا في استخدام أنظمة ATS على نطاق أوسع لحماية المجاري المائية في جميع أنحاء الولاية، ومع ظهور لوائح أكثر صرامة لجودة المياه، يمكن أن تؤدي أنظمة ATS دورًا رئيسًا في معالجة مياه الصرف المستدامة، بما يتوافق مع مبادىء الاقتصاد الحيوي الدائرية وتعزيز الابتكار العالمي في إدارة المياه.

التقنيات البارزة

ب. الفقاعات النانوية

تهوية الفقاعات النانوية هي تقنيّة ناشئة تعمل على تطوير معالجة المياه وإدارتها من خلال إدخال فقاعات غازية متناهية الصغر في الماء لزيادة مستويات الأكسجين وتفتيت الملوثات.

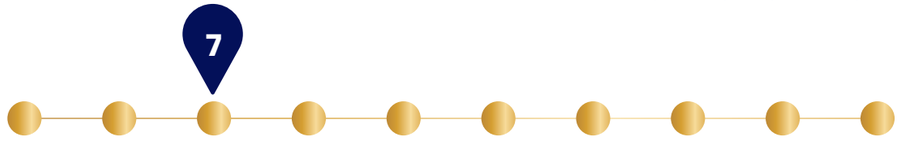
الفقاعات النانوية

تعمل تقنية التهوية بالفقاعات النانوية على إدخال فقاعات غازية فائقة الدقة، يبلغ حجمها عادة من 70 إلى 120 نانومترًا، إلى الماء لزيادة مستويات الأكسجين وتحلل الملوثات. وتظل هذه الفقاعات النانوية معلقة بسبب الحركة البراونية، مما يوفر توزيعًا موحدًا للأكسجين ونسبة عالية من مساحة السطح إلى الحجم، مما يحسن كفاءة نقل الغاز. وتشمل التطورات الأخيرة طرق توليد الفقاعات النانوية الموفرة للطاقة، مثل التقنيات القائمة على الاحتكاك، وتطبيق الفقاعات النانوية المشبعة بالأوزون من أجل التطهير الفعال وإزالة الملوثات في عمليات معالجة المياه. في عام 2024، قدمت شركة Moleaer مولد Trinity Nanobubble،المصمم لتعزيز نقل الأكسجين وتحسين جودة المياه في التطبيقات الزراعية، كما نفذت مدينة بحيرة إلسينور تقنية الفقاعات النانوية لتحسين جودة مياه البحيرة، مما أدى إلى زيادة كبيرة في مستويات الأكسجين المذاب وانخفاض في مستويات الرواسب العضوية. لتقنية الفقاعات النانوية تحديات تقنية، لا سيما في الحفاظ على استقرار حجم الفقاعات ووظائفها في ظل تنوع تركيبات المياه والملوثات. إذ قد تؤثر هذه التغيرات على كفاءة نقل الغازات وتؤدي إلى انخفاض أداء المعالجة بشكل عام في مياه الصرف المعقدة أو ذات التركيز العالي من الملوثات.

التقنيّة ونضج السوق

في سياق معالجة مياه الصرف الصحي، يتم تقييم تقنيّة الفقاعات النانوية عند المستوى TRL 8، مما يشير إلى أنها أثبتت فعاليتها في البيئات التشغيلية ولكن قد لا يتم اعتمادها على نطاق واسع في جميع المرافق حتى الآن. ونجحت شركات مثل Moleaer في تنفيذ أنظمة الفقاعات النانوية في محطات معالجة مياه الصرف الصحي الصناعية والبلدية، مما يدل على تحسن القدرة على التحلل البيولوجي وكفاءة المعالجة. ويتم تحقيق تقدم في جاهزية السوق لتقنيّة الفقاعات النانوية في معالجة مياه الصرف الصحي، إذ وصل التقييم الحالي إلى مستوى MRL 7. وهذا يعكس وجودًا متزايدًا في السوق مع زيادة مستويات الاعتماد.

مستوى جاهزية السوق (MRL)



مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)

يوجد في قسم قاموس المصطلحات وصف مستوى جاهزية السوق (MRL) ومستوى جاهزية التقنية (TRL)

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

الجهات الفاعلة الرئيسة

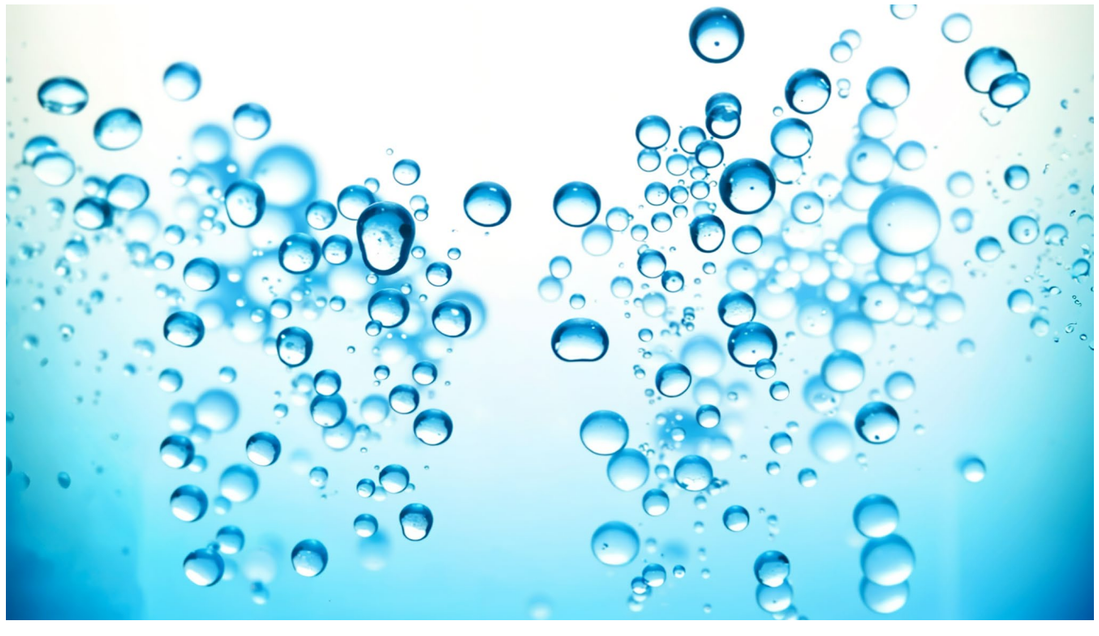
1 شركة Moleaer Inc.

2 شركة ترايدنت بابل تكنولوجيز ذ.م.م

3 نانوبوكس

4 شركة أكوا بي نانوبيل للابتكارات المحدودة.

5 جامعة تكساس ايه اند ام.



الرؤى والإحصائيات

يمكن أن يؤدي دمج تقنيّة الفقاعات النانوية في عمليات معالجة مياه الصرف إلى تحقيق تحسينات كبيرة في الكفاءة التشغيلية والحفاظ على الموارد وخفض التكاليف.

الأثر والإحصائيات

- **زيادة قدرات المعالجة**: يمكن أن يؤدي تطبيق تقنيّة الفقاعات النانوية إلى زيادة قدرة معالجة مرافق مياه الصرف الحالية بنسبة تصل إلى 25%. وهذا يسمح للمحطات بمعالجة كميات أكبر من مياه الصرف دون استثمارات كبيرة في البنية التحتية. مجلة Waste Management World
- **تحسين مستويات إزالة الملوثات**: ثبت أن الفقاعات النانوية تعمل على تحسين إزالة الملوثات العضوية في مياه الصرف من خلال تعزيز عمليات التعويم، وتسهم خصائصها الفريدة في زيادة كفاءة فصل الملوثات عن الماء، مما يؤدي إلى إنتاج مياه صرف أنظف. أي إم بي إكسبريس
- **خفض استهلاك الطاقة**: يمكن أن يؤدي تطبيق تقنية الفقاعات النانوية إلى خفض استهلاك الطاقة بنسبة 40% في محطات معالجة مياه الصرف، ويتحقق ذلك من خلال عمليات تهوية أكثر كفاءة، مما يقلل من الحاجة إلى التهوية الميكانيكية وتكاليف الطاقة المرتبطة بها. مجلة المياه الذكية
- **الممارسات المستدامة**: تعمل هذه التقنية على تقليل الحاجة إلى الإضافات الكيميائية في معالجة مياه الصرف، وتعزيز الممارسات الصديقة للبيئة والحد من مخاطر التعرض للمواد الكيميائية على العمال والمجتمعات. مجلة Offshore Technology
- **القبول المجتمعي**: حظي تنفيذ أنظمة الفقاعات النانوية بقبول جيد في مناطق مختلفة، إذ أقرت المجتمعات بالتحسن في جودة المياه والصحة البيئية. UBS
- **تحسين كفاءة نقل الأكسجين**: يمكن أن تعمل تهوية الفقاعات النانوية على مضاعفة معدل استخدام الأكسجين ومعامل نقل الكتلة الحجمية مقارنة بطرق التهوية التقليدية، مما يعزز تحلل الملوثات العضوية. الجمعية الكيميائية الامريكية

تبني التقنية

يتزايد استخدام تقنية الفقاعات النانوية، مدفوعًا بمكاسب الكفاءة والاهتمام التنظيمي والفوائد المؤكدة، ولكن التكلفة وقابلية التوسع والتشكك في القطاع الصناعي لا تزال تشكل تحديات.

الوضع الراهن

- **قابلية التطوير**: لا يزال توسيع نطاق توليد الفقاعات النانوية لمعالجة مياه الصرف على نطاق واسع يمثل تحديًا، ويمكن أن تعيق الجسيمات تكوين الفقاعات النانوية وربما تلحق الضرر بالمولدات، مما يستلزم تحقيق تطورات تقنيّة لتحقيق إنتاج متسق في بيئات متنوعة. مجلة Envir. Sci. & Tech
- **تركيز البحث والتطوير**: تهدف الأبحاث الجارية إلى تحسين طرق توليد الفقاعات النانوية وفهم تفاعلاتها مع المجتمعات الميكروبية. وتركز الجهود على تعزيز استقرار الفقاعات النانوية وكفاءتها، مما يسهل اعتمادها على نطاق أوسع في تطبيقات معالجة مياه الصرف. مجلة Water Res
- **الاعتماد البلدي**: بدأت محطات معالجة مياه الصرف في دمج الفقاعات النانوية لتحسين إزالة الملوثات. واعتمدت منطقة جوليتا الصحية في كاليفورنيا هذه التقنية للتخفيف من المواد الخافضة للتوتر السطحي المثبطة، مما أدى إلى تحسين إزالة المواد الصلبة العالقة الإجمالية وتحسين كفاءة المعالجة. مجلة Moleaer

الدروس المستفادة عالميًا

- **التحديات التشغيلية في الحقل**: رغم أن الفقاعات النانوية تتميز بقدرتها على نقل الأكسجين، إلا أنها قد لا توفر خلطًا كافيًا في خزانات التهوية، ولاحظ المشغلون أن أنظمة الفقاعات النانوية قد تحتاج إلى استكمالها بخلاطات ميكانيكية لضمان الخلط المناسب ومنع الترسيب. Eng Tips
- **اختيار الغاز**: يؤثر اختيار الغاز-مثل الأكسجين والهواء والأوزون- بشكل كبير على كفاءة تكلفة تهوية الفقاعات النانوية وفاعليتها، وتعمل فقاعات الأكسجين النانوية على تحسين النشاط الميكروبي في حين توفر فقاعات الأوزون النانوية فوائد تطهير إضافية. مجلة Envir. Sci. & Tech
- **إثبات العائد على الاستثمار بما يتجاوز التهوية**: لا يزال العديد من مشغلي الصرف متشككين بسبب التكاليف الأولية المرتفعة وعدم الإلمام بالأمر، وينجح التبني عندما تُثبت فوائد الفقاعات النانوية- تقليل الحمأة، وتعزيز النشاط الميكروبي وانخفاض استخدام المواد الكيميائية- بما يتجاوز مجرد توفير الطاقة. مجلة Offshore Technology

آفاق التقنية

من المتوقع أن تُستخدم تقنية الفقاعات النانوية على نطاق واسع في مختلف التطبيقات مع التطورات المتوقعة في إزالة الملوثات الدقيقة والمعالجة اللامركزية وكفاءة الطاقة.

دلائل التغيير

- **التطورات في أبحاث فقاعات الأوزون النانوية**: ركزت الدراسات الحديثة على استخدام الفقاعات النانوية المشبعة بالأوزون للتطهير الفعال وإزالة الملوثات في عمليات معالجة المياه، مما يسلط الضوء على إمكاناتها في تعزيز كفاءة المعالجة. WRF
- **تنفيذ الفقاعات النانوية**: في عام 2024، قامت بحيرة إلسينور في كاليفورنيا، بتركيب قارب فقاعة نانوية يضخ 3.5 مليون جالون من الفقاعات النانوية الغنية بالأكسجين يوميًا لتحسين جودة المياه، ويبرز حجم هذا المشروع إمكانات الفقاعات النانوية لاستعادة البيئة على نطاق واسع ومنع تكاثر الطحالب. بحيرة إلسينور
- **مشروع تجريبي في الدنمارك**: في مدينة ناستفيد بالدنمارك، اختبر مشروع تجريبي تقنية الفقاعات النانوية لتعزيز كفاءة محطة صغيرة لمعالجة مياه الصرف، ولا سيما خلال فترات الحمل العضوي العالي. ويشير هذا إلى الاهتمام المتزايد بالحلول اللامركزية الموفرة للطاقة لمعالجة مياه الصرف. برنامج Interreg

التوجه المستقبلي

- **تحسين فاعلية التكلفة من خلال طرق التوليد المتقدمة**: بفضل التقدم في مجال الموائع الدقيقة وإذابة الغاز والتعلم الآلي، يمكننا أن نتوقع أن تصبح مولدات الفقاعات النانوية أكثر كفاءة في استخدام الطاقة بنسبة 30%-50 بحلول منتصف ثلاثينات القرن الحادي والعشرين، ومع ذلك، فإن التكاليف الرأسمالية الأولية قد تحد من اعتماد هذه الحلول في محطات معالجة مياه الصرف الصغيرة والمتوسطة الحجم. Bior source Technology
- **زيادة اعتماد إزالة الملوثات الدقيقة ومسببات الأمراض**: بحلول عام 2035، من المتوقع أن تُدمج الفقاعات النانوية على نطاق واسع في عمليات معالجة مياه الصرف لإزالة المواد البلاستيكية الدقيقة وبقايا المستحضرات الصيدلانية ومواد PFAS (المواد الكيميائية الأبدية). المواد النانوية
- **حلول معالجة مياه الصرف اللامركزية والمتنقلة**: باتباع التوجهات العامة في معالجة مياه الصرف، قد تظهر وحدات معالجة مياه الصرف المحمولة في حاويات باستخدام فقاعات النانو للاستخدام خارج الشبكة في عمليات الطوارئ والمجتمعات الريفية والتطبيقات الصناعية. Acc Chem Res

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

دراسة حالة

بحيرة إلسينور (الولايات المتحدة)

في يناير 2024، استخدمت مدينة بحيرة السينور، كاليفورنيا، نظام تهوية واسع النطاق للفقاعات النانوية لمكافحة مشكلات جودة المياه المستمرة، بما في ذلك انخفاض مستويات الأكسجين المذاب، وتكاثر الطحالب، وتراكم الرواسب. ويضخ النظام، المثبت على مركب عائم، 3.5 مليون جالون من الفقاعات النانوية الغنية بالأكسجين يوميًا، مما يعزز بشكل كبير كفاءة نقل الأكسجين ويحسن الصحة المائية.

وفي غضون ثلاثة أشهر، كشفت بيانات الرصد عن زيادة بنسبة 40% في مستويات الأكسجين المذاب في طبقات المياه العميقة، مما يساعد على التخفيف من نمو الطحالب وتقليل تراكم الرواسب العضوية. وأظهر المشروع قدرة الفقاعات النانوية على دعم استعادة البحيرة دون الاعتماد على المعالجات الكيميائية.

يشير نجاح التجربة في بحيرة إلسينور إلى تزايد الاهتمام البلدي بتقنيّة الفقاعات النانوية للإدارة المستدامة للمياه. وتدرس المدن التي تواجه تحديات نقص الأكسجين والتغذية الزائدة الآن حلولًا مماثلة، كما يدعم المشروع أبحاثًا أوسع نطاقًا في تطبيقات الفقاعات النانوية اللامركزية، مما يعزز جدواها في معالجة مياه الصرف البلدية والصناعية.

التقنيات البارزة

ج . الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD)

يشير الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) إلى عمليات متقدمة لمعالجة مياه الصرف، مصممة للتخلص من النفايات السائلة عن طريق إعادة تدوير المياه و استعادتها، مع ترك البقايا الصلبة فقط. إذ تدمج الطرق الفيزيائية والكيميائية والحرارية لمعالجة مياه الصرف، مما يتيح إعادة استخدام المياه وتقليل التصريف البيئي.

الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD)

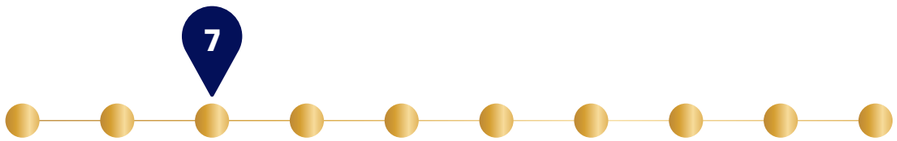
الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) هو نهج متقدم لمعالجة مياه الصرف الصحي يعمل على التخلص من النفايات السائلة، واستعادة وإعادة استخدام كل المياه تقريبًا مع ترك بقايا صلبة فقط. وهو أمر بالغ الأهمية في الصناعات التي تواجه لوائح بيئية صارمة وندرة في المياه، إذ يعمل على الحد من التلوث وتعظيم كفاءة استخدام المياه. ويتم اعتماد نهج تفريغ السوائل الصفرية (ZLD) على نطاق واسع في محطات الطاقة وصناعة المنسوجات والصناعات الكيميائية، وخاصة في المناطق التي تعاني من شح المياه مثل الصين والهند والولايات المتحدة.

وتعمل التقنيات الناشئة القائمة على الأغشية، مثل التناضح العكسي (RO) والتناضح الأمامي (FO)، على تحسين كفاءة استخدام الطاقة في تقنية الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD). ومع ذلك لا تزال هناك تحديات كارتفاع التكاليف واستهلاك الطاقة. لا تزال إدارة نفايات المحلول الملحي عالي التركيز تمثل تحديًا بيئيًا واقتصاديًا رئيسًا في أنظمة الإفراغ الصفري للسوائل ZLD. وتركز التطورات المستقبلية على دمج استعادة الموارد والاستفادة من مصادر الطاقة منخفضة الدرجة لجعل نهج تفريغ السوائل الصفرية (ZLD) أكثر استدامة وجدوى اقتصادية.

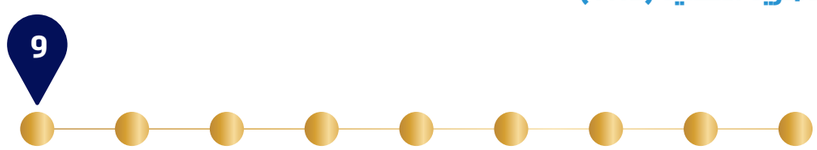
التقنيّة ونضج السوق

يعد الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) تقنية عالية النضج (TRL 8-9)، تطورت من أنظمة حرارية كثيفة الطاقة إلى حلول هجينة أكثر كفاءة تعتمد على الأغشية مثل التناضح العكسي (RO) والتناضح الأمامي (FO). ويتزايد اعتماد السوق لهذه التقنيّة بشكل متسارع، وخاصة في الصناعات التي تواجه ضغوطًا تنظيمية وتكاليف عالية للتخلص من مياه الصرف الصحي. وعلى الرغم من وجود تطبيقات واسعة النطاق، فإن الاعتماد الواسع النطاق مقيد بالنفقات الرأسمالية المرتفعة والطلب على الطاقة، مما يدفع الابتكار في تقنيات استعادة الطاقة والموارد.

مستوى جاهزية السوق (MRL)



مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)



يوجد في قسم قاموس المصطلحات وصف مستوى جاهزية السوق (MRL) ومستوى جاهزية التقنية (TRL)

الجهات الفاعلة الرئيسة

1. شركة فيوليا لتقنيات المياه
2. أكواتيك الدولية المحدودة
3. مجموعة جي إي أي
4. ألفا لافال
5. ويتسوس
6. جنرال إلكتريك
7. شركة ميتسوبيشي للكيماويات

الرؤى والإحصائيات

تقلل تقنيّة الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) من تصريف مياه الصرف الصحي، وتعزز إعادة استخدام المياه، وتقلل الملوثات، وتُمكّن من استعادة الموارد، ولكنها تواجه تحديات تتعلق باستهلاك الطاقة والتكاليف والبنية التحتية.

الأثر والإحصائيات

- **معدل عالٍ لاستعادة المياه**: يمكن الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) استرداد ما يقرب من 100% من مياه الصرف، مما يقلل من التأثير على مصادر المياه العذبة، فتستفيد البلديات والصناعات مثل صناعة المنسوجات والكيماويات ومحطات الطاقة بشكل كبير من حلول استعادة المياه عالية الكفاءة التي تساعد على تقليل الاستهلاك والتكاليف. مفهوم ZLD
- **استهلاك الطاقة**: يتطلب اعتماد الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) ما بين 20 إلى 25 كيلووات ساعة لكل متر مكعب من المياه المعالجة، وهو ما يفوق بكثير المعالجة التقليدية لمياه الصرف. وعلى الرغم من استهلاك هذه التقنيّة للطاقة بكثافة، تهدف التطورات التقنيّة المستمرة إلى تقليل استهلاك الطاقة وتحسين الفاعلية من حيث التكلفة. مجلة Envir. Sci. & Tech
- **التأثيرات على التكلفة**: تزيد تكاليف تنفيذ الإفراغ الصفري للسوائل بين 2 إلى 3 مرات أكثر من المعالجة التقليدية بسبب ارتفاع التكاليف الرأسمالية والتشغيلية. ومع ذلك، تشمل الفوائد طويلة المدى انخفاض تكاليف شراء المياه، وتقليل المخالفات التنظيمية، والإيرادات من الموارد المستردة. LC-CMR
- **استعادة الموارد**: لا يسهم اعتماد الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) على معالجة مياه الصرف فحسب، بل يعمل على استخراج المنتجات الثانوية القيمة أيضًا مثل كبريتات الصوديوم وكلوريد الصوديوم وأملاح صناعية أخرى. وتسهم استعادة الموارد هذه في خلق تدفقات إيرادات إضافية للصناعات مع دعم نهج الاقتصاد الدائري. مجلة Envir. Sci. & Tech
- **تقليل الملوثات**: يزيل الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) ما يصل إلى 99% من الملوثات، مثل المعادن الثقيلة والمستحضرات الصيدلانية واللدائن الدقيقة، مما يمنع تلوث الأنهار والبحيرات. وهذا يحمي النظم البيئية المائية ويقلل من الأضرار البيئية طويلة المدى. مجلة Envir. Sci. & Tech
- **عمر البنية التحتية**: من خلال تقليل حجم مياه الصرف التي تتطلب المعالجة والتفريغ، يمكن الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) تقليل الضغط على البنية التحتية الحالية لمياه الصرف البلدية، مما قد يؤدي إلى إطالة عمرها التشغيلي وتقليل تكاليف الصيانة. مجلة إدارة البيئة.

تبني التقنية

يعتمد اعتماد تقنيّة الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) على ندرة المياه واللوائح التنظيمية ولكنه يواجه تحديات بسبب ارتفاع التكاليف ومتطلبات الطاقة ومتطلبات التشغيل المعقدة.

الوضع الراهن

- **اللوائح البيئية**: تؤدي السياسات البيئية العالمية الأكثر صرامة إلى اعتماد تقنيّة الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD). وتفرض الهيئات التنظيمية في الولايات المتحدة وأوروبا والهند اتباع نهج تفريغ السوائل الصفرية (ZLD) في صناعات مثل توليد الطاقة والمنسوجات، مما يؤدي إلى زيادة تكاليف الامتثال للجهات التي لا تعتمد التقنيّة. IMARC
- **الاعتماد الإقليمي**: تتصدر منطقة آسيا والمحيط الهادئ في اعتماد تقنيّة الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD)، إذ تمثل أكبر حصة في السوق بسبب تسارع التقدم في قطاع التصنيع واللوائح الصارمة لمعالجة مياه الصرف. وفرضت الصين والهند- على وجه الخصوص- قيودًا صارمة على التصريف، مما يجعل الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) حلًا حاسمًا للامتثال. مجلة M Heavy Tech
- **التكاليف التشغيلية**: يمكن أن تكون تكاليف الهندسة والمشتريات والبناء الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) واسع النطاق كبيرة، وغالبًا ما تتطلب حلولًا مصممة خصيصًا لتلبية الاحتياجات الصناعية المحددة. وتركز الجهود المبذولة لخفض التكاليف على تحسين كفاءة العمليات واستخدام الحرارة المهدرة لاستعادة الطاقة. مجلة M Heavy Tech

الدروس المستفادة عالميًا

- **متطلبات التصميم الخاصة بالموقع**: يجب تصميم الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) وفقًا للخصائص المحددة لمياه الصرف والظروف البيئية المحلية، فاتباع نهج واحد يناسب كل شيء أمر غير فعّال إذ إن هناك حاجة إلى حلول مخصصة لمعالجة مجموعات الملوثات الفريدة والمتطلبات التنظيمية. ESWP
- **مشكلات توافق المواد**: يمكن أن تؤدي الملوحة العالية والتركيب الكيميائي للمحاليل الملحية المركزة في الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) إلى التآكل والتقشر في المعدات. ويعد اختيار المواد المناسبة وتنفيذ عمليات المعالجة الفاعلة أمرًا ضروريًا للتخفيف من هذه المشكلات. SAMCO
- **إمكانية استعادة الموارد**: بالإضافة إلى معالجة المياه، يمكن لنهج (ZLD) تسهيل استخراج المواد القيمة، مثل الأملاح والمعادن، من مياه الصرف، ولا يؤدي هذا إلى تعويض تكاليف التشغيل فحسب، بل يعزز أيضًا الاستخدام المستدام للموارد. Waterman Engineers

آفاق التقنية

يعتمد مستقبل الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) على الابتكارات التقنية، والضغوط التنظيمية، وإمكانات استعادة الموارد، وأساليب المعالجة الهجينة، وموازنة الاستدامة مع تحديات التكلفة والطاقة.

دلائل التغيير

- **النمذجة الحسابية المتقدمة لتحسين العمليات**: مكن تطوير النماذج الحسابية المتطورة من تحسين عمليات الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD)، وتحقيق التوازن بين استهلاك الطاقة والتكلفة والتأثير البيئي. جامعة نورث وسترن
- **أنظمة الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) الهجينة**: ثبت أن الجمع بين العمليات الحرارية والغشائية في أنظمة الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) الهجينة يعزز الكفاءة الإجمالية، مما يجعل التقنيّة أكثر سهولة في الوصول إليها وأكثر فاعلية من حيث التكلفة لمختلف الصناعات. IDE Tech
- **الاستعادة الانتقائية للمواد الحرجة**: يتيح التقدم في تحلية المياه فوق الحرجة الآن استخراج مواد قيمة- مثل النيوديميوم- من مياه الصرف، مما يحول مجاري النفايات إلى فرص لاستعادة الموارد. مجلة Chemical Physics

التوجه المستقبلي

التوقعات المستقبلية: من المتوقع أن يصل سوق الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) إلى 14.9 مليار دولار بحلول عام 2033، بمعدل نمو سنوي مركب قدره 6.8%. وستركز التطورات المستقبلية على حلول الطاقة الفاعلة من حيث التكلفة، وتحسين العمليات القائمة على الذكاء الاصطناعي، ودمج الطاقة المتجددة للحد من آثار الكربون. IMARC

التطورات التقنيّة: تعمل التقنيات الناشئة مثل التناضح الأمامي (FO) والتقطير الغشائي (MD) على تحسين كفاءة الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) وخفض التكاليف، ويمكن لهذه الابتكارات أن تجعل أنظمة الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) مجدية من الناحية المالية لعدد أكبر من البلديات، مما يسرع الاعتماد على نطاق واسع في إدارة مياه الصرف. مجلة Role of Sci &Tech

السياسات والمحركات التنظيمية: سيؤدي وضع اللوائح البيئية وأهداف الاستدامة الأكثر صرامة إلى زيادة اعتماد نهج الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD). وتعمل الحكومات على تنفيذ سياسات تحد من تصريف مياه الصرف وتشجع إعادة استخدام المياه، مما يجعل نهج الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) بمثابة استراتيجية امتثال، وخاصة في المناطق التي تعاني من ندرة المياه. مجلة Envir. Sci. & Tech

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

دراسة حالة

حديقة الملك سلمان (المملكة العربية السعودية)

تقوم حديقة الملك سلمان، وهي مشروع تطوير حضري كبير في الرياض بالمملكة العربية السعودية، بتنفيذ نهج تفريغ السوائل الصفرية (ZLD) كجزء من مجمع معالجة المياه والصرف (WSTC). وتضمن هذه المبادرة، التي طورتها مؤسسة حديقة الملك سلمان، معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها، مما يدعم أهداف الاستدامة في الحديقة.

لقد صممت شركة Osmosys نهجًا متقدمًا لتفريغ السوائل الصفرية (ZLD) يجمع بين التليين والأكسدة المتقدمة وتركيز المحلول الملحي الغشائي (MBC). وتقوم هذه التقنيّة بمعالجة المياه المالحة ذات الملوحة العالية من غشاء التناضح العكسي (RO)، بدءًا من 34,000 ملغم/لتر من المواد الصلبة الذائبة وصولاً إلى استعادة 82% من المياه مع استهلاك طاقة أقل من 5.4 كيلووات ساعة/متر مكعب. وتشمل العملية تليين هيدروكسيد الصوديوم، وأكسدة الفنتون، والترشيح الفائق، وتقنيات التناضح العكسي للتكيف مع الملوحة متعددة الخطوات (SAMRO) وتركيز المحلول الملحي الغشائي، وتركيز المحلول الملحي إلى 200,000 ملغ/لتر من المواد الصلبة الذائبة.

وتقوم وحدة التبلور الحراري بمعالجة المحلول الملحي، مما يزيد من إعادة استخدام المياه ويقلل من النفايات. ويتوافق الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) عالي الكفاءة هذا مع رؤية استدامة المياه في المملكة العربية السعودية، مما يضمن تقليل الأثر البيئي والتنمية الحضرية المسؤولة.

التقنيات البارزة

د. التحلل الحراري (Thermal Hydrolysis)

التحلل الحراري هو عملية معالجة للحمأة تستخدم درجة حرارة عالية وضغطًا لتفتيت المواد العضوية قبل التخمير اللاهوائي، وتعزز هذه المعالجة المسبقة من إنتاج الغاز الحيوي، وتقليل حجم الحمأة، وإنتاج مواد صلبة حيوية خالية من مسببات الأمراض ومناسبة للاستخدام الزراعي.

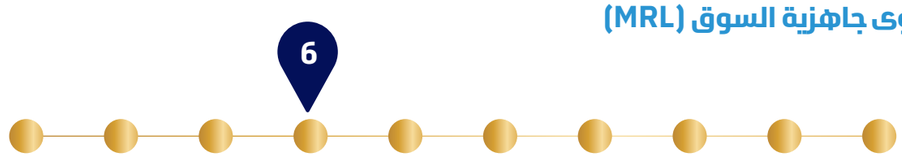
التحلل الحراري

التحلل الحراري هو تقنية متقدمة لمعالجة الحمأة مسبقًا تستخدم في معالجة مياه الصرف الصحي لتعزيز التخمر اللاهوائي. وتعتمد هذه العملية على استخدام درجة حرارة عالية (عادة 160-180 درجة مئوية) وضغط مرتفع لتفكيك المواد العضوية المعقدة، مما يؤدي إلى تحسين القدرة على التحلل البيولوجي وزيادة إنتاج الغاز الحيوي. وتعتبر عملية التحلل الحراري ضرورية لاستعادة الموارد، وتقليل حجم الحمأة، وتقليل تكاليف التخلص منها، وإنتاج المواد الصلبة الحيوية الخالية من مسببات الأمراض للاستخدام الزراعي. إذ اعتمدت المرافق الرئيسة مثل Thames Water (المملكة المتحدة) وDC Water (الولايات المتحدة الأمريكية) تقنيّة التحلل الحراري لتحسين استعادة الطاقة واستدامتها. وتركز التطورات المستقبلية على دمج التحلل الحراري في مرافق مياه الصرف الصحي المحايدة للطاقة واستكشاف التطبيقات اللامركزية. وتشمل التحديات ارتفاع التكاليف الرأسمالية والتعقيدات التشغيلية، ولكن التقدم في تحسين العمليات وتكامل الطاقة المتجددة يمكن أن يعزز جدواها في جميع أنحاء العالم. تواجه تقنية التحلل الحراري عدة تحديات، من أبرزها ارتفاع التكاليف الرأسمالية والتشغيلية نتيجة الحاجة إلى معدات تعمل تحت ضغط ودرجات حرارة عالية. كما أن العملية تتطلب مدخلات طاقة كبيرة، مما قد يؤثر على استدامتها في حال عدم اقترانها بأنظمة لاستعادة الطاقة.

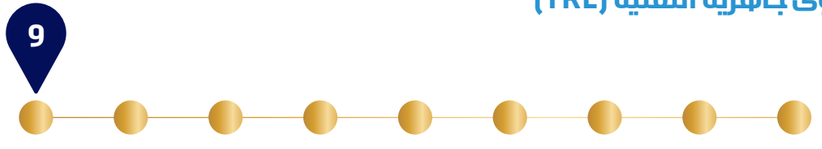
التقنيّة ونضج السوق

يتمتع التحلل الحراري بمستوى عالٍ من الجاهزية التقنيّة (TRL 9)، مع استخدام مثبت في محطات معالجة مياه الصرف الصحي الكبيرة، مما يعزز إنتاج الغاز الحيوي وإدارة الحمأة. ومع ذلك، لا يزال نضج السوق متوسطًا (TRL 6)، إذ تحد التكاليف الرأسمالية المرتفعة والتعقيد التشغيلي من الاعتماد على نطاق واسع، خاصة في المنشآت الأصغر. ويمكن أن يؤدي التركيز التنظيمي على استعادة الطاقة وإعادة استخدام المواد الصلبة الحيوية، إلى جانب خفض التكاليف، إلى اعتماد هذه التقنية على نطاق أوسع في السوق في السنوات القادمة.

مستوى جاهزية السوق (MRL)



مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)



يوجد في قسم قاموس المصطلحات وصف مستوى جاهزية السوق (MRL) ومستوى جاهزية التقنية (TRL)

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

الجهات الفاعلة الرئيسة

1 كامبي

2 شركة فيوليا لتقنيات المياه

3 ليستيك الدولية

4 ستانتيك (Stantec)

5 براون وكالدويل

الرؤى والإحصائيات

يعمل التحلل الحراري على تعزيز إنتاج الغاز الحيوي، ويقلل من حجم الحمأة، ويحسن جودة المواد الصلبة الحيوية، ويزيد من كفاءة معالجة مياه الصرف واستدامتها.

الأثر والإحصائيات

- **إنتاج الغاز الحيوي**: يمكن أن يؤدي تنفيذ التحلل الحراري إلى زيادة إنتاج الغاز الحيوي بشكل كبير أثناء التخمر اللاهوائي، وأشارت الدراسات إلى زيادة إنتاج الغاز الحيوي بنحو 75%-80% عند استخدام التحلل الحراري على الحمأة المنشطة للنفايات، مما يحول النفايات إلى مصدر طاقة ذي قيمة. مجلة Water Sci Technol
- **تقليل الحمأة**: يقلل التحلل الحراري بشكل فاعل من حجم الحمأة الناتجة عن عمليات معالجة مياه الصرف، ويؤدي هذا التقليل إلى خفض التكاليف المرتبطة بالتعامل مع الحمأة والتخلص منها، إذ توجد مواد أقل لإدارتها. مجلة Water and Wastewater
- **تحسين قابلية إزالة المياه**: تظهر الحمأة المعالجة بالتحلل الحراري خصائص تجفيف معززة، فمثلاً يمكن أن يزيد إجمالي محتوى المواد الصلبة في كعكة الحمأة المطرد المركزي بنسبة تزيد عن 50% بعد التحلل الحراري عند 170 درجة مئوية، مما يسهل إزالة المياه بكفاءة أكبر ويقلل من حجم الحمأة. جامعة هاواي
- **إنتاج الميثان**: تشير الأبحاث إلى أن التحلل الحراري يمكن أن يزيد من إنتاج الميثان المحدد من الحمأة المنشطة للنفايات بنسبة تتراوح بين 31% إلى 53%. وتعزز هذه الزيادة إنتاج الطاقة المتجددة، مما يسهم في استدامة عمليات معالجة مياه الصرف. مجلة Water Res. Technol
- **الدمج في البنية التحتية الحالية**: يمكن تركيب أنظمة التحلل الحراري في مرافق معالجة مياه الصرف الحالية، وتسمح هذه القدرة على التكيف للمحطات بتطوير عملياتها وتحسين الأداء والكفاءة، دون الحاجة إلى إصلاحات شاملة. مجلة Water and Wastewater
- **الجدوى الاقتصادية**: في حين أن الاستثمار الأولي في البنية التحتية للتحلل الحراري يمكن أن يكون كبيرًا، إلا أن الفوائد الاقتصادية طويلة الأجل كبيرة، ويؤدي تحسين إنتاج الغاز الحيوي إلى تقليل تكاليف الطاقة، كما يؤدي تقليل أحجام الحمأة إلى خفض نفقات التخلص منها، مما يسهم في توفير التكلفة الإجمالية. مجلة Water and Wastewater

تبني التقنيّة

تعمل مرافق مياه الصرف الرئيسة على دمج التحلل الحراري، والاستفادة من قدرتها على زيادة كفاءة التخمر، وتقليل تكاليف التخلص، ودعم أهداف الاقتصاد الدائري.

الوضع الراهن

- **نمو السوق العالمية**: قُيمت سوق تقنية التحلل الحراري العالمية بحوالي 1.89 مليار دولار أمريكي في عام 2024 ومن المتوقع أن يصل إلى 3.10 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2030، أي بمعدل نمو سنوي مركب قدره 8.60%.مجلة TechSci Research
- **المنشآت الرئيسة**: اعتمدت منشآت هامة أنظمة التحلل الحراري، مثل محطة معالجة مياه الصرف المتقدمة بلو بليز في واشنطن العاصمة، والتي تدير أكبر نظام تحلل حراري في العالم، إذ تعالج 135 ألف طن من المواد الصلبة الجافة سنويًا. كامي
- **التطورات التقنيّة**: تقوم شركات مثل فيوليا وكامي بتطوير عمليات التحلل الحراري لكميات كبيرة من المواد الصلبة، وتحسين إدارة الحمأة، وزيادة إنتاج الغاز الحيوي، وتقليل بصمة المرافق، وتعزيز تكامل الاقتصاد الدائري في معالجة مياه الصرف.

الدروس المستفادة عالميًا

- **كفاءة البنية التحتية**: يسمح تنفيذ أنظمة التحلل الحراري لمحطات معالجة مياه الصرف بزيادة معدلات تحميل التخمر دون زيادة سعة الخزانات الحالية، كما تسمح بتحسين بصمة المرافق وتقليل النفقات الرأسمالية. براون وكالدويل
- **خيارات التكوين المتنوعة**: توفر تكوينات التحلل الحراري المختلفة، مثل إعدادات ما قبل التخمر وما بعد التخمر، مزايا فريدة، بما في ذلك تحسين القدرة على إزالة المياه واستعادة الطاقة، مما يسمح بالتخصيص بناءً على احتياجات المحطة المحددة. كامي
- **تحسين كفاءة التخمر**: تعمل المعالجة المسبقة بالتحلل الحراري على تحسين التخمر اللاهوائي بشكل كبير مما يزيد من إنتاج الغاز الحيوي بنسبة تصل إلى 20% وتقليل حجم الحمأة، وبالتالي تحويل النفايات إلى طاقة بكفاءة أكبر. شركة فيوليا لتقنيات المياه

آفاق التقنية

تتحول عملية التحلل الحراري إلى محرك لمعالجة مياه الصرف الدائرية، مع التوسع اللامركزي، ولوائح الحمأة الأكثر صرامة، واحتجاز الكربون التي تشكل مستقبلها.

دلائل التغيير

- **مشاريع تجريبية مبتكرة**: يستخدم مشروع استعادة الطاقة الحيوية في مدينة رالي التحلل الحراري بهدف تقليل حجم المواد الصلبة الحيوية بنسبة 50% تقريبًا. وسيُكرر الغاز الحيوي الناتج ويُحول إلى غاز طبيعي متجدد، ومن المتوقع أن يُستخدم لتشغيل أكثر من 70 حافلة في المدينة يوميًا. مدينة شارلوت
- **التطورات في تكوينات التحلل الحراري**: سلط البحث في مختلف تكوينات التحلل الحراري- مثل إعدادات ما قبل التخمر وما بعد التخمر- الضوء على نقاط قوتها الفريدة في تعزيز كفاءة معالجة مياه الصرف واستعادة الموارد. كامي
- **استثمارات كبيرة في البنية التحتية**: تستثمر هيئة المرافق العامة في سان فرانسيسكو (SFPUC) أكثر من 3 مليارات دولار لتطوير محطة معالجة الجنوب الشرقي، ودمج أنظمة التحلل الحراري الخاصة بشركة كامبي لتعزيز معالجة المواد الصلبة الحيوية واستعادة الطاقة. هيئة المرافق العامة في سان فرانسيسكو

التوجه المستقبلي

- **معالجة مياه الصرف ذات الطاقة الإيجابية**: يمكن أن يدفع التحلل الحراري محطات مياه الصرف نحو الاستقلال المرتبط بالطاقة، ودمج التخمر المتقدم وتطوير الغاز الحيوي لتوليد الطاقة المتجددة، وتقليل الاعتماد على الطاقة الخارجية، وإنشاء مرافق معالجة محايدة للكربون ومدرة للدخل. مجلة npj للمياه النظيفة
- **أنظمة التحلل الحراري اللامركزية والمعيارية**: سيُوسع نطاق اعتماد التحلل الحراري ليشمل أنظمة حاويات لامركزية للمواقع النائية والصناعية، وسيعزز التقدم في التقنية المعيارية القدرة على تحمل التكاليف، مما يتيح معالجة مياه الصرف في المناطق النامية. البيئات.
- **عزل الكربون والمواد الحيوية**: ستعمل المواد الصلبة الحيوية المعالجة بالتحول الحراري على دعم احتجاز الكربون وإنتاج المواد الحيوية، وستعمل التطبيقات الناشئة في مجال الفحم الحيوي والزراعة المتجددة واحتجاز ثاني أكسيد الكربون على خلق مصادر جديدة للإيرادات، وحوافز تنظيمية للمرافق العامة.الفحم الحيوي

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

دراسة حالة

هيئة المياه والصرف في واشنطن العاصمة (الولايات المتحدة)

في عام 2014، أصبحت محطة معالجة مياه الصرف المتقدمة بلو بليز في واشنطن أكبر منشأة في العالم تنفذ التحلل الحراري، مما وضع معيارًا جديدًا لمعالجة مياه الصرف المستدامة. وفي مواجهة زيادة تكاليف الطاقة واللوائح الأكثر صرامة للتخلص من المواد الصلبة الحيوية، استثمرت هيئة المياه والصرف في واشنطن العاصمة 470 مليون دولار في برنامج متقدم لإدارة المواد الصلبة الحيوية، مع استخدام نظام التحلل الحراري باعتباره النظام الأساسي للمعالجة.

تعمل عملية التحلل الحراري على معالجة حمأة مياه الصرف مسبقًا باستخدام حرارة عالية (165 درجة مئوية) وضغط قبل التخمر اللاهوائي، مما يحسن بشكل كبير من التحلل البيولوجي. ونتيجة لذلك زاد إنتاج الغاز الحيوي بنسبة 50%، مما مكن المحطة من توليد 10 ميجاوات من الكهرباء المتجددة، وهو ما يغطي ثلث طلبها على الطاقة ويوفر 10 ملايين دولار سنويًا من تكاليف الطاقة. بالإضافة إلى ذلك، انخفض حجم المواد الصلبة الحيوية بنسبة 50%، مما أدى إلى خفض تكاليف التخلص منها.

وتنتج المحطة الآن مواد صلبة حيوية من الفئة (أ)، والتي تحمل علامة "بلوم"، وهو سماد غني بالمغذيات يباع تجاريًا. ألهم نجاح بلو بليز الاعتماد العالمي لتقنية التحلل الحراري، مما يثبت إمكانية تحويل مياه الصرف إلى طاقة، ومواد صلبة حيوية مدرة للدخل، وموارد قيمة، مما يمهد الطريق نحو مستقبل أكثر استدامة واستقلالية للطاقة.

التقنيات البارزة

هـ. وسائل تحسين المعالجة القائمة على الذكاء الاصطناعي

تستفيد هذه التقنية من الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات في الوقت الفعلي والبيانات التاريخية من عمليات معالجة مياه الصرف، مما يتيح إجراء التحليلات التنبؤية والتحكم الديناميكي. ومن خلال تحسين معايير مثل الجرعات الكيميائية والتهوية، تعمل تقنيات الذكاء الاصطناعي على تعزيز كفاءة المعالجة، وتقليل التكاليف التشغيلية، وتحسين جودة النفايات السائلة.

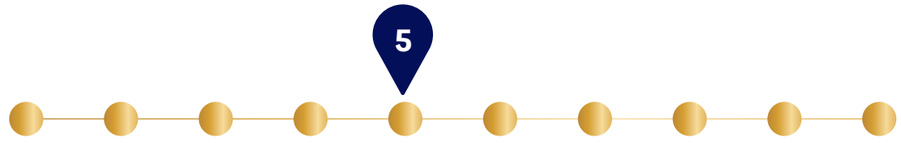
وسائل تحسين المعالجة القائمة على الذكاء الاصطناعي

يعمل تحسين معالجة مياه الصرف الصحي القائم على الذكاء الاصطناعي على الاستفادة من تقنيّات الذكاء الاصطناعي لتعزيز كفاءة معالجة مياه الصرف الصحي من خلال تحليل البيانات التاريخية والبيانات في الوقت الفعلي. وتعمل النماذج المعتمدة على الذكاء الاصطناعي على تحسين المعايير الحرجة مثل الجرعات الكيميائية والتهوية وإدارة الحمأة، مما يؤدي إلى تحسين إزالة الملوثات وتقليل تكاليف التشغيل وتحسين جودة النفايات. وتستخدم شركات المرافق العامة مثل EWE WASSER (ألمانيا) ومجلس المرافق العامة في سنغافورة الذكاء الاصطناعي لتحسين التحكم في العمليات وكفاءة الطاقة. وتعتبر هذه التقنيّة بالغة الأهمية في ظل الضغوط المتزايدة التي تواجهها معالجة المياه بسبب التوسع الحضري وتغير المناخ. وتركز التطورات المستقبلية على توسيع قدرات الذكاء الاصطناعي التنبؤية، والتكامل مع أجهزة استشعار إنترنت الأشياء، وتمكين حلول المعالجة اللامركزية. وتشمل التحديات ارتفاع تكاليف التنفيذ، والمخاوف المتعلقة بجودة البيانات، والحواجز التنظيمية، ولكن التقدم في الأتمتة والحوسبة السحابية يسرع من اعتماد الذكاء الاصطناعي على مستوى العالم. في المملكة العربية السعودية، تستفيد أرامكو من حلول الذكاء الاصطناعي والبيانات الضخمة لتطوير مختلف العمليات في قطاع الطاقة، بما في ذلك إدارة المياه. وتهدف أرامكو من خلال تسخير قوة الذكاء الاصطناعي والبيانات الضخمة وإنترنت الأشياء الصناعية (IIoT) إلى تعزيز العمليات الصناعية وتحسين الكفاءة والموثوقية والاستدامة.

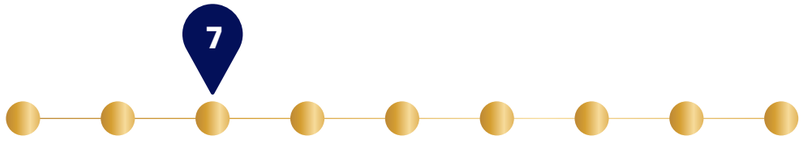
التقنيّة ونضج السوق

وصلت عملية تحسين معالجة مياه الصرف الصحي المدعومة بالذكاء الاصطناعي إلى مستوى جاهزية تقنيّة متوسط إلى مرتفع (TRL 7)، إذ أثبتت حالات التنفيذ التجريبية الناجحة قدرتها على تعزيز كفاءة العمليات من خلال تحليل البيانات في الوقت الفعلي والتحكم التنبؤي. ومع ذلك، لا يزال نضج السوق متوسطًا (MRL 5)، إذ لا يزال مستوى الاعتماد ناشئًا بين الجهات التي اعتمدت التقنيّة في وقت مبكر. وتشمل التحديات الرئيسة تكاليف الدمج، والشكوك التنظيمية، والمخاوف المتعلقة بجودة البيانات. ومن المتوقع أن تؤدي توجهات التحول الرقمي المتزايدة ومتطلبات الاستدامة إلى تسريع تبني التقنية على نطاق أوسع في المستقبل القريب.

مستوى جاهزية السوق (MRL)



مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)



يوجد في قسم قاموس المصطلحات وصف مستوى جاهزية السوق (MRL) ومستوى جاهزية التقنية (TRL)

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

الجهات الفاعلة الرئيسة

1 بايوبوت أناليتيكس

2 جرادیانت

3 أوكسيل

4 جامعة شيكاغو

5 ويتسوس

الرؤى والإحصائيات

يعمل تحسين معالجة مياه الصرف الصحي القائم على الذكاء الاصطناعي على تعزيز الكفاءة وخفض التكاليف وتحسين إزالة الملوثات وخفض الانبعاثات، مما يؤدي إلى تعزيز الاستدامة والامتثال التنظيمي في قطاع المياه.

الأثر والإحصائيات

- **استهلاك الطاقة:** يمكن تحسين التهوية، التي تمثل ما يصل إلى 60% من إجمالي استهلاك الطاقة في مرافق المعالجة، باستخدام نماذج الذكاء الاصطناعي التي تضبط معدلات التهوية ديناميكيًا بناءً على بيانات جودة المياه في الوقت الفعلي، مما يقلل من استخدام الطاقة في محطات معالجة مياه الصرف الصحي بنسبة 30-50%. شركة Rockwell Automation
- **توفير استخدام المواد الكيميائية:** يتيح التحكم في العمليات المدعومة بالذكاء الاصطناعي تحديد جرعات أكثر دقة من المواد المسببة للتخثر والمطهرات والمواد الكيميائية الأخرى الخاصة بالمعالجة، مما يؤدي إلى انخفاض استهلاك المواد الكيميائية بنسبة 10%-30 وتوفير التكاليف وتعزيز استقرار العمليات. حاكويس
- **دقة إزالة الملوثات:** تتنبأ نماذج الذكاء الاصطناعي بكفاءة إزالة الملوثات وتعززها بقيمة R^2 تتراوح بين 0.64 و1.00، مما يعني أنها توفر توقعات دقيقة للغاية لنتائج المعالجة. وتساعد هذه الدقة المرافق على تلبية المعايير التنظيمية وتوقعات المجتمع. مجلة Water Sci Technol
- **انخفاض انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري:** أدت معالجة مياه الصرف الصحي بمساعدة الذكاء الاصطناعي إلى خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة تصل إلى 18% من خلال تحسين عمليات التهوية ومعالجة الحمأة. وهذا يسهم في تحقيق أهداف الاستدامة ويتوافق مع المستهدفات العالمية للحد من الكربون، مما يجعل محطات معالجة مياه الصرف الصحي أكثر ملاءمة للبيئة. العمليات
- **خفض التكاليف التشغيلية:** أدى استخدام الذكاء الاصطناعي للتحليلات التنبؤية إلى انخفاض بنسبة 10% في النفقات التشغيلية من خلال تبسيط جداول الصيانة وتحسين تخصيص الموارد. بالإضافة إلى ذلك، تعمل إدارة الأصول المدعومة بالذكاء الاصطناعي على إطالة عمر المعدات الحيوية بنسبة 20%. العمليات
- **الصيانة التنبؤية:** تقلل الصيانة التنبؤية القائمة على الذكاء الاصطناعي من الأعطال غير المتوقعة بنسبة 18%. ومن خلال متابعة أداء المعدات والتنبؤ بالأعطال قبل حدوثها، يقلل الذكاء الاصطناعي من وقت التوقف المكلف ويتيح تنفيذ أعمال الصيانة الاستباقية بدلاً من الإصلاحات التفاعلية. العمليات

تبني التقنيّة

تعمل تقنيّات الذكاء الاصطناعي على إعادة تشكيل عمليات معالجة مياه الصرف الصحي، مع زيادة مستويات الاعتماد بين المرافق الناضجة رقميًا، ومع ذلك تظل القدرة على التوسع والتدريب والوضوح التنظيمي تحديات رئيسة للانتشار في السوق على نطاق أوسع.

الوضع الراهن

- **نمو السوق العالمية:** تم تقييم سوق تقنيات الذكاء الاصطناعي العالمي في مجالي المياه والصرف بحوالي 3.77 مليار دولار أمريكي في عام 2023 ومن المتوقع أن يصل إلى 24.45 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2030، بمعدل نمو سنوي مركب قدره 26.8%. ويشير هذا النمو الكبير إلى زيادة تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي في معالجة مياه الصرف الصحي. شركة InsightAce Analytic
- **الاعتماد في مرحلة مبكرة:** لا يزال اعتماد الذكاء الاصطناعي في معالجة مياه الصرف الصحي في مراحله المبكرة. وتتصدر المرافق الأكبر حجمًا في المناطق المتقدمة رقميًا عملية اعتماد هذه التقنيّة، في حين تتخلف المرافق الأصغر حجمًا عن الركب. وبحلول نهاية عام 2025، من المتوقع أن يرتفع معدل الانتشار إلى 25%-30، بفضل خفض التكاليف، والعائد على الاستثمار المؤكد، والحوافز المالية. Idrica
- **التحديات المتعلقة بالاعتماد:** على الرغم من الفوائد، فإن التحديات مثل الصيانات المُجهدة للأجهزة، ونقص الخبرة العملية في تصميم برامج الذكاء الاصطناعي، وعدم استقرار حلقات التحكم تعيق اعتماد الذكاء الاصطناعي على نطاق أوسع في مرافق معالجة مياه الصرف الصحي. المياه

الدروس المستفادة عالميًا

- **جودة البيانات وتوافرها:** تعتمد فعالية الذكاء الاصطناعي في معالجة مياه الصرف الصحي بشكل كبير على مجموعات بيانات عالية الجودة وشاملة. ويمكن أن تؤدي البيانات غير المكتملة أو غير الدقيقة إلى تنبؤات خاطئة، مما يؤكد ضرورة وجود أنظمة قوية لجمع البيانات وإدارتها. تنقية وتكييف المياه
- **التحديات المتعلقة بالدمج**: يمكن أن يكون دمج الذكاء الاصطناعي في البنية التحتية الحالية لمعالجة مياه الصرف الصحي معقدًا ويتطلب جهودًا كبيرة. وتتطلب مشكلات التوافق بين نماذج الذكاء الاصطناعي والأنظمة الحالية تخطيطًا وتصميمًا دقيقين لضمان الدمج وتنفيذ الوظائف بطريقة سلسة. دراسات حالة في الهندسة الكيميائية والبيئية
- **الاعتبارات الاقتصادية**: يمكن أن يكون الاستثمار الأولي في تقنيات الذكاء الاصطناعي، بما في ذلك أجهزة الاستشعار والبرامج والتدريب، كبيرًا. ومع ذلك، قد يتم تعويض هذه التكاليف بمرور الوقت من خلال الكفاءة التشغيلية وتوفير التكاليف، مما يجعل من الضروري تقييم الفوائد طويلة الأجل مقابل النفقات الأولية. مؤسسةSave the Water

آفاق التقنية

من المتوقع أن تعمل معالجة مياه الصرف الصحي المدعومة بالذكاء الاصطناعي على تحويل الكفاءة والمرونة واستعادة الموارد، مما يتيح عمليات أكثر ذكاءً مع تطور اعتماد الحلول الرقمية والأطر التنظيمية.

دلائل التغيير

- **الشركات الناشئة المتخصصة:** يشهد قطاع المياه زيادة في عدد الشركات الناشئة التي تركز على تطبيقات الذكاء الاصطناعي لإدارة مياه الصرف الصحي. على سبيل المثال، جمعت شركة كاندو 10 ملايين دولار في عام 2024 لتعزيز حلولها الخاصة بمعالجة مياه الصرف الصحي القائمة على الذكاء الاصطناعي، بهدف تحسين جودة المياه وتعزيز إعادة الاستخدام. StartupHub
- **الاستثمارات الرأسمالية في المشاريع:** في عام 2022، حصلت ZwitterCo، وهي شركة متخصصة في حلول الترشيح المتقدمة، على 33 مليون دولار في تمويل السلسلة A، مما يمثل أحد أكبر الاستثمارات في الشركات الناشئة في مجال تقنيّات المياه. وهذا يشير إلى تزايد ثقة المستثمرين. Global Water Awards
- **مشاريع تجريبية مبتكرة:** تعمل تقنية الترشيح الفائق المدعومة بالذكاء الاصطناعي في درايتون فالي على تحسين المعالجة في منشأة في بلدة صغيرة. ويوضح هذا النموذج القابل للتطوير إمكانات الذكاء الاصطناعي في معالجة المياه بطريقة لامركزية ومستدامة، مما يعود بالنفع على المجتمعات ذات الموارد المحدودة، ويشكل سابقة لاعتمادها في المناطق الريفية. مؤسسةAlberta Innovates

التوجه المستقبلي

- **دائرية المياه المدعومة بالذكاء الاصطناعي:** يمكن للذكاء الاصطناعي تحسين إعادة استخدام المياه في الوقت الفعلي، وتخصيص مياه الصرف الصحي المعالجة بشكل ديناميكي للاستخدام الصناعي والزراعي والشرب. ويمكن أن يعزز ذلك أهداف الاقتصاد الدائري، ويحسن كفاءة الموارد، ويدعم استراتيجيات القدرة على التكيف مع المناخ. مجلة الطبيعة
- **وحدات المعالجة الدقيقة اللامركزية المدعومة بالذكاء الاصطناعي:** يمكن لوحدات معالجة مياه الصرف الصحي المدعومة بالذكاء الاصطناعي والتي تعمل خارج الشبكة إدارة العمليات بشكل مستقل، مما يتيح للمناطق التي تعاني من نقص المياه أو المعرضة للكوارث تحسين إدارة مياه الصرف الصحي دون الحاجة إلى بنية تحتية واسعة النطاق، ودعم حلول المعالجة اللامركزية والقابلة للتطوير والتكيف. دليل الاستدامة
- **دمج الذكاء الاصطناعي في أجهزة الاستشعار الذكية:** يمكن لأجهزة الاستشعار المدعومة بالذكاء الاصطناعي اكتشاف الملوثات بشكل مستقل وتحسين المعالجة والتنبؤ بالأعطال. وقد تعمل أنظمة الذكاء الاصطناعي المتطورة على تقليل الاعتماد على الحوسبة المركزية، مما يتيح تحسين معالجة مياه الصرف الصحي بشكل أسرع وأكثر كفاءة في الوقت الفعلي. المجلة العالمية للأبحاث المتقدمة والمراجعات

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

دراسة حالة

شركة WE WASSER **(ألمانيا)**

في عام 2017، سعت محطة معالجة مياه الصرف في كوكسهافن في ألمانيا، التي تديرها شركة EWE WASSER GmbH، إلى تحسين كفاءة الطاقة وخفض تكاليف التشغيل مع الحفاظ على الامتثال التنظيمي الصارم، وعقدت المحطة شراكة مع Xylem لتنفيذ نظام تحسين المعالجة المدعوم بالذكاء الاصطناعي، والذي يحلل البيانات في الوقت الفعلي والتاريخية من نظام سكادا (SCADA) الخاص بالمحطة للتنبؤ بنقاط ضبط التهوية المثالية.

وكانت التهوية، التي تمثل ما يقرب من 60% من استهلاك الطاقة في معالجة مياه الصرف البيولوجية، محورًا رئيسًا لتحسين الكفاءة. ويعمل حل الذكاء الاصطناعي على ضبط مستويات الأكسجين بشكل مستمر استجابةً لتغيرات التدفق الداخل، مما يضمن استخدام الطاقة فقط عند الضرورة. وخلال السنة الأولى خفضت المحطة استهلاك طاقة التهوية بنسبة 30%، أي ما يعادل توفيرًا سنويًا قدره 1.1 مليون كيلووات في الساعة، وهو ما يكفي لتشغيل 64 منزلًا لمدة عام. كما قام النظام بتحسين جرعات المواد الكيميائية وإدارة الحمأة، مما أدى إلى تخفيضات إضافية في التكاليف.

توضح هذه الحالة قدرة معالجة مياه الصرف المدعومة بالذكاء الاصطناعي على تعزيز الكفاءة والاستدامة وتوفير التكاليف، مما يشكل سابقة لاعتمادها على نطاق أكبر في المرافق.

04

رؤى القادة

الابتكار من أجل مستقبل مستدام:
شركة إينووا وتطورات تقنيات المياه

"

تُعد ندرة المياه تحديًا ملحًا على مستوى العالم، بما في ذلك في المملكة العربية السعودية، وذلك نتيجةً للنمو السكاني وتغير المناخ. وتتمثل التحديات الرئيسة المتعلقة بالمياه في مدى توفرها، وتكلفتها، واستهلاك الطاقة في إنتاجها وتوزيعها. ولمواجهة هذه التحديات، يتم تطوير تقنيات مبتكرة تهدف إلى تعزيز الكفاءة وتحقيق الاستدامة. ومن بين أبرز هذه التطورات الواعدة تقنية "استثمار المحلول الملحي"، التي لا تسهم فقط في خفض تكلفة إمدادات المياه، بل تُمكّن أيضًا من استخراج معادن قيّمة من المحلول الملحي، مثل كلوريد الصوديوم.

"استثمار المحلول الملحي لا يزال غير حاضر على رادار الجميع، لكننا نتابعه عن كثب نظرًا لإمكاناته الكبيرة في خفض تكاليف وإستهلاك الطاقة في إنتاج المياه." وفي المملكة العربية السعودية، تم إنشاء محطة لاستثمار المحلول الملحي بطاقة 1000 متر مكعب يوميًا في مدينة ضبا، بهدف اختبار وتوثيق فعالية هذه التقنيات. وتُعد الأملاح المستخرجة من المحلول الملحي ضرورية لإنتاج مادة **PVC** السائلة، وهي مادة استراتيجية لمنطقة مجلس التعاون الخليجي.

تُعزى استثمارات المملكة في الابتكار بمجال المياه بشكل أساسي إلى سعيها لتقليل استهلاك الطاقة، وخفض تكاليف إنتاج المياه، والحد من الأثر البيئي لعمليات التحلية. علاوة على ذلك، فإن التوسع الصناعي في المملكة يتوافق مع رؤية 2030، التي تهدف إلى تحويل المملكة إلى قوة اقتصادية عالية التقنية.

"

الدكتور نيكولاي فوتشكوف
المدير التنفيذي لمركز الابتكار في المياه في شركة إينووا

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

الابتكار من أجل مستقبل مستدام:
شركة إينووا وتطورات تقنيات المياه

"

لدعم هذا التحول، أنشأت الحكومة هيئة البحث والتطوير والابتكار بهدف تسريع وتيرة الابتكار في مجال المياه. ومن المتوقع أن يشهد سوق الابتكار المائي في المملكة العربية السعودية نموًا سريعًا خلال السنوات الخمس إلى العشر القادمة، مدفوعًا بالتقدم التقني، وأهداف الاستدامة، وزيادة حجم الاستثمارات.

ولكي تصبح المملكة العربية السعودية رائدة عالميًا في مجال الابتكار المائي، يتمثل أحد الإجراءات الاستراتيجية الأساسية في "التركيز على تطوير خارطة طريق 2030 لتنفيذ استراتيجية الابتكار في المياه في مجالات التحلية، ومعالجة مياه الصرف الصحي، وإعادة الاستخدام (خارطة طريق الابتكار المائي السعودي)".

وتتضمن الإجراءات الاستراتيجية الأخرى إنشاء مركز ابتكار موحد بإدارة لجنة توجيهية تُشرف وتنسّق الأنشطة المختلفة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للمملكة أن تتخذ خطوة استراتيجية مهمة من خلال تشجيع ريادة الأعمال والشركات الناشئة عبر حاضنات الأعمال، وفرص التمويل، وبرامج الإرشاد، مما سيسهم في ترسيخ مكانتها كقوة عالمية في هذا المجال.

كما يُعد "الاستفادة من التقنيات الرقمية" من الإجراءات الاستراتيجية المهمة، من خلال تبني التحول الرقمي في إدارة المياه باستخدام تقنيات إنترنت الأشياء، والبيانات الضخمة، والذكاء الاصطناعي، مع تطبيق أنظمة إدارة ذكية للمياه تُعزز الكفاءة والمراقبة ودقة اتخاذ القرار.

"

الدكتورة نورة شهاب
القائمة بأعمال رئيس مركز الابتكار في المياه في شركة إينووا

05

الملحق

المقابلات - الأسئلة الموجهة لقادة القطاع الخاص

د. نيكولاي فوتشكوف
(المدير التنفيذي لمركز ابتكار المياه)
- شركة إينووا

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

تتمثل التحديات الرئيسة المتعلقة بالمياه في: توافر المياه، وتكاليفها، واستخدام الطاقة لإنتاجها ونقلها.
يواجه العالم أجمع، والمملكة العربية السعودية على وجه الخصوص، تحديات ندرة المياه الناجمة عن النمو السكاني والاحتباس الحراري.
ويسمح الجيل الجديد من تقنيات معالجة المياه وتثمين المحلول الملحي بخفض تكلفة إمدادات المياه بشكل كبير من خلال استخدام معدات عالية الكفاءة في استخدام الطاقة.

كما تتيح تقنيات تثمين المحلول الملحي استخراج معادن تجارية قيّمة من المحلول الملحي، والتي يمكن بيعها تجاريًا لتعويض تكلفة إنتاج المياه

2. ما الذي لم يُدرَج بعد في دائرة اهتمام الجميع وأنتم تتابعونه عن كثب؟

أ. لم يُدرَج بعدُ تثمين المحلول الملحي ضمن دائرة اهتمام الجميع، لكننا نتابعه عن كثب لما يتمتع به من إمكانات هائلة لتحويل التكلفة والطاقة اللازمتين لإنتاج المياه. نتابع تثمين المحلول الملحي عن كثب، وقد أنشأنا مصنعًا لتثمين المحلول الملحي بطاقة 1000 متر مكعب يوميًا في ضباء، المملكة العربية السعودية، لتطوير الجيل التالي من تقنيات تثمين المحلول الملحي واعتمادها. إن المنتج الرئيس من مرافق تثمين المحلول الملحي هو كلوريد الصوديوم، والذي يُمكن إنتاجه الآن بتكاليف أقل من تكاليف مصادر الملح الأرضية. ويُستخدم ملح المحلول الملحي لإنتاج بولي كلوريد الفينيل السائل، وهو ذو أهمية استراتيجية لجميع دول مجلس التعاون الخليجي.

ب. مواد بلاستيكية من الجيل الجديد تتيح استخدامات متعددة عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد، واستبدال أنابيب الفولاذ المقاوم للصدأ عالية الضغط بأنابيب بلاستيكية - حاليًا، ترتبط معظم تكاليف رأس مال محطة تحلية المياه وتشغيلها بتخفيف الطبيعة التآكلية للمياه المحلاة. ويتطلع عدد من المقاولين المتخصصين في البلاستيك إلى تطوير أنابيب بلاستيكية قادرة على تحمل الضغوط العالية، وبالتالي الاستغناء عن استخدام أنابيب الفولاذ المقاوم للصدأ عالية الضغط.

ج. توليد الطاقة عن طريق حصاد فرق الضغط الاسموزي بين مصادر المياه المالحة والمياه العذبة: إذ ينتج عن استخراج المحلول الملحي توليد تيارات عالية الملوحة، والتي يمكنها توليد الكهرباء بتكلفة منخفضة في أنظمة الأغشية ذات السوائل منخفضة الملوحة، إلى جانب الأغشية المتخصصة للتناضح المتأخر للضغط.

د. الأغشية متعددة الوظائف: لا تؤدي الأغشية الحالية سوى وظيفة واحدة، وهي إنتاج المياه العذبة من المياه المالحة، ولا تقتصر قدرة الأغشية الانتقائية متعددة الوظائف على إنتاج المياه العذبة فحسب، بل يمكنها أيضًا اختيار معادن محددة واستخراجها من تيار مياه البحر المصدر، وبالتالي تنتج منتجين تجاريين: مياه الشرب ومعادن محددة.

هـ. استخدام المحلول الملحي في الإنشاءات: إن دراسة استخدام المحلول الملحي أو الملح كبديل للأسمنت في الخرسانة يمكن أن يقلل بشكل كبير من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بإنتاج الأسمنت التقليدي.

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

د. نورا شهاب
(القائم بأعمال رئيس مركز ابتكار المياه)
- شركة إينووا

3. ما الذي يدفع الاستثمارات في ابتكارات المياه في المملكة العربية السعودية؟

تُعد الحاجة إلى خفض الطاقة وتكاليف إنتاج المياه العذبة والآثار البيئية لتحلية المياه من أهم محركات الاستثمار، كما يُعد النمو الصناعي المتوقع في المملكة العربية السعودية - في ظل سعيها لتحقيق رؤية -2030 دافعًا آخر لتحقيق مكانة اقتصادية متقدمة تقنيًا.

4. كيف تتوقعون تطور سوق ابتكارات المياه خلال السنوات الخمس إلى العشر القادمة؟

نتوقع أن يشهد سوق الابتكار في المملكة العربية السعودية نموًا متسارعًا لتلبية الاحتياجات المحددة في رؤية 2030. وقد أنشأت المملكة العربية السعودية هيئة حكومية خاصة (هيئة تطوير واستثمار المياه) لدعم هذا النمو في ابتكارات المياه.

5. كيف يمكن للمملكة العربية السعودية أن تُرسّخ مكانتها كرائدة عالمية في مجال ابتكار المياه؟

لتصبح المملكة العربية السعودية رائدة عالمية في مجال ابتكار المياه، يجب عليها التركيز استراتيجيًا على ما يلي:

أ. وضع خارطة طريق لعام 2030 لتنفيذ استراتيجية ابتكار المياه السعودية في مجال تحلية المياه ومعالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها (خارطة طريق ابتكار المياه السعودية).

ب. إنشاء مركز ابتكار تديره لجنة توجيهية، لتنسيق جميع الأنشطة المرتبطة بتنفيذ خارطة طريق ابتكار المياه السعودية.

ج. زيادة الاستثمار في ابتكار المياه بشكل كبير لتنفيذ خارطة طريق ابتكار المياه السعودية.

د. إنشاء مجلس مشترك مع قطاع الصناعة لتطبيق التقنيات المتقدمة التي طُوّرت نتيجة لتنفيذ خارطة طريق ابتكار المياه.

هـ. تشجيع ريادة الأعمال والشركات الناشئة: إنشاء منظومة تدعم الشركات الناشئة ورواد الأعمال في مجال المياه، وذلك بحاضنات الأعمال وفرص التمويل وبرامج الإرشاد، التي ستحفّز الابتكار وتطرح أفكارًا جديدة في السوق.

و. الاستفادة من التقنيات الرقمية: تبنّي التحول الرقمي في إدارة المياه من خلال استخدام إنترنت الأشياء والبيانات الضخمة والذكاء الاصطناعي، مع تطبيق أنظمة ذكية لإدارة المياه لتُحسّن الكفاءة وعمليات المراقبة واتخاذ القرارات.

المنهجية المفضّلة

تم إعداد محتوى هذا التقرير بناءً على الممارسات المتبعة مثل إطار الحوكمة الاستباقية للتقنيات الناشئة، الصادر عن منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية، وذلك باستخدام المسح الممنهج للأفق – وهو بمثابة استكشاف مستمر للتطورات التقنية والدلائل المبكرة التي تبرز الابتكارات أو الديناميكيات الاجتماعية التقنية ذات الأهمية، سواء كانت فرصاً أو تهديدات محتملة.

من خلال تحديد المؤشرات الضعيفة وتحليلها، يكشف مسح الأفق عن المجالات الناشئة ذات الأهمية التقنية، ويحدد المحركات الرئيسة للتغيير، ويوفر رؤى حول كيفية تطوُّر هذه العوامل إلى فرص تحويلية أو مخاطر حرجة. وتعد هذه المرحلة الأولية والمستمرة بمثابة تقييم شامل للمشهد التقني في مراحله المبكرة، ما يضمن مرونة صناع القرار وإلمامهم بالمستجدات في عصر الابتكار السريع.

تُعد القدرة على معالجة المعلومات عاملاً رئيسا يحد من تغطية مسح الأفق في بيئة تتسم بالتقدم التقني السريع وتطور المعارف المتجدد. وللتخفيف من حدة هذا التحدي، تطبق الوزارة نهج المسح الذي يجمع بين مزايا الخبرة البشرية والذكاء الآلي، استنادًا إلى قاعدة بيانات منصة نبراس التي تضم أكثر من 10,000 مصدر (بما في ذلك المنشورات العلمية وبراءات الاختراع وتقارير القطاع والأخبار) وأكثر من 100 مليون نقطة بيانات تُحدّث مرتين يوميًا.

الخطوة الأولى - جمع المؤشرات وتحديد التقنيات

بالنظر إلى الممارسات الراسخة، مثل إطار الحوكمة الاستباقية للتقنيات الناشئة (OECD 2024) ، تضمنت الخطوة الأولى للتحليل جمع المؤشرات وتقييمها بشكل منهجي لتحديد التقنيات ذات الصلة. ولتحقيق ذلك، استخدم الفريق أسلوب مسح يجمع بين مزايا الخبرة البشرية والذكاء الاصطناعي، مستخدمًا قاعدة بيانات تحتوي على أكثر من 100 مليون نقطة بيانات (مثل براءات الاختراع وتقارير الصناعة والمنشورات العلمية، إلخ). وعلى مدار السنوات الخمس الماضية، تم الحصول على حوالي 27000 إشارة متعلقة بمعالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها. وباستخدام الذكاء الاصطناعي لتوليد البيانات المعززة بالاسترجاع (RAG) والتحقق من صحة الخبراء البشريين، جُمعت قائمة طويلة تضم 132 تقنية مميزة مذكورة في معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها لإجراء تحليل متعمق.

الخطوة الثانية - تقييم التقنيات وإرساء المشهد التقني

في الخطوة الثانية، تم إنشاء مشهد تقني شامل من القائمة الطويلة للتقنيات المذكورة في المؤشرات. أولاً، تم استبعاد جميع التقنيات التي لم يعد من الممكن اعتبارها ناشئة، أي تلك التي دخلت بالفعل نطاق التبني السائد في الأسواق ذات الصلة - على سبيل المثال، "عدادات المياه الذكية". بالإضافة إلى ذلك، تم تقليل التداخل المفاهيمي بين التقنيات من خلال إدراج تقنيات متشابهة أو فريدة (على سبيل المثال، "أجهزة الاستشعار الروبوتية"، و"السباحة الحرة"، و"الأنظمة غير المقيدة"). وأخيرًا، تم تجميع التقنيات في مجالات تقنية بناءً على غرض الاستخدام والخصائص الوظيفية. وأخيرًا، تم تقييم جميع التقنيات المدرجة في المشهد بناءً على مستوى النضج وإمكانية التأثير وسهولة التنفيذ وفقًا للمعايير الموضحة في خارطة طريق اعتماد تقنية المياه لوزارة البيئة والمياه والزراعة.

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

بطاقة تقييم معايير الختيار

	التقنية	Terminology	مستوى (TRL) جاهزية التقنية	الأثر المحتمل	الزيادة في الإشارات
01	وسائل تحسين المعالجة القائمة على الذكاء الاصطناعي	AI-Enabled Treatment Optimization	7-6	عالٍ جداً	عالٍ جداً
02	تقنية التنظيف بالطحالب	Algal Turf Scrubber (ATS) Systems	9-8	عالٍ جداً	عالٍ
03	الفقاعات النانوية	Nanobubbles	9-8	عالٍ جداً	عالٍ
04	الإفراغ الصفري للسوائل	Zero Liquid Discharge (ZLD) Systems	9-8	عالٍ جداً	عالٍ
05	التحلل الحراري	Thermal Hydrolysis	9-8	عالٍ جداً	عالٍ
06	التوائم الرقمية لمحطات المعالجة	Digital Twins of Treatment Plants	9-8	عالٍ جداً	عالٍ
07	شبكات الاستشعار الذكية	Smart Sensor Networks	7-6	عالٍ جداً	عالٍ
08	خلايا الوقود الميكروبية	Microbial Fuel Cells (MFC)	7-6	عالٍ جداً	عالٍ
09	المعالجة باستخدام الإنزيمات	Enzyme-based Treatment	5-4	عالٍ جداً	عالٍ
10	الكائنات الحية الدقيقة المحسنة وراثيًا	Genetically-enhanced Microorganisms	5-4	عالٍ جداً	عالٍ
11	أغشية الجرافين	Graphene-based Membranes	5-4	عالٍ جداً	عالٍ
12	مفاعل الأغشية الحيوية المتحرك	Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)	9-8	عالٍ جداً	متوسط
13	المفاعلات الحيوية الغشائية	Membrane Bioreactors (MBRs)	9-8	عالٍ جدا	متوسط
14	استعادة ستروفايت	Struvite Recovery	9-8	عالٍ جدا	متوسط
15	مرافق المعالجة المشتركة	Co-Treatment Facilities	9-8	عالٍ جدا	متوسط
16	الكربنة الحرارية المائية	Hydrothermal Carbonization (HTC)	9-8	عالٍ جدا	متوسط
17	التحفيز الضوئي الشمسي	Solar Photocatalysis	7-6	عالٍ جدا	متوسط
18	التناضح الأمامي	Forward Osmosis (FO)	7-6	عالٍ جدا	متوسط
19	استخلاص الغاز الحيوي إلى هيدروجين	Biogas-to-Hydrogen Recovery	7-6	عالٍ جدا	متوسط
20	الإزالة الاختزالية لـ PFAS	PFAS Reductive Defluorination (PRD)	5-4	عالٍ جدا	متوسط
21	أنظمة الحمأة الحبيبية الهوائية	Aerobic Granular Sludge (AGS) Systems	9-8	عالٍ جدا	منخفض

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

	التقنية	Terminology	مستوى (TRL) جاهزية التقنية	الأثر المحتمل	الزيادة في الإشارات
22	محطات معالجة تعمل بالطاقة الشمسية	Solar-powered Treatment Plants	9-8	عالٍ جدا	منخفض
23	أنظمة معالجة المياه الرمادية المعيارية	Modular Graywater Treatment Systems	9-8	عالٍ جداً	منخفض
24	المعالجة النباتية	Phytoremediation	7-6	عالٍ	عالٍ
25	الأكسدة المتقدمة الكهروكيميائية	Electrochemical Advanced Oxidation (EAOP)	7-6	عالٍ	عالٍ
26	الأنظمة الكهروكيميائية الميكروبية	Microbial Electrochemical Systems (MES)	5-4	عالٍ	عالٍ
27	التحليل الكهربائي	Electrodialysis (ED)	9-8	عالٍ	متوسط
28	أكسدة الماء فوق الحرجة	Supercritical Water Oxidation (SCWO)	9-8	عالٍ	متوسط
29	مفاعلات الموجات فوق الصوتية	Ultrasonic Reactors	9-8	عالٍ	متوسط
30	وحدات معالجة مياه الصرف المتنقلة	Mobile Wastewater Treatment Units	9-8	عالٍ	متوسط
31	مرشحات التربة واسعة النطاق	Large-scale Soil Filters	7-6	عالٍ	متوسط
32	التقطير الغشائي	Membrane Distillation (MD)	7-6	عالٍ	متوسط
33	تعدين المجاري	Sewer Mining	7-6	عالٍ	متوسط
34	التخثر الكهربائي	Electrocoagulation	7-6	عالٍ	متوسط
35	النانوسليلوز	Nanocellulose	5-4	عالٍ	متوسط
36	المفاعلات الحيوية ذات الأغشية التناضحية	Osmotic Membrane Bio-reactors (OMBRs)	5-4	عالٍ	متوسط
37	أحواض الطحالب عالية المعدل	High-Rate Algal Ponds (HRAPs)	7-6	متوسط	متوسط
38	المركبات البوليمرية	Polymeric Composites	7-6	متوسط	متوسط
39	معالجة المياه باستخدام قوس البلازما	Plasma Arc Water Treatment	5-4	متوسط	متوسط
40	الأراضي الرطبة الهجينة	Hybrid Constructed Wetlands	9-8	متوسط	منخفض

قاموس المصطلحات

مستوى جاهزية التقنيّة (TRL)

تُستخدم مستويات جاهزية التقنيّة كطريقة لتقييم نضج التقنية المطورة، وله مقياس من 1 إلى 9 (من المبادىء 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 السوق (MRL)

تُستخدم مستويات جاهزية السوق لتقييم الجاهزية التجارية لعروض التقنيّة لتوفير سياق أكبر، وله مقياس من 0 إلى 9 (من مرحلة الفكرة إلى مرحلة توسيع النطاق)

MRL0	MRL1	MRL2	MRL3	MRL4
حدس	أبحاث سوق أساسية	صياغة الاحتياجات	التحقق من الاحتياجات	حملة لأصحاب المصلحة على نطاق صغير

MRL5	MRL6	MRL7	MRL8	MRL9
حملة لجهات الاعتماد في وقت مبكرة على نطاق كبير	إثبات الاجتذاب	إثبات الرضا	إثبات قابلية التوسع	إثبات الاستقرار

المصادر:

1. TRL – تمّ تصميم التعريف من جانب ناسا https://esto.nasa.gov/files/trl_definitions.pdf. يوجد وصف تفصيلي للأجهزة والبرامج https://www.nasa.gov/pdf/458490main_TRL_Definitions.pdf
2. MRL - من خلال إطار عمل لتقييم الحدوى التجارية لخدمات الحوسبة السحابية في الاتحاد الأوروبي

قاموس المصطلحات

	المصطلح	الوصف
1	مفاعل الأغشية الحيوية MBBR	يشير مفاعل الأغشية الحيوية ذو السرير المتحرك (MBBR) إلى عملية معالجة مياه الصرف التي تستخدم حاملات بلاستيكية عائمة حرة داخل خزان تهوية لدعم نمو الأغشية الحيوية. وتعمل هذه الأغشية الحيوية على تحلل الملوثات العضوية، مما يعزز كفاءة المعالجة ويسهل إعادة استخدام المياه. وتعتبر أنظمة (MBBR) مدمجة وقادرة على التكيف مع أنواع مختلفة من مياه الصرف.
2	الأراضي الرطبة الهجينة Hybrid Constructed Wetlands	تدمج الأراضي الرطبة المبنية الهجينة أنواعًا متعددة من الأراضي الرطبة، مثل أنظمة التدفق الرأسي والأفقي، لتعزيز معالجة مياه الصرف. ويعمل هذا التكوين على إزالة المواد العضوية والمُغذيات ومسببات الأمراض بشكل فعّال، مما ينتج عنه مياه صرف مناسبة لإعادة الاستخدام في الري أو التصريف الآمن.
3	تقنيات التنظيف بالطحالب ATS	تستخدم تقنيات التنظيف بالطحالب (ATS) الطحالب التي تنمو بشكل طبيعي على الأسطح المنحدرة لمعالجة مياه الصرف. ومع تدفق المياه فوق الطحالب، تستوعب الطحالب المُغذيات والملوثات، مما يؤدي إلى تحسين جودة المياه بشكل فعّال وتمكين إعادة الاستخدام.
4	أنظمة الحمأة الحبيبية الهوائية AGS	تستخدم أنظمة الحمأة الحبيبية الهوائية (AGS) حبيبات ميكروبية كثيفة لمعالجة مياه الصرف، مما يوفر إزالة فاعلة للمواد العضوية والمُغذيات. ويعزز الهيكل المدمج لهذه الحبيبات خصائص الترسيب، مما يؤدي إلى تحسين أداء المعالجة وتقليل البصمة مقارنة بأنظمة الحمأة المنشطة التقليدية. .
5	أحواض الطحالب عالية المعدل HRAPs	تشير إلى أحواض ضحلة مختلطة تستخدم الطحالب الدقيقة والبكتيريا لمعالجة مياه الصرف. ومن خلال التمثيل الضوئي، تنتج الطحالب الدقيقة الأكسجين، الذي يدعم التحلل البكتيري للملوثات العضوية، مما يزيل المُغذيات والملوثات بشكل فعّال. وتعمل هذه العملية على تحسين جودة المياه، مما يجعلها مناسبة لإعادة الاستخدام.
6	مرشحات التربة واسعة النطاق Large-scale Soil Filters	تشير إلى أنظمة هندسية تستخدم قدرات الترشيح الطبيعية للتربة لمعالجة مياه الصرف. فعندما تتسرب مياه الصرف من خلال مصفوفة التربة، تزيل العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المُلوثات، مما يعزز جودة المياه لإعادة استخدامها. وتعتبر هذه الأنظمة قابلة للتطوير للتطبيقات البلدية والصناعية.
7	المعالجة النباتية Phytoremediation	تستخدم النباتات لإزالة أو تحلل أو تثبيت الملوثات في مياه الصرف. ومن خلال عمليات مثل الامتصاص والتراكم، تستطيع نباتات مثل زهرة الماء (Pontederia crassipes) ونبات البط (Lemna minor) استخلاص المعادن الثقيلة والملوثات العضوية بشكل فعّال، ما يعزز جودة المياه لإعادة استخدامها.
8	المعالجة باستخدام الإنزيمات-Enzyme based Treatment	تعتمد المعالجة باستخدام الإنزيمات على استخدام إنزيمات محددة لتحفيز تحلل الملوثات العضوية الموجودة في مياه الصرف. وتستهدف هذه المحفزات الحيوية الملوثات مثل الفينولات والأستروجين والمركبات الخطرة الأخرى، وتحولها إلى أشكال أقل سمية أو أكثر قابلية للتحلل البيولوجي، وبالتالي تعزز كفاءة عمليات معالجة مياه الصرف.
9	النانوسليلوز Nanocellulose	يشتمل النانوسليلوز على جسيمات نانوية سليولوزية مشتقة من الألياف النباتية، وتتميز بمساحة سطح عالية وكيمياء سطحية متعددة الاستخدامات. وفي معالجة مياه الصرف، تعمل المواد القائمة على النانوسليلوز كمواد ماصة ومرشحات غشائية، مما يؤدي إلى إزالة الملوثات مثل المعادن الثقيلة والأصباغ والمواد الملوثة العضوية بشكل فعّال، وبالتالي تعزيز جودة المياه لإعادة الاستخدام.
10	الكائنات الحية الدقيقة المعززة وراثيًا Genetically-enhanced Microorganisms	صُممت الكائنات الحية الدقيقة المحسنة وراثيًا لامتلاك قدرات متفوقة للعمل على تحلل الملوثات في مياه الصرف. ومن خلال التعديلات الجينية، يمكن لهذه الميكروبات تحطيم الملوثات المعقدة بشكل أكثر كفاءة، وتعزيز عمليات المعالجة وتسهيل إعادة الاستخدام الآمن للمياه المعالجة.

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

	المصطلح	الوصف
11	التحليل الكهربائي ED	يستخدم التحليل الكهربي مجالاً كهربائيًا لدفع الأيونات عبر أغشية التبادل الأيوني الانتقائي، مما يفصل بشكل فعّال الأملاح المذابة والشوائب عن مياه الصرف. وهذه العملية مفيدة بشكل خاص لتحلية المياه وإزالة أيونات محددة، مما يعزز جودة المياه لإعادة استخدامها.
12	أكسدة الماء فوق الحرجة SCWO	تتضمن أكسدة الماء فوق الحرجة (SCWO) معالجة مياه الصرف عند درجات حرارة وضغوط أعلى من النقطة الحرجة للماء (374 درجة مئوية و221 بارا)، إذ تصبح سائلاً أحادي الطور. وفي هذه الحالة، تتأكسد الملوثات العضوية بسرعة إلى منتجات ثانوية غير ضارة مثل ثاني أكسيد الكربون والماء، مما يتيح التنقية الفعّالة وإعادة استخدام المياه المحتملة.
13	مفاعلات الموجات فوق الصوتية Ultrasonic Reactors	تستخدم مفاعلات الموجات فوق الصوتية موجات صوتية عالية التردد لتوليد التجويف، مما يؤدي إلى تفكيك هياكل الحمأة وتعزيز تحلل الملوثات العضوية في مياه الصرف. وتساعد هذه العملية على تحسين إنتاج الغاز الحيوي وتقليل الحمأة المتبقية، وتسهيل معالجة مياه الصرف بشكل أكثر كفاءة وتعزيز إعادة استخدام المياه المعالجة.
14	الأكسدة المتقدمة الكهروكيميائية EAOP	تتضمن عمليات الأكسدة المتقدمة الكهروكيميائية توليد جذور الهيدروكسيل على سطح الأنود أثناء التحليل الكهربائي، والتي تعمل على أكسدة وتحلل الملوثات العضوية الثابتة في مياه الصرف، مما يؤدي إلى تعدينها وتحسين جودة المياه لإعادة استخدامها.
15	التحفيز الضوئي الشمسي Solar Photocatalysis	يستخدم التحفيز الضوئي الشمسي ضوء الشمس لتنشيط المحفزات، مما يولد أنواعًا تفاعلية تؤدي إلى تدهور الملوثات العضوية ومسببات الأمراض في مياه الصرف. وتعزز هذه الطريقة المستدامة كفاءة معالجة المياه، مما يتيح إعادة استخدام المياه النقية في مختلف الاستخدامات
16	الفقاعات النانوية Nanobubbles	تمثّل تهوية الفقاعات النانوية تقنيّة ناشئة تعمل على تطوير معالجة المياه وإدارتها من خلال إدخال فقاعات غازية متناهية الصغر في الماء لزيادة مستويات الأكسجين وتفتيت الملوثات.
17	التخثر الكهربائي Electrocoagulation	يشير التخثر الكهربي إلى عملية معالجة مياه الصرف التي تستخدم التيارات الكهربائية لإذابة أقطاب معدنية قابلة للذوبان، مما يؤدي إلى إطلاق أيونات تعمل على تحييد الملوثات وتجمعها. وتعمل هذه الطريقة على إزالة المواد الصلبة العالقة والمعادن الثقيلة والزيوت المستحلبة بشكل فعّال، مما يعزز جودة المياه المعالجة لإعادة استخدامها.
18	الأنظمة الكهروكيميائية الميكروبية MES	تستخدم الأنظمة الكهروكيميائية الميكروبية الكائنات الحية الدقيقة النشطة كهربائيًا لتسهيل التحويل بين الطاقة الكيميائية والكهربائية أثناء معالجة مياه الصرف. ويمكن لهذه الأنظمة أن تعمل على تحلل الملوثات العضوية، وتوليد الكهرباء، وإنتاج مواد كيميائية قيمة، مما يعزز كفاءة المعالجة واستعادة الموارد.
19	الإزالة الاختزالية لمواد البيرفلورو ألكيل والبولي فلورو ألكيل PFAS Reductive Defluorination	تتضمن تحلل مواد البيرفلورو ألكيل والبولي فلورو ألكيل (PFAS) عن طريق تقسيم الروابط القوية بين الكربون والفلور من خلال تفاعلات كيميائية اختزالية. وتهدف هذه العملية إلى تحلل ملوثات البيرفلورو ألكيل والبولي فلورو ألكيل (PFAS) الثابتة في مياه الصرف، مما يسهل إعادة استخدام المياه بشكل أكثر أمانًا ويقلل من التلوث البيئي.
20	معالجة المياه باستخدام قوس البلازما Plasma Arc Water Treatment	تستخدم تقنية معالجة المياه باستخدام قوس البلازما أقواس البلازما عالية الطاقة لتوليد أنواع تفاعلية تعمل على تحلل الملوثات العضوية ومسببات الأمراض في مياه الصرف. وتعمل عملية الأكسدة المتقدمة هذه على تحسين جودة المياه بشكل فعّال، مما يسهل إعادة استخدامها في مختلف الاستخدامات.

	المصطلح	الوصف
21	المفاعلات الحيوية الغشائية MBRs	تجمع المفاعلات الحيوية الغشائية بين عمليات المعالجة البيولوجية والترشيح الغشائي لإزالة الملوثات العضوية وغير العضوية بشكل فعّال من مياه الصرف. ويعزز هذا التكامل جودة النفايات السائلة، مما يجعلها مناسبة لمختلف تطبيقات إعادة الاستخدام، بما في ذلك الري والعمليات الصناعية.
22	الإفراغ الصفري للسوائل ZLD	يشير الإفراغ الصفري للسوائل (ZLD) إلى عمليات متقدمة لمعالجة مياه الصرف مصممة للتخلص من النفايات السائلة عن طريق استعادة وإعادة تدوير المياه، مع ترك البقايا الصلبة فقط. إذ تدمج الطرق الفيزيائية والكيميائية والحرارية لمعالجة مياه الصرف، مما يتيح إعادة استخدام المياه وتقليل التصريف البيئي.
23	التناضح الأمامي FO	تستخدم تقنية التناضح الأمامي غشاء شبه نافذ وتدرج الضغط الاسموزي لسحب المياه من مياه الصرف إلى محلول سحب مركّز، مما يؤدي إلى فصل الملوثات بشكل فعّال. وتوفر هذه العملية معالجة موفرة للطاقة وتسهل تطبيقات إعادة استخدام المياه.
24	المركبات البوليمرية Polymeric Composites	تشير المركبات البوليمرية إلى مواد مصممة تجمع بين البوليمرات مع مواد مالئة مثل أنابيب الكربون النانوية أو أكسيد الجرافين، مما يعزز القوة الميكانيكية وخصائص الامتصاص. وفي معالجة مياه الصرف، تُستخدم في الأغشية والمواد الماصة لإزالة الملوثات بشكل فعّال، بما في ذلك المعادن الثقيلة والملوثات العضوية. وبالتالي تحسين جودة المياه لإعادة الاستخدام.
25	التقطير الغشائي MD	يشير التقطير الغشائي إلى عملية فصل مدفوعة حراريًا إذ يسمح الغشاء الكاره للماء بمرور بخار الماء مع الاحتفاظ بالملوثات غير المتطايرة. وهذه التقنية فعّالة في معالجة مياه الصرف عالية الملوحة، مما يتيح إعادة استخدام المياه في مختلف التطبيقات.
26	المفاعلات الحيوية ذات الأغشية التناضحية OMBRs	تدمج المفاعلات الحيوية ذات الأغشية التناضحية أغشية التناضح الأمامي مع عمليات المعالجة البيولوجية، باستخدام الضغط التناضحي لسحب المياه من خلال غشاء شبه نافذ. ويركز هذا النهج بشكل فعّال على الملوثات ويعزز إزالة المواد العضوية والمُغذيات، مما يؤدي إلى إنتاج مياه صرف عالية الجودة مناسبة لإعادة الاستخدام.
27	أغشية الجرافين Graphene-based Membranes	تستخدم أغشية الجرافين الخصائص الفريدة للجرافين، مثل السُمك الذري والوظائف القابلة للضبط، لتعزيز عمليات تنقية المياه. وتوفر هذه الأغشية نفاذية وانتقائية عالية، كما تزيل الملوثات بشكل فعّال وتحسن كفاءة تحلية المياه في تطبيقات معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها.
28	التحلل الحراري Thermal Hydrolysis	يشير التحلل الحراري إلى عملية معالجة للحمأة تستخدم درجة حرارة عالية وضغطًا لتفتيت المواد العضوية قبل التخمر اللاهوائي. وتعزز هذه المعالجة المسبقة من إنتاج الغاز الحيوي، وتقليل حجم الحمأة، وإنتاج مواد صلبة حيوية خالية من مسببات الأمراض مناسبة للاستخدام الزراعي.
29	استعادة ستروفايت Struvite Recovery	تتضمن عملية استعادة ستروفايت ترسيب فوسفات الأمونيوم والمغنيسيوم من مجاري مياه الصرف، وخاصة من الحمأة المتخمرة لاهوائيًا. ولا تخفف هذه العملية من مشكلات التوسع في مرافق المعالجة فحسب، بل تنتج أيضًا سمادًا بطيء الإطلاق غنيًا بالفوسفور والنيتروجين، مما يعزز الزراعة المستدامة.
30	محطات معالجة تعمل بالطاقة الشمسية Solar-powered Treatment Plants	تستخدم محطات المعالجة التي تعمل بالطاقة الشمسية الأنظمة الكهروضوئية لتوفير الطاقة المتجددة لعمليات معالجة مياه الصرف. ومن خلال استغلال الطاقة الشمسية، تعمل هذه المرافق على تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وخفض تكاليف التشغيل، وتعزيز الاستدامة، وتمكين المعالجة الفعّالة وإعادة استخدام مياه الصرف بشكل آمن.

	المصطلح	الوصف
31	الكربنة الحرارية المائية HTC	تشير الكربنة الحرارية المائية إلى عملية كيميائية حرارية تقوم بتحويل الكتلة الحيوية الرطبة، مثل حمأة مياه الصرف، إلى فحم مائي عن طريق استخدام الحرارة والضغط في وسط مائي. وتقلل هذه العملية من حجم الحمأة وتنتج الفحم المائي، وهي مادة غنية بالكربون ذات تطبيقات محتملة كتعديل للتربة أو مصدر للطاقة.
32	خلايا الوقود الميكروبية (Microbial Fuel Cells (MFC	تستخدم خلايا الوقود الميكروبية (MFCs) الأنشطة الأيضية للكائنات الحية الدقيقة لأكسدة المواد العضوية في مياه الصرف، وتوليد الكهرباء مع إزالة الملوثات في وقت واحد. وتوفر هذه العملية نهجًا مستداماً لمعالجة مياه الصرف وتسهل إعادة استخدام المياه المعالجة.
33	تحويل الغاز الحيوي إلى هيدروجين Biogas-to-Hydrogen Recovery	تحلل عمليات التخمر اللاهوائي المواد العضوية لإنتاج الغاز الحيوي، الذي يتكون في المقام الأول من الميثان، وذلك في معالجة مياه الصرف. ويمكن استخدام هذا الغاز الحيوي مباشرة لتوليد الحرارة والكهرباء أو تحويله إلى الميثان الحيوي. بالإضافة إلى ذلك تتيح التقنيات المتقدمة تحويل الغاز الحيوي إلى هيدروجين، مما يوفر مصدرًا للطاقة النظيفة ويقلل من انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري.
34	وحدات معالجة مياه الصرف الصحي المتنقلة Mobile Wastewater Treatment Units	تعد هذه الوحدات أنظمة محمولة قائمة بذاتها مصممة لتوفير حلول فورية لمعالجة مياه الصرف أثناء حالات الطوارئ، مثل الكوارث الطبيعية أو فشل البنية التحتية. ويمكن استخدامها بسرعة لاستعادة خدمات الصرف، وضمان حماية البيئة وسلامة الصحة العامة. على سبيل المثال، تقدم شركة فيوليا أنظمة معالجة المياه المتنقلة التي يمكن توصيلها إلى المواقع حسب الحاجة، مما يوفر خدمات موثوقة وآمنة.
35	مرافق المعالجة المشتركة Co-Treatment Facilities	تقوم مرافق المعالجة المشتركة بمعالجة مجاري النفايات المتعددة - مثل مياه الصرف البلدية والنفايات السائلة الصناعية والصرف - داخل محطة معالجة واحدة. ويعمل هذا النهج المتكامل على تحسين استخدام الموارد، وتعزيز كفاءة المعالجة، وتقليل التكاليف التشغيلية باستخدام البنية التحتية الحالية. على سبيل المثال، يمكن أن تؤدي المعالجة المشتركة لمياه الرشح من مكبات النفايات مع مياه الصرف البلدية إلى إدارة الملوثات عالية القوة بشكل فعّال.
36	التوائم الرقمية لمحطات المعالجة Digital Twins of Treatment Plants	تشير التوائم الرقمية إلى نسخ متماثلة ديناميكية افتراضية لمحطات معالجة مياه الصرف المادية التي تدمج البيانات في الوقت الفعلي والمحاكاة المتقدمة. فهي تمكن المشغلين من متابعة العمليات والتنبؤ بسلوكيات النظام وتحسين الأداء وتعزيز كفاءة المعالجة وتسهيل إعادة الاستخدام الآمن للمياه المعالجة.
37	أنظمة معالجة المياه الرمادية المعيارية Modular Graywater Treatment Systems	تشير أنظمة معالجة المياه الرمادية المعيارية إلى وحدات مدمجة وقابلة للتطوير مصممة لمعالجة وإعادة تدوير المياه الرمادية من مصادر مثل مرشات الاستحمام (الدش) والأحواض والغسالات. وباستخدام العمليات الفيزيائية والبيولوجية والكيميائية، تعمل هذه الأنظمة على تنقية المياه لاستخدامات غير الشرب مثل تنظيف المراحيض والري، مما يعزز الحفاظ على المياه واستدامتها.
38	تعدين المجاري Sewer Mining	يتضمن تعدين المجاري استخراج مياه الصرف غير المعالجة مباشرة من المجاري البلدية ومعالجتها في الموقع وإنتاج مياه عالية الجودة للاستخدامات غير الصالحة للشرب مثل الري أو العمليات الصناعية. ويهدف هذا النهج اللامركزي إلى معالجة مشكلة ندرة المياه في المناطق الحضرية من خلال تمكين إعادة استخدام المياه محليًا وتقليل الطلب على مرافق المعالجة المركزية.
39	شبكات الاستشعار الذكية (Smart Sensor Networks)	تستخدم هذه المستشعرات تقنية إنترنت الأشياء (IoT) لمتابعة بيانات مياه الصرف بشكل مستمر مثل الرقم الهيدروجيني، والعكارة، والتركيب الكيميائي. فهي توفر بيانات في الوقت الفعلي، مما يتيح الكشف الفوري عن الحالات الشاذة، وتعزيز كفاءة المعالجة، وضمان الامتثال للمعايير البيئية.
40	وسائل تحسين المعالجة القائمة على الذكاء الاصطناعي AI-Enabled Treatment Optimization	تستفيد هذه التقنية من الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات في الوقت الفعلي والبيانات التاريخية من عمليات معالجة مياه الصرف، مما يتيح إجراء التحليلات التنبؤية والتحكم الديناميكي. ومن خلال تحسين معايير مثل الجرعات الكيميائية والتهوية، تعمل تقنيات الذكاء الاصطناعي على تعزيز كفاءة المعالجة، وتقليل التكاليف التشغيلية، وتحسين جودة النفايات السائلة.

	المصطلح	الوصف
41	الذكاء الاصطناعي المعزز بالاسترجاع RAG AI	تقنية الذكاء الاصطناعي المعزز بالاسترجاع (RAG AI) للذكاء الاصطناعي التي تجمع بين البحث واستجابات الذكاء الاصطناعي.
42	العدادات الذكية Smart Metering	استخدام أجهزة رقمية مزودة بأجهزة استشعار وتقنيات اتصال لقياس بيانات استخدام المياه وتسجيلها ونقلها تلقائيًا في الوقت الفعلي أو على فترات زمنية محددة.
43	سهولة التنفيذ	تشير إلى مستوى التطبيق العملي والجدوى في نشر تقنية ما ضمن نظام قائم. ويشمل ذلك عوامل مثل جاهزية البنية التحتية، ومستوى التعقيد التقني، وتكلفة التبني، والخبرة المطلوبة. ويمكن دمج التقنيات ذات المستوى المرتفع من السهولة في التنفيذ بأقل قدر من التعديلات، في حين أن التقنيات ذات المستوى المنخفض من السهولة في التنفيذ قد تتطلب تعديلات واسعة النطاق أو بنية تحتية جديدة أو تدريبًا متخصصًا.
44	الأثر المحتمل	يشير إلى الفعالية المتوقعة والمزايا طويلة الأجل للتقنية في معالجة التحديات الرئيسة المتعلقة بإدارة المياه. ويشمل ذلك قدرتها على تعزيز الكفاءة، وخفض التكاليف، وتحسين الاستدامة، وتحسين استغلال الموارد. تسهم التقنيات ذات الأثر المرتفع في مجال معالجة مياه الصرف في إعادة استخدام المياه، واستعادة الطاقة، وحماية البيئة، وأما في مجال إدارة التسرب الذكية فتسهم في تقليل الفاقد من المياه، وتحسين مرونة الشبكة، وتعزيز الكفاءة التشغيلية.
45	الأثر المترتب	يشير إلى النتيجة القابلة للقياس وتأثير تقنية ما على تحسين أنظمة المياه. ويشمل ذلك مساهمتها في الحد من الهدر وزيادة الكفاءة والحفاظ على الموارد وتعزيز موثوقية الخدمة. ففي مجال معالجة مياه الصرف، يقاس الأثر من خلال تحسين جودة المياه واستدامتها، بينما يتم تقييم الأثر في مجال إدارة التسرب الذكية عن طريق تقليل المياه غير المدرة للإيرادات، وتعزيز الكشف عن التسرب، وزيادة عمر البنية التحتية.

توجهات الابتكار في قطاع المياه_ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

شركاؤنا

توجهات الابتكار في قطاع المياه _ معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها

وزارة البيئة والمياه والزراعة
Ministry of Environment Water & Agriculture

الهيئة السعودية للمياه
Saudi Water Authority

شركة نقل وتقنيات المياه
WATER TRANSMISSION AND TECHNOLOGIES CO.

المؤسسة العامة لتحلية المياه المالحة
Saline Water Conversion Corporation

شركة المياه الوطنية
National Water Company

مؤسسة سقاية الأهلية
Sekaya Charitable Foundation
أفضل الصدقة

مركز مائي
maee center

الشركة السعودية لشراكات المياه
Saudi Water Partnership Company

المؤسسة العامة للري
Saudi Irrigation Organization
المملكة العربية السعودية

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

وزارة البيئة والمياه والزراعة
Ministry of Environment Water & Agriculture