وزارة البيئة والمياه والزراعة
Ministry of Environment Water & Agriculture

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

توجهات الابتكار في قطاع المياه

إدارة التسرب الذكية

بسم الله الرحمن الرحيم

كلمات افتتاحية

خادم الحرمين الشريفين
الملك سلمان بن عبدالعزيز آل سعود
حفظه الله

هدفي الأول أن تكون بلادنا نموذجاً ناجحاً ورائداً في العالم على كافة الأصعدة،
وسأعمل معكم على تحقيق ذلك

صاحب السمو الملكي
الأمير محمد بن سلمان بن عبدالعزيز آل سعود
حفظه الله

اعتمدنا تطلّعات طموحة لقطاع البحث والتطوير والابتكار، لتصبح المملكة من رواد الابتكار في العالم، وسيصل الإنفاق السنوي على القطاع إلى 2.5 في المائة من إجمالي الناتج المحلي في عام 2040 ليسهم القطاع في تنمية وتنويع الاقتصاد الوطني من خلال إضافة 60 مليار ريال سعودي إلى الناتج المحلي الإجمالي في عام 2040، واستحداث آلاف الوظائف النوعية عالية القيمة في العلوم والتقنية و الابتكار ، بمشيئة الله

كلمات افتتاحية

معالي 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).

معالي 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.

معالي م. عبدالله بن إبراهيم العبدالكريم

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 التقني لتوجيه منظومة الابتكار في قطاعات البيئة والمياه والزراعة نحو التركيز على التقنيات والابتكارات ذات الإمكانات القطاعية الكبرى.

أهداف سلسلة التقارير القطاعية:

1

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

2

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

3

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

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.

الفهرس

1

كلمات افتتاحية 4
نبذة عامة حول التقرير 8
الفهرس 11

2

الملخص التنفيذي 12
المقدمة 14
نطاق التقرير 16
المنهجية 22

3

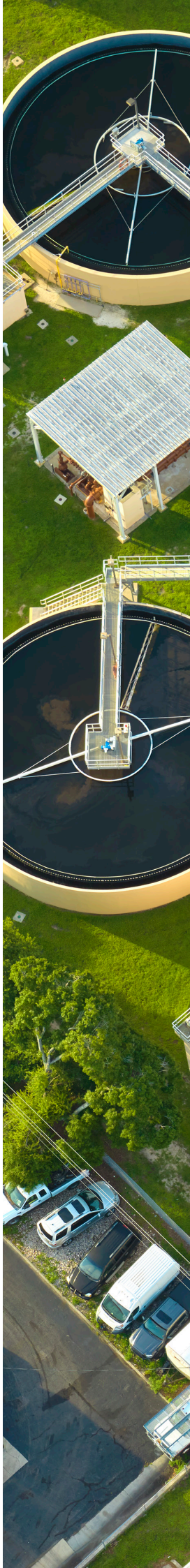
مجموعات التقنيات ذات الأولوية 24
3.1 إدارة التسرب الذكية 28
3.1.1 التقنيات البارزة 46
أ. التوائم الرقمية ذاتية التكيف (Self-adapting digital twins) 50
ب. الأنظمة العائمة (Free-swimming Systems) 60
ج. المواد ذاتية الإصلاح (Self-healing materials) 70
د. عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها (Self-reconfiguring network nodes) 80
هـ. أجهزة استشعار موجات الضغط (Pressure wave sensors) 90

4

رؤى القادة 100

5

الملحق 104
المنهجية المفصلة 108
بطاقة تقييم معايير الاختيار 110
قاموس المصطلحات 112
شركاؤنا 118



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 العلمي. يُستفتح التقرير بنبذة عامة عن التحديات التي يواجهها قطاع المياه مع التركيز على أهمية مجموعة واحدة من التقنيات ذات الأولوية وهي: إدارة التسرب الذكية.

تركّز هذه المجموعة من التقنيات ذات الأولوية بتطبيق حلول متقدمة، تشمل أجهزة استشعار إنترنت الأشياء، وخوارزميات الذكاء الاصطناعي، ونظم المراقبة الآنية، وذلك في مرحلتي **"النقل والتخزين"، و"التوزيع"** من سلسلة قيمة المياه (الاطلاع على صفحة 20 و21). وتهدف هذه التقنيات إلى تمكين الكشف المبكر عن التسربات وتقليل فاقد المياه، مما يساهم في ترشيد التكاليف، وتعزيز كفاءة البنية التحتية، وضمان استدامة الإمدادات المائية بشكل موثوق.

استنادًا إلى ما سبق، يعتمد التقرير على منهجية فعالة تتكون من ثلاث مراحل وتتوافق مع أفضل الممارسات العالمية، خاصةً إطار عمل منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD)، مما يضمن فاعلية نتائج التقرير وشمولها 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، إذ يُحدُّ التكرار من خلال جمع الابتكارات المتشابهة. وتصنف 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.

يستعرض التقرير التحولات في المجالات الاجتماعية والاقتصادية والسياسية لقطاع المياه بهدف ترتيب أولويات الاستثمارات في مجال البحث والتطوير والابتكار. وخضعت ست توجهات رئيسة للدراسة في إدارة التسرب الذكية لعام 2024*. إذ تتكون توجهاتها من:

- دراسة جدوى ترشيد استهلاك المياه
- مراقبة الاستهلاك اللحظي والعدادات الذكية
- عمليات الاستحواذ والشراكات الاستراتيجية
- استثمارات المرافق الرئيسة في تطوير البنية التحتية
- المخالفات التنظيمية والحوافز لإدارة التسرب
- نظم إدارة أرصدة المياه

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:

- **التوائم الرقمية ذاتية التكيف** في مجال التحليلات والمحاكاة
- **الأنظمة العائمة** في مجال التحكم والاستجابة
- **المواد ذاتية الإصلاح** في مجال المواد والطلاءات
- **عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها** في مجال تطوير الشبكة والبنية التحتية
- **أجهزة استشعار موجات الضغط** في مجال الاستشعار والكشف

*يشير عام "2024" إلى السنة التقويمية الكاملة.

*تعريف مستوى جاهزية التقنية TRL مذكور في قسم قاموس المصطلحات

في القسم التالي من التقرير يتناول قسم "التقنيات البارزة" رؤى تفصيلية حول كل تقنية مختارة في مجموعة التقنيات ذات الأولوية، ويركز 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، لتسريع 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 .

ومن ناحية أخرى، فقد رفعت السياسات التنظيمية من قيمة المخالفات المترتبة على إهدار المياه، كما قدمت الحوافز للحلول المتقدمة لإدارة التسرب الذكية. كما تشمل 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 عامٍ للتحديات الوطنية الرئيسة في قطاع المياه، يليه تحليلٌ للتطورات التقنية والفرص. وينقسم التقرير إلى أقسامٍ تستكشف التقنيات الناشئة وتُسلّط الضوء عليها،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 قسمٍ لدعم صانعي السياسات، وقادة الصناعة، وأصحاب المصلحة في اتخاذ قراراتٍ مستنيرة تتماشى مع أهداف رؤية 2030 في مجال استدامة المياه.

60
40
°C
80
20
100
0
120
60
40
°C
80
100
0
120

نطاق التقرير (3/1)

يركز هذا التقرير على " إدارة التسرب الذكية "، 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 الإدارة الذكية للتسربات 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.

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 إدارة التسرب الذكية التي تندرج ضمن مراحل النقل والتخزين والتوزيع.

1 إدارة التسرب الذكية

الحد من خسائر المياه في شبكات النقل والتوزيع من خلال أنظمة ذكية للرصد والإصلاح.

نطاق التقرير (3/2)

المواءمة مع الأهداف الوطنية

تماشيًا مع الأهداف الوطنية، يركز هذا التقرير على إدارة التسرب الذكية، 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:

إدارة التسرب الذكية
(النقل والتخزين والتوزيع)

- **الحاجة الملحة لتقليل خسائر المياه:** تواجه المملكة العربية السعودية **خسائر عالية في المياه غير المدرة للإيرادات**، مما يجعل رصد التسرب ومنعه **أولوية قصوى** لتحسين ترشيد استهلاك المياه وكفاءة الإمداد.

- **تطوير البنية التحتية:** مع وجود الاستثمارات في شبكات نقل المياه وتوزيعها، يمكن **للتقنيات الذكية** مثل التوائم الرقمية ذاتية التكيف، وأجهزة استشعار موجة الضغط، وعقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها أن تعزز **الكفاءة التشغيلية** بدرجة ملحوظة

ومن الضروري مواجهة التحديات في سعينا نحو إدارة مستدامة للمياه، وتلعب تقنية إدارة التسرب الذكية دورًا محوريًا في هذه الجهود، إذ تستهدف كل جوانب مختلفة ومتكاملة في دورة المياه. تستكشف الأقسام التالية كيفية إسهام هذه التقنيات في تعزيز كفاءة المياه وموثوقيتها.

معالجة التحديات الرئيسة في سلسلة قيمة المياه

تركز **إدارة التسرب الذكية** على الحد من **خسائر النقل والتوزيع**، وتعزيز **تغطية الشبكة**، وضمان **إمدادات مياه أكثر موثوقية ودون انقطاع.** إذ أنه وبالحد من إهدار المياه، **يزيد توافر المياه** ويقلّ الضغط على مصادر الإمداد.

أُدرجت خمس مجالات رئيسة

من التقنيات لإدارة التسرب الذكي للتعمق أكثر في هذه النسخة:

1. التحكم والاستجابة
2. الاستشعار والكشف
3. تحسين الشبكة والبنية التحتية
4. المواد والطلاءات
5. التحليلات والمحاكاة

نطاق التقرير (3/3)

سلسلة القيمة	الإمداد	النقل والتخزين	
مجموعات التقنيات ذات الأولوية	أنظمة التناضح العكسي المتقدمة	إدارة التسرب الذكية	
التحديات والفرص	تقليل تكاليف الطاقة الإنتاجية والتكاليف الرئيسية	تقليل تكاليف نقل المياه	
	تحقيق الأثر البيئي الأمثل لتحلية المياه	زيادة عدد أيام التخزين المتاحة	
	زيادة استخدام المياه من المصادر غير المتجددة		
	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

التوزيع	معالجة مياه الصرف الصحي وإعادة استخدامها	الطلب	
	معالجة مياه الصرف الصحي وإعادة استخدامها	الري المبتكر	الاستهلاك المبتكر للمياه في المنازل
تحسين تغطية شبكة المياه	تحسين شبكة مياه الصرف الصحي	تقليل مستويات استهلاك المياه في المناطق الحضرية [لتر للفرد في اليوم الواحد]	
تقليل خسائر توزيع المياه	تحسين معالجة مياه الصرف الصحي	تقليل مستويات استهلاك المياه الصناعية	
ضمان إمدادات مياه موثوقة وبدون انقطاع	زيادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة	الحد من استخدام مصادر المياه غير المتجددة (استهلاك المياه الزراعية)	

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 إشارات تحتوي على أكثر من 100 مليون نقطة بيانات (مثل براءات الاختراع وتقارير الصناعة والمنشورات العلمية، إلخ). وعلى مدار السنوات الخمس الماضية، حُصل على حوالي 9,600 إشارة متعلقة بإدارة التسرب الذكية. وباستخدام الذكاء الاصطناعي لتوليد البيانات المعززة بالاسترجاع (RAG) والتحقق من صحة الخبراء البشريين، جُمعت قائمة طويلة تضم 109 تقنيات مميزة مذكورة في إدارة التسرب الذكية لإجراء تحليل متعمق.

2. تقييم التقنية والتعريف بالمشهد التقني

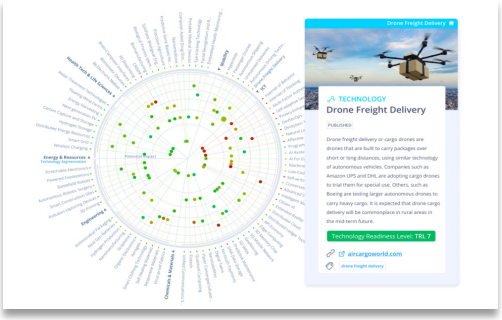
في الخطوة الثانية، أُنشئ مشهد تقني شامل من القائمة الطويلة للتقنيات المذكورة في المؤشرات. أولاً استبعاد كل التقنيات التي لا تعد ناشئة، كتلك التي دخلت بالفعل نطاق التبني السائد في الأسواق ذات الصلة، مثل:"عدادات المياه الذكية". كما قُلل التداخل المفاهيمي بين التقنيات وذلك بإدراج تقنيات متشابهة أو فريدة (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

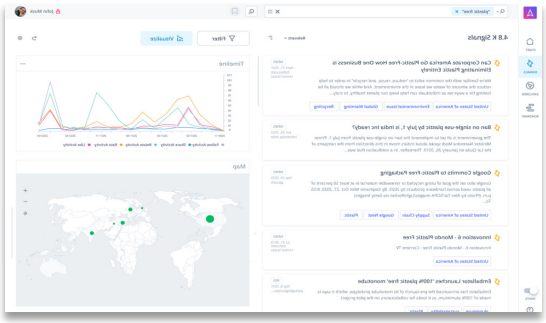
في الخطوة الأخيرة، دُرست مؤشرات كل تقنية بالتفصيل. وبناءً على ذلك وُضعت أوصاف تقنية تشمل معلومات مثل الجهات الفاعلة الرئيسة عالميًا، والحالة الراهنة للاعتماد، وآفاق التطوير، ودراسات الحالة ذات الصلة. وأُختيرت تقنية واحدة من كل مجال من مجالات التقنية المحددة لعرضها بصفتها عنصرًا محوريًا في هذا التقرير. 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.

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.



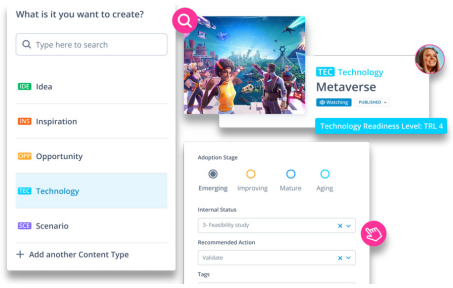
رادار التقنية

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.



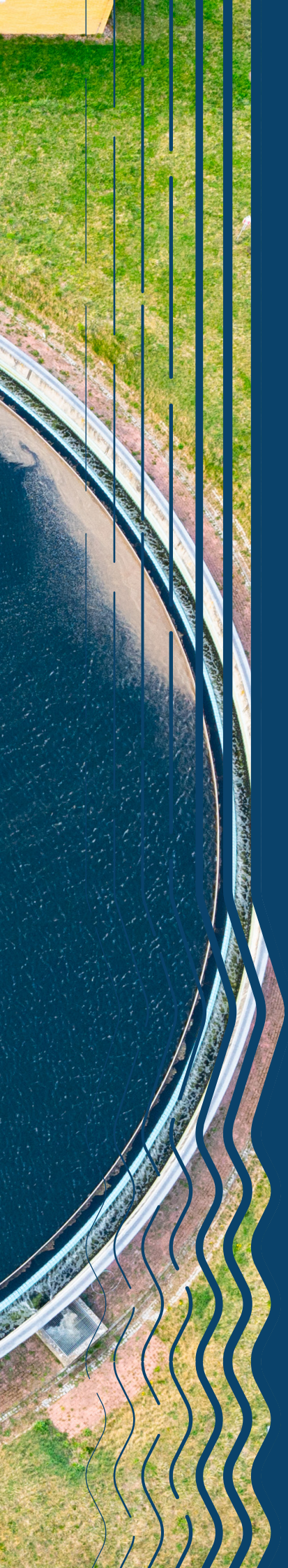
المراقبة الآلية

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.



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.



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

مجموعات التقنيات ذات الأولوية محل تركيز هذه النسخة

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.

التوزيع	معالجة مياه الصرف الصحي وإعادة استخدامها	الطلب	
	معالجة مياه الصرف الصحي وإعادة استخدامها	الري المبتكر	الاستهلاك المبتكر للمياه في المنازل
تحسين تغطية شبكة المياه	تحسين شبكة مياه الصرف الصحي	تقليل مستويات استهلاك المياه في المناطق الحضرية [لتر للفرد في اليوم الواحد]	
تقليل خسائر توزيع المياه	تحسين معالجة مياه الصرف الصحي	تقليل مستويات استهلاك المياه الصناعية	
ضمان إمدادات مياه موثوقة وبدون انقطاع	زيادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة	الحد من استخدام مصادر المياه غير المتجددة (استهلاك المياه الزراعية)	

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

محور التركيز ضمن مجموعات التقنيات ذات الأولوية

3.1 إدارة التسرب الذكية

تُعالج تقنية "إدارة التسرب الذكية" التحديات الماثلة في مرحلتي "النقل والتخزين" و"التوزيع" وذلك بالاستفادة من حلول مثل أجهزة الاستشعار المتقدمة والمراقبة في الوقت الفعلي وأنظمة التحكم الآلي، ويمكن لهذه المجموعة أن تقلل من خسائر المياه، وأن تقلل من التكاليف المرتبطة بها.

الإمداد	النقل والتخزين	التوزيع	معالجة مياه الصرف الصحي وإعادة استخدامها	الطلب
	تقليل تكاليف نقل المياه	تحسين تغطية شبكة المياه		
	زيادة عدد أيام التخزين المتاحة	تقليل خسائر توزيع المياه		
		ضمان إمدادات مياه موثوقة وبدون انقطاع		

إدارة التسرب الذكية

تشير إدارة التسرب الذكية إلى تكامل التقنيات المتقدمة في أنظمة المياه للكشف عن التسربات ومراقبتها ومنعها فوريًا، مثل: أجهزة إنترنت الأشياء (IoT) والذكاء الاصطناعي (AI). ويعزز هذا النهج الاستباقي الكفاءة ويقلل من الهدر ويحمي البنية التحتية. فبفضل أجهزة الاستشعار وخوارزميات الذكاء الاصطناعي، يمكن للأنظمة الذكية تحديد التسريبات فورًا مما يسمح بالتدخل الفوري قبل أن تتفاقم إلى مشاكل كبيرة، وبالتالي يمكن تقدير أضرار المياه وتكاليف الإصلاح المرتبطة بها.

يسهم تشغيل الأنظمة الذكية للكشف عن التسرب بتحقيق فوائد مالية كبيرة وذلك بتقليل النفقات المتعلقة بالإصلاحات الشاملة وخسائر المياه، مما يؤكد على أهمية التدابير الوقائية. وتساعد المراقبة المستمرة في الحفاظ على سلامة المباني والبنية التحتية، الأمر الذي سيمنع تراكم المياه والأضرار الهيكلية المحتملة مما يسهم في السلامة العامة وطول العمر الافتراضي. ويسهم تشغيل الأنظمة الذكية للكشف عن التسرب بتحقيق فوائد مالية كبيرة وذلك بتقليل نفقات

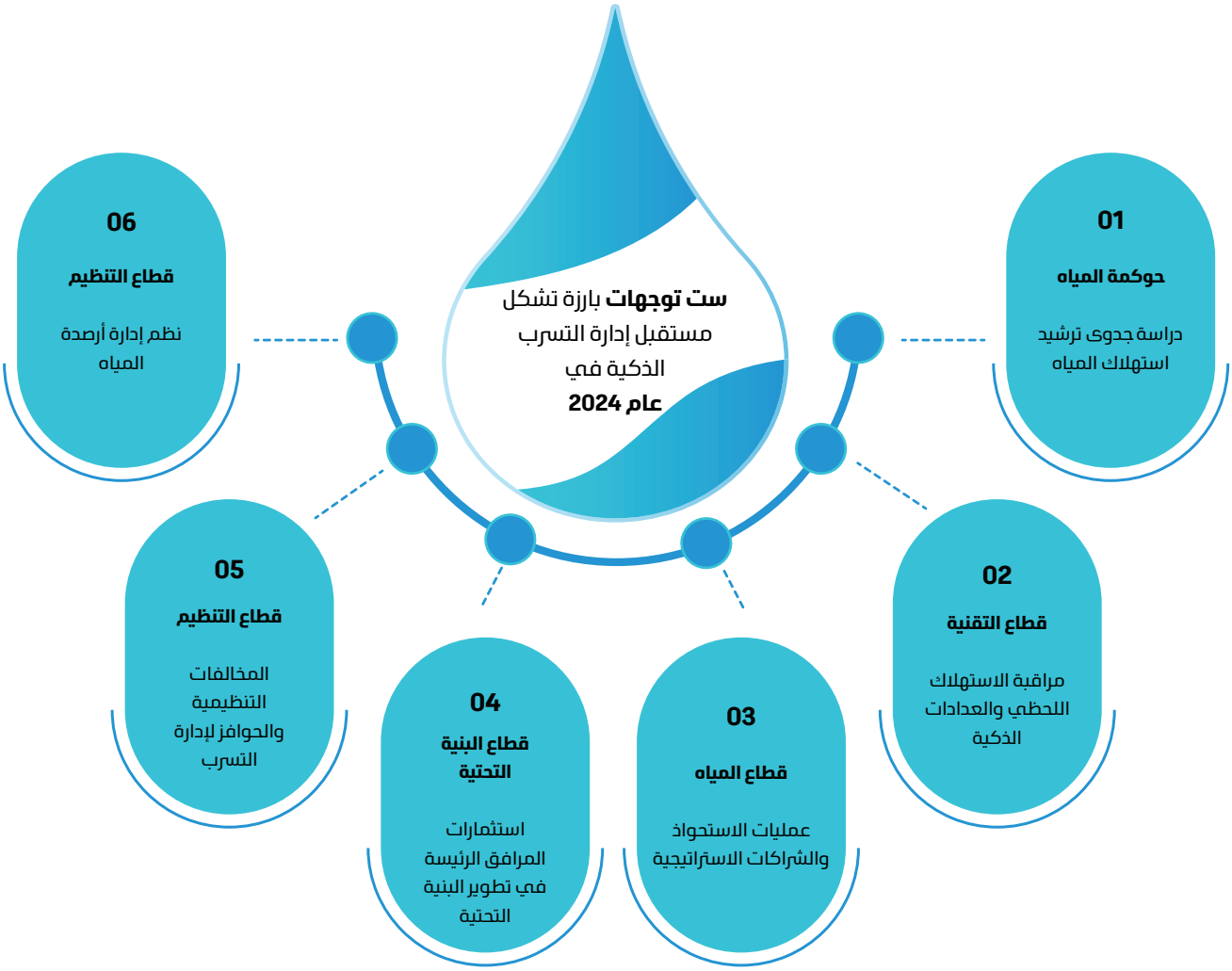
الإصلاحات الشاملة وخسائر المياه، إضافةً إلى ذلك، تعمل إدارة التسرب الذكية على ترشيد استهلاك المياه وذلك بالكشف عن التسريبات ومعالجتها على الفور، وبالتالي الحفاظ على هذا المورد الأساسي، ودعم جهود الاستدامة العالمية. ويتيح تكامل أجهزة إنترنت الأشياء إمكانية جمع البيانات المتعلقة بتدفق المياه والضغط وأنماط الاستهلاك وتحليلها، بما يتيح اتخاذ قرارات مستنيرة، وإجراء الصيانة التنبؤية، وتحسين استراتيجيات إدارة المياه.

إن دمج أنظمة إدارة التسرب الذكية نهج استشرافي لا يحمي الأصول ويقلل التكاليف فحسب بل يسهم أيضًا في الاستدامة البيئية وكفاءة الموارد.

التوجهات القطاعية (3/1)

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

في سياق إدارة التسرب الذكية، تميزت ست توجهات رئيسة في عام 2024، سواءً بتسريع التطورات الجارية أو طرح توجهات جديدة للتغيير. بناءً على المشهد التقني الموضح أعلاه، يُسلّط هذا القسم الضوء على أبرز التوجهات الملحوظة. تشمل التوجهات الست في إدارة التسرب الذكية قطاعات الحوكمة والصناعة والتقنية والتنظيم والبنية التحتية.



التوجهات القطاعية (3/2)

دراسة جدوى ترشيد استهلاك المياه

اكتساب شعبية بين المستهلكين والمرافق العامة

تشير البيانات المستقاة من عام 2023 إلى أن ترشيد استهلاك المياه قد اكتسب اهتمامًا كبيرًا بين ملاك المنازل والشركات والمرافق في جميع أنحاء العالم، وذلك بسبب تنامي التطلعات لتحقيق فوائد مالية ملموسة فمثلاً في قطاع الشركات يشير **تقرير المياه العالمي لعام 2023 الصادر عن مشروع الكشف عن الكربون (CDP) إلى أن حوالي 20% من الشركات الكبيرة التي شملها الاستطلاع في جميع أنحاء العالم والبالغ عددها 3,163** شركة أشارت إلى وجود مشكلات كبيرة في سلسلة إمداد المياه، مما يعكس زيادة تقدر بـ 16% عن عام 2021. وتهدد هذه المخاطر مجتمعة ما لا يقل عن **77 مليار دولار أمريكي** من قيمة الأعمال السنوية المعرضة للخطر. فضلًا عن وجود **زيادة بنسبة 23% في عدد الشركات التي تفصح عن البيانات المتعلقة بالمياه من خلال برنامج الكشف عن الكربون مقارنةً بالعام السابق، حيث قامت 118 علامة تجارية** عالمية بتقديم حوافز مالية لرؤساء المشتريات لمعالجة المشكلات المتعلقة بالمياه. كما تطرقت كل من منظمة AWWA* و WEF* إلى هذا الموضوع، حيث اعتبرتا تقنيات المياه الذكية أداة رئيسة نحو إمدادات مياه مستدامة ومنخفضة التكلفة ومرنة.

المؤشرات المحلية:

أطلق المركز الوطني لكفاءة وترشيد المياه حملة "عادة تحقق الاستدامة" لتعزيز سلوكيات ترشيد استهلاك المياه في المنازل. ،تهدف هذه المبادرة إلى غرس الممارسات اليومية التي تقلل من هدر المياه.

إطلاق المركز الوطني لكفاءة وترشيد المياه حملة "عادة تحقق الاستدامة"

ووفقًا لأحدث تقرير للهيئة العامة للإحصاء عن حسابات المياه، فقد ارتفع استهلاك المياه المعاد إستخدامها بنسبة 12% ليصل إلى 555 مليون متر مكعب، مما يشير إلى التقدم في مبادرات إعادة التدوير.

مراقبة الاستهلاك اللحظي والعدادات الذكية

تسريع التبني وتوسيع التواجد في السوق العالمية

تسارع اعتماد مراقبة الاستهلاك الفوري في عام 2024 من خلال العدادات الذكية، وتحول من أوائل المتبنين إلى الأغلبية المبكرة. **وكان هذا التوسع قويًا بشكل خاص في أمريكا الشمالية وأوروبا وآسيا والمحيط الهادئ، مع ظهور ألمانيا وإيطاليا وإسبانيا والمملكة المتحدة والصين واليابان والهند** كأسواق رئيسة. من المتوقع أن تصل قيمة السوق العالمية للعدادات الذكية التي بلغت قيمتها 3.8 مليار دولار في عام **2023**، إلى **7.36 مليار دولار** بحلول عام **2031**، مما يعكس **معدل نمو سنوي مركب بنسبة 9.9%**. كما أنه من المتوقع أن تؤدي زيادة الاعتماد على هذه التقنية إلى تعزيز الكشف المبكر عن التسرب وتحسين إدارة التسرب وتقليل المياه غير المدرة للإيرادات في المنازل الخاصة.

المؤشرات المحلية:

تعمل المملكة العربية السعودية على تطوير سوق عدادات المياه الذكية، مستفيدة من إنترنت الأشياء وتحليلات البيانات للمراقبة الفورية ورصد التسربات، وفعالية الاستهلاك. ومن المتوقع أن يشهد السوق نموًا قويًا في عام 2024، بفضل رؤية 2030 وتوجهات التحضر.

نمو قوي متوقع في سوق عدادات المياه الذكية

*جمعية الأشغال المائية الأمريكية (AWWA) - منظمة غير ربحية مكرسة لتحسين جودة المياه وإمداداتها من خلال العلم والسياسة والتعليم.

*المنتدى الاقتصادي العالمي (WEF) - منظمة دولية للتعاون بين القطاعين العام والخاص، تشتهر بتعاونها مع القادة السياسيين ورجال الأعمال والأكاديميين وغيرهم من القادة لهدف تشكيل جداول الأعمال العالمية والإقليمية والصناعية

عمليات الاستحواذ والشراكات الاستراتيجية

ازدياد دمج تقنية الكشف الذكي عن التسرب في شبكات المياه

في عام 2024، شهد قطاع المياه العالمي عددًا من عمليات الاستحواذ والشراكات الاستراتيجية الكبرى بين الشركات المبتكرة في مجال إدارة التسرب الذكية، بما في ذلك Diehl Metering التي استحوذت على شركة PREVENTIO GmbH (شركة ألمانية) , استحواذ شركة Bradford White على شركة FloLogic (شركة أمريكية مقرها في أمبلر، بنسلفانيا)، استحواذ شركة ABB على شركة Real Tech (شركة متعددة الجنسيات مقرها زيوريخ، سويسرا)، **واستحواذ شركة** Xylem **على أغلبية حصص شركة** Idrica (Xylem شركة أمريكية رائدة في مجال توفير تقنيات المياه، ويقع مقرها الرئيس في واشنطن العاصمة بالولايات المتحدة الأمريكية)

المؤشرات المحلية:

تعاونت شركة المياه الوطنية مع مركز الابتكار السعودي لتقنيات المياه لإطلاق حاضنة لتطوير الابتكارات في قطاع المياه. وتدعم هذه المبادرة تسريع الأعمال والبحوث والتقنيات الجديدة، بما يتماشى مع الأهداف لشركة المياه الوطنية.

اتفاق شركة المياه الوطنية و مركز الابتكار السعودي لتقنيات المياه لإطلاق الحاضنة

التوجهات القطاعية (3/3)

استثمارات المرافق الرئيسة في تطوير البنية التحتية

تسهيل دمج إدارة التسرب الذكية

في عام 2024، أُطلقت استثمارات كبيرة في تطوير البنية التحتية للمياه على مستوى العالم لمعالجة الأنظمة المتقادمة وتعزيز كفاءتها، ومن الأمثلة على ذلك تخصيص الحكومة الأمريكية مبلغ 11.5 مليار دولار أمريكي لتطوير البنية التحتية للمياه في السنة المالية 2024، وخطة الاستثمار بقيمة 100 مليار جنيه إسترليني 2025-2030 في شركات المياه في المملكة المتحدة، وخطة الاستثمار بقيمة4 مليارات دولار أمريكي لمؤسسة المياه والصرف في كراتشي (KWSC) المدعومة من بنك الاستثمار الأوروبي والبنك الدولي.

المؤشرات المحلية:

تستثمر شركة المياه الوطنية السعودية 11.6 مليار ريال سعودي (3.2 مليار دولار أمريكي) في مشاريع المياه والصرف في عسير والقصيم والباحة، وتتماشى هذه الجهود مع رؤية 2030 التي تهدف إلى تحديث توزيع المياه ومعالجة مياه الصرف من أجل مستقبل أكثر استدامة.

شركة المياه الوطنية تعلن عن مشاريع بقيمة 11.6 مليار ريال سعودي

المخالفات التنظيمية والحوافز لإدارة التسرب

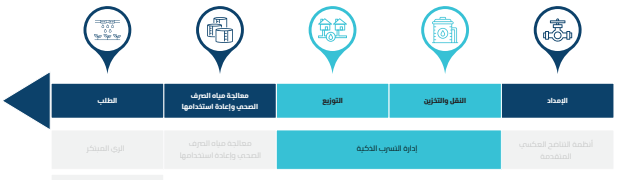
التأكيد على التركيز التنظيمي المتزايد لترشيد استهلاك المياه

شددت الهيئات التنظيمية في عام 2024 المخالفات واستحدثت حوافز لتعزيز إدارة التسرب في مرافق المياه، فقامت هيئة تنظيم خدمات المياه (Ofwat) في المملكة المتحدة بإلزام شركات المياه في إنجلترا وويلز بإعادة 158 مليون جنيه إسترليني للعملاء بعد فشلها في تحقيق مستهدفات الحد من تسربات مياه الصرف. وفي الولايات المتحدة عدلت وكالة حماية البيئة سياساتها الخاصة بالمخالفات المدنية لمراعاة هذه المسألة إذ زادت الغرامات على الانتهاكات، كتلك المتعلقة بإدارة المياه. وبصفة عامة ينبغي أن تشجع مثل هذه السياسات المنشآت على تبني تقنيات للوقاية والاستجابة السريعة بهدف تقليل خسائر المياه.

المؤشرات المحلية:

توفر استراتيجية المياه الوطنية التي وضعتها وزارة البيئة والمياه والزراعة إطار عمل موحد لقطاع المياه في المملكة، إذ تدمج السياسات واللوائح والممارسات على المستوى الوطني لمعالجة التحديات الرئيسة وإعادة هيكلة القطاع.

استراتيجية المياه الوطنية تشدّد على الحد من هدر المياه



نظم إدارة أرصدة المياه

إنشاء آلية مبنية على السوق لتعزيز المحافظة على المياه

خلال عام 2024م، حققت نظم إدارة أرصدة المياه انتشارًا واسعًا، حيث أنها تتبع آلية سياسة معتمدة على السوق تهدف إلى تعزيز المحافظة على المياه. تعمل هذه النظم على تحفيز أصحاب المرافق والمستهلكين على الاستثمار في التقنيات التي تعمل على ترشيد استهلاك المياه، بما في ذلك الكشف الذكي عن التسرب، ونظم الري الفعالة. على سبيل المثال، أفاد برنامج المياه الذكية (WaterSMART) التابع لمكتب الاستصلاح الأمريكي، بدعمه لأكثر من (2,300) مشروعًا، وذلك بتمويل قدره (3.23) مليار دولار أمريكي. كما شرعت العديد من شركات التأمين في القطاع الخاص بتقديم خصومات على تركيب أجهزة ذكية لمراقبة استهلاك المياه للمؤمن لهم.

المؤشرات المحلية:

تعمل شركة المياه الوطنية على طرح مبادرة تتماشى مع مبادىء نظم إدارة أرصدة المياه. تم تصميم البرنامج القائم على الحوافز لمكافأة المواطنين على ترشيد استهلاكهم للمياه، حيث يتم منح المشتركين، الذي يحققون مستويات منخفضة من استهلاك المياه، نقاطًا لاستبدالها مقابل مزايا مختلفة، بما في ذلك خصومات على فواتير المياه، وعروض مقدمة من العلامات التجارية الشريكة.

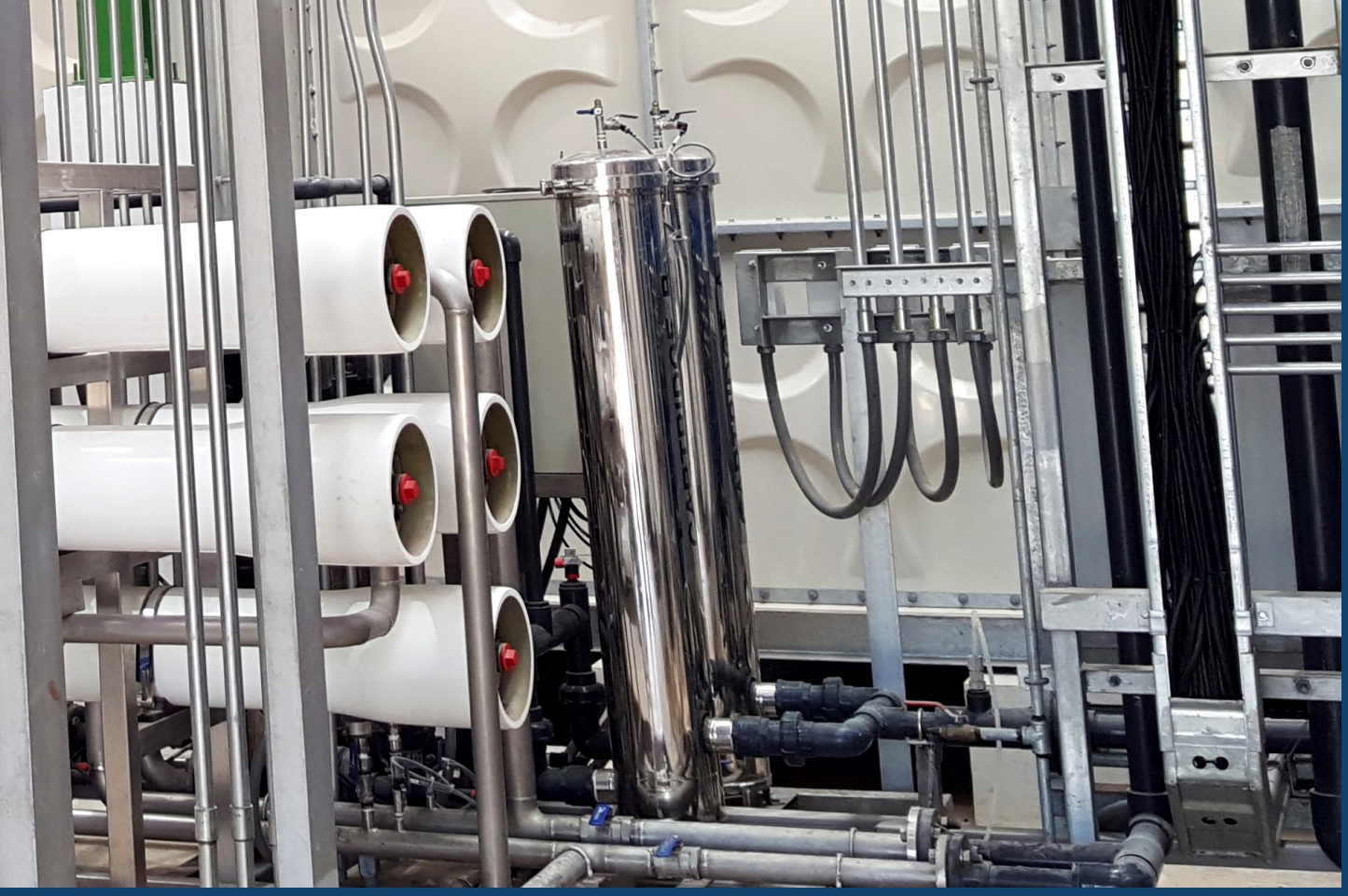
تصميم برنامج تحفيزي للمواطنين لترشيد استهلاكهم للمياه

من التوجهات القطاعية إلى إحراز التقدم التقني

يتأثر المشهد المتغير لإدارة المياه بالتوجهات القطاعية السائدة، بما في ذلك زيادة التركيز على ترشيد استهلاك المياه، وتزايد تقنيات المراقبة الفورية، والشراكات الاستراتيجية، والتحولات التنظيمية. وتشير هذه التوجهات إلى الطلب المتزايد على الحلول الذكية على سبيل المثال، الأنظمة العائمة وأجهزة استشعار موجات الضغط. والتي يمكن أن تعزز الكفاءة وتقلل من هدر المياه وتدعم جهود الاستدامة.

وفيما تتكيف المنشآت والحكومات والقطاعات مع هذه التغيرات، تؤدي التقنية دورًا محوريًا في تمكين هذا التحول. ولا يُعد دمج تقنيات الإدارة الذكية للمياه مجرد استجابة لهذه التحولات القطاعية، بل هو دافع أساسي لإحراز التقدم. تعمل الابتكارات المتقدمة، بما في ذلك تقنيات الكشف عن التسرب القائمة على الذكاء الاصطناعي، والعدادات الذكية القائمة على إنترنت الأشياء، والتحليلات التنبؤية، على تسريع عملية التحول نحو بنية تحتية مائية أكثر مرونة وكفاءة.

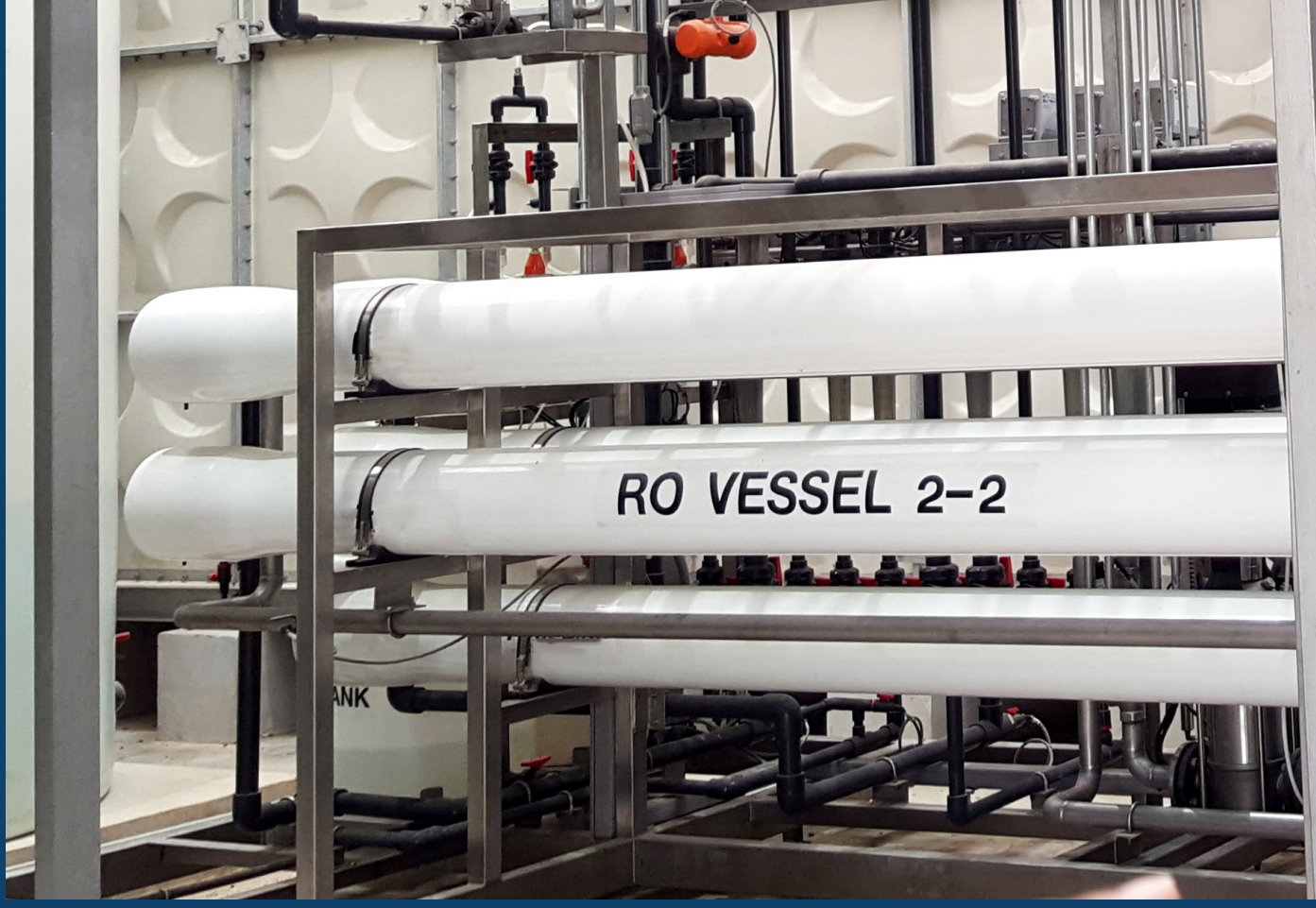
لتلبية الأهداف الطموحة لاستراتيجيات المياه الوطنية والعالمية، يتعين على أصحاب المصلحة الاستفادة من مجموعة من التقنيات المتطورة المصممة لتعزيز منع التسرب واكتشافه والتخفيف من آثاره. يستعرض القسم التالي هذه التقنيات المتقدمة، ويحدد تأثيرها وجدواها في التصدي للتحديات التي تفرضها إدارة المياه اليوم. ويستكشف القسم التالي تقنيات محددة تركز على إدارة التسرب الذكية.



تقنيات الإدارة الذكية للمياه التي تحقق الكفاءة والاستدامة

فلا بد من الجمع بين مختلف التقنيات الجديدة بأسلوب ذكي وذلك لتحقيق الأهداف المرسومة للاستراتيجية الوطنية للمياه كالحد من المياه المهدرة بنسبة **15%** وتحقيق استمرارية إمدادات المياه بنسبة **100%**، وفي إطار هذه الجهود يستفيد أصحاب المصلحة في مبادرة البحث والتطوير والابتكار من الفهم الشامل للمشهد التقني مما يضمن لهم الاستفادة الفاعلة من الابتكارات الناشئة، وتماشيًا مع هذه الرؤية يحدد بيان البحث والتطوير والابتكار ضمن المهمة الوطنية للمياه والذي أعلن عنه خلال أسبوع الابتكار في الاستدامة* في نهاية عام 2024. وتضع أهدافًا أكثر تحولاً، حيث تهدف إلى "تقليل سحب المياه غير المتجددة وخفض تكلفة إنتاج المياه بحلول عام 2035" مما يعزز التزام المملكة بإدارة المياه المستدامة والفاعلة، ويقدم المخطط البياني للتقنيات في الشرائح التالية **نظرة عامة شاملة للتقنيات الرئيسة** التي يمكن أن تعالج تحديات إدارة التسرب الذكية، وتهدف **لتوسيع نطاق الوعي، وإثراء تخطيط البحث والتطوير والابتكار وتشجيع التعمق** في مجالات تقنية مختارة.

أسبوع الابتكار في الاستدامة* SIW



يضم المخطط البياني **32 تقنية مبتكرة ذات إمكانية عالية ضمن مجموعة إدارة التسرب الذكية**، حيث تمتد من المكاسب قصيرة المدى إلى الرؤية طويلة المدى، وتتراوح بين البحوث الاستكشافية والحلول الجاهزة. كما تحدد الأساليب الواعدة **لمنع التسرب واكتشافه والحد منه**. 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 الفاعلة والمجدية للإدارة المستدامة للمياه.

مجالات تقنيات إدارة التسرب الذكية

التحليلات والمحاكاة (Analytics & Simulation)	المواد والطلاءات (Materials & Coatings)	
المنصات السحابية Cloud-Based Platforms (TRL 8-9)	المواد المقاومة للتآكل Corrosion-resistant Materials (TRL 8-9)	
نظام المعلومات الجغرافية والذكاء الاصطناعي الجيومكاني GIS & Geospatial AI (TRL 8-9)	الحواجز الهيدروجيل Hydrogel Barriers (TRL 6-7)	
الحوسبة الطرفية والذكاء الاصطناعي الطرفي Edge Computing & Edge AI (TRL 6-7)	المواد والطلاءات الاستشعارية Sensorial Materials & Coatings (TRL 6-7)	
النمذجة الهيدرولوجية الهجينة (Hybrid Hydrological Modeling) (TRL 6-7)	المواد ذاتية الإصلاح (Self-healing materials) (TRL 4-5)	
التوائم الرقمية ذاتية التكيف (Self-adapting digital twins) (TRL 6-7)	طبقات الجرافين Graphene-Based Layers (TRL 4-5)	
الذكاء الاصطناعي السلوكي الآني Real-Time Behavioral AI (TRL 1-3)	سدادات المعادن السائلة Liquid Metal Seals (TRL 1-3)	

توجد تعاريف التقنيات أعلاه في قسم قاموس المصطلحات

سدادات المعادن السائلة
Liquid Metal Seals
(TRL 1-3)

- متابعة حالة الأصول
  Asset Condition Monitoring
  (TRL 8-9)
- المضخات والصمامات الذكية
  Smart Pumps & Valves
  (TRL 8-9)
- أنظمة التحكم بالضغط الديناميكي القائمة على إنترنت الأشياء
  IoT-based Dynamic Pressure Control (TRL 6-7)
- الصمامات المتقدمة العازلة للتسرب
  (Advanced Leak-Isolating Valves) (TRL 4-5)
- عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها
  (Self-reconfiguring network nodes) TRL (1-3)

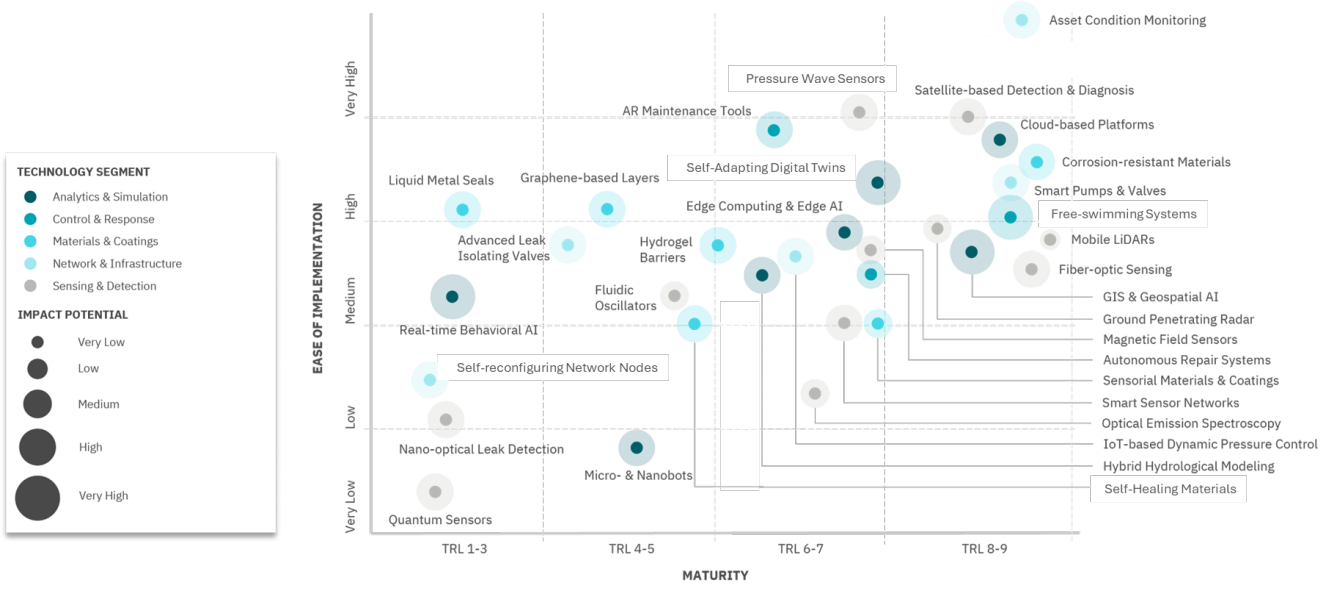
الاستشعار والكشف
(Sensing & Detecting)

- أجهزة الاستشعار بالألياف البصرية
  Fiber Optic Sensing
  (TRL 8-9)
- رادار الاختراق الأرضي
  (GPR)Ground Penetrating Radar
  (TRL 8-9)
- أنظمة الليدار المتحركة
  (Mobile LiDARs)
  (TRL 8-9)
- أنظمة الكشف والتشخيص القائمة على الأقمار الصناعية
  Satellite-based Detection & Diagnosis
  (TRL 8-9)
- أجهزة استشعار المجال المغناطيسي
  Magnetic Field Sensors
  (TRL 6-7)
- التحليل الطيفي للانبعاثات الضوئية
  Optical Emission Spectroscopy
  (TRL 6-7)
- أجهزة استشعار موجة الضغط
  (Pressure wave sensors)
  (TRL 6-7)
- شبكات الاستشعار الذكية
  Smart Sensor Networks
  (TRL 6-7)
- المذبذبات الحدودية السائلة
  (Fluidic Oscillators)
  (TRL 4-5)
- أنظمة كشف التسرّب النانو بصرية
  Nano-optical Leak Detection
  (TRL 1-3)
- أجهزة الاستشعار الكمية
  Quantum Sensors
  (TRL 1-3)

التحكم والاستجابة
(Control & Response)

- الأنظمة العائمة
  Free-swimming Systems
  (TRL 8-9)
- أدوات الواقع المعزز لصيانة خطوط الأنابيب
  AR Tools for Pipeline Maintenance
  (TRL 6-7)
- الأنظمة ذاتية الإصلاح
  Autonomous Repair Systems
  (TRL 6-7)
- الروبوتات الدقيقة والنانوية
  Micro - and Nanobots
  (TRL 4-5)

مخطط التقنيات
(سهولة التنفيذ مقارنةً بمستوى النضج)



بدأ هذا القسم بتحديد ست توجهات قطاعية رئيسة تؤثر على الابتكار في قطاع المياه لعام 2024 ودوره في تحويل إدارة المياه. وسلط الضوء على التحديات في إدارة التسرب الذكية مع التأكيد على الحاجة إلى التقنيات المتقدمة. ومع الحوافز التنظيمية وتطويرات البنية التحتية التي تسرّع من عملية التبني، يبحث هذا القسم في التقنيات الناشئة لإدارة التسرب الذكية ويقيّم سهولة تنفيذها مقارنةً بمستوى نضجها.

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 قاموس المصطلحات

يوضّح المخطط البياني تقنيات إدارة التسرب الذكية وهي جزء أساسي من مرحلة النقل والتوزيع في سلسلة القيمة المائية المذكورة في قسم التحديات الماثلة في قطاع المياه.

وتصنف هذه التقنيات ضمن خمس مجالات:

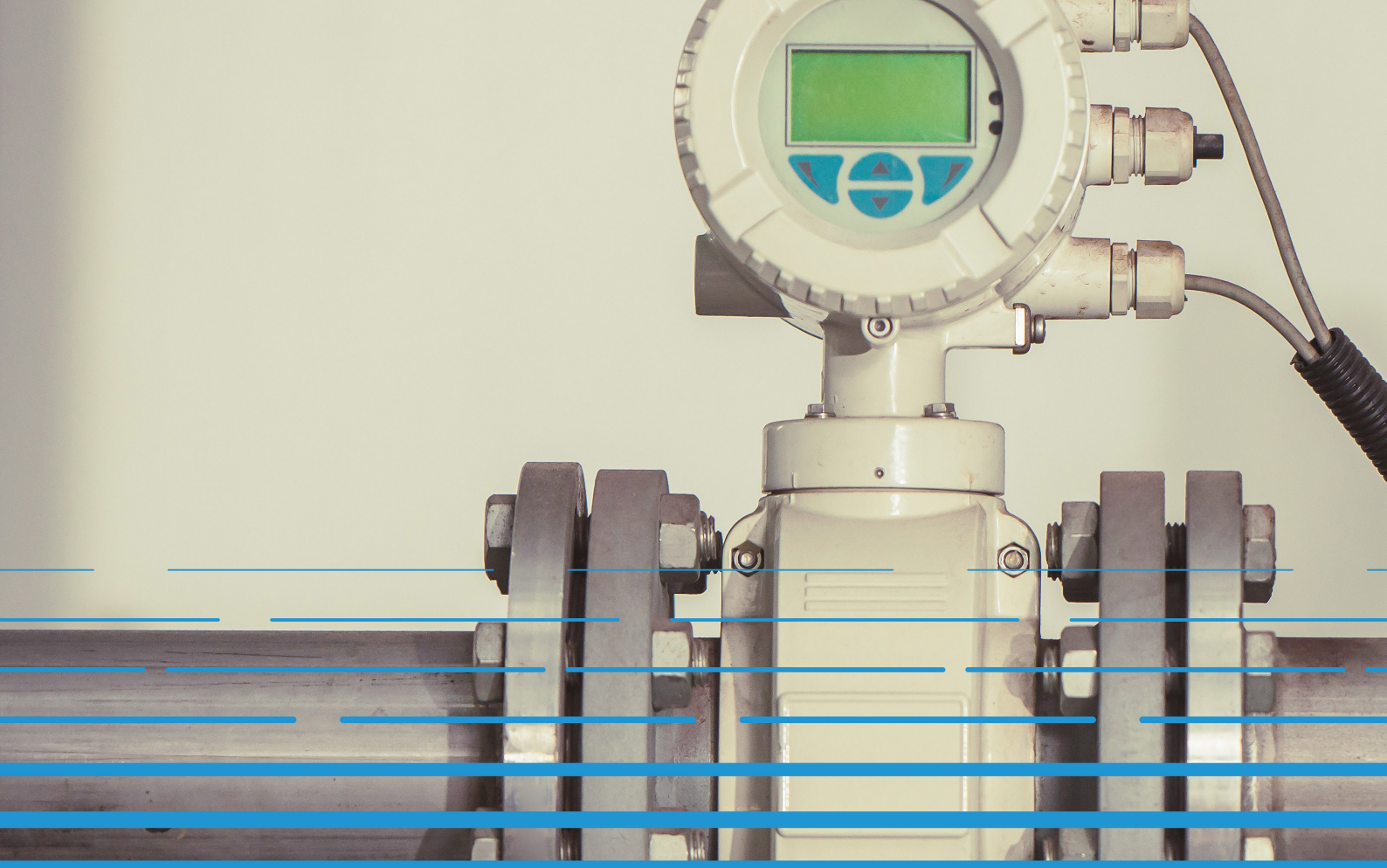
- التحليلات والمحاكاة
- التحكم والاستجابة
- المواد والطلاءات
- الشبكة والبنية التحتية
- الاستشعار والكشف

تقيّم 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

إدارة التسرب الذكية

3.1.1 التقنيات البارزة



التقنيات الواعدة لإدارة التسرب الذكية

اختيرت التقنيات الواردة في هذه المجموعة بناءً على ثلاثة معايير رئيسة لضمان الملاءمة والتأثير والتنوع في إدارة التسرب الذكية:

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 التسرب الذكية 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 الملحق

توافق تقنيات إدارة التسرب الذكية السائدة مع رؤية 2030

تتوافق تقنيات إدارة التسرب الذكية المختارة مع المعايير الأساسية للابتكار، من حيث الأهمية والأثر والتنوع الوظيفي، وتسهم هذه التقنيات في تمكين التحليلات التنبؤية وتطوير بنية تحتية قابلة للتكيّف، لمعالجة فاقد المياه وتحسين قدرة الأنظمة على الكشف المبكر عن التسربات. وقد تم اختيارها بناءً على توازن مدروس بين التقنيات ذات الجاهزية العالية للتطبيق الفوري، والتقنيات الناشئة التي تحمل إمكانات مستقبلية واعدة لتحقيق أثر مستدام يتماشى مع مستهدفات رؤية المملكة 2030.

مجالات التقنية	التقنية	النضج	المواءمة مع رؤية 2030
التحليلات والمحاكاة	التوائم الرقمية ذاتية التكيف	TRL 6-7	تمكين المراقبة الفورية والتحليلات التنبؤية، وتحسين كفاءة إدارة التسرب الذكية، والتوافق مع أهداف الاستدامة والبنية التحتية الذكية لرؤية 2030.
التحكم والاستجابة	الأنظمة العائمة	TRL 8-9	الاستفادة من الكائنات الدقيقة المعدلة وراثيًا أو الوحدات الروبوتية لتعزيز إدارة التسرب الذكية، وتحسين الكفاءة والاستدامة بما يتماشى مع التطورات البيئية والتقنية لرؤية 2030.
المواد والطلاءات	المواد ذاتية الإصلاح	TRL 4-5	تعزيز متانة البنية التحتية من خلال إصلاح التشققات في أنظمة إدارة التسرب الذكية ذاتيًا، مما يقلل من تكاليف الصيانة ويدعم التزام رؤية 2030 بالإدارة المستدامة والمرنة للمياه.
تحسين الشبكة والبنية التحتية	عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها	TRL 1-3	التكيف بشكل ديناميكي مع متطلبات إدارة التسرب الذكية المتغيرة، وتعزيز كفاءة النظام ومرونته بما يتماشى مع أهداف البنية التحتية الذكية والاستدامة لرؤية 2030.
الاستشعار والكشف	مستشعرات موجة الضغط	TRL 6-7	تمكين الكشف الفوري عن التسرب وتحسين التدفق في إدارة التسرب الذكية، وتحسين الكفاءة وجهود الحفاظ على المياه بما يدعم أهداف الإدارة الذكية للمياه والاستدامة في رؤية 2030.

التقنيات البارزة

أ. التوائم الرقمية ذاتية التكيف
Self-adapting digital twins

تعمل منصات التوائم الرقمية لشبكات المياه على إنشاء نسخ افتراضية آنية ومتماثلة مما يسمح للمرافق بمراقبة الأداء ومحاكاته وتحسينه مع التنبؤ بالتسربات والأعطال وأوجه القصور.

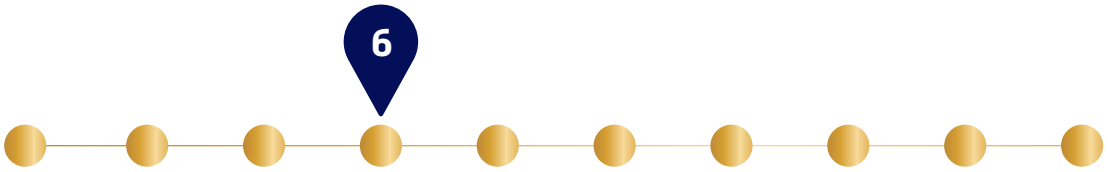
التوائم الرقمية ذاتية التكيف

تعمل منصات التوائم الرقمية لشبكات المياه على إنشاء نسخ افتراضية آنية ومتماثلة لأنظمة توزيع المياه. إن دمج هذه التقنيات مع غيرها مثل الذكاء الاصطناعي والحوسبة الطرفية ونظام المعلومات الجغرافية وصور الأقمار الصناعية سيمكّن من مراقبة أداء الشبكة ومحاكاته وتحسينه. كما تعزز هذه المنصات عملية صنع القرار وذلك بالتنبؤ بالتسربات والأعطال وأوجه القصور قبل حدوثها. وتتطور التوائم الرقمية ذاتية التكيف باستمرار باستخدام البيانات الحية لمحاكاة الأداء والتنبؤ بالأعطال وتحسين العمليات مما يوفر رؤى فورية ويتيح الإدارة الاستباقية لشبكات المياه. كما تميزت التطورات العالمية في عام 2024 بإطلاق مشاريع طموحة للغاية تهدف إلى تعزيز المراقبة الآنية لأنظمة المياه في مدن مثل: هيوستن وفوجو (التي حصلت على جائزة ابتكار المشاريع من الرابطة الدولية للمياه)، والمجتمعات على امتداد نهر التمز. من المقرر أن يغطي مشروع نافر العديد من المدن في المملكة العربية السعودية، إذ سيتم تطوير منصات التوائم الرقمية. باستخدام هذه التقنية المتطورة سيتم تطبيقها من خلال العديد من الخدمات المتكاملة مثل محاكاة الفيضانات. يتناسب هذا المشروع مع استراتيجية المملكة العربية السعودية الأوسع نطاقاً للنهوض بالبنية التحتية للمدن الذكية وتحسين الإدارة الحضرية.

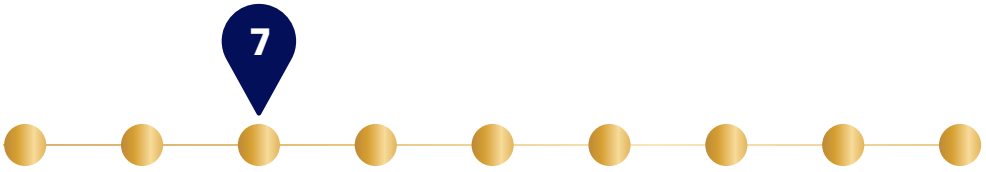
التقنيّة ونضج السوق

تقدمت تقنية التوائم الرقمية في إدارة المياه إلى المرحلة التي تُعرض فيها نماذج أولية للنظام في البيئات التشغيلية (TRL7). ونفذت العديد من المنشآت أنظمة التوائم الرقمية لمراقبة شبكات توزيع المياه الخاصة بها وإدارتها. كما قُيم مستوى جاهزية السوق لأنظمة التوائم الرقمية في توزيع المياه بدرجة (MRL6)، مما يشير إلى أن التقنية جاهزة للسوق، حيث ينفذها المستخدمون المبكرون بشكل تجريبي ويعتمدونها بشكل أولي. ولهذا من المتوقع أن تنتشر هذه التقنية على المستوى العالمي 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)

الجهات الفاعلة الرئيسة

1. أوتودسك (Autodesk)
2. أنظمة بينتلي (Bentley)
3. مجموعة دي اتش آي(DHI)
4. شركة إدريكا (Idrica)
5. سيمنز (SIEMENS)
6. سنستايم (SenseTime)
7. شركة تمز ووتر
8. جامعة برلين التقنية
9. مختبرات فاسار (Vassar Labs)

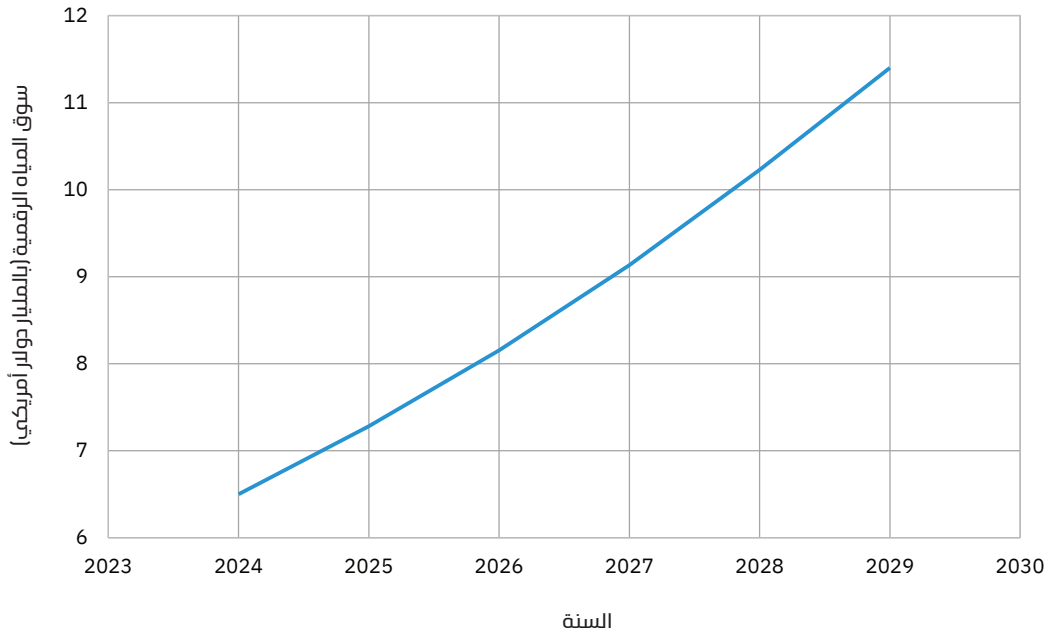
الرؤى والإحصائيات

من خلال تحليل البيانات، والتنبؤ بالمشكلات مثل التسربات، وتحسين العمليات، يمكن أن تساعد التوائم الرقمية في تعزيز الكفاءة وتقليل التكاليف والحفاظ على الطاقة كما هو موضح أدناه.

الأثر والإحصائيات

- **تحسين الكفاءة التشغيلية**: تقدم التوائم الرقمية تحليلات مفصلة وفورية تتيح لموظفي المرافق إدارة عمليات الضخ والتوزيع المعقدة بشكل أكثر فعالية. يؤدي ذلك إلى تحسين كفاءة الموظفين والتشغيل الأمثل للمعدات. الجمعية الأمريكية لأعمال المياه
- **التخطيط الرأسمالي وإدارة المخاطر**: يتيح دمج النماذج الهيدروليكية في التوأم الرقمي للمرافق محاكاة أحداث مثل أعطال الأنابيب وانقطاع التيار الكهربائي، مما يعزز المرونة ويحسن الاستثمارات الرأسمالية. شركة إدارة وتمويل المياه (**Waterfm**)
- **تحسين الكشف عن التسرب:** من خلال تتبع جودة المياه وتدفقها وضغطها، تمكّن التوائم الرقمية الفنيين من كشف التسريبات بسرعة والتنبؤ بالمشاكل المستقبلية. **Idexx Currents**
- **توفير التكاليف:** يمكن أن يؤدي استخدام التوائم الرقمية إلى تقليل التكاليف بشكل ملحوظ. فمثلاً،ساهمت محطة الضخ القائمة على التوائم الرقمية في مبنى اختبار المياه 4.0 التابع للوشان ووتروكركس (التي طُورت بالتعاون مع جامعة برلين التقنية) في تقليل وقت الصيانة بنسبة تصل إلى 30% وتقليل تكاليفها بنسبة تصل إلى 25%. المنتدى الاقتصادي العالمي
- **كفاءة الطاقة:** يمكن أن يؤدي تحسين عمليات المضخات من خلال التوائم الرقمية إلى توفير الطاقة بنسبة تصل إلى 15%، حيث يمكن للمرافق محاكاة استراتيجيات ضخ أكثر كفاءة وتنفيذها. الرابطة الدولية للمياه
- **نمو السوق العالمية**: من المتوقع أن يصل سوق المياه الرقمي الأوسع نطاقًا – والذي يشمل تقنيات التوائم الرقمية- إلى 11.4 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2029 بعد أن كان 6.5 مليار دولار أمريكي في 2024،وذلك بمعدل نمو سنوي مركب قدره 12%. ماركتس أند ماركتس

الحجم المتوقع لسوق المياه الرقمية (2024-2029)



تبني التقنيّة

نركز هنا على اعتماد التوائم الرقمية في إدارة المياه، ونستعرض تنفيذها العالمي المتزايد وجهود التوحيد القياسي والتكامل مع التقنيات المتقدمة مثل إنترنت الأشياء ونظم المعلومات الجغرافية.

الوضع الراهن

- **تزايد عدد المشاريع التي تم إطلاقها ونجاحها**: تُدمج تقنية التوائم الرقمية بشكل متزايد في أنظمة إدارة المياه في جميع أنحاء العالم، مما يعزز قدرات المراقبة الفورية والقدرات التنبؤية لتعزيز الكفاءة والمرونة. المنتدى الاقتصادي العالمي
- **جهود التوحيد القياسي**: تعمل منظمات القطاع على توحيد تعريف التوائم الرقمية ومكوناتها في قطاع المياه. مدونة بينتلي (**Bentley**)
- **الصين في دور ريادي**: تستعد الصين لتولي دور ريادي في تقنيات التوائم الرقمية لإدارة المياه والحفاظ عليها، وذلك مع إنشاء 94 برنامجًا تجريبيًا للتوائم الرقمية في 48 موقعًا في جميع أنحاء البلاد. بيوت الخبرة السويسرية (**Swissnex**)

الدروس المستفادة عالميًّا

- **التكامل مع التقنيات المتقدمة**: إن دمج مستشعرات إنترنت الأشياء (IoT) وبيانات نظام المعلومات الجغرافية (GIS) في منصات التوائم الرقمية يعزز قدرات المراقبة الفورية والتحليل المكاني. وكان هذا التكامل عامل نجاح رئيسًا في المشاريع الأخيرة.أكواتيك الدولية المحدودة (Aquatech)
- **نهج استباقي لتحديات البيانات**: وجدت منشآت مثل Anglian Water أن مشاكل البيانات القديمة يمكن أن تعيق تطوير التوائم الرقمية. ويعد تقييم جودة البيانات وتحسينها في وقت مبكر من المشروع أمرًا بالغ الأهمية لتحقيق النجاح. شركة IoT إن
- **حلول مرنة وقابلة للتطوير**:إن المنصات التي يمكن أن تتطور مع التغيرات التقنية، وتتكيف مع الاحتياجات المتزايدة للمنشآت هي الأساس لضمان استمرارية الجدوى على المدى الطويل. مجموعة إنفو تيك للبحوث (Info-Tech)

آفاق التقنية

يُسلط الضوء على مستقبل التوائم الرقمية في إدارة المياه، مع التركيز على التطورات مثل التحسين القائم على الذكاء الاصطناعي والتكامل مع شبكات المدن الذكية.

دلائل التغيير

- **دمج بيانات رصد الأرض عالية الدقة**: قامت مختبرات فاسار بتطوير تقنية التوأم الرقمي وذلك بدمج بيانات الأرض عالية الدقة، مما يتيح محاكاة مفصلة لدورة المياه. Vassar Labs
- **تحسين المراقبة الفورية والتحليلات التنبؤية**: أبلغت الجمعية الأمريكية لأعمال المياه عن تطبيقات ناجحة للتوائم الرقمية التي تستفيد من تدفقات البيانات الثابتة والمباشرة، مثل بيانات نظام تحصيل البيانات والتحكم (SCADA) وإنترنت الأشياء، لوصف أداء النظام بدقة. الجمعية الأمريكية لأعمال المياه (AWWA)
- **جهود التوحيد القياسي التي تبذلها الجمعية الأمريكية لأعمال المياه (AWWA) ومنتدى شبكات المياه الذكية (SWAN)**: تعاونت الجمعية الأمريكية لأعمال المياه (AWWA) ومنتدى شبكات المياه الذكية (SWAN) لتوحيد تعريف التوائم الرقمية ومكوناتها في قطاع المياه. الهندسة والبناء

التوجه المستقبلي

- **سيقود الذكاء الاصطناعي والأتمتة المتقدمة مسيرة تطور التوائم الرقمية**: على مدار العقد القادم، من المرجح أن تصبح التوائم الرقمية أكثر قدرة على التعلم الذاتي والاستقلالية، باستخدام الذكاء الاصطناعي لتحسين شبكات المياه في الوقت الفعلي. كما ستستمر النماذج التنبؤية في التحسن، مما يتيح اكتشاف التسرب بشكل أسرع وأكثر دقة وبأقل تدخل بشري. Idrica LG Sonic
- **التكامل مع شبكات المدن والمنشآت الذكية الأوسع نطاقاً**: في مرحلة ما، يُتوقع أن تتصل التوائم الرقمية بسلاسة مع المدن الذكية، وتتكامل مع شبكات الطاقة والتنبؤ بالطقس وأنظمة النقل. SmartWaterMagazine
- **الإصلاح والصيانة الآلية تصبح واقعًا**: من المرجح أن تتجاوز التطورات المستقبلية اكتشاف التسرب إلى منعه وإصلاحه آليًا، وبالتالي تقلل خسائر المياه، وقد تُدمج الروبوتات ومواد الإصلاح الذاتي في شبكات خطوط الأنابيب، مما يعزز قدرات التوأم الرقمي. Building SmartInternational

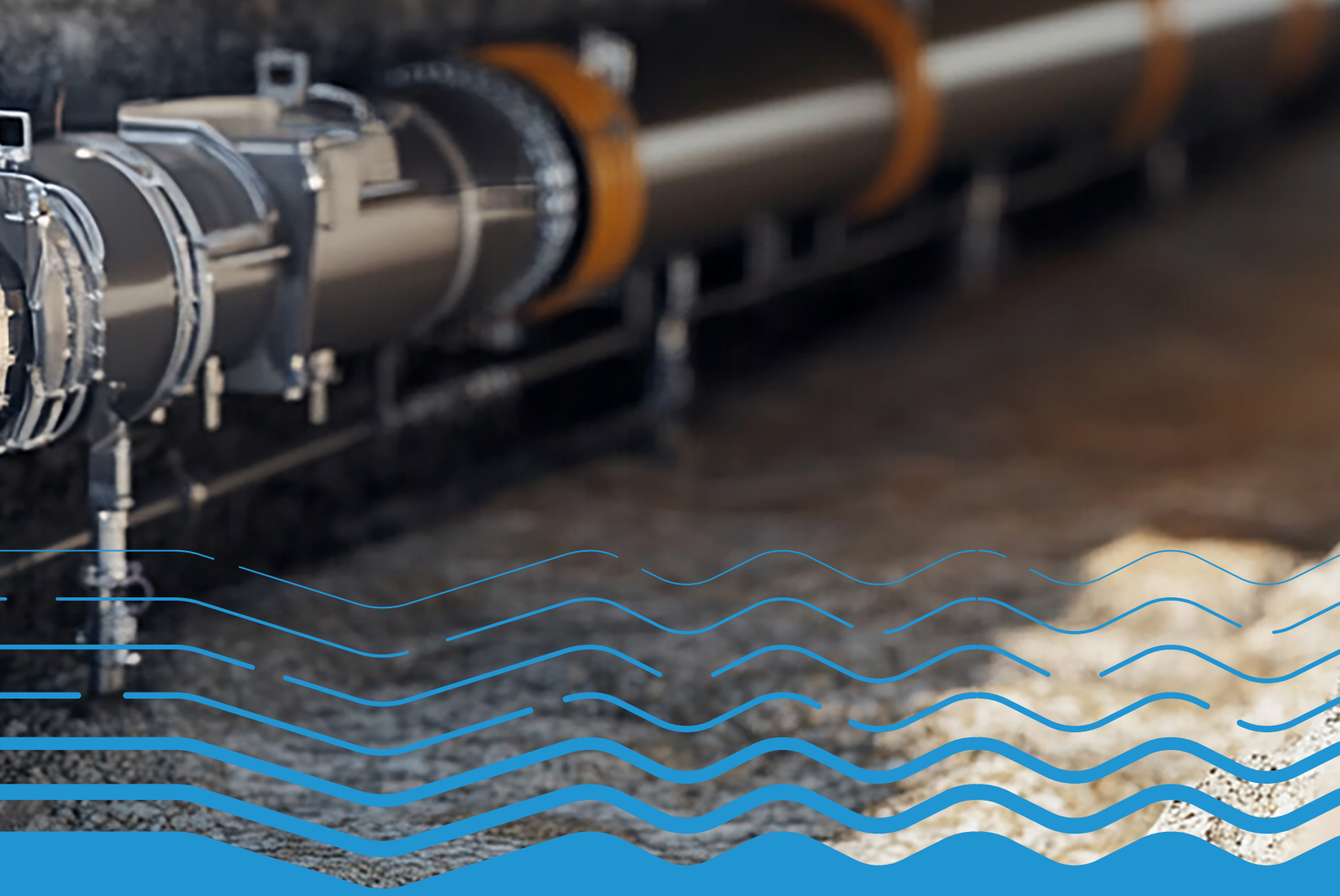
دراسة حالة

التوائم الرقمية ذاتية التكيف: نماذج المدن ثلاثية الأبعاد

ابتداء من عام 2024 ، شرعت خمس مدن سعودية كبرى (الرياض والمدينة المنورة وجدة والدمام ومكة المكرمة) في شراكة كبيرة مدتها خمس سنوات مع Naver ، وهي شركة إنترنت وتقنية كورية جنوبية رائدة لتطوير منصات رقمية مزدوجة لتحويل التخطيط الحضري، شاملةً إدارة المياه. ولقد أثبت اعتماد التوائم الرقمية نجاحه بالفعل في مدن عالمية. فمثلاً: طورت سنغافورة وشنغهاي توأمين رقميين بالكامل للمساعدة على تحسين استهلاك الطاقة وتدفق حركة المرور وتخطيط التنمية الحضرية. وتسلط هذه الحالات الضوء على إمكانات مبادرة المملكة العربية السعودية لدفع عملية اتخاذ قرارات أكثر كفاءة وقائمة على البيانات. 5 أمثلة واقعية لتوائم رقمية واقعية - **PALAMIR** تهدف هذه المبادرة، والتي أُمنت بعقد بقيمة 100 مليون دولار في أكتوبر 2023، إلى إنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد وعالية الدقة لهذه المدن بدقة تصل إلى 10 سنتيمترات، ويتضمن المشروع

أيضًا التعاون مع شركاء كوريين، كالشركة الكورية للموارد المائية (K-Water) والشركة الكورية للأراضي والمعلومات الجغرافية المكانية (LX)، لدمج الخدمات الأساسية وتمكين نقل المعرفة بما يتماشى مع استراتيجية المملكة العربية السعودية الأوسع نطاقًا للنهوض بالبنية التحتية للمدن الذكية وذلك بالتقنيات المتطورة.

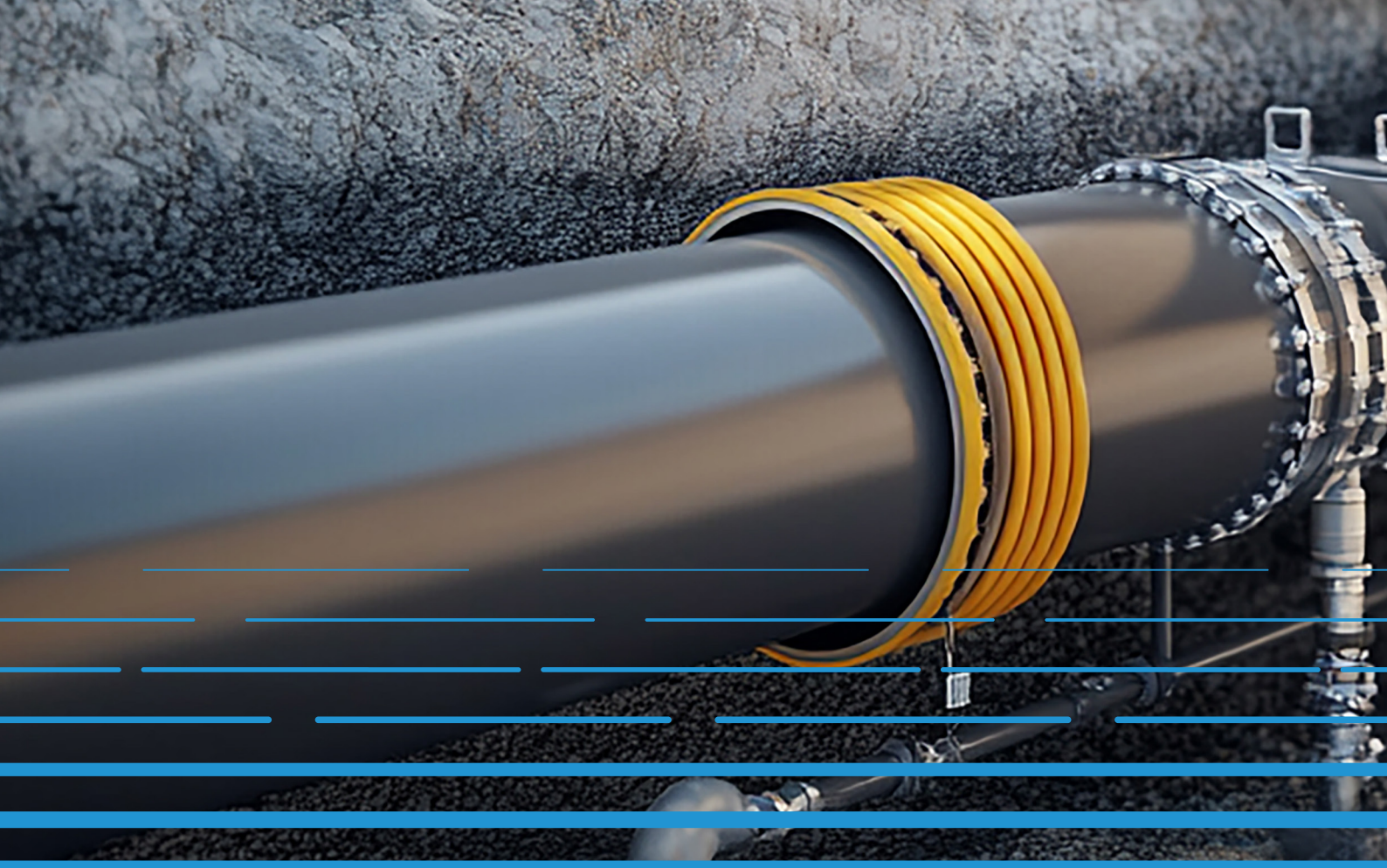
من المتوقع أن تؤدي هذه المبادرة إلى تطوير البنية التحتية للمدينة، وتحسين الاستدامة، وتعزيز الخدمات العامة. وستعمل التوائم الرقمية على تسهيل الكشف الاستباقي عن التسربات، وإدارة الحركة، والتخطيط الاستجابي لحالات الطوارئ. ويفترض أن تكون هذه التوائم الرقمية بمثابة أدوات أساسية للمدن الذكية المستدامة القائمة على الذكاء الاصطناعي، مما يعكس نهجًا مبتكرًا لإدارة المدن وذلك بحلول عام 2030.



التقنيات البارزة

ب.الأنظمة العائمة

أجهزة مستقلة مزودة بأجهزة استشعار تتنقل عبر خطوط الأنابيب للكشف عن التسربات وجيوب الغاز والعيوب الهيكلية، وتوفر هذه التقنية حلاً لفحص خطوط الأنابيب، ولا سيما في الشبكات ذات القطر الكبير أو التي يصعب الوصول إليها.



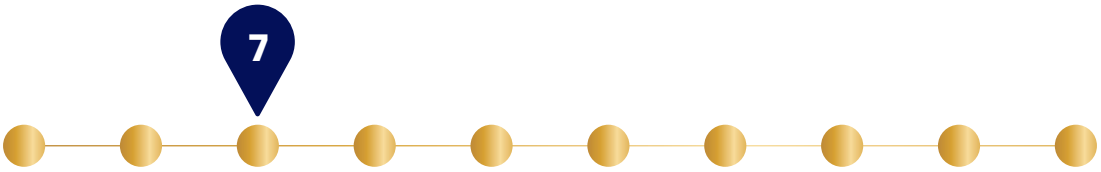
الأنظمة العائمة

تقنيات فحص مستقلة داخل الأنابيب تُستخدم للكشف عن التسربات والتقييمات الهيكلية في خطوط أنابيب المياه، وهي مزوّدة بأجهزة استشعار صوتية قائمة على الضغط والحرارة والقياسات المغناطيسية لتحديد التسربات وجيوب الغازات والاختلالات بدقة عالية. ويمكن لهذه الأجهزة أن تقطع مسافات بعيدة في الأنابيب، وتتنقل بين الانحناءات والصمامات دون تعطيل الخدمة. وعلى عكس الأنظمة المربوطة، فإنها تتحرك بحرية مع تدفق المياه مما يجعلها مثالية لخطوط الأنابيب ذات الأقطار الكبيرة. وتعمل خرائط نظم المعلومات الجغرافية على تعزيز تحديد موقع التسرب مما يتيح إجراء إصلاحات دقيقة. وقد اعتمدت بعض المباني في قطر واسكتلندا والنرويج وكندا - التي تضم حالات متنوعة للبنية التحتية - حلولاً مثل SmartBall وPipeDiver لتقليل هدر المياه وإطالة عمر البنية التحتية. ومع تقدم التقنيات سيعمل الذكاء الاصطناعي والتحليلات الفورية على تحسين اكتشاف التسرب ومراقبة خطوط الأنابيب. فيما يتعلق بالقيود، توجد تحديات ومحدودية للأنظمة العائمة. فعلى سبيل المثال، يكون أداء أجهزة الأنظمة العائمة محدوداً عندما يتعلق الأمر بخطوط الأنابيب المعقدة ذات الضغط العالي.

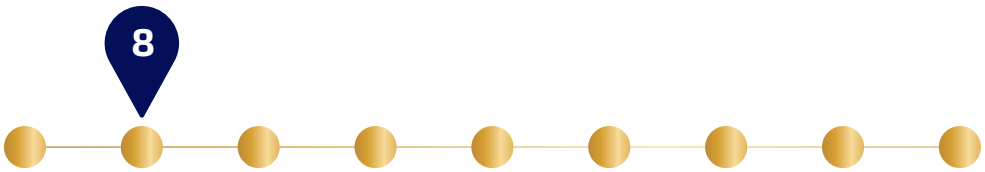
التقنيّة ونضج السوق

حققت الأنظمة المستقلة لفحص خطوط الأنابيب مستوى الجاهزية التقنية وصل إلى (TRL 8)، مما يشير إلى أنها مكتملة ومؤهلة من حيث الاختبار والعرض. فمثلا: تعد تقنية SmartBall®من شركة Xylem's Pure Technologies حلاً متاحًا تجاريًا نُشر بنجاح في العديد من شبكات خطوط الأنابيب. وقد ركزت التطورات الأخيرة في عام 2024 على تعزيز دقة أجهزة الاستشعار وعمر بطارياتها وقدرات تحليل البيانات مما يعزز النضج التقني. أما فيما يتعلق بمستوى جاهزية السوق (MRL 7)، فإن هذه الأنظمة في المستوى 7، أي أن سوقها ناضج ويضم منتجات جيّدة ذات مستوى تبني متنامي.

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 أكوا روبوتيكس

2 شركة أكوا أنالیتكس

3 شركة إنسايت لتقنيات المياه

4 جامعة ماساشوسيتس التقنية

5 مجموعة روسين

6 شركة (Xylem (Pure Technologies

7 جامعة شيفيلد

الرؤى والإحصائيات

تعمل الأنظمة العائمة على ترشيد استهلاك المياه وتقليل التكاليف التشغيلية وتحسين مرونة البنية التحتية وذلك بالكشف عن التسريبات في وقت مبكر ودون انقطاع، كما هو موضح أدناه

الأثر والإحصائيات

- **الكشف المبكر عن التسرب**: وذلك بالتحديد الفوري للتسريبات، إذ تسهّل الأنظمة العائمة إجراء الإصلاحات في الوقت المناسب، ومعالجة 20%-30 من المياه المفقودة سنويًا في أنظمة الإمداد، ومنع تفاقم المشاكل البسيطة وتحولها إلى أعطال كبيرة. PMC
- **تغطية واسعة لخطوط الأنابيب**: يمكن للأنظمة العائمة مسح أكثر من 60 كم من خطوط الأنابيب في عملية نشر واحدة (بمعدل تدفق 1 م/ثانية) دون انقطاع الخدمة، ويمكنها التنقل عبر الشبكات المعقدة، بما في ذلك الانحناءات الضيقة والصمامات الداخلية أثناء العمل بفاعلية في ظروف التدفق المنخفض وعبر مواد الأنابيب المختلفة. IWA
- **الحد الأدنى من تدخل المشغل**: نظرًا لتحركها مع تدفق المياه، تتطلب الأنظمة العائمة عددًا أقل من نقاط الوصول، وتدخلاً يدويًا أقل مقارنةً بالزواحف الآلية أو أجهزة الاستشعار المربوطة. IWA
- **الفحص غير التعطيلي**: خلال عملها ضمن خطوط الأنابيب المباشرة، تُلغي هذه الأنظمة الحاجة إلى الإغلاق أو الحفر أو انقطاع الخدمة، على عكس بعض طرق الكشف المربوطة أو الخارجية. IWA
- **تكامل نظم المعلومات الجغرافية ورسم الخرائط الرقمية**: وذلك بالتقاط بيانات الموقع الدقيقة (في حدود 1-2 متر)، وتدعم هذه التقنية نماذج التوائم الرقمية واستراتيجيات إدارة الأصول لتخطيط البنية التحتية على المدى الطويل. PMC
- **دقة عالية في خطوط الأنابيب ذات القطر الكبير**: تُعد الأنظمة العائمة الخيار الأمثل لأنابيب النقل الرئيسة الكبيرة (التي يزيد قطرها عن 20-30 سم)، إذ غالبًا ما تعاني أجهزة الاستشعار الخارجية وأجهزة ربط ضوضاء التسرب من صعوبات بسبب قيود المسافة. Pacific Northwest National Laboratory

تبني التقنيّة

يتزايد الاعتماد على الأنظمة العائمة حول العالم، وذلك مع التقدم في تصميم أجهزة الاستشعار واستخدام البلديات على نطاق واسع، مما يؤدي إلى تحسين إدارة خطوط الأنابيب والحفاظ على المياه.

الوضع الراهن

- **الاعتماد المتزايد من قبل المنشآت والمرافق:** أصبحت تقنية SmartBall حلًا موثوقًا على مستوى العالم، حيث قامت المنشآت بفحص أكثر من 15,700 كيلومتر من خطوط الأنابيب وتحديد أكثر من 4,450 تسربًا منذ نشرها في عام 2005. Xylem
- **التطور في تصميم أجهزة الاستشعار:** أدت الجهود البحثية إلى تطوير تصاميم محسّنة لأجهزة الاستشعار (مثل: التحسينات الديناميكية الهوائية والهيدروديناميكية) لضمان استقرار أفضل، وتقليل تداخل الضوضاء، وتعزيز دقة الكشف عن التسرب في ظل الظروف الطبيعية. ARF-MTS
- **توسيع نطاق تبني البلديات:** تستخدم المرافق العامة مثل مؤسسة المياه الاسكتلنديةومدينة كالجاري وأوسلو وقطر أجهزة مثل SmartBall لفحص أنابيب المياه ذات الأقطار الكبيرة، مما يمنع الأعطال ويقلل من هدر المياه.

الدروس المستفادة عالميًّا

- **تصميم خطوط الأنابيب وإمكانية الوصول إليها:** تُظهر الدروس المستفادة من عمليات النشر أهمية نقاط الوصول للإدخال والاسترجاع، إذ إن تجهيز خطوط الأنابيب بهذه الإمكانيات يعزز كفاءة عمليات التفتيش وجدواها. IWA
- **تكامل التقنيات المتعددة:** لا تُعد الأنظمة العائمة حلًا قائمًا بذاته، إلّا أنها مكملات قيّمة لأدوات أخرى للكشف عن التسرب مثل الأنظمة المربوطة وتقنيات التصوير والاستشعار والتحليلات القائمة على البرمجيات. ويمكّن استخدام هذه التقنيات المرافق من التحقق من النتائج وجمع بيانات أكثر شمولاً. Water
- **معالجة التحديات الإقليمية:** تظهر عمليات النشر في المناطق ذات البنية التحتية المتقادمة الحاجة إلى تصميم أجهزة الاستشعار بما يراعي اختلاف مواد الأنابيب وأقطارها وظروف التدفق. ARFMT

آفاق التقنية

ستركز التطورات المستقبلية في الأنظمة على الدقة والتصغير وقدرات الاستشعار المتعددة وتكامل إنترنت الأشياء والمتانة في مختلف البيئات.

دلائل التغيير

- **ظهور تقنيات خطوط الأنابيب ذاتية المعالجة**:استُحدثت حلول مبتكرة مثل تقنية الكرات الذكية (Twin Balls) للكشف عن التسربات ومعالجتها فوريًا داخل خطوط الأنابيب، ويتضمن هذا النهج استخدام الكرات الذكية التي تكتشف التسربات عن طريق البيانات الصوتية، كما تطلق عوامل المعالجة لسد التسربات على الفور. ARFMTS
- **التطورات في تصميم أجهزة الاستشعار**: تركز الأبحاث على تحسين ثبات أجهزة الاستشعار، والحد من تداخل الضوضاء، وتحسين الديناميكيات المائية لكشف التسرب بشكل أكثر دقة وكفاءة. وبناءً عليه، فقد اقتُرحت واختُبرت وحدات حركية جديدة، بعضها مستوحى من الأشكال البيضاوية والطوربيدية. ARFMTS
- **معيار جديد في الدقة والكفاءة**: يؤكد نشر الأنظمة العائمة في أوسلو على قدرتها على اكتشاف التسربات الصغيرة التي تصل إلى 0.01 m/، مما يدل على دقة وموثوقية لا تضاهى في ظل الظروف الواقعية. MechChem

التوجه المستقبلي

- **التصغير والقدرات متعددة الاستشعار**: من المرجح أن تركز التطورات المستقبلية على إنشاء أجهزة استشعار أصغر حجمًا ومتعددة الوظائف، للكشف عن التسربات ونقاط الضعف الهيكلية والملوثات في وقت واحد، مما يجعل عمليات التفتيش أكثر شمولاً. Pipelines_Condition Assessment:2024
- **قابلية التشغيل البيني مع منصات إنترنت الأشياء والمنصات السحابية**: ستتكامل الأنظمة المستقبلية بسهولة مع منصات إنترنت الأشياء السحابية، مما يتيح المراقبة عن بُعد واتخاذ القرارات الفورية للمنشآت التي تدير شبكات خطوط الأنابيب الكبيرة. INSIGHT Water Technologies
- **تصميم ملائم للظروف البيئية القاسية**: استحدث قطاع النفط والغاز أدوات تلائم ظروف الضغط العالي ودرجات الحرارة العالية. إذ يمكن أن يؤدي تنفيذ هذه التصاميم على أنظمة المياه إلى تحسين المتانة والأداء في ظل الظروف البيئية القاسية. NDT

دراسة حالة

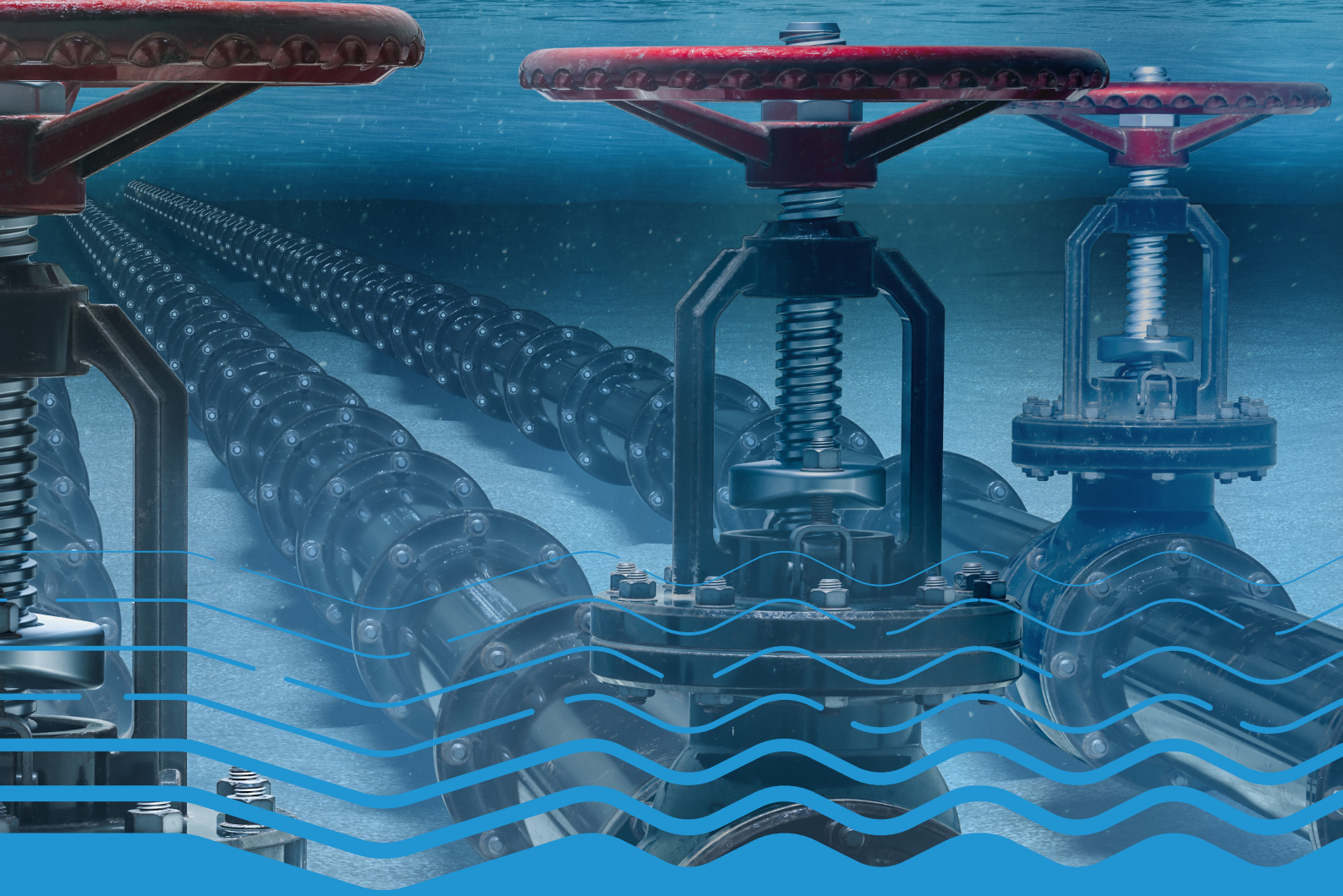
أنظمة الفحص الروبوتي المستقل المدعوم بالذكاء الاصطناعي للبنية التحتية لخطوط أنابيب المياه

تهدف شركة أكوا روبوتيكس (ACWA Robotics)، وهي شركة فرنسية ناشئة، إلى معالجة المشكلة الكبيرة المتمثلة في هدر المياه في شبكات التوزيع، حيث تفقد المنشآت في جميع أنحاء العالم ما يقارب 32 مليار متر مكعب من المياه النظيفة سنويًا بسبب تدهور البنية التحتية، وتهدف الشركة إلى تزويد مرافق المياه ببيانات دقيقة وفورية حول ظروف خطوط الأنابيب لإدارة أنظمة إمدادات المياه وصيانتها بشكل استباقي، وبالتالي تقليل هدر المياه وتحسين استثمارات البنية التحتية.

وتحقيقًا لهذا الغرض، ابتكرت شركة أكوا روبوتيكس روبوتات "كلين ووتر باثفايندر"، وهو روبوت ذاتي القيادة مصمم للتنقل داخل خطوط أنابيب المياه النشطة دون تعطيل الخدمة. وزُوّد الروبوت بأجهزة استشعار متطورة، تشمل الكاميرات عالية الوضوح وأجهزة الموجات فوق الصوتية، حيث يقوم الروبوت بتقييم سماكة الأنابيب ومراقبة التآكل واكتشاف التسربات، كما يتيح له نظام الملاحة المدعوم بالذكاء الاصطناعي التنقل عبر الأنابيب بأقطار مختلفة، والتعامل مع منحنيات تصل إلى 90

درجة، والعمل في أنابيب يتراوح قطرها بين 200 و1,000 ملليمتر. ونجحت الشركة في أكتوبر 2024 بتنفيذ أول مهمة للروبوت المذكور في شبكة مياه دنكيرك بالشراكة مع شركة سويز اس ايه (SUEZ) ووكالة المياه (Agence de l'Eau).

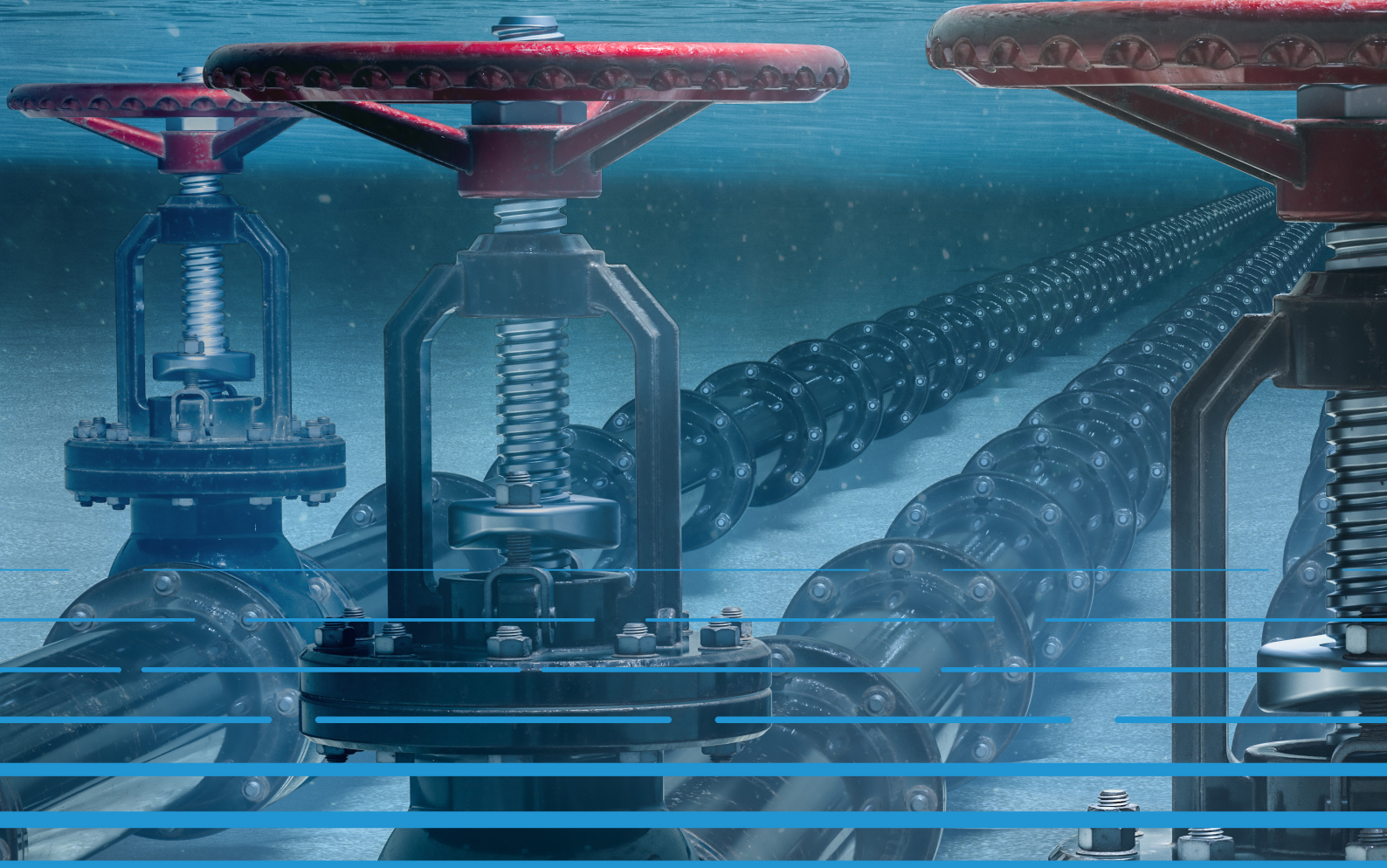
يمكّن نشر روبوت "كلين ووتر باثفايندر" المنشآت من الحصول على مرئيات شاملة حول البنية التحتية لخطوط الأنابيب الخاصة بها، مما يسهل الصيانة الاستباقية ويقلل من هدر المياه، وذلك بتوفير تقييمات مفصلة دون الحاجة إلى انقطاع الخدمة أو الحفريات، ويساعد الروبوت على تحسين جهود الصيانة وإطالة عمر البنية التحتية الحالية، وفي عام 2023، حصلت هذه التقنية على جائزة أفضل ابتكار في المدن الذكية من معرض الإلكترونيات الاستهلاكية.



التقنيات البارزة

ج. المواد ذاتية الإصلاح

المواد ذاتية الإصلاح هي مواد مبتكرة قادرة على إصلاح الأضرار بصورة ذاتية، مثل الشقوق أو التسربات، في خطوط أنابيب المياه والبنية التحتية.



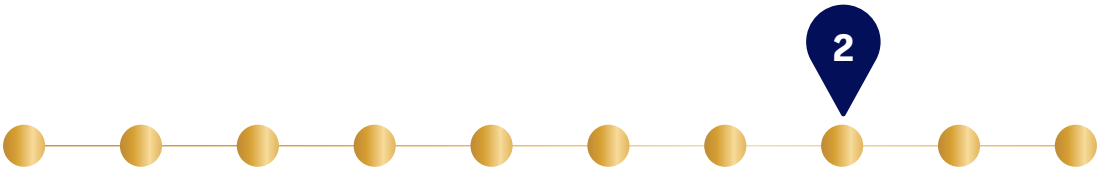
المواد ذاتية الإصلاح
(Self-healing materials)

المواد ذاتية الإصلاح هي مواد مبتكرة قادرة على إصلاح الأضرار بصورة ذاتية، مثل الشقوق أو التسربات، في خطوط أنابيب المياه. وتعمل هذه المواد من خلال دمج كبسولات دقيقة أو مواد نانوية مملوءة بمواد معالجة داخل هيكل خط الأنابيب، وعند حدوث تلف تتمزق هذه الكبسولات وتطلق المواد الفعالة لسد الشقوق واستعادة السلامة الهيكلية دون تدخل بشري. وتقلل هذه التقنية من تكاليف الصيانة بشكل كبير، كما تقلل من هدر المياه، وتطيل عمر البنية التحتية الأساسية. وقد بدأت مؤخرًا شركة نورثمبريا ووتر (Northumbria Water) وشركة أوريجينتيك (OriginTech) بتطبيقات تجريبية للتقنيات مثل تقنية "No-dig". ويتوقع الخبراء أن تُحدث الأنابيب ذاتية الإصلاح المعززة بتقنية النانو ثورة في **أنظمة إدارة المياه** خلال الألفية الميلادية الثالثة، **وسيوفر ذلك حلولاً أكثر استدامة وفعالية لمنع التسرب.**

التقنيّة ونضج السوق

بلغت المواد ذاتية الإصلاح لخطوط أنابيب المياه حاليًا مستوى جاهزية تقنية (TRL5)، مما يشير إلى أنه وعلى الرغم من التحقق من صحة الفحوص المخبرية وإجراء الاختبارات الميدانية، إلا أن من الضروري إجراء المزيد من التحسينات للتطبيق على أرض الواقع. فمستوى جاهزية السوق (MRL2)، وفي ظل وضوح الحاجة العامة لتوفير تقنيات متقدمة للتسربات في السوق، فإن البحوث والمشاريع التوضيحية الجارية ضرورية لمعالجة تحديات قابلية التطوير والتكلفة والتحديات التنظيمية. والمواد ذاتية الإصلاح لا تزال في مراحل البحث المبكرة، وتُعد مرتفعة التكلفة حاليًا للتطبيق على نطاق واسع.

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

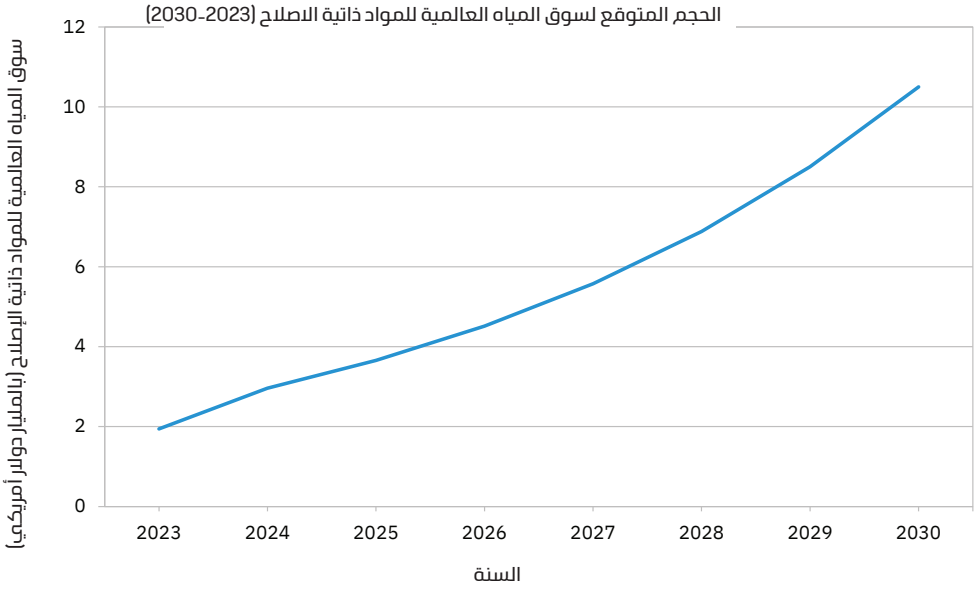
1. مجموعة نظام المواد الذاتية (جامعة إلينوي في أوربانا شامبين)
2. مجموعة الأبحاث الحضرية (جامعة كليمسون)
3. المختبر الوطني لتقنية الطاقة (NETL)
4. شركة نورثمبريا ووتر
5. المعهد الملكي للتقنية في ملبورن
6. جامعة جنوب أستراليا

الرؤى والإحصائيات

تتمتع المواد ذاتية الإصلاح في البنية التحتية للمياه بإمكانية تقليل تكاليف الصيانة وتقليل هدر المياه، وإطالة عمر البنية التحتية الأساسية بشكل كبير.

الأثر والإحصائيات

- **الوفورات في تكاليف الصيانة:** يمكن أن يؤدي تطبيق تقنيات الإصلاح الذاتي في الهياكل الخرسانية- كأنابيب الصرف- إلى توفير أكثر من 1 مليار دولار أمريكي في تكاليف الإصلاح في اقتصادات مثل أستراليا وذلك باستدامة البنية التحتية. University of South Austra-lia
- **تقليل الانقطاع:** تتطلب إصلاحات خطوط الأنابيب التقليدية-في كثير من الأحيان- عمليات حفر واسعة النطاق، مما يؤدي إلى ازدحام الحركة وإرباك الشركات المحلية. وتقلل مواد الإصلاح الذاتي من هذه الأعطال وذلك بمعالجة التسربات بصورة مستقلة، مما يضمن عمليات يومية أكثر سلاسة للمجتمعات. مجلةSmart Infrastructure & Construction
- **نمو السوق:** قُدرت قيمة السوق العالمي للمواد ذاتية الإصلاح بحوالي 1.94 مليار دولار في عام 2023، ومن المتوقع أن ينمو بمعدل نمو سنوي مركب بنسبة 23.5% من عام 2024 إلى عام 2030، مما يعكس إمكانات اقتصادية كبيرة. Grandview Research
- **الاستدامة البيئية:** يمكن للمواد ذاتية الإصلاح أن تقلل من الأثر البيئي للبنية التحتية للمياه وذلك ب تقليل تواتر عمليات الإصلاح والاستبدال، مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الموارد وتوليد النفايات. مجلة -Advanced Sci-ence
- **متانة البنية التحتية:** تعمل هذه المواد على تعزيز متانة أنظمة توزيع المياه وذلك بمنع الأضرار الطفيفة من التصاعد، وبالتالي استدامة البنية التحتية. Envisioning



تبني التقنيّة

على الرغم من أن أبحاث المواد ذاتية الإصلاح في خطوط أنابيب المياه لا تزال في مراحلها الأولى، إلا أنها تقدمت بشكل ملحوظ، ولا سيما خلال السنة الماضية.

الوضع الراهن

- **التجارب المستمرة وتنوع الحلول**: كما هو معتاد بالنسبة للتقنيات ذات مستوى الجاهزية التقنية المتوسط، ثمة مجموعة واسعة من الأساليب والحلول التي استحدثت في مشروع بحثي جارٍ. وتشمل هذه التطورات طلاء الرذاذ البارد ذاتي الإصلاح لخطوط الأنابيب، ودمج الشبكات البوليمرية في تصميم خطوط أنابيب المياه، وتطوير مواد ذاتية الإصلاح فائقة السرعة بالاعتماد على اللدائن البيزو أيونية.
- **جهود التسويق التجاري**: في حين أن المواد ذاتية الإصلاح تقدّم فوائد واعدة، إلا أن تبنيها في سوق أنابيب المياه محدود في الوقت الحالي، مع استمرار بذل الجهود لمعالجة المسائل المتعلقة بقابلية التطوير والفاعلية من حيث التكلفة لتحسين الاستخدام على نطاق أوسع. مجلة Advanced Science

الدروس المستفادة عالميًّا

- توافق المواد والأداء: إن ضمان توافق المواد ذاتية الإصلاح مع مواد خطوط الأنابيب الحالية أمر بالغ الأهمية، فمثلا: طوّر المهندسون الأستراليون طلاءً من الزنك والبولي يوريثان لمنع تكوّن الدهون في أنابيب الصرف، مما يدل على أهمية اختيار المواد التي يمكنها تحمل ظروف بيئية معينة. The Guardian
- استراتيجيات التصميم والتصنيع: تُعد أساليب التصميم المبتكرة-مثل تضمين الكبسولات الدقيقة أو تطوير البوليمرات الداخلية ذاتية الإصلاح-أمرًا بالغ الأهمية لإنشاء مواد فعالة ذاتية الإصلاح. وتؤكد المراجعة الشاملة للمركبات ذاتية الإصلاح على أهمية اتباع تقنيات تصنيع مصممة خصيصًا لتعزيز ديمومة المواد. Materials

آفاق التقنية

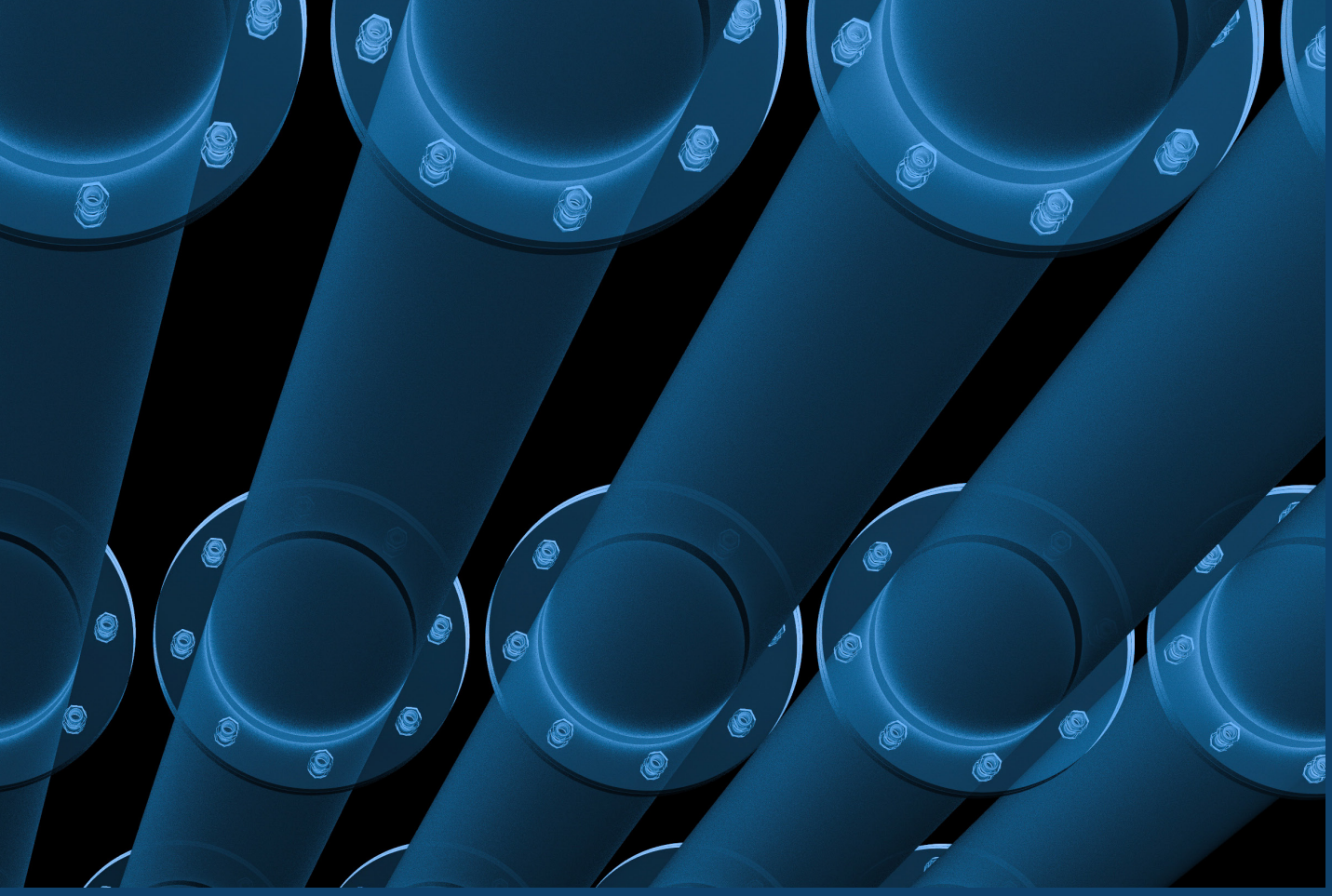
تشير التطورات الحديثة في المواد ذاتية الإصلاح إلى مستقبل تكون فيه البنية التحتية لخطوط أنابيب المياه أكثر مرونة واستدامة وفاعلية من حيث التكلفة في الصيانة.

دلائل التغيير

- **تقنية الأنابيب ذاتية الإصلاح "No-Dig" التي طورتها شركة نورثمبريان ووتر**: قامت شركة نورثمبريان ووتر بتجربة تقنية "No-Dig" المبتكرة في نيوكاسل، ونجحت بإصلاح أنابيب المياه ذاتيًا دون الحاجة للحفر، ويهدف هذا التقدم إلى تسريع عمليات إصلاح التسربات، وتقليل الأعطال وترشيد استهلاك المياه. Water Magazine
- **التطورات في مجال البوليمرات ذاتية الإصلاح للبيئات الرطبة**: تقدمت الأبحاث في ابتكار بوليمرات ذاتية الإصلاح مصممة خصيصًا للظروف الرطبة، مثل خطوط أنابيب المياه، وتعمل هذه المواد بشكل مستقل على إصلاح التلف في البيئات الرطبة، مما يعزز متانة البنية التحتية. التقدم في تقنيات البوليمر

التوجه المستقبلي

- **الدمج التدريجي في البف التحتية للمياه**: ابتداءً من عام 2030، من المرجح أن تُدمج المواد ذاتية الإصلاح في مشاريع خطوط أنابيب المياه الجديدة، بدلاً من تعديل البنية التحتية القائمة. ومن المحتمل أن تؤدي التكاليف المرتفعة والقيود التقنية ومشاكل التوافق مع الأنظمة القديمة إلى إبطاء اعتمادها على نطاق واسع في الشبكات القديمة. مجلة Advanced Science
- **التركيز على الأنظمة الهجينة التي تجمع بين أجهزة الاستشعار والمواد ذاتية الإصلاح**: من المرجح أن يتضمن مستقبل خطوط الأنابيب ذاتية الإصلاح تقنيات هجينة، بحيث تعمل مواد ذاتية الإصلاح مع أجهزة الاستشعار الذكية. وستكشف هذه الأنظمة عن التسربات في مراحلها المبكرة، وتطلق آليات المعالجة الموضعية، وتوفر بيانات فورية للصيانة التنبؤية. مجلة Smart In-frastructure& Construction

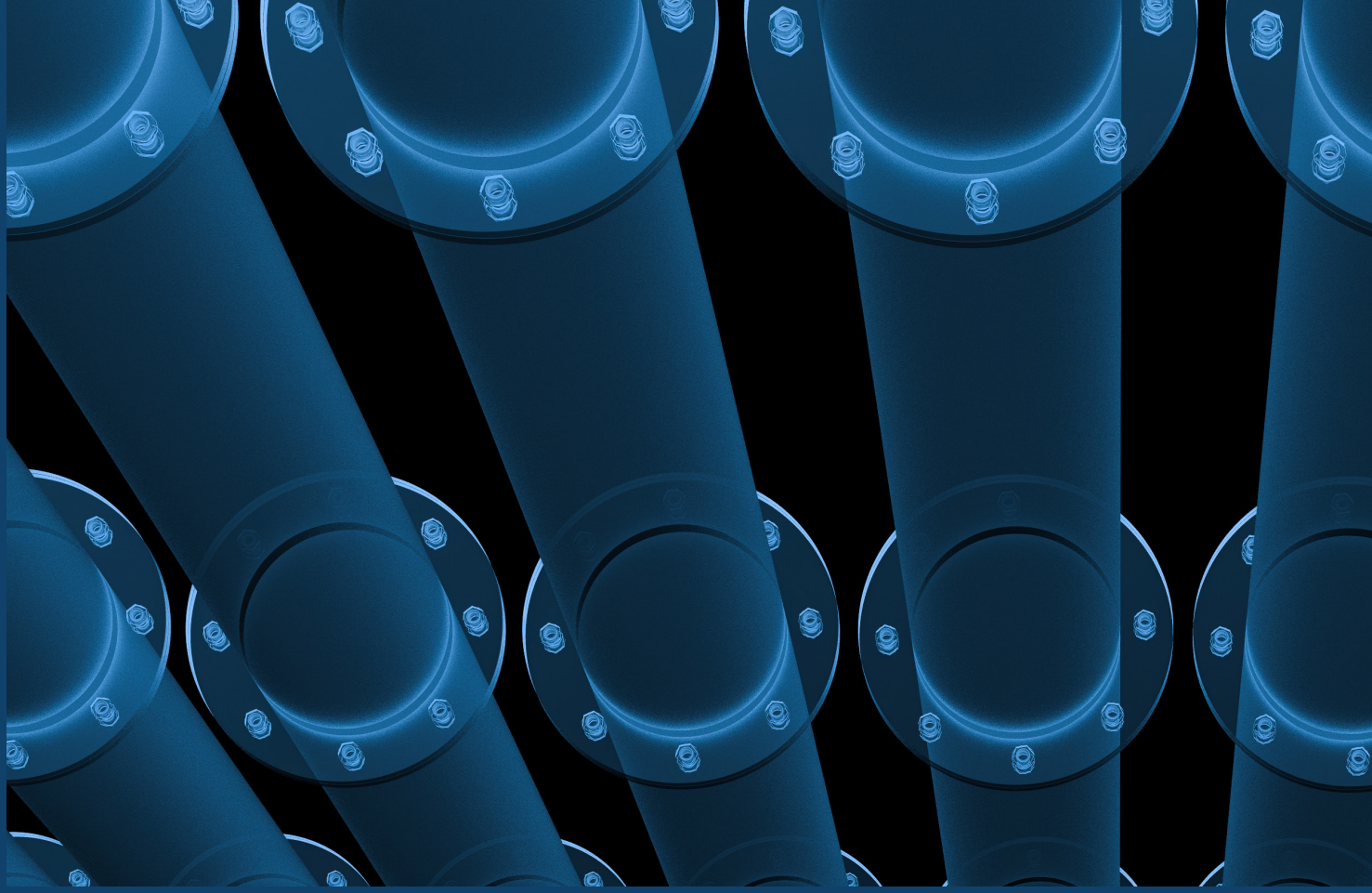


دراسة حالة

المواد ذاتية الإصلاح: دراسة حالة لتقنية خط أنابيب "No-Dig" ذاتية الإصلاح

واجهت شركة نورثمبريان ووتر تحديًا مستمرًا يتمثل في الكشف عن التسربات وإصلاحها داخل شبكة خطوط الأنابيب الواسعة، وغالبًا ما تتطلب الطرق التقليدية عمليات حفر معطِّلة ومكلفة، مما يؤدي إلى إزعاج العملاء وزيادة النفقات التشغيلية، وقد سعت الشركة إلى إيجاد حل مبتكر لمعالجة التسريبات بكفاءة أكبر مع تقليل الآثار البيئية والاجتماعية.

بالتعاون مع أوريجينتيك (OriginTech)، طورت شركة نورثمبريان ووتر تقنية "عدم الحفر" (No-Dig) - وهو نهج رائد يتيح لأنابيب المياه أن تصلح نفسها بنفسها دون الحاجة إلى الحفر، ويتكون هذا المحلول الخالي من المواد الكيميائية من الماء والهلام والمعادن التي تُحقن في الأنابيب المسرِّبة. وينتقل المزيج عبر خط الأنابيب ويحدد التسرب ويغلقه من الخارج ويسد الثقب بشكل فعال. كما بدأت التجارب الأولية خلال مهرجان الابتكار الذي نظمته الشركة في عام 2021، وأُجريت المزيد من التطورات والاختبارات الميدانية في السنوات اللاحقة.



حقق تطبيق تقنية عدم الحفر فوائد كبيرة، حيث سرّعت من عمليات إصلاح التسرب وقللت من الحاجة إلى الحفريات وحافظت على موارد المياه. ومن خلال تجنب إغلاق الطرق وتقليل الإزعاج للعملاء، عززت هذه التقنية من رضاهم. بالإضافة إلى ذلك، فإن التركيبة الصديقة للبيئة تتماشى مع أهداف الاستدامة. وبعد نجاح التجارب تخطط شركة نورثمبريان ووتر لإدماج هذه الطريقة في عملياتها القياسية لإصلاح التسربات، وتسعى لنشرها على نطاق واسع في جميع أنحاء المنطقة بحلول نهاية العام.

التقنيات البارزة

د. عقد الشبكة القي تعيد تشكيل ذاتها
Self-reconfiguring network nodes

عقد ذكية تعيد تكوين الاتصالات في شبكة المياه بشكل مستقل للتكيف مع حجم الطلب والحد من أوجه الضعف.

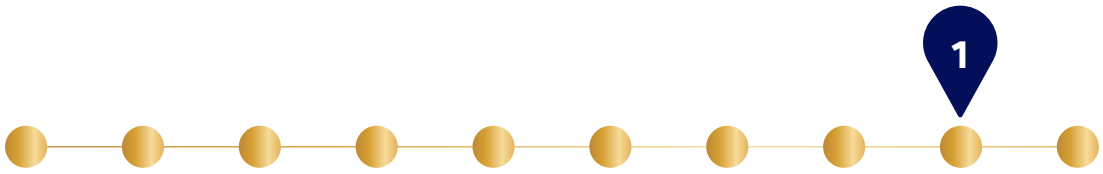
عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها
Self-reconfiguring network nodes

عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها هي تقنية في مراحلها الأولى، ويُتوقع أن تسهم في تشكيل إدارة تسرب المياه الذكية مستقبلًا. وستعمل هذه العقد الذكية على التكيف الذاتي وإعادة تكوين اتصالات شبكة المياه بشكل مستقل بناءً على مدخلات البيانات الآنية، مثل: تقلبات الضغط ومعدلات التدفق وأنماط الطلب. وباستخدام خوارزميات متقدمة وتحليلات تنبؤية يمكنها اكتشاف نقاط الضعف المحتملة قبل حدوث التسربات، وإعادة توجيه المياه بشكل ديناميكي للحفاظ على سلامة النظام. اعتبارًا من عام 2025، لا تزال تقنية عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها في المرحلة النظرية دون وجود تجارب ميدانية كاملة النطاق. ومع ذلك، فمن المتوقع مستقبلًا، سيتيح تكامل التقنية مع الذكاء الاصطناعي ونماذج التوائم الرقمية إمكانية تحسين أنظمة توزيع المياه ذاتيًا بالكامل، مما يعزز بشكل كبير من المرونة ويقلل من هدر المياه والتدخل اليدوي للكشف عن التسربات وإصلاحها.

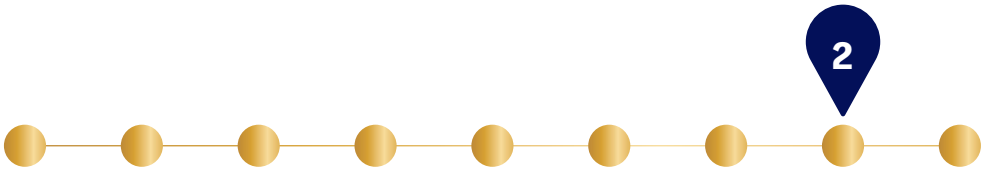
التقنيّة ونضج السوق

لا تزال عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها في مرحلة مفاهيمية مبكرة (TRL2). إذ تتمحور الفكرة حول دمج العقد الذكية مع قدرات إعادة التشكيل الفورية في أنظمة توزيع المياه، مستفيدةً بذلك من التحليلات التنبؤية والخوارزميات المتقدمة. وقد صيغت الأسس النظرية بالاعتماد على التطورات في الشبكات الذكية وإنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي من مجالات البنية التحتية الأخرى، مثل: شبكات الطاقة والاتصالات السلكية واللاسلكية. في حين أن هناك حاجة واضحة إلى حلول متقدمة لإدارة التسرب، خاصة في المناطق التي تعاني من ندرة المياه مثل المملكة العربية السعودية، إلا أن هذه التقنية لم تُحدد بعد مع حالات استخدام واضحة أو نماذج أعمال أو عروض قيمة (MRL1).

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. جامعة آلبورغ
2. **مركز التميز للتفاعل المعرفي (CITEC) ، جامعة بيليفيلد**
3. شركة جروندفوس
4. كلية لندن الإمبراطورية
5. جامعة كاليفورنيا
6. **جامعة إكسيتر**
7. جامعة كومنويلث فرجينيا، مركز الأمن السيبراني الصناعي للأنظمة المادية والسيبرانية

الرؤى والإحصائيات

ستمكن عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها على المدى الطويل من تعزيز مرونة البنية التحتية للمياه، وتقليل خسائرها بشكل كبير، وتقليل التدخل اليدوي للكشف عن التسرب وإصلاحه.

الأثر والإحصائيات

- **التكيف الديناميكي مع الظروف البيئية**: تركّز أبحاث أنظمة التوطين ذاتية التهيئة على أهمية التكيف الذاتي مع الظروف البيئية. ويمكن أن يؤدي تنفيذ العقد التي تعيد تشكيل ذاتها إلى تمكين شبكات المياه من التكيف مع الظروف المتغيرة، مما يعزز المرونة والكفاءة التشغيلية. مجلة ACM Transactions on Embedded Computer Systems
- **تخفيف التسرب الاستباقي بإعادة التشكيل الذاتي**:يمكن أن تقوم عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها بتعديل تدفق المياه والضغط بشكل ديناميكي وفوري بناءً على أوجه الخلل المكتشفة، مما يخفف من مخاطر التسرب بشكل استباقي قبل أن تتفاقم. وهذا من شأنه أن يحول النموذج من إصلاحات التسرب التفاعلية إلى التحسين المستمر والمستقل للنظام. مجلة Engineering Proceedings
- **دعم تكامل المدن الذكية والحوكمة القائمة على البيانات**: كجزء من شبكات المياه الذكية الأوسع نطاقاً، يمكن أن تتكامل هذه العقد بشكلٍ سلس مع منصات إنترنت الأشياء والتوائم الرقمية، مما يوفر بيانات آنية لإدارة المياه على مستوى البلدية. وهذا من شأنه تعزيز عملية اتخاذ القرارات المستندة إلى البيانات، وتحسين الامتثال التنظيمي، ودعم مبادرات الاستدامة في التخطيط الحضري. مجلة المعلوماتية المائية (Hydroinformatics)
- **تعزيز كفاءة الطاقة من خلال الضبط الذاتي**: حققت البروتوكولات التي تراعي العوامل البيئية-كالتيارات المائية- وفورات كبيرة في الطاقة، ويمكن أن يؤدي دمج عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها وتتكيف مع مثل هذه العوامل إلى تحقيق كفاءة كبيرة في استهلاك الطاقة في توزيع المياه. مجلة Sensors

تبني التقنية

اعتبارًا من عام 2024، لا تزال تقنية عقد شبكة المياه التي تعيد تشكيل ذاتها في مراحلها الأولى، حيث تركز الأبحاث بشكل أساسي على التصورات الأولى وتكييف الرؤى الناتجة عن بُنى الشبكات التكيفية في أنواع الشبكات الأخرى، مثل الطاقة.

الوضع الراهن

- **تحديد المفاهيم الخاصة بشبكات توزيع المياه التكيفية**: قدمت الأبحاث فكرة هياكل الشبكات القابلة لإعادة التشكيل الديناميكي في شبكات المياه لتحسين التحكم في الضغط وتعزيز مرونة النظام. ويدمج هذا النهج ما بين مزايا مناطق تقسم شبكات المياه (DMAs) مع الشبكات المتداخلة واسعة النطاق، بهدف تحسين إدارة التسرب والمرونة التشغيلية. مجلة المعلوماتية المائية (Hydroinformatics)
- **التحسين الموزع للتحكم في الشبكة**: طرحت الدراسات الحديثة نماذج تحكم جديدة تستخدم التحسين الموزع غير المحدب لتحسين عمليات الضغط وجودة المياه في شبكات التوزيع، وتهدف هذه النماذج إلى تحسين الكفاءة التشغيلية والمتانة، والتي تعتبر ضرورية لتطوير قدرات إعادة التشكيل الذاتي. مجلة إدارة الموارد المائية (Water Resources Management)
- **المخططات البيانية الدقيقة القائمة على القواعد الفيزيائية**: طُبقت الابتكارات في مجال التعلّم الآلي- مثل المخططات البيانية الدقيقة القائمة على القواعد الفيزيائية على أنظمة توزيع المياه بهدف تقدير الحالة الهيدروليكية على نحو فعال، إذ توفر هذه النماذج أوقات محاكاة أسرع وأعلى دقة، مما يسهم في المعرفة التأسيسية اللازمة لتطوير العقد التي تعيد تشكيل ذاتها. وقائع مؤتمر AAAI للذكاء الاصطناعي 2024

الدروس المستفادة عالميًّا

- **دمج آليات التحكم التكيفي**: يمكن أن يؤدي تنفيذ استراتيجيات التحكم التكيفي إلى تعزيز كفاءة أنظمة توزيع المياه، وتشير الأبحاث إلى أن مخططات التحكم التكيفية القائمة على إنترنت الأشياء تتفوق على الطرق التقليدية، مما يشير إلى الحاجة إلى مزيد من الدراسة في هذا المجال. معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات
- **التحسين التكيفي القوي للتنبؤ بالطلب على المياه**: إن استخدام نهج قوي متعدد الخطوات للتنبؤ بالطلب على المياه ضمن أطر الإدارة الذكية للمياه يمكن أن يحسن من مرونة النظام، إذ تدعم الأبحاث الإضافية في هذا المجال تطوير عقد قادرة على التكيف بشكل مستقل مع أحجام الطلب المتغيرة. مجلة Nature إصدار Scientific Reports
- **تطبيق تقنيات التعلم الآلي**: يمكن لتطبيقات التعلم الآلي في أنظمة توزيع المياه الذكية أن تعزز الصيانة التنبؤية والكفاءة التشغيلية، ويعد تحديد التحديات والتوجهات المستقبلية في هذا المجال أمرًا ضروريًا لتطوير قدرات إعادة التشكيل الذاتي. مجلة Artificial Intelligence Review

آفاق التقنية

من المتوقع أن تتطور عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها من النماذج المفاهيمية إلى تقنيات المرحلة التجريبية بحلول منتصف عام 2030، وذلك بالاعتماد على التطورات الأخيرة في محاكاة الشبكة والتوائم الرقمية وتقنيات التعلم الآلي.

دلائل التغيير

- **مختبر البف التحتية الذكية للمياه: نماذج اختبار قابلة لإعادة التشكيل للتحكم في البف التحتية للمياه وإدارتها**: تناقش هذه الورقة البحثية تطوير مختبر البف التحتية الذكية للمياه المصممة كنظام نموذجي يمكن تكوينه لتمثيل شبكات محددة لتوزيع المياه وجمع الصرف. كما يتيح إجراء بحوث تجريبية في التحكم في البف التحتية للمياه وإدارتها في ظل ظروف واقعية. Water
- **شبكات متكيّفة ديناميكيًا لدمج الإدارة المثلى للضغط وعناصر التحكم في التنظيف الذاتي**: يتناول هذا البحث التكامل بين الإدارة المثلى للضغط وعناصر التحكم في التنظيف الذاتي في شبكات توزيع المياه المتكيفة ديناميكيًا. كما يصوغ مشكلة تصميم ثنائية الأهداف لتحسين وضع صمامات التحكم وتشغيلها على النحو الأمثل، مما يوفر أساسًا مهمًا لإعادة التشكيل الذاتي للشبكة. مجلة Annual Reviews in Control

التوجه المستقبلي

- **الانتقال التدريجي من المفهوم إلى النموذج الأولي**: ستتقدم عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها من النماذج المفاهيمية إلى نماذج أولية وظيفية تُنشر في بيئات تجريبية خاضعة للرقابة بحلول أوائل ثلاثينات القرن الحالي، وستركز هذه النماذج التجريبية على الأرجح على مناطق حضرية محددة عالية الخطورة حيث يكون فقدان المياه أمرًا بالغ الأهمية، بدلاً من تطبيقات الشبكة على نطاق واسع. مجلة المعلوماتية المائية (Hydroinformatics)
- **التكامل مع التوائم الرقمية والتحليلات التنبؤية**: سيصبح تطوير التوائم الرقمية لشبكات المياه عامل تمكين رئيس لاختبار خوارزميات العقد التي تعيد تشكيل ذاتها وتحسينها، مما يتيح للمنشآت محاكاة استراتيجيات إعادة التشكيل دون المخاطرة بأعطال البنية التحتية في أرض الواقع. مجلة Artificial Intelligence Review
- **وظائف محدودة ذاتية التشغيل مع تدخل بشري**: لن تتحقق الاستقلالية الكاملة في إعادة تشكيل شبكات المياه على الأرجح بحلول منتصف ثلاثينات القرن العشرين، بل قد تعمل الأنظمة عوضًا عن ذلك بنموذج "التدخل البشري"، حيث تقترح العقد الذاتية التكوينات المثلى ولكنها تتطلب مصادقة بشرية لتنفيذها في البنية التحتية الأساسية. IAPP

دراسة حالة

عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها (Self-reconfiguring network nodes): التحسين الذاتي لشبكة المياه ومحاكاة البنية التحتية ذاتية التشكيل

يهدف مختبر البنى التحتية الذكية للمياه (SWIL)، وهو عبارة عن تعاون بين جامعة أليبورج وجامعة غرونينغن، إلى إحداث ثورة في إدارة البنى التحتية للمياه والتحكم فيها من خلال تطوير أنظمة ذكية وقابلة للتكيف، ويركز المختبر على ابتكار حلول فاعلة وسهلة الاستخدام تلبي احتياجات كل من المتخصصين في الصناعة والمستهلكين. ويتمثل أحد الأهداف المهمة في توفير منصة لاختبار التقنيات الناشئة التي تَعِد بتعزيز كفاءة توزيع المياه من خلال التحسين المستقل للشبكة.

يستخدم المختبر تصميمًا نموذجيًا قابلًا لإعادة التشكيل يمكّن الباحثين من محاكاة مجموعة واسعة من البنى التحتية للمياه، بما في ذلك شبكات توزيع المياه وأنظمة الصرف وشبكات التدفئة في المناطق. وتعد هذه المرونة أمرًا جوهريًا لتجربة عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها، حيث تتيح محاكاة هيكل الشبكة الديناميكية لضبط مسارات التدفق ومناطق الضغط بشكل مستقل، كما يدمج المختبر أنظمة المراقبة الآنية وخوارزميات التحكم المتقدمة ومنصات الحصول على البيانات،

لتقييم كيفية استجابة تقنيات إعادة التشكيل الذاتي لظروف الطلب المتغيرة وحالات التسرب والضغط التشغيلي.
تكمن إمكانات المختبر في قدرته على أن يكون بمثابة حقل اختبار واقعي لتقنيات المياه الذكية الناشئة، فمن خلال تمكين التجارب الخاضعة للرقابة سيساعد في التحقق من الجدوى التشغيلية ومكاسب الكفاءة وتحسينات المرونة التي توفرها هذه التقنيات. ويمكن لهذا البحث تسريع عملية انتقال العقد من النماذج النظرية إلى التطبيقات العملية، مما يسهم في تقليل خسائر المياه، وتحسين استهلاك الطاقة، وتعزيز موثوقية الشبكة في البنى التحتية الواقعية.

التقنيات البارزة

هـ .أجهزة استشعار موجة الضغط (Pressure wave sensors)

أجهزة استشعار موجات الضغط هي أجهزة متطورة تراقب موجات الضغط في الوقت الفعلي وتستخدم تحليلات عالية الدقة لاكتشاف أصغر الانحرافات الناجمة عن التسربات.

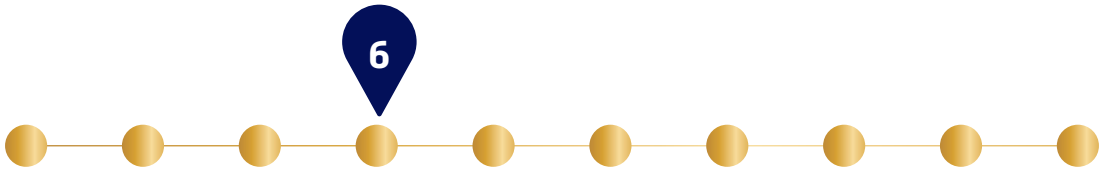
أجهزة استشعار موجة الضغط
Pressure wave sensors

أنظمة موجات الضغط هي تقنيات متطورة للكشف عن التسرب تراقب موجات الضغط العابر في خطوط الأنابيب لتحديد التسربات وتحديد مواقعها في الوقت الفعلي، وباستخدام أجهزة استشعار عالية الدقة وتحليل موجات الضغط السلبي، تتيح هذه الأنظمة الكشف المبكر، مما يقلل فقدان المياه والأضرار التي تلحق بالبنية التحتية. وتُعد أنظمة موجات الضغط ضرورية لشبكات المياه البلدية والمنشآت الصناعية ومشاريع المدن الذكية، وقد اعتُمدت في مرافق المياه في سنغافورة والشبكات الحضرية الأوروبية. وتعمل هذه التقنية على تحسين الكفاءة التشغيلية، لكنّ التحديات تشمل التكامل مع البنية التحتية القديمة ومتطلبات معالجة البيانات العالية، وستعمل التطورات المستقبلية على تعزيز التحليلات القائمة على الذكاء الاصطناعي واتصال إنترنت الأشياء والصيانة التنبؤية، مما يجعل أنظمة موجات الضغط أداة رئيسة في الدفع نحو إدارة المياه المرنة والفاعلة والمستدامة في جميع أنحاء العالم. وتوفر أجهزة استشعار موجة الضغط حلاً فعالًا من حيث التكلفة للكشف عن التسربات في الوقت الفعلي، وهي مناسبة بشكل كبير لشبكات المياه في المملكة، حيث تُكمل جهود الشركة الوطنية للمياه الحالية مثل مشاريع الكشف الصوتي عن التسربات.

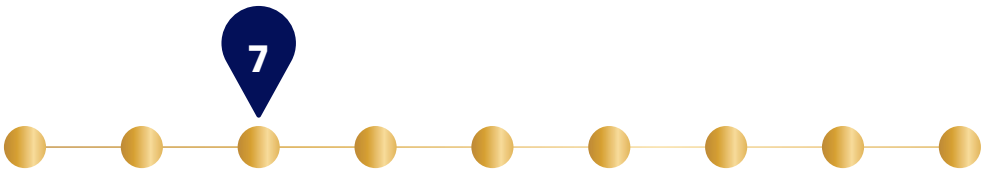
التقنيّة ونضج السوق

إن أنظمة موجات الضغط لا تزال في مرحلة التسويق التجاري المبكرة إلى مرحلة النمو (MRL 6)، مع زيادة الاعتماد عليها في المرافق الحضرية والتطبيقات الصناعية، وتعتبر هذه التقنية ثابتة في مجال الكشف الدقيق عن التسرب (MRL 7)، ولكنها تواصل التطور مع التحليلات القائمة على الذكاء الاصطناعي وتكامل إنترنت الأشياء. في حين أن البرامج التجريبية وعمليات النشر تتوسع في مناطق مثل أوروبا وسنغافورة وأمريكا الشمالية، ولا تزال هناك تحديات في قابلية التوسع والتكلفة والتكامل مع البنية التحتية القديمة، مما يحد من اعتمادها على نطاق واسع.

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 Atmos International

2 شركة بيوند ليميتس

3 شركة Echologics

4 شركة هيتاشي

5 شركة NAI

6 شركة Phyn

7 شركة سيمنس للطاقة

8 شركة Visenti

الرؤى والإحصائيات

تمكّن أنظمة موجات الضغط من الكشف عن التسرب بشكل أسرع، وتقليل هدر المياه، وخفض تكاليف الإصلاح، وإطالة عمر البنية التحتية، وتحسين الاستدامة في إدارة المياه.

الأثر والإحصائيات

- **القدرة على المراقبة لمسافات طويلة:** يمكن أن تنتقل موجات الضغط السالب (NPW) لمسافة تزيد عن 36 كم في خطوط الأنابيب السائلة بأقل قدر من التوهين مما يجعلها خيارًا مثاليًا لشبكات نقل المياه لمسافات طويلة. مجلة Mea-surement
- **حساسية عالية لاكتشاف التسرب:** يمكن لأنظمة موجات الضغط أن تكتشف التسربات الصغيرة التي تصل إلى 5% من معدل التدفق الاسمي للسائل، مما يضمن التدخل المبكر قبل أن تتفاقم خسائر المياه، ويعد هذا أمرًا بالغ الأهمية لمرافق المياه التي تدير البنية التحتية المتقادمة، حيث يمكن أن تسهم حتى التسريبات الصغيرة في فقدان ملايين اللترات من المياه سنويًا. معهد ASGMT
- **التحديد السريع للتسرب:** تسمح القدرة على تحليل موجات الضغط السلبي في غضون أجزاء من الثانية باكتشاف التسرب والاستجابة شبه الفورية، وتستخدم الأنظمة الحديثة معدلات مسح عالية السرعة تصل إلى 1 مللي ثانية، مما يضمن عدم وجود أي عيوب في الضغط دون اكتشافه. مجلة Applied Sciences
- **تحديد موقع التسرب بدقة:** تستخدم أنظمة موجات الضغط تحليل التأخير الزمني للنبضات وخوارزميات الارتباط المتبادل لتحديد مواقع التسريبات بدقة على امتداد خطوط الأنابيب، وبفضل هوامش الخطأ المنخفضة التي تصل إلى-1.46% 0.97%، تقلل هذه الأنظمة بشكل كبير من الحاجة إلى عمليات الحفر والتنقيب المكلفة. مجلة Sensors
- **القدرة على التكيف مع مختلف السوائل:** يمكن لأنظمة موجات الضغط الكشف بدقة عن التسربات لدى مجموعة كبيرة من السوائل، وتضمن هذه القدرة على التكيف أن أنواع خطوط الأنابيب المختلفة- سواء كانت مياه الشرب أو شبكات الري أو مياه الصرف أو محطات تحلية المياه- يمكن أن تستفيد من نهج موحد وقابل للتطوير للكشف عن التسرب.مجلة Sus-tainability
- **التكامل مع نظام (SCADA) باستخدام الحد الأدنى من حزم البيانات:** بدلاً من إرسال البيانات الخام بشكل مستمر، ترسل أنظمة موجات الضغط حزمًا مصغرة مختومة زمنيًا (100 بايت لكل 20-120 ثانية) إلى المحطات المركزية، مما يضمن معالجة أسرع مع استخدام الحد الأدنى من النطاق الترددي.مجلة IEEE Control Systems Magazine

تبنّي التقنيّة

بدءًا من عام 2024، تميز الاعتماد العالمي على أجهزة استشعار موجات الضغط لإدارة تسرب المياه بإدراك أهمية هذه التقنية كأداة قيمة في إدارة موارد المياه بكفاءة.

الوضع الراهن

- **اعتماد واسع النطاق في سنغافورة:** بعد تجارب ناجحة للكشف عن 13 تسربًا على مدى ثلاث سنوات، بدأ مجلس المرافق العامة (PUB) لدى وكالة المياه الوطنية في سنغافورة بنشر 1200 جهاز استشعار على مستوى الجزيرة لرصد التسرب تدريجيًا منذ عام 2017. مجلة المياه الذكية
- **التطورات في الكشف عن التسربات في المنازل الذكية:** شهدت التطورات الأخيرة دمج تحليل موجات الضغط في تقنيات المنازل الذكية، مما يتيح الكشف عن التسربات الخفية داخل أنظمة المياه السكنية. الرابطة الوطنية للعاملين في بناء المنازل
- **تطوير البنية التحتية لشركة De Watergroep:** خصصت شركة **De Watergroep**، وهي شركة مياه بلجيكية، 17.8 مليون يورو لتركيب 400 جهاز استشعار جديد للتدفق وموجات الضغط واستبدال 300 جهاز تسجيل بيانات موجود، وتهدف هذه المبادرة إلى تعزيز الكشف عن التسرب وتقليل الفاقد من المياه عبر شبكة خطوط الأنابيب التي يبلغ طولها 34,000 كم. مجلة **Asset Performance**

الدروس المستفادة عالميًا

- **حساسية أجهزة الاستشعار مقارنة بالنتائج الإيجابية الخاطئة:** يمكن لأجهزة استشعار موجات الضغط عالية الحساسية أن تؤدي إلى نتائج موجبة خاطئة بسبب تقلبات الضغط الطبيعية، مما يؤدي إلى صدور تنبيهات غير ضرورية. ويعد تحقيق التوازن بين الحساسية والدقة أمرًا بالغ الأهمية لتقليل هذه الحالات. شركة **Laiier**
- **التقييم الشامل للشبكة:** من الضروري إجراء تقييم شامل لشبكة توزيع المياه لتحديد المناطق المعرضة للخطر، وتحسين وضع أجهزة الاستشعار للكشف الفاعل عن التسرب، إذ يعزز هذا النهج من كفاءة نشر أجهزة استشعار موجات الضغط. مجلة Sensors
- **التوافق بين أنواع أجهزة الاستشعار:** يعمل دمج أنواع مختلفة من أجهزة الاستشعار- مثل أجهزة استشعار الضغط وأجهزة الاستشعار الصوتية- على تعزيز دقة الكشف عن التسرب في أنظمة توزيع المياه من خلال توفير بيانات تكميلية، مما يؤدي إلى تحديد التسريبات ومواقعها بشكل أكثر موثوقية. مجلة Water

آفاق التقنية

خلال المستقبل القريب، من المتوقع أن تتطور أجهزة استشعار موجات الضغط إلى أنظمة متكاملة ومتعددة ذات إمكانات أفضل من حيث الدقة والقدرات التنبؤية في الآنية.

دلائل التغيير

- **تقنيات تحديد موقع التسرب التكرارية:** اقترحت الدراسات الحديثة طرقًا تستخدم الحد الأدنى من أجهزة استشعار الضغط إلى جانب المحاكاة الفيزيائية لتحديد مواقع التسرب بشكل متكرر، وتحسين نشر أجهزة الاستشعار وتقليل التكاليف. مجلة Systems & Control
- **نماذج التعلم الآلي القائمة على القوانين الفيزيائية:** أدى تطبيق نماذج التعلّم الآلي القائمة على القوانين الفيزيائية إلى تحسين عملية تقدير الطلب غير المنتظم على المياه، وبالتالي تحسين عملية الكشف عن التسربات وتحديد مواقعها. مجلة Water Research
- **النشر الأمثل لأجهزة استشعار الضغط:** استحدث باحثون صينيون منهجية جديدة لتحسين توزيع أجهزة استشعار الضغط في شبكات توزيع المياه، بهدف تحسين كفاءة تحديد التسرب. مجلة Sensors

التوجه المستقبلي

- **شبكات الاستشعار الهجينة لتعزيز التحقق من التسرب:** من المرجح أن تصبح شبكات الاستشعار الهجينة، التي تجمع بين أجهزة استشعار موجات الضغط مع أجهزة الاستشعار الصوتية والحرارية والتدفق، بمثابة المعيار الصناعي للكشف الشامل عن التسرب، مما يقلل من النتائج الإيجابية الخاطئة بشكل كبير. مجلة Water
- **التحول نحو الحلول القائمة على الحوسبة السحابية والحوسبة الطرفية:** ستُعالج البيانات من أجهزة استشعار موجات الضغط بشكل متزايد باستخدام أجهزة الحوسبة الطرفية لإجراء تحليل محلي أسرع مع منصات سحابية للتعامل مع تخزين البيانات على المدى الطويل والتحليلات المتقدمة. مجلة Sensors
- **تصغير الحجم وتحسين الدقة:** تشير التطورات الأخيرة إلى أن أجهزة استشعار موجات الضغط أصبحت أكثر صغرًا وكفاءة في استخدام الطاقة، مما يسمح بتسهيل نشرها في أنظمة التوزيع السكنية دون المساس بدقة الكشف. مجلة Water

دراسة حالة

أجهزة استشعار موجات الضغط: الكشف الذكي عن تسرب المياه والصيانة التنبؤية باستخدام أجهزة استشعار موجات الضغط.

تهدف مبادرة المياه الذكية في سنغافورة، التي يقودها مجلس المرافق العامة (PUB)، إلى تعزيز أمن المياه واستدامتها من خلال اعتماد تقنيات متقدمة، من بينها أجهزة استشعار موجات الضغط، ونظرًا لمحدودية الموارد المائية الطبيعية في سنغافورة واعتمادها على المياه المستوردة، فإن تقليل المياه غير المتجددة - أي المياه المفقودة بسبب التسربات أو السرقة أو عدم دقة القياس - يعد أولوية وطنية بالغة الأهمية، ويتمثل الهدف الرئيس للمبادرة في الكشف عن تسربات المياه والتخفيف من حدتها في وقت مبكر، مما يقلل من خسائرها، ويضمن موثوقية الإمدادات، ويحسن الكفاءة التشغيلية في مواجهة الطلب المتزايد على المياه في المناطق الحضرية.

نشر المجلس أكثر من 300 محطة استشعار على مستوى الجزيرة بأكملها، لرصد معايير مثل جودة المياه والضغط والتدفق في خطوط أنابيب مياه الشرب، وتوفر هذه المستشعرات بيانات آنية تتيح الكشف المبكر عن التسريبات وأوجه الخلل، ويتيح دمج أجهزة استشعار موجات الضغط إمكانية التحديد الدقيق لمواقع التسرب من خلال تحليل عابرات الضغط داخل الشبكة

كان لمبادرة المياه الذكية تأثير عميق على إمكانيات إدارة المياه في سنغافورة:

- تقليل خسائر المياه: نجح مجلس المرافق العامة في خفض مستويات الفاقد من المياه غير الصالحة للشرب في سنغافورة إلى حوالي 5%، مما أدى إلى تقليل عدد التسريبات المسجلة لكل 100 كيلومتر من طول الشبكة من 10 إلى 5.
- استجابة أسرع للتسربات: تتيح البيانات الآنية الكشف الفوري عن الحالات الشاذة، مما يقلل من الوقت اللازم لتحديد التسريبات وإصلاحها.
- الصيانة التنبؤية: تدعم البيانات استراتيجيات الصيانة التنبؤية، مما يتيح لمجلس المرافق العامة توقع الأعطال المحتملة قبل حدوثها، وبالتالي تعزيز مرونة البنية التحتية.

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

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.

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 المفصّلة

أُعد 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.

ومن 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، مما يضمن مرونة صناع القرار وإلمامهم بالمستجدات في عصر الابتكار السريع.

تُعد القدرة على معالجة المعلومات عاملاً رئيسًا 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

ولتحديد أكثر التقنيات الناشئة ذات الصلة في مجال تركيز هذا التقرير - إدارة التسرب الذكية - أُجري بحث قائم على الكلمات المفتاحية في قاعدة بيانات منصة نبراس في مجال إدارة التسرب الذكية، فمثلاً: تضمنت استفسارات البحث المصطلحات الأساسية "مياه" و"تسرب" مع مصطلحات إضافية مثل "ذكي" و"مستشعر" و"إنترنت الأشياء" و"كشف" و" مراقبة" و"تحليلات" وغيرها، ولضمان حداثة الإشارات المختارة لإجراء مزيد من التحليل، اعتُمد إطار زمني لمدة خمس سنوات لجمع هذه المؤشرات. إذ أظهر نهج البحث توجيه 9600 إشارة من قاعدة البيانات لإجراء المزيد من التحليل، وذلك ضمن سياق إدارة التسرب الذكية. وبمساعدة تقنيات النماذج اللغوية الكبيرة (LLM) المعتمدة في قاعدة بيانات منصة نبراس، صُنفت التقنيات المذكورة في كل مؤشر ومن ثم أُعدت قائمة طويلة بالتقنيات المذكورة خلال السنوات الخمس الماضية، كما تم التوصل من خلال هذا النهج إلى 109 تقنيات متميزة في مجال إدارة التسرب الذكية، والتي خضعت لتقييم أكثر دقة.

الخطوة الثانية - تقييم التقنيات وإرساء المشهد التقني

تماشياً مع هدف هذا التقرير المتمثل في توضيح التقنيات الناشئة وإلهام الابتكار، أُنشئ مشهد تقني شامل من القائمة الطويلة للتقنيات المذكورة في المؤشرات. أولاً، استُبعدت جميع التقنيات التي لم يعد من الممكن اعتبارها ناشئة، أي تلك التي دخلت بالفعل مرحلة التبني السائد المبكر في الأسواق ذات الصلة (بمعنى آخر، التي قُيمت في كل من TRL 9 و MRL 9). على سبيل المثال، وأدى ذلك إلى استبعاد تقنيات مثل "عدادات المياه الذكية" و"الأنظمة المقيدة" من مشهد التقنية الناشئة المعروض في هذا التقرير. ثانياً، قُلل التداخل المفاهيمي بين التقنيات من خلال إدراج التقنيات المتشابهة أو الفريدة (مثل "أجهزة الاستشعار الروبوتية" و"السباحة الحرة" و"الأنظمة غير المقيدة"). وأخيراً، جُمعت التقنيات في مجالات تقنية بناءً على غرض الاستخدام والخصائص الوظيفية. فمثلاً: في مجال إدارة التسرب الذكية أدى هذا النهج إلى ظهور مشهد تقني ناشئ وتقنيات ناشئة عبر خمس مجالات: "التحليلات والمحاكاة"، و"المواد والطلاءات"، و"تحسين الشبكة والبنية الأساسية"، و"الاستشعار والكشف"، و"التحكم والاستجابة".

بطاقة تقييم معايير الختيار

	التقنية	Terminology	مستوى (TRL) جاهزية التقنية	الأثر المحتمل	الزيادة في الإشارات
1	التوائم الرقمية ذاتية التكيف	Self-Adapting Digital Twins	7-6	عالٍ جداً	عالي جداً
2	الأنظمة العائمة	Free-swimming Systems	9-8	عالٍ جداً	عالي
3	المواد ذاتية الإصلاح	Self-healing Materials	5-4	عالٍ	عالٍ جداً
4	عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها	Self-Reconfiguring Network Nodes	3-1	عالٍ	عالٍ
5	أجهزة استشعار موجة الضغط	Pressure Wave Sensors	7-6	عالٍ	عالٍ
6	نظام المعلومات الجغرافية والذكاء الاصطناعي الجيومكاني	GIS & Geospatial AI	9-8	عالٍ جداً	عالٍ
7	الذكاء الاصطناعي السلوكي الآني	Real-Time Behavioral AI	3-1	عالٍ جداً	عالٍ
8	أجهزة الاستشعار بالألياف البصرية	Fiber Optic Sensing	9-8	عالٍ	عالٍ
9	أنظمة الكشف والتشخيص القائمة على الأقمار الصناعية	Satellite-based Detection & Diagnosis	9-8	عالٍ	عالٍ
10	النمذجة الهيدرولوجية الهجينة	Hybrid Hydrological Modeling	7-6	عالٍ	عالٍ
11	الحواجز الهيدروجيل	Hydrogel Barriers	7-6	عالٍ	عالٍ
12	أنظمة التحكم بالضغط الديناميكي القائمة على إنترنت الأشياء	IoT-based Dynamic Pressure Control	7-6	عالٍ	عالٍ
13	طبقات الجرافين	Graphene-Based Layers	5-4	عالٍ	عالٍ
14	الروبوتات الدقيقة والنانوية	Micro - and Nanobots	5-4	عالٍ	عالٍ
15	أجهزة الاستشعار الكمية	Quantum Sensors	3-1	عالٍ	عالٍ
16	المنصات السحابية	Cloud-Based Platforms	9-8	عالٍ	متوسط
17	المواد المقاومة للتآكل	Corrosion-resistant Materials	9-8	عالٍ	متوسط
18	المضخات والصمامات الذكية	Smart Pumps & Valves	9-8	عالٍ	متوسط

	التقنية	Terminology	مستوى (TRL) جاهزية التقنية	الأثر المحتمل	الزيادة في الإشارات
19	الحوسبة الطرفية والذكاء الاصطناعي الطرفي	Edge Computing & Edge AI	7-6	عالٍ	متوسط
20	شبكات الاستشعار الذكية	Smart Sensor Networks	7-6	عالٍ	متوسط
21	أدوات الواقع المعزز لصيانة خطوط الأنابيب	AR Tools for Pipeline Maintenance	7-6	عالٍ	متوسط
22	الصمامات المتقدمة العازلة للتسرب	Advanced Leak-Isolating Valves	5-4	عالٍ	متوسط
23	أنظمة كشف التسّرب النانو بصرية	Nano-optical Leak Detection	3-1	عالٍ	متوسط
24	سدادات المعادن السائلة	Liquid Metal Seals	3-1	عالٍ	متوسط
25	المواد والطلاءات الاستشعارية	Sensorial Materials & Coatings	7-6	متوسط	عالٍ
26	التحليل الطيفي للانبعاثات الضوئية	Optical Emission Spectroscopy	7-6	متوسط	عالٍ
27	رادار الاختراق الأرضي	Ground Penetrating Radar (GPR)	9-8	متوسط	متوسط
28	أجهزة استشعار المجال المغناطيسي	Magnetic Field Sensors	7-6	متوسط	متوسط
29	الأنظمة ذاتية الإصلاح	Autonomous Repair Systems	7-6	متوسط	متوسط
30	المذبذبات الحدودية السائلة	Fluidic Oscillators	5-4	متوسط	متوسط
31	متابعة حالة الأصول	Asset Condition Monitoring	9-8	عالٍ	منخفض
32	أنظمة الليدار المتحركة	Mobile LiDARs	9-8	منخفض	متوسط

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

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

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

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

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

قاموس المصطلحات

	المصطلح	الوصف
1	المنصات السحابية Cloud-Based Platforms	المنصات المركزية التي تدمج البيانات من أجهزة إنترنت الأشياء، وأجهزة الاستشعار، والإدارة المركزية للأحداث (CEM)، وأنظمة سكادا (SCADA) للكشف عن التسرب في الوقت الفعلي وتنسيق إجراءات الاستجابة.
2	نظام المعلومات الجغرافية GIS والذكاء الاصطناعي الجيومكاني Geospatial AI	يجمع نظام المعلومات الجغرافية والذكاء الاصطناعي الجيومكاني بين البيانات الجيومكانية والذكاء الاصطناعي لتحليل شبكات المياه والتنبؤ بأي تسّربات محتملة وتحسين تخطيط البنية التحتية.
3	الحوسبة الطرفية والذكاء الاصطناعي الطرفي Edge Computing & Edge AI	تقوم الحوسبة الطرفية لشبكات المياه بمعالجة البيانات محليًا على أجهزة إنترنت الأشياء، مما يتيح التحليل الفوري واتخاذ القرارات السريعة لتحسين العمليات والكشف عن الحالات الشاذة.
4	النمذجة الهيدرولوجية الهجينة Hybrid Hydrological Modeling	تجمع الوسائل الهجينة للمحاكاة الهيدرولوجية بين النماذج القائمة على الفيزياء والخوارزميات القائمة على الذكاء الاصطناعي لمحاكاة ديناميكيات تدفق المياه والتنبؤ بها، والكشف عن التسربات وتقييم أداء الشبكة.
5	التوائم الرقمية ذاتية التكيف Self-Adapting Digital Twins	تعمل منصات التوائم الرقمية لشبكات المياه على إنشاء نسخ افتراضية آنية ومتماثلة لأنظمة توزيع المياه، ما يمكّن المرافق من مراقبة أداء الشبكة ومحاكاته وتحسينه.
6	الذكاء الاصطناعي السلوكي الآني Real-Time Behavioral AI	يصف الذكاء الاصطناعي السلوكي الآني الأنظمة المصممة لفهم سلوك شبكات توزيع المياه والتنبؤ به بصورة آنية لتحفيز الاستجابات بصورة مستقلة.
7	المواد المقاومة للتآكل Corrosion-resistant Materials	صُممت المواد المقاومة للتآكل لمنع تحلل خطوط الأنابيب والبنية التحتية في البيئات الصعبة، بما يضمن المتانة والموثوقية مع مرور الوقت.
8	حواجز الهيدروجيل Hydrogel Barriers	تستخدم حواجز الهيدروجيل الخاصة بتخفيف التسرب مواد هيدروجيل عالية الامتصاص تتمدد عند ملامسة الماء المتسرب، ما يشكل حاجزًا فعليًا لاحتواء التسرب والحد منه.
9	المواد والطلاءات الاستشعارية Sensorial Materials & Coatings	تشير إلى مواد أنابيب مرنة مزودة بأجهزة استشعار نانوية تكتشف تغيرات الضغط والرطوبة ودرجة الحرارة، ما يتيح تحديد التسرب بصورة فورية.
10	المواد ذاتية الإصلاح Self-healing Materials	تشير إلى مواد مبتكرة قادرة على إصلاح الأضرار بصورة ذاتية، مثل الشقوق أو التسربات، في خطوط أنابيب المياه والبنية التحتية
11	طبقات الجرافين Graphene-Based Layer	تكشف المستشعرات المغلفة بالجرافين عن التسربات الصغيرة من خلال تحديد التغيرات في الرطوبة ودرجة الحرارة والضغط على المستوى الجزيئي.
12	سدادات المعادن السائلة Liquid Metal Seals	تشير إلى سدادات عالية التكيف تستخدم معادن سائلة للاستجابة لتغيرات الضغط ومنع التسرب.
13	متابعة حالة الأصول Asset Condition Monitoring	تستخدم أنظمة الكشف عن حالة أصول المستشعرات وتحليلات البيانات وأدوات المراقبة لتقييم صحة البنية التحتية الأساسية للمياه وأدائها.
14	المضخات والصمامات الذكية Smart Pumps & Valves	تستخدم المضخات والصمامات الذكية مستشعرات مدمجة وتتصل بإنترنت الأشياء لمراقبة تدفق المياه وضغطها وضبطها ديناميكيًا، ما يؤدي إلى تحسين الكفاءة وتقليل استهلاك الطاقة.
15	أنظمة التحكم بالضغط الديناميكي القائمة على إنترنت الأشياء IoT-based Dynamic Pressure Control	تستخدم أنظمة التحكم بالضغط الديناميكي القائمة على إنترنت الأشياء مستشعرات ومشغلات متصلة لمراقبة ضغط المياه وتحسينه عبر شبكات التوزيع بصورة فورية.

	المصطلح	الوصف
16	الصمامات المتقدمة العازلة للتسرب Advanced Leak-Isolating Valves	صمامات متقدمة تكتشف التسربات وتقوم بعزلها تلقائيًا دون تعطيل الشبكة بالكامل.
17	عقد الشبكة التي تعيد تشكيل ذاتها Self-Reconfiguring Network Nodes	تشير إلى العُقد الذكية التي تعيد تشكيل الاتصالات وهيكل الشبكة بشكل مستقل للتكيف مع الطلب وتقليل جوانب الضعف.
18	أجهزة الاستشعار بالألياف البصرية Fiber Optic Sensing	تستخدم الألياف الضوئية للكشف عن التسربات وتغيرات الضغط والإجهاد الهيكلي عن طريق التحليل، وغالبًا ما يكون ذلك بالاقتران مع أجهزة الاستشعار الصوتي الموزع (DAS).
19	رادار الاختراق الأرضي GPR	يستخدم الموجات الكهرومغناطيسية للكشف عن الحالات الشاذة تحت السطح، مثل تسربات المياه وحالة خطوط الأنابيب.
20	أنظمة الليدار المتحركة Mobile LiDARs	تستخدم الماسحات الضوئية الليزرية المحمولة (أنظمة الليدار المتحركة) تقنية الليزر لرسم خرائط تفصيلية ثلاثية الأبعاد لخطوط الأنابيب والبنية التحتية، وتحديد العيوب والمشاكل الهيكلية.
21	أنظمة الكشف والتشخيص القائمة على الأقمار الصناعية Satellite-based Detection & Diagnosis	تعمل أنظمة الكشف عن التسرب القائمة على الأقمار الصناعية بتحليل بيانات الاستشعار عن بُعد لتحديد التغيرات في رطوبة التربة والظروف السطحية التي تشير إلى تسرب المياه من خطوط الأنابيب.
22	أجهزة استشعار المجال المغناطيسي Magnetic Field Sensors	تقوم أجهزة استشعار المجال المغناطيسي برصد الاختلافات في المجالات المغناطيسية للكشف عن الحالات الشاذة الهيكلية، مثل الشقوق أو التسّربات في خطوط الأنابيب.
23	التحليل الطيفي للانبعاثات الضوئية OES	يقوم التحليل الطيفي للانبعاثات الضوئية (OES) بتحليل الضوء المنبعث من الذرات المثارة في عينات المياه للكشف عن التغيرات في التركيب الكيميائي أو التلوث أو تحلل مواد الأنابيب.
24	أجهزة استشعار موجة الضغط Pressure wave sensors	تشير إلى اجهزة استشعار متطورة تراقب موجات الضغط بصورة فورية وتستخدم تحليلات عالية الدقة لتحديد أصغر الاختلالات الناجمة عن التسّرب.
25	شبكات الاستشعار الذكية Smart Sensor Networks	تستخدم شبكة الاستشعار الذكية تقنية إنترنت الأشياء (IoT) لمراقبة المعايير الرئيسة في أنظمة توزيع المياه، ما يوفر بيانات فورية للكشف عن التسرب وتحسين الأداء. كما تتابع هذه المستشعرات بيانات مياه الصرف بشكل مستمر، مثل الرقم الهيدروجيني، والعكارة، والتركيب الكيميائي، مما يتيح الكشف الفوري عن الحالات الشاذة، وتعزيز كفاءة المعالجة، وضمان الامتثال للمعايير البيئية، ويدعم جهود إعادة الاستخدام بشكل فعال
26	المذبذبات الحدودية السائلة Fluidic Oscillators	تقوم بتحليل الاختلافات في اضطراب التدفق وأنماط التذبذب داخل خطوط الأنابيب لتحديد مواقع التسرب المحتملة.
27	أنظمة كشف التسّرب النانو بصرية Nano- optical Leak Detection	تكتشف الأنظمة البصرية المحعومة بتقنية النانو عن التسربات عن طريق قياس التغيرات في انعكاس الضوء وانكساره الناجمة عن تسرب المياه من خطوط الأنابيب.
28	أجهزة الاستشعار الكمية Quantum Sensors	تستخدم الظواهر الكمية مثل التراكب والتشابك للكشف عن التغيرات الدقيقة في ضغط المياه أو تدفقها التي قد تشير إلى وجود تسرب.
29	الأنظمة العائمة Free-swimming Systems	أجهزة مستقلة (مثل أجهزة SmartBall مزودة بأجهزة استشعار تتنقل عبر خطوط الأنابيب للكشف عن التسربات وجيوب الغاز والعيوب الهيكلية.

	المصطلح	الوصف
30	أدوات الواقع المعزز لصيانة خطوط الأنابيب AR Tools for Pipeline Maintenance	تساعد أدوات الواقع المعزز (AR) فرق صيانة خطوط الأنابيب من خلال عرض البيانات والمخططات والمعلومات التشخيصية الفورية على البنية التحتية المادية لخطوط الأنابيب.
31	الأنظمة ذاتية الإصلاح Autonomous Repair Systems	تستخدم الأنظمة ذاتية الإصلاح روبوتات وأدوات متطورة للكشف عن التسربات أو الأضرار الهيكلية في خطوط الأنابيب وإصلاحها دون الحاجة إلى التحخل اليدوي.
32	الروبوتات الدقيقة والنانوية Micro - and Nanobots	تشير إلى أنظمة روبوتية دقيقة ونانوية مصممة للتنقل وفحص خطوط الأنابيب ذات الأقطار الصغيرة.
33	الذكاء الاصطناعي المعزز بالاسترجاع (RAG AI)	تقنية الذكاء الاصطناعي المعزز بالاسترجاع (RAG AI) التي تجمع بين البحث واستجابات الذكاء الاصطناعي.
34	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.
35	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.
36	الأثر المحتمل	يشر 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.
37	الأثر المترتب	يشر 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.

شركاؤنا

وزارة البيئة والمياه والزراعة
Ministry of Environment Water & Agriculture

الهيئة السعودية للمياه
Saudi Water Authority

شركة المياه الوطنية
National Water Company

المؤسسة العامة للري
Saudi Irrigation Organization
المملكة العربية السعودية

شركة نقل وتقنيات المياه
WATER TRANSMISSION AND TECHNOLOGIES CO.

مؤسسة سقاية الأهلية
Sekaya Charitable Foundation
أفضل الصدقة

المؤسسة العامة لتحلية المياه المالحة
Saline Water Conversion Corporation

الشركة السعودية لشراكات المياه
Saudi Water Partnership Company

مائي
MAEE

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