دور الابتكار الرقمي في إدارة الموارد المائية: سنغافورة نموذجا

The Role of Digital Innovation in Water Resource Management: Singapore as a Model

إيمان زكري

جامعة العربي بن مهيدي، مخبر المحاسبة، المالية، الجباية والتأمين (COFIFAS)، جامعة أم البواقي (الجزائر)،

imene.zekri@univ-oeb.dz

تاريخ الاستلام:2026/05/15 تاريخ القبول: 2026./06/18 تاريخ النشر:15 /2026/09

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل دور الابتكار الرقمي في إدارة الموارد المائية في سنغافورة، من خلال توضيح كيفية توظيف التقنيات الرقمية المتقدمة في تحسين الحوكمة المائية. وتوضيح كيف يمكن الاستفادة من تجربة سنغافورة وتكييفها في الدول التي تعاني من ندرة المياه.

توصلت الدراسة إلى أن اعتماد سنغافورة لنموذج المياه الذكية أسهم بشكل ملموس في تقليص الفاقد المائي، تحسين كفاءة التشغيل، وتعزيز القدرة الاستباقية في إدارة المخاطر المائية المرتبطة بالتغيرات المناخية، وأوصت الدراسة بضرورة تبني استراتيجيات وطنية للابتكار الرقمي المائي، وتعزيز الأطر التنظيمية والمؤسسية، وتكييف التجربة السنغافورية وفق الخصوصيات الوطنية للدول التي تعاني من ندرة الموارد المائية.

كلمات مفتاحية: الابتكار الرقمي، الموارد المائية، التقنيات الرقمية، المياه الذكية، الحوكمة الذكية للمياه.

تصنيفات JEL : Q25، Q31، Q55 .

Abstract :

This study aims to analyze the role of digital innovation in the management of water resources in Singapore by clarifying how advanced digital technologies are employed to improve water governance. It also seeks to show how Singapore’s experience can be leveraged and adapted in countries facing water scarcity.

The study found that Singapore’s adoption of a smart water model has significantly contributed to reducing water losses, improving operational efficiency, and strengthening the proactive management of water risks associated with climate change. It further recommends adopting national strategies for digital water innovation, strengthening regulatory and institutional frameworks, and adapting the Singaporean experience to the specific national contexts of countries suffering from water scarcity.

Keywords: Digital innovation, water resources, digital technologies, smart water, smart water governance.

JEL Classification Codes : Q25, Q31, Q55.

المؤلف المرسل: إيمان زكري

1.مقدمة:

يشهد العالم في العقود الأخيرة تصاعدا غير مسبوق في التحديات المرتبطة بإدارة الموارد المائية، نتيجة تزايد الطلب على المياه، تغير الأنماط المناخية، التوسع الحضري المتسارع وتدهور نوعية الموارد المائية السطحية والجوفية. وقد أفضت هذه التحولات إلى جعل الأمن المائي قضية استراتيجية ذات أبعاد اقتصادية واجتماعية وبيئية، تفرض إعادة النظر في أساليب إدارة المياه وسياسات توزيعها واستغلالها، وهنا أظهرت المقاربات التقليدية في إدارة الموارد المائية محدوديتها في مواجهة هذه التحديات المركبة، الأمر الذي استدعى البحث عن حلول مبتكرة قادرة على رفع كفاءة الإدارة وتحسين الأداء المؤسسي.

في هذا الإطار، برز الابتكار الرقمي في قطاع المياه كأحد أهم المداخل الحديثة لتحديث نظم إدارة الموارد المائية، من خلال توظيف تقنيات رقمية متقدمة مثل العدادات الذكية، إنترنت الأشياء، الذكاء الاصطناعي، تحليل البيانات الضخمة ونظم المعلومات الجغرافية. وقد أتاح هذا التحول الرقمي إمكانات كبيرة لتحسين كفاءة استخدام المياه، الحد من الفاقد المائي، تعزيز مراقبة الشبكات وتحسين التخطيط والتنبؤ بالطلب، فضلا عن دعم اتخاذ القرار اعتمادا على بيانات دقيقة وفي الزمن الحقيقي.

وعلى الرغم من بروز تجارب دولية رائدة أثبتت فعالية الابتكار الرقمي في تحسين إدارة قطاع المياه، لاسيما في الدول المتقدمة وبعض الدول العربية، وتعد سنغافورة نموذجا دوليا متميزا في توظيف تقنيات الرقمية لإدارة المياه خاصة من ناحية ندرة الموارد المائية، وتقدم تجربتها دروسا قابلة للتكييف مع البلدان التي تواجه تحديات مماثلة. إلا أن العديد من الدول النامية ما تزال تواجه تحديات هيكلية ومؤسساتية وتقنية تحد من تعميم هذه الحلول الرقمية والاستفادة القصوى منها، ويتمثل ذلك في ضعف البنية التحتية الرقمية، ومحدودية الاستثمار، ونقص الكفاءات المتخصصة، إضافة إلى غياب رؤية استراتيجية متكاملة للتحول الرقمي في قطاع المياه. وهو ما يطرح تساؤلات جوهرية حول مدى قدرة الابتكار الرقمي على تحسين أداء قطاع المياه، وشروط نجاحه، وآليات تكييفه مع الخصوصيات الوطنية.

1.1.إشكالية الدراسة:

انطلاقا مما سبق، تتمحور إشكالية الدراسة حول التساؤل الرئيسي التالي:

كيف يساهم الابتكار الرقمي في تعزيز كفاءة واستدامة إدارة الموارد المائية في سنغافورة، وما إمكانية الاستفادة من هذا النموذج في دول تعاني من ندرة المياه؟

2.1.التساؤلات الفرعية:

يتفرع التساؤل الرئيسي إلى مجموعة من التساؤلات الفرعية وهي:

1. ما هي دوافع توجه سنغافورة نحو تبني الابتكار الرقمي في إدارة الموارد المائية؟
2. ما هي أهم التقنيات الرقمية المستخدمة في منظومة إدارة الموارد المائية في سنغافورة؟
3. كيف ساهمت التقنيات الرقمية المستخدمة في تحسين كفاءة التشغيل والخفض من الفاقد المائي وضمان الأمن المائي؟

4. إلى أي مدى يمكن نقل أو تكييف التجربة السنغافورية في الدول التي تعاني ندرة المياه؟

3.1.فرضيات الدراسة:

تنطلق الدراسة من جملة من الفرضيات، أهمها:

1. يشكل الابتكار الرقمي عاملا حاسما في رفع كفاءة إدارة الموارد المائية وتحقيق الاستدامة المائية؛

2. نجاح الابتكار الرقمي في قطاع المياه يرتبط بتكامل التكنولوجيا مع الحوكمة الرشيدة والاستثمار في رأس المال البشري؛

3. أثبتت التجربة السنغافورية قدرة التقنيات الرقمية على تجاوز قيود الندرة الطبيعية للمياه؛

4. إمكانية نقل النموذج السنغافوري إلى دول أخرى تظل مشروطة بمدى توافر البنية التحتية الرقمية والإطار المؤسسي الملائم.

4.1.أهمية الدراسة:

تكمن أهمية الدراسة في أهمية موضوع المياه في كافة دول العامل وندرة المياه ويمكن حصر أهمية الدراسة في ما يلي:

- تزايد الضغوط على الموارد المائية نتيجة ندرتها، التغيرات المناخية والنمو الحضري والصناعي المتسارع؛
- محدودية فعالية المقاربات التقليدية لإدارة الموارد المائية في مواجهة التحديات المائية المعاصرة؛
- بروز الابتكار الرقمي كمدخل استراتيجي لتحسين كفاءة إدارة المياه والانتقال من الإدارة التفاعلية إلى الإدارة الاستباقية؛
- الدور المحوري للتقنيات الرقمية في تقليص الفاقد المائي وتحسين جودة الخدمات وتعزيز الأمن المائي والاستدامة؛
- الحاجة الأكاديمية والعملية إلى إطار مفاهيمي يربط بين الابتكار الرقمي والحوكمة الذكية للمياه.

5.1.أهداف الدراسة:

تهدف الدراسة إلى:

- بناء إطار مفاهيمي متكامل للابتكار الرقمي في إدارة الموارد المائية؛
- تحليل تطور إدارة الموارد المائية من المقاربات التقليدية إلى النماذج الرقمية والذكية؛
- إبراز العلاقة بين الابتكار الرقمي وتحسين فعالية الحوكمة الذكية للمياه؛
- استعراض أبرز التقنيات الرقمية المستخدمة في إدارة الموارد المائية (إنترنت الأشياء، الذكاء الاصطناعي، SCADA، التوائم الرقمية)؛
- تحليل تجربة سنغافورة كنموذج رائد في توظيف الابتكار الرقميفي إدراة الموارد المائية؛
- استكشاف إمكانية نقل التجربة السنغافورية إلى دول تعاني من ندرة الموارد المائية.

6.1.المنهج المتبع:

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، من خلال تحليل الأدبيات النظرية والدراسات العلمية العربية والأجنبية المتعلقة بالابتكار الرقمي وإدارة الموارد المائية. كما تم توظيف منهج دراسة الحالة لتحليل تجربة سنغافورة في إدارة المياه، بالاعتماد على التقارير الرسمية للوكالة

الوطنية للمياه **(PUB)** والدراسات الأكاديمية الحديثة. وقد مكن هذا المنهج من الربط بين الإطار النظري والتطبيقي، وتحليل كيف ساهمت التقنيات الرقمية على كفاءة الإدارة المائية والحوكمة الذكية.

2. الإطار المفاهيمي للابتكار الرقمي في إدارة الموارد المائية:

في ظل تزايد الضغوط الناتجة عن ندرة الموارد المائية، التغيرات المناخية وارتفاع الطلب الحضري والصناعي، برزت الحاجة إلى تبني مقاربات جديدة تتجاوز أساليب الإدارة التقليدية نحو نماذج أكثر ذكاءا ومرونة. حيث يقوم الابتكار الرقمي على توظيف التقنيات الرقمية الحديثة في جمع البيانات المائية، تحليلها ودعم اتخاذ القرار، بما يساهم في الانتقال من إدارة تفاعلية إلى إدارة استباقية قائمة على المعرفة والبيانات.

1.2 مفهوم الابتكار الرقمي وتطوره في قطاع المياه:

يعرف الابتكار بأنه: "فكرة جديدة يمكن بلورتها في شكل منتج أو خدمة لم تكن موجودة من قبل." (علون و السبتي، 2019، صفحة 147) وغالبا ما ينشأ الابتكار استجابة لتفاعل المبتكر مع متطلبات السوق وتفضيلات المستهلكين من حيث الجودة والنوعية، إلى جانب مواكبة التطورات التكنولوجية المتسارعة. ويتحقق ذلك عبر ابتكار تقنيات حديثة تدعم الأجهزة والآلات، وتسهم في تطويرها ورفع إنتاجيتها، فضلا عن تحسين أساليب نقل وتوزيع وتجميع وتصنيع المنتجات الناتجة عن هذا الابتكار. (صافي، 2021، صفحة 278)

عادة عندما نفكر بالابتكار نفكر أولا في التكنولوجيا وكيفية إدخالها في ابتكار منتجات وخدمات جديدة كأنظة كمبيوتر، برمجيات وتكنولوجيات لها القدرة على إعادة تشكيل نظم الإنتاج وطريقة الأداء وإجراء تغييرات شاملة تزيد من جودة المنتوج وسهولة الحصول عليه أو سهولة التواصل مع المنتج وغيرها، (دارم، حاج عيسى، و قاسمية ، 2020، صفحة 13) وهو مايطلق عليه بالابتكار الرقمي والذي يواكب التطور التكنولوجي وتطبيق آليات التحول الرقمي.

حيث يعرف الابتكار الرقمي بأنه: "عملية إدماج التقنيات الرقمية مثل انترنت الأشياء، الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية وغيرها، في الأنشطة الاقتصادية والتنظيمية بهدف إحداث تحسينات جوهرية في المنتجات، الخدمات، العمليات ونماذج الأعمال، من أجل خلق قيمة مضافة مستدامة." (سعد الله و قانة، 2021، صفحة 76)

يشمل الابتكار الرقمي التحول الرقمي للشبكات المائية **(Digital Water)** بما في ذلك الرصد الذكي، التنبؤ بالطلب وكشف التسربات عبر الاستشعر عن بعد، لتحسين جودة الخدمات المائية وتدخلات إدارة المياه كما في أنظمة الري الذكي وإعادة التدوير. (جاوي، 2024، صفحة 118)

2.2.إدارة الموارد المائية بين المقاربات التقليدية والرقمية:

يعكس تطور أنظمة إدارة المياه تحولا أوسع في البنية التحتية الحضرية، حيث ينتقل من العمليات التفاعلية واليدوية إلى حوكمة ذكية قائمة على البيانات؛ وهي مراحل تطورية توضح كيف تكيفت منظمات المياه مع هذه التغيرات، تمثل كل مرحلة خطوة نحو مزيد من التكامل بين التقنيات الرقمية وتحسين قدرات اتخاذ القرار.

2.2.1. مرحلة المراقبة اليدوية: اعتمدت شركات المياه بشكل كبير على المراقبة اليدوية، والسجلات الورقية، والفحوصات الدورية لإدارة شبكات التوزيع واكتشاف المشكلات مثل التسريبات أو التلوث، لم تكن هذه الطرق تتطلب جهدا كبيرا فحسب، بل كانت محدودة أيضا في قدرتها على توفير رؤى أو قدرات تنبؤية في الوقت المناسب. ونتيجة لذلك، كانت الصيانة غالبا تفاعلية بدلا من استباقية، مما أدى إلى عدم الكفاءة، واضطرابات في الخدمات، وزيادة تكاليف التشغيل، كما أن نقص البيانات اللحظية أعاق بشكل كبير عمليات اتخاذ القرار، كانت هذه الطريق تفتقر إلى قابلية التوسع ولم تستطع تلبية الطلبات المتزايدة لسكان المدن أو معالجة التحديات البيئية الناشئة؛ (Dai, Huang, Khan, & Labbo, 2025, p. 02)

2.2.2. مرحلة التحكم الآلي: في أواخر القرن العشرين، بدأت العديد من وكالات المياه في اعتماد أنظمة الرقابة وجمع البيانات **(SCADA)**، والذي سمح بالمراقبة عن بعد للمعلمات الحيوية مثل الضغط، معدل التدفق، ومستويات الخزان، مما أتاح تحكما أكثر استجابة للبنية التحتية. شكل إدخال هذه الأنظمة تحسنا كبيرا في الكفاءة التشغيلية، حيث قلل الاعتماد على العمل اليدوي ومكن من المراقبة المركزية. ومع ذلك وعلى الرغم من مزاياها، بقيت **(SCADA)** مركزية وثابتة إلى حد كبير ورغم أنها وفرت بيانات فورية إلا أن قدرتها على التحليلات المتقدمة واتخاذ القرار التكيفي كانت محدودة؛ غالبا ما كانت قواعد القرار مشفرة بشكل ثابت، وكانت تعديلات النظام تتطلب تدخلا يدويا. علاوة على ذلك، أدى نقص التوافقية بين منصات **(SCADA)** إلى حد المرونة وقابلية التوسع، مما جعل من الصعب التكامل مع التقنيات الأحدث. وضعت هذه المرحلة الأساس لجهود الرقمنة المستقبلية من خلال إظهار قيمة المراقبة الفورية والتحكم الآلي. إلا أنه أصبح من الواضح بشكل متزايد أن أدوات أكثر تطورا ستكون ضرورية لمعالجة تعقيدات إدارة المياه الحديثة؛ (Dai, Huang, Khan, & Labbo, 2025, p. 03)

2.2.3. المرحلة الرقمية للماء: مع صعود البيانات الضخمة وتقنيات إنترنت الأشياء في أوائل القرن الحادي والعشرين، دخلت منظمات المياه عصر المياه الرقمية، وتميزت هذه المرحلة بدمج حساسات إنترنت الأشياء، القياس عن بعد ومنصات البيانات المركزية، مما أتاح المراقبة المستمرة والأتمتة الأساسية، وأصبح بإمكان شركات المرافق العامة الآن جمع كميات كبيرة من البيانات التشغيلية من مصادر موزعة، مما يدعم تتبع الأداء، تحليل الاتجاهات والصيانة التنبؤية. على عكس الأنظمة السابقة، سهلت منصات المياه الرقمية اتخاذ القرار القائم على البيانات من خلال تجميع المعلومات من أنظمة فرعية متعددة في لوحات تحكم موحدة.

على الرغم من هذه التطورات، قدمت مرحلة المياه الرقمية تحديات جديدة، كانت وحدات البيانات المنفصلة شائعة بسبب استخدام أنظمة وبروتوكولات متنوعة. علاوة على ذلك، فإن حجم البيانات وتباين البيانات تطلبا تقنيات معالجة أكثر تقدما، والتي لم تكن العديد من المؤسسات مجهزة للتعامل معها بعد. ومع ذلك، مثلت هذه المرحلة خطوة كبيرة إلى الأمام من حيث الشفافية والاستجابة والقدرة التحليلية؛ (Dai, Huang, Khan, & Labbo, 2025, p. 03)

4.2.2. مسرح الماء الذكي: تعرف أنظمة المياه اليوم بشكل متزايد عبر أنحاء العالم تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي، والحوسبة السحابية، ونمذجة التوائم الرقمية، مما يمكن اتخاذ القرار في الوقت الحقيقي، والتحليلات التنبؤية، والتحكم التكيفي. تدعم هذه الابتكارات التخصيص الديناميكي للموارد المائية، والكشف المبكر عن التسربات، والتخطيط القائم على السيناريوهات، مما يحسن بشكل كبير وظائف النظام ومتانته البيئية، ومن الجدير بالذكر أن مفهوم شبكات المياه الذكية برز كمكون رئيسي في هذه المرحلة، حيث دمج تقنيات متعددة لتحسين الشفافية والاستجابة عبر الشبكة بأكملها.

حيث تعد التوائم الرقمية، التي تعمل كنسخ افتراضية من البنية التحتية المادية، ذات قيمة خاصة لمحاكاة السيناريوهات، وتقييم المخاطر، ودعم الاستعداد للطوارئ، على عكس المراحل السابقة، فمرحلة المياه الذكية لا تركز فقط على جمع البيانات والمراقبة، بل أيضا على التكيف الذاتي والتحسين على مستوى النظام. تعالج خوارزميات الذكاء الاصطناعي كميات هائلة من بيانات المستشعرات لاكتشاف الشذوذات، التنبؤ بالأعطال، واقتراح تدخلات مثلى. (Dai, Huang, Khan, & Labbo, 2025, pp. 03-04)

3.2. العلاقة بين الابتكار الرقمي والحوكمة الذكية للمياه:

تعرف حوكمة المياه حسب الشركة العالمية للمياه (GWP) على أنها: "مجموعة من الأنظمة السياسية والاقتصادية والاجتماعية والإدارية التي يتم وضعها من أجل تطوير وتنظيم وتسيير الموارد المائية على مختلف مستويات المجتمع"، (بن النوي، 2020، صفحة 70) بالإضافة إلى ذلك فهي تشجع الناس على المشاركة في تصميم وتخطيط وتطبيق نشاطات تسيير إدارة المياه من جهة ودعم قدرة المجتمعات المحلية على الابتكار والتكيف مع الظروف المتغيرة كالجفاف والفيضانات.

وعليه يمكن اعتبار حوكمة المياه بأنها مجموعة متكاملة من النظم التي تتحكم في صنع القرارات الخاصة بتطوير الموارد المائية وإدارتها وتسمح لمؤسسات المجتمع المدني والقطاع الخاص في المشاركة في صنعها. (صالحي، 2016، صفحة 89)

إن الحوكمة الذكية للمياه تعتبر مقاربة حديثة تهدف إلى تحسين إدارة الموارد المائية من خلال تعزيز الكفاءة، الشفافية، المساءلة والمشاركة في اتخاذ القرار، بالاعتماد على أدوات تنظيمية وتقنية متقدمة. وفي هذا الإطار، يشكل الابتكار الرقمي أحد المرتكزات الأساسية التي تقوم عليها الحوكمة الذكية، كونه يوفر البنية التكنولوجية والمعرفية اللازمة للانتقال من أنماط الإدارة التقليدية إلى أنماط أكثر تكاملا ومرتكزة على البيانات الرقمية. (جاوي، 2024، صفحة 118)

تسهل المنصات السحابية أيضا تبادل المعلومات بسلاسة بين أصحاب المصلحة، حيث تمثل هذه المرحلة تحولا جذريا من السيطرة القائمة على القواعد إلى الحوكمة المعتمدة على الذكاء، حيث تسترشد القرارات بالتوقعات بدلا من الممارسات السابقة، كما يقدم مسارات جديدة لمشاركة المواطنين من خلال تطبيقات الهواتف المحمولة ومبادرات البيانات المفتوحة، مما يعزز المساءلة ومشاركة أصحاب المصلحة بشكل أكبر. إن فهم هذا المسار التنموي ضروري لتصميم استراتيجيات إدارة مياه جاهزة للمستقبل تتماشى مع أهداف الاستدامة العالمية وقيود التنفيذ المحلية، كما يعكس الانتقال من الحوكمة اليدوية إلى الحوكمة الذكية جهدا مستمرا لتحسين الفعالية التشغيلية، والحفاظ على البيئة، والقدرة على التكيف المؤسسي. كل مرحلة بنت على سابقتها هي قاعدة لتقنيات ومنهجيات جديدة لمواجهة التحديات المتطورة. (Dai, Huang, Khan, & Labbo, 2025, p. 03)

تمثل مرحلة المياه الذكية تحولا جذريا من السيطرة القائمة على القواعد إلى الحوكمة المعتمدة على الذكاء، حيث تستند القرارات إلى رؤى تنبؤية بدلا من أنماط تاريخية، على عكس النماذج السابقة التي ركزت على المراقبة والأتمتة الأساسية. (Dai, Huang, Khan, & Labbo, 2025, p. 04)

3. التقنيات الرقمية المستخدمة في إدارة الموارد المائية:

تساهم التقنيات الرقمية في تعزيز كفاءة إدارة الموارد المائية من خلال دمج المراقبة الذكية، التحليل المتقدم، والتحكم عن بعد في شبكات المياه. ومن أبرز هذه التقنيات ما يلي:

1.3. انترنت الأشياء (IOT) في مراقبة الشبكات المائية والتحكم فيها:

يعد انترنت الأشياء (IoT) أداة تقنية متقدمة تساهم في تحسين مراقبة شبكات المياه والتحكم فيها في الوقت الحقيقي. كما تعتمد أنظمة (IoT) على أجهزة استشعار متصلة بالشبكة لقياس مؤشرات مثل التدفق، الضغط، درجة الحموضة، والتلوث، ويتم نقل البيانات إلى منصات تحليلية لدعم اتخاذ القرارات التشغيلية وتقليل فقد المياه.(Zalina, et al., 2022, p. 07)

كما تمت الإشارة إلى أن دمج (IoT) في شبكات توزيع المياه يمكن من التحكم في الصمامات والمضخات عن بعد وتحسين توزيع الموارد المائية، بالإضافة إلى اكتشاف التسربات بشكل مبكر وتعزيز الكفاءة التشغيلية للشبكة. وتمكن هذه التقنية أيضا من تطوير صيانة وقائية وتحسين جودة المياه من خلال المراقبة المستمرة، ما يسهم في استدامة الموارد المائية وتقليل التكاليف التشغيلية. في المجمل، يشكل انترنت الأشياء ركيزة أساسية نحو شبكات مياه ذكية وفعّلة بيئيا واقتصاديا، حيث يجمع بين المراقبة الذكية والتحكم الفعال في الشبكات المائية. (García-Martín, Torralba, Hidalgo-Fort, Daza, & González-Carvajal, 2023)

2.3. الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات الضخمة في التنبؤ والقرار المائي:

يشكل الذكاء الاصطناعي (AI) وتحليل البيانات الضخمة عناصر مركزية في تحسين التنبؤات ودعم اتخاذ القرار في إدارة الموارد المائية نظرا لقدرتهما على معالجة كميات ضخمة ومعقدة من البيانات متعددة المصادر بكفاءة. إن دمج الذكاء الاصطناعي، التعلم العميق وانترنت الأشياء؛ يمكن أن يعزز بشكل كبير قدرات التنبؤ بالطلب على المياه وتحسين توزيعها ومراقبة جودتها عبر نماذج تحليلية متقدمة تتعامل مع التدفق والطلب والخصائص البيئية في الوقت الحقيقي، مما يدعم الصيانة الوقائية والتخطيط المستدام للموارد. (Ed-Dehbi, Ahlaqqach, & Benhra, 2025, p. 05)

تمكن خوارزميات الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة النمذجة التنبؤية لتوقع الطلب، مما يسمح بتخصيص موارد المياه بشكل أكثر كفاءة. بالإضافة إلى ذلك، توفر تحليلات البيانات الضخمة، التي تستفيد من حساسات إنترنت الأشياء وصور الأقمار الصناعية، مراقبة فورية ورؤى شاملة حول توفر المياه وأنماط الاستخدام وأداء البنية التحتية. تساعد هذه التطورات التكنولوجية في تحسين الري من خلال تحليل رطوبة التربة وظروف المناخ، وتحسين التحلية من خلال تعزيز كفاءة الطاقة وموثوقية النظام، وتنقية شبكات توزيع المياه من خلال اكتشاف التسربات وتحسين معدلات التدفق. (Pratiksha Mahajan, 2025, p. 01) وتعمل هذه النماذج على تعظيم الاستفادة

من بيانات الاستشعار، السجلات التاريخية، ونماذج المناخ لتقديم توصيات تشغيلية واستراتيجية، ما يجعلها أدوات حيوية في الانتقال من الإدارة التقليدية القائمة على الأساليب الإحصائية البسيطة إلى إدارة مائية ذكية وتنبؤية، هذه القدرات التقنية تساهم في تقليل الهدر، تحسين كفاءة الموارد، وتعزيز القدرة على مواجهة الأزمات مثل الجفاف والفيضانات من خلال استراتيجيات مستندة إلى البيانات. وتظهر النتائج أن اعتماد مثل هذه الأنظمة يسهم في رفع موثوقية القرارات المائية وتقليل المخاطر التشغيلية، وهو ما يضع الذكاء الاصطناعي والتحليل المتقدم في صدارة الأدوات التكنولوجية لإدارة المياه المعاصرة. (Ed-Dehbi, Ahlaqqach, & Benhra, 2025, p. 05)

3.3. نظم التحكم والإشراف عن بعد (SCADA) في تحسين كفاءة التشغيل:

تساهم أنظمة التحكم والإشراف عن بعد (SCADA) في تحسين كفاءة التشغيل في قطاع المياه من خلال الرصد اللحظي والتحكم الآلي في مكونات الشبكة، وهو ما تؤكده دراسات حالة تطبيقية في محطات معالجة وتوزيع المياه. إذ تمكن هذه الأنظمة من مراقبة الضغط، التدفق، وجودة المياه عبر الحساسات، مما يسمح بالكشف المبكر عن التسربات وتحقيق توازن تلقائي في الشبكة، وقد أدى ذلك في بعض التطبيقات العملية إلى خفض الفاقد غير الإيرادي بشكل ملحوظ.

كما تتيح (SCADA) تحليل البيانات التشغيلية لدعم الصيانة التنبؤية، وتقليل فترات التوقف، وتحسين مؤشرات الجودة مثل الضغط ودرجة الحموضة، إلى جانب ترشيد استهلاك الطاقة في عمليات الضخ والمعالجة. وإلى جانب ذلك، تدعم هذه الأنظمة الامتثال للمعايير التنظيمية وتعزز اتخاذ القرار المبني على البيانات، بما يسهم في تحسين الاستدامة وتقليص التكاليف التشغيلية في الشبكات المائية واسعة النطاق (Balaraman, Patel, & Reddy, 2025, p. 307) .

4.3. التوائم الرقمية (Digital Twin) ونمذجة نظم المياه:

تم تطوير مفهوم التوأم الرقمي في الأصل بواسطة شركة (Grieves) في عام 2005، وقد تم ابتكاره في البداية لتقنيات الصناعة والفضاء، وبعدها جاء كل تعريف حسب الحاجة لاستخدام هذه التقنية.

تعرف تقنية التوأم الرقمي على أنها: "تمثيل رقمي مناسب لغرض شيء أو عملية محققة مع وسيلة لتمكين التقارب بين المثيل المتحقق والمثيل الرقمي بمعدل تزامن مناسب".

وتعرف التوائم الرقمية أيضا بأنها: "نموذج ديناميكي وشامل، يدمج عناصر مثل الموظفين، المنتجات، الأصول، والعمليات". هذا المفهوم يندمج بسلاسة مع مشهد معالجة مياه الصرف الصحي، حيث يهدف إلى تعزيز تطوير وإدارة محطات معالجة مياه الصرف الصحي.

من التعاريف السابقة يمكن القول أنه باستخدام نماذج رقمية لهياكل معالجة مياه الصرف، تحلل التوائم الرقمية البيانات اللحظية للتنبؤ بظروفها وتعديلها. مع تطورها، تعزز التوائم الرقمية اتخاذ القرار البيئي، مما يبسط بشكل فعال التحكم واستخدام البيانات والتكامل بين صناعة مياه الصرف والتفاعلات الاجتماعية والبيئية (Wang, Li, He, Tao, & Wang, 2024, pp. 22-23).

4.دراسة حالة الابتكار الرقمي في إدارة الموارد المائية في سنغافورة:

إن الابتكار الرقمي أحد أبرز المحركات لتحسين إدارة الموارد المائية في عصر التحديات البيئية، حيث يدمج تقنيات ذكية تتمثل في انترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي لتعزيز الكفاءة والاستدامة، وتعتبر سنغافورة نموذجا رائدا في دمج الابتكار الرقمي بقطاع المياه، حيث تعتمد وكالة المياه الوطنية (PUB) على تقنيات ذكية لتحسين الكفاءة ومواجهة التحديات التي تواجه قطاع المياه مثل ندرة الموارد المائية والتغير المناخي، حيث أدى هذا الابتكار إلى بناء نظام مياه متكامل يعتمد على إعادة التدوير والطاقة النظيفة.

1.4.الموارد المائية في سنغافورة: الندرة، الطلبة المتزايد والتحديات الهيكلية:

تواجه سنغافورة ندرة مياه حادة كدولة جزيرية بدون مصادر مياه طبيعية كبيرة، فهي حاليا تستهلك حوالي 440 مليون جالون من المياه يوميا، ومع استمرار نمو السكان (أكبر من 7850 نسمة/كم^2) من المتوقع أن يتضاعف الطلب إلى ضعف الحالي بحلول سنة 2065، ما دفع الدولة إلى تبني استراتيجية "المنابع الأربعة": المياه المستوردة، الخزانات المحلية، إعادة تدوير المياه **(NEWater)**، والتحلية، لضمان أمن مائي كامل بحلول 2060.

يشكل القطاع غير المنزلي أكثر من 60**%** من الطلب مقابل 55**%** حاليا (PUB, 2025)، تبرز التطورات الأخيرة الضغط المتزايد على الموارد المائية غير المنزلية، بدءا من استثمار (Micron Technology**)** بقيمة 9.5 مليار دولار سنغافوري في منشأة جديدة لأشباه الموصلات، إلى حرم أسترازينيكا الصناعي الذي تبلغ قيمته 2 مليار دولار، إلى جانب خطط لبناء منشأة بحث وتطوير تصنيع أشباه الموصلات الوطنية الجديدة بقيمة 500 مليون دولار سنغافوري ستبدأ عملياتها في عام 2027.

تشكل هذه الصناعات حاليا حوالي 17**%** من الطلب على المياه غير المنزلية، مما يبرز الحاجة الملحة لاستراتيجيات إدارة مياه مستدامة، معادلة أمن المياه هذه ليست فقط عن إدارة الموارد؛ بل هو في جوهره يتعلق باستمرارية الأعمال والمرونة الوطنية، مع تصاعد تغير المناخ وزيادة ضغوط المياه العالمية، تواجه الشركات مخاطر تشغيلية متزايدة بسبب ندرة المياه. أما بالنسبة لسنغافورة، وهي دولة ذات موارد مائية طبيعية محدودة، فإن المخاطر أكبر. (Singapore's National Water Agency, 2025)

2.4.الإطار المؤسسي والتشريعي ودور الوكالة الوطنية للمياه في سنغافورة (**PUB**):

تدير الوكالة الوطنية للمياه في سنغافورة دورة المياه الكاملة منذ 2001، بما في ذلك الجمع، المعالجة، إعادة التدوير والصرف، تحت وزارة البيئة والموارد المائية، مما يضمن تنسيقا فعالا (Singapore C. , 2007)، فهي لا تقتصر فقط على تسعير المياه في سنغافورة بل تشجع أيضا الشركات على إعطاء الأولوية لاستدامة المياه، فمنذ بداية 2024 أصبح إلزامي على بعض الصناعات التي تركز على المياه الالتزام بمتطلبات تدوير المياه الإلزامية. (Singapore Industrial Water Revolution, 2025)

تقوم (PUB) بجمع ومعالجة وإعادة استخدام المياه المستخدمة على نطاق واسع، وهي خطوة لم تتخذها سوى عدد قليل من الدول، حيث قامت سنغافورة ببناء أنظمة تصريف وصرف منفصلة لتسهيل إعادة استخدام المياه المستخدمة على نطاق واسع، بما في ذلك نظام صرف مياه عميقة ينقل المياه المستخدمة بالجاذبية إلى محطات المعالجة. (Singapore W. p., 2017)

3.4.توظيف التقنيات الرقمية في دورة المياه المتكاملة:

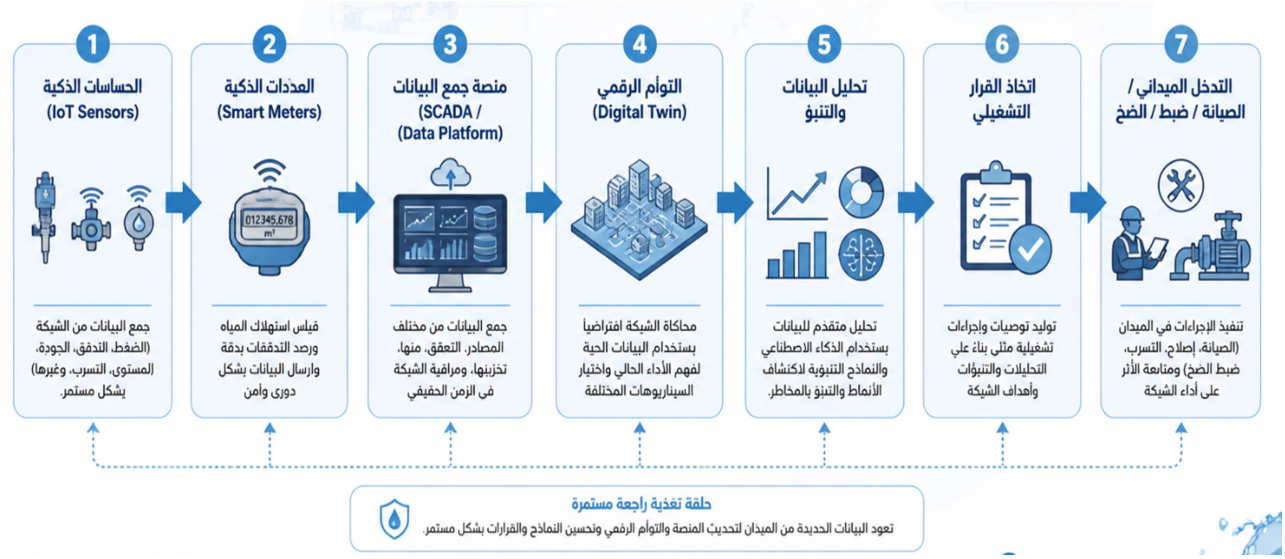
قامت الوكالة الوطنية للمياه في سنغافورة (PUB) بدمج التقنيات الرقمية بشكل منهجي في هذا النموذج الحوكمي، مما جعل شبكة المياه الذكية منصة تكنولوجية أساسية لتحسين استخدام الموارد وضمان الأمن المائي الوطني. كما يعتبر أساس نجاح سنغافورة هو القدرة على إدارة المياه غير المدرة للإيرادات (NRW)، حيث حققت باستمرار واحدة من أدنى الأسعار العالمية في هذا المؤشر، هذا ليس مجرد نتيجة لنشر أجهزة استشعار إنترنت الأشياء لمراقبة الضغط والتدفق وجودة المياه في الوقت الحقيقي، بل هو استراتيجية متعددة الجوانب تشمل شبكات حساسة عالية الدقة، وأجهزة استشعار صوتية متقدمة، وتحليلات تنبؤية مدفوعة (Ramos, et al., 2023, p. 03). حيث تسمح هذه الأدوات لـ (PUB) بتوقع ومعالجة التسربات المحتملة قبل أن تتفاقم حيث تعتمد على مبدأ –من الصيانة التفاعلية إلى الصيانة الاستباقية– وهي سمة مميزة لطبقة التحليل الذكي ضمن بنية عداد المياه الذكي (SWM).

تدمج الوكالة الوطنية للمياه في سنغافورة (PUB) تقنيات مثل الذكاء الاصطناعي (AI)، انترنت الأشياء (IOT) وتحليل البيانات الضخمة ضمن نظام الشبكات الذكية لإدارة الموارد المائية، وقد شملت المرحلة الأولى نشر عدادات مياه ذكية (SWM) لفائدة أكثر من 300.000 عميل، إلى جانب توظيف أنظمة (SCADA) للكشف المبكر عن التسربات وتحسين التحكم التشغيلي، واعتماد نظام مراقبة الفياضانات (FAS) لتعزيز الاستجابة الاستباقية للمخاطر الهدرولوجية. (Banerjee, Bhaduri, & Saraswat, 2022)

4.4. مراحل تدفق البيانات في شبكة المياه الذكية لسنغافورة:

تمر عملية تدفق البيانات من الحساسات في الشبكة الميدانية إلة اتخاذ القرار التشغيلي والتدخل الميداني ضمن إطار الإدارة الذكية للمياه في سنغافورة بعدة مراحل، والشكل الموالي يوضح عملية تسلسل تدفق البيانات في شبكة المياه الذكية لسنغافورة:

الشكل 1: تسلسل تدفق البيانات في شبكة المياه الذكية لسنغافورة



المصدر: من إعداد الباحثة اعتمادا على (Dai, Huang, Khan, & Labbo, 2025, p. 12)

من خلال الشكل نلاحظ أن تنفيذ شبكة المياه الذكية في سنغافورة يتبع هيكلة منظمة تتكون من خمس طبقات رئيسية، حيث تدمج كل طبقة تقنيات وأساليب تحليلية محددة: (Dai, Huang, Khan, & Labbo, 2025, pp. 08-09)

أ. **طبقة استشعار البيانات:** يتم نشر أكثر من 50,000 جهاز استشعار إنترنت الأشياء عبر الخزانات وخطوط الأنابيب ومحطات المعالجة لمراقبة معايير مثل الضغط، معدل التدفق، العكارة، ومستويات الكلور في الوقت الفعلي؛

ب. **طبقة النقل:** يتم نقل البيانات عبر أنظمة **(SCADA)** الآمنة وشبكات الألياف الضوئية إلى منصات سحابية مركزية، مما يضمن اتصالا منخفض التأخير وتوفر بيانات عالي؛

ج. **طبقة المعالجة:** تخضع البيانات الخام للتنظيف، والتطبيع، والتكامل من خلال منصات البرمجيات الوسيطة التي توحد المدخلات من مصادر غير متجانسة (مثل توقعات الطقس، السجلات التاريخية)؛

د. **طبقة التحليل الذكي:** تستخدم نماذج التعلم الآلي، بما في ذلك **(ARIMA)** للتنبؤ بالسلاسل الزمنية و(Random Forest) لاكتشاف الشذوذ، للتنبؤ بالتسريبات، وتحسين جداول المضخات، وتقييم صحة النظام؛

هـ. **طبقة دعم القرار:** يتم عرض الرؤى التي تولدها طبقة التحليل الذكي على لوحات المعلومات المتاحة لمشغلي(PUB) ومخططي المدن، تدمج هذه اللوحات بيانات رسم خرائط نظم المعلومات الجغرافية، وأنظمة الإنذار، وأدوات محاكاة السيناريوهات لدعم كل من العمليات الروتينية والاستجابة للطوارئ. تكمل هذه القوة التكنولوجية فرق مكافحة التسربات النشطة، وبرنامج تجديد الأنابيب المنهجي، ومبادرات المشاركة العامة التي تشجع المواطنين على الإبلاغ عن التسربات.

من خلال الشكل يتضح أن نجاح التجربة السنغافورية لا يعود إلى التقنية وحدها، بل إلى التكامل بين البنية الرقمية، والإدارة المؤسسية، والرقابة التشغيلية، والوعي المجتمعي، وهو ما يجعلها نموذجا مرجعيا في مجال إدارة المياه الذكية.

5.4. تحليل نموذج المياه الذكية لسنغافورة:

يعد دمج نمذجة التوائم الرقمية في سنغافورة متقدما بشكل خاص، حيث يتجاوز الصيانة التنبؤية ليشمل تحسين النظام الشامل، تمكن هذه النسخ الرقمية من التخطيط المتكامل للسيناريوهات من تحسين جداول الضخ كثيفة الطاقة بناء على الطلب على المياه وأسعار الكهرباء في الوقت الحقيقي، بالإضافة إلى محاكاة الاستجابات للأحداث الناتجة عن المناخ أو الاضطرابات الأمنية، كما تساهم هذه القدرات بشكل مباشر في مرونة النظام، وهي سمة بارزة في استراتيجية سنغافورة "المرحلة الذكية للمياه"، علاوة على ذلك، تلعب نماذج التوأم الرقمي دورا حيويا في التخطيط طويل الأمد للبنية التحتية من خلال تقييم تأثير التنمية الحضرية ودعم تحسين كفاءة الطاقة في محطات **(NEWater)** ومحطات تحلية المياه. على سبيل المثال، يمكن أن تدمج بشكل فعال توقعات الأرصاد الجوية مع البيانات التشغيلية، مما يمكن من تحسين عمليات مثل التحلية وتوزيع المياه وتحقيق تحسينات ملحوظة في كفاءة الطاقة .(Francesco G. Ciliberti, 2023) .

كما تؤكد استراتيجية سنغافورة بأن التكنولوجيا وحدها غير كافية، بل لابد من توفير تطبيقات الهاتف المحمول للمستهلكين للتغذية الراجعة الفورية حول استخدامهم للمياه، مما يعزز الوعي بالحفاظ على المياه ويتيح اتخاذ قرارات مستنيرة. يستند النجاح العام لنموذج سنغافورة إلى الإرادة السياسية القوية، والأطر التنظيمية الواضحة، والاستثمار المستمر في البحث والتطوير، وثقافة التحسين المستمر داخل الوكالة الوطنية للمياه **(PUB)**، ورغم أن الاستثمار الأولي العالي شكل تحديا، إلا أنه برر برؤية طويلة الأمد لأمن المياه وكفاءة العمليات. (Francesco G. Ciliberti, 2023)

تظهر هذه النتائج فعالية حلول المياه الذكية المتكاملة في تحسين أداء النظام، وتقليل الهدر، وتعزيز تفاعل المستخدمين، كما هو موضح في الجدول (1):

الجدول 1: مؤشرات الأداء الرئيسية لمبادرات المياه الذكية في سنغافورة

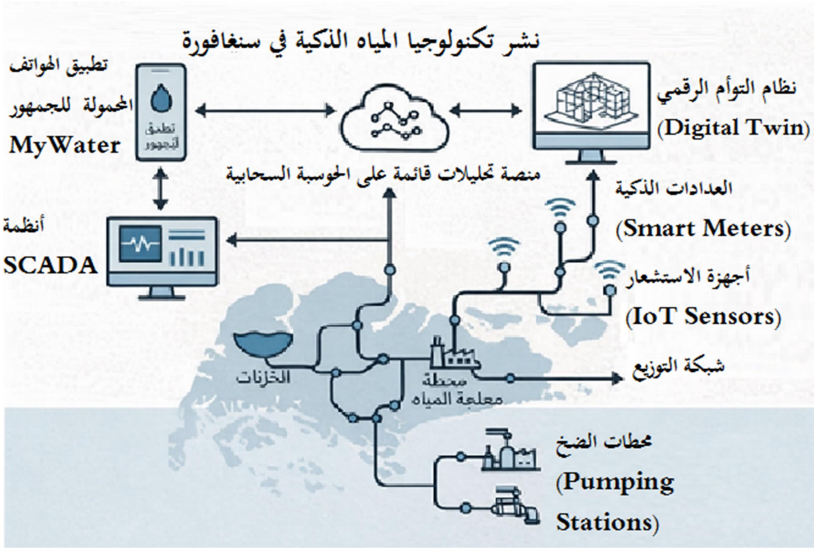
المؤشر	السنة الأساسية	سنة 2023	السنة 2025
معدل المياه غير المدرة للإيرادات (NRW)	9 % (سنة 2010)	%4.1	%3.5
زمن استجابة اكتشاف التسربات	72 ساعة (قبل 2010)	أقل من 6 ساعات	أقل من 4 ساعات
تغطية العدادات الذكية	10% (سنة 2015)	%85	95 % (نهاية 2025)
معدل تبني تطبيقات الجوال (الاستهلاك المنزلي)	–	35% من المستهلكين الأسر	%45
تقليل استهلاك الطاقة في الضخ	–	15 % منذ 2020	18% (2025)

Source: (Dai, Huang, Khan, & Labbo, 2025, p. 11)

من خلال الجدول، يتضح أن نموذج سنغافورة في إدارة المياه حقق **نجاحا واضحا** في تحسين الكفاءة وتقليص الفاقد، لكنه ما يزال يواجه تحديات تتعلق بالكلفة، والاعتماد على التكنولوجيا، وصعوبة النقل الكامل إلى دول أخرى. فالبيانات تظهر انخفاض معدل المياه غير المدرة للإيرادات من 9% سنة 2010 إلى 4.1% سنة 2023 ثم إلى 3.5% سنة 2025، وهو مؤشر قوي على فعالية الحوكمة الذكية. كما انخفض زمن اكتشاف التسربات من 72 ساعة إلى أقل من 6 ساعات ثم إلى أقل من 4 ساعات، وارتفعت تغطية العدادات الذكية من 10% إلى 85% ثم إلى 95%، ما يعكس نضجا كبيرا في الرقمنة التشغيلية.

استنادا إلى استراتيجية التحول الرقمي لـ **(PUB)**، الشكل الموالي يوضح كيفية دمج أجهزة استشعار إنترنت الأشياء، والتوائم الرقمية، ومنصات الحوسبة السحابية، وأدوات تفاعل المواطنين عبر سلسلة توريد المياه بأكملها (Dai, Huang, Khan, & Labbo, 2025, p. 12). كما يعكس كيف تترابط هذه التقنيات لتمكين المراقبة الفورية، والتحليلات التنبؤية، والحوكمة التكيفية. (Robles, et al., 2015)

الشكل 2: عملية التوائم الرقمية المتكاملة للتخطيط القائم على السيناريوهات والتحكم في الوقت الحقيقي.



Source: (Dai, Huang, Khan, & Labbo, 2025, p. 12)

يوضح الشكل البنية الرقمية المتكاملة التي تعتمدها سنغافورة في إدارة مواردها المائية، حيث تتداخل عدة مكونات تقنية ومؤسساتية في منظومة واحدة مترابطة. فالحساسات الذكية وإنترنت الأشياء (IoT Sensors) تقوم بجمع البيانات الميدانية بشكل مستمر حول الضغط والتدفق والتسربات، بينما تتولى العدادات الذكية (Smart Meters) قياس الاستهلاك بدقة عالية وإرسال المعطيات بشكل لحظي إلى المنصة المركزية. كما يساهم نظام التحكم الإشرافي وجمع البيانات (SCADA) في متابعة أداء الشبكة والتحكم فيها عن بعد، في حين يسمح التوأم الرقمي (Digital Twin) بمحاكاة الشبكة المائية افتراضيا واختبار السيناريوهات المختلفة قبل تنفيذها ميدانيا. ويضاف إلى ذلك تطبيق MyWater الذي يربط المستهلك النهائي بمنظومة الحوكمة المائية، من خلال تمكينه من متابعة الاستهلاك والتفاعل مع البيانات والخدمات المائية.

ويعكس هذا الشكل انتقال سنغافورة من إدارة تقليدية للمياه إلى نموذج حوكمة ذكية قائم على البيانات والتحليل اللحظي والاستباق في اتخاذ القرار، الأمر الذي أسهم في تقليص الفاقد المائي، ورفع كفاءة التشغيل، وتحسين الاستجابة للتسربات والأعطال، وتعزيز مشاركة المستهلك في ترشيد الطلب.

5. الدروس المستفادة من تجربة سنغافورة وإمكانية نقلها إلى الدول النامية:

استنادا إلى تجربة سنغافورة، تم استخلاص مجموعة من الدروس التي قد تكون ذات قيمة في إطار السعي نحو إرساء الأسس اللازمة للتحول نحو الإدارة الذكية للمياه، حيث أظهرت مبادرات المياه الذكية في سنغافورة كيف يمكن للتقنيات المتكاملة دعم أمن المياه الحضرية مع الحفاظ على معايير خدمة عالية، كما تقدم خبرتها دروسا قيمة لمناطق أخرى تعاني من ضغوط المياه التي تسعى لتبني نماذج حوكمة ذكية للمياه، تشمل النقاط الرئيسية التالية:

- أهمية التكامل بين الابتكار الرقمي والحوكمة الذكية للمياه، حيث لا يكفي الاعتماد على التكنولوجيا فقط دون وجود مؤسسات فعالة وسياسات مائية واضحة وطويلة الأجل؛

- الاستثمار المستمر في البنية التحتية الرقمية، خاصة أنظمة الاستشعار، العدادات الذكية، ومنصات تحليل البيانات، بما يسمح بالمراقبة الفورية وتحسين كفاءة الشبكات المائية؛
- الاعتماد على التحليلات التنبؤية والذكاء الاصطناعي في الكشف المبكر عن التسربات وإدارة الطلب على المياه، مما ساهم في تقليص الفاقد المائي وتحسين الاستجابة للمخاطر المائية؛
- تنويع مصادر المياه من خلال إعادة التدوير والتحلية وتجميع مياه الأمطار، بما يعزز الأمن المائي ويقلل من الاعتماد على المصادر التقليدية؛
- إشراك المستهلكين في إدارة المياه عبر التطبيقات الرقمية والعدادات الذكية، بما يرفع الوعي المجتمعي بترشيد الاستهلاك ويعزز السلوك المائي المستدام؛
- أهمية بناء القدرات البشرية وتطوير الكفاءات التقنية القادرة على إدارة الأنظمة الذكية وتحليل البيانات الضخمة؛
- ضرورة تطوير أطر تنظيمية وتشريعية مرنة تدعم التحول الرقمي وتحمي البيانات والبنية التحتية من المخاطر السيبرانية؛
- اعتماد مقاربة تدريجية لتكييف التجربة السنغافورية في الدول النامية، تراعي الإمكانات الاقتصادية، ومستوى الرقمنة، والخصوصيات المؤسسية لكل دولة، بدل الاعتماد على النقل الحرفي للنموذج.

والشكل التالي يوضح باختصار شروط تكييف التجربة السنغافورية لتحقيق التحول نحو الحوكمة الذكية للمياه:

الشكل 3: شروط تكييف التجربة السنغافورية لتحقيق التحول نحو الحوكمة الذكية للمياه



المصدر: من إعداد الباحثة اعتمادا على ماسبق

إلا أن الدول النامية خاصة قد تواجه في تبني استراتيجية شاملة في الحوكمة الذكية للمياه، وبناء أنظمة مياه مرنة ومستدامة قادرة مجموعة من التحديات المستقبلية والمتمثلة في:

- الاعتماد الكبير على التحلية وإعادة التدوير يتطلب استثمارات مالية وتقنية وطاقة ضخمة، ما قد يصعب نقلها مباشرة إلى دول ذات موارد مالية محدودة، لأن تكلفة التحول الرقمي والتحلية مرتفعة وعدم توافر اعتمادات مستدامة للاستثمار في البنية المائية الذكية؛
- نقص الكفاءات التقنية والتشغيلية للتعامل مع أنظمة الذكاء الاصطناعي وشبكات الاستشعار المعقدة؛
- بعض الحلول قد تكون مكلفة ولا يمكن تطبيقها في الدول النامية التي تعاني من ديون عامة وضغوط ميزانياتية؛
- النموذج السنغافوري مرتبط بحوكمة مركزة وحازمة، وغالبا ما يقابل بالانتقاد لصعوبة تكييفه في أنظمة سياسية وإدارية أضعف أو أكثر تشتتا، ما يحد من قابلية النسخ الحرفي؛
- مقاومة تغيير نمط استهلاك الماء، وقلة ثقافة الترشيد والاعتماد على الدعم المائي في بعض الدول العربية؛
- سنغافورة دولة تتميز بمساحة صغيرة جدا، وعدد سكان منخفض جدا، ما يسهل الإدارة المركزية والرقابة التقنية مقارنة بدول عربية واسعة ومتعددة الأقاليم وعدد سكان كبير جدا، حيث نقل النموذج إلى دول ذات أراض شاسعة وشبكات مائية مترامية قد يتطلب تعديلات جوهرية في التصميم.

والشكل التالي يوضح الفرق بين نموذج سنغافورة والدول النامية في إدارة المياه:

الشكل 4: الفرق بين نموذج سنغافورة والدول النامية في إدارة المياه



المصدر: من إعداد الباحثة اعتمادا على ماسبق

وبالتالي يمكن القول أن الدول النامية التي تعاني من ندرة الموارد يمكنها الاستفادة من نموذج سنغافورة للمياه الذكية ولكن عبر تبني مبادئه الأساسية (الاستراتيجية الشاملة، تقليل الفاقد، الرقمنة، الاستدامة البيئية)، مع تكييفها وفق القدرات المؤسسية والمالية والاجتماعية المحلية.

6.تحليل النتائج:

إدارة الموارد المائية باستخدام التكنولوجيا الرقمية في سنغافورة، تعد نموذجا يحتذى به حقا من حيث الأداء والشفافية والمساءلة فيما يتعلق بأنظمة إمدادات المياه وإدارة مياه الصرف الصحي.

تختلف القوانين واللوائح بشكل كبير بين المدن، لكن الدراسة تجد أنه لا توجد تقريبا قيود قانونية أو تنظيمية على الرقمنة في قطاع المياه الحضرية، فنظام (SCADA) هو عملية رقمنة داخلية لشركات المياه لجعلها أكثر كفاءة، و(FAS) هو نوع من خدمة المعلومات المقدمة للمواطنين، دون أي متطلبات للامتثال، ويستخدمه الناس بناء على تقديرهم فقط، أما في حالة (SWM) يتم ملاحظة بعض مشاكل الامتثال حيث يتم تنفيذ (SWM) بشكل إلزامي لجميع الاتصالات الاستهلاكية.

وتستخدم أنظمة المراقبة واتخاذ القرار المبنية على الذكاء الاصطناعي لإدارة المياه المتكاملة، كما يمكن للنظام الرقمي المشترك أن يعظم مصدر المياه السطحية للمدينة، مع الحفاظ على جودة المياه في الخزانات والمجاري المائية داخل حوض التجميع، وتجنب حالات الفيضانات داخل المدينة.

كان للابتكار الرقمي أثر ملموس في تعزيز كفاءة إدارة الموارد المائية وتحسين الأمن المائي الوطني، فقد ساعدت التقنيات الرقمية على:

- تقليل الفاقد المائي من خلال أنظمة إنذار ذكية وتحليلات توقعية مبنية على البيانات؛
- تحسين جودة الخدمات المائية عبر مراقبة مستمرة وتحليل ديناميكي لحالة الشبكات؛
- دعم التخطيط الاستراتيجي طويل الأمد من خلال نماذج توقع تفصيلية للطلب المائي واحتياجات المعالجة والتوزيع.

كما تعمل هذه الأدوات الرقمية على تعزيز قدرة سنغافورة على مواجهة المخاطر المناخية والهيدرولوجية من خلال أنظمة إنذار مبكر واستجابة سريعة، ما يساهم في ضمان استدامة الموارد المائية في ظل الضغوط البيئية والاقتصادية المتسارعة.

تعد التجربة السنغافورية في إدارة الموارد المائية نموذجا قابلا للاستلهام في الدول التي تعاني من ندرة المياه، نظرا لاعتمادها على الابتكار الرقمي كبديل استراتيجي عن الوفرة الطبيعية، فقد أثبتت سنغافورة أن محدودية الموارد لا تشكل عائقا حتميا أمام تحقيق الأمن المائي، متى توفرت الحوكمة الرشيدة، التخطيط طويل الأجل، والتكامل بين التكنولوجيا والمؤسسات.

إن استنساخ نموذج سنغافورة في توظيف الابتكار الرقمي لإدارة الموارد المائية لا يمكن أن يتم بصورة آلية، بل يظل رهينا بمدى ملاءمته للخصوصيات الوطنية، لاسيما ما يتعلق بالمستوى الاقتصادي، وجاهزية البنية التحتية الرقمية وكفاءة الأطر التشريعية والتنظيمية. ومع ذلك، فإن توظيف عناصر هذه التجربة في الدول العربية يعد أمرا قابلا للتحقق، خاصة في مجالات الحد من الفاقد المائي، وتعزيز

كفاءة إدارة الطلب، وتوسيع إعادة استخدام المياه المعالجة، وذلك شريطة اعتماد مسار تدريجي ومدروس للتحول الرقمي يراعي الإمكانات والقيود المحلية.

تظهر هذه الدراسة أن الابتكار الرقمي يشكل ركيزة أساسية لإعادة هيكلة إدارة الموارد المائية في ظل ندرة المياه والتغيرات المناخية. وقد أكدت تجربة سنغافورة أن الجمع بين التكنولوجيا المتقدمة، والحوكمة الذكية، والتخطيط الاستراتيجي طويل الأجل يمكن أن يحقق مستويات عالية من الكفاءة والأمن المائي.

غير أن تعميم هذا النموذج في دول أخرى يظل رهينا بمدى توافر الشروط التقنية والمؤسسية والمالية اللازمة، وبقدرة صناع القرار على تكييفه مع الخصوصيات الوطنية. وعليه، فإن التحول الرقمي في إدارة الموارد المائية لا ينبغي أن ينظر إليه كحل تقني منفصل، بل كخيار استراتيجي شامل يدمج الابتكار الرقمي بالاستدامة المائية.

7. خاتمة:

خلصت هذه الدراسة إلى أن الابتكار الرقمي لم يعد مجرد أداة تقنية مساندة، بل أصبح ركيزة استراتيجية في إعادة هندسة نماذج إدارة الموارد المائية، خاصة في ظل تفاقم تحديات ندرة المياه، وتسارع آثار التغيرات المناخية، وتنامي الطلب الحضري والصناعي. فقد أظهر تحليل التجربة السنغافورية أن توظيف تقنيات إنترنت الأشياء(IOT)، والذكاء الاصطناعي(AI)، ونظم (SCADA) والتوأم الرقمي، أسهم في الانتقال من أنماط إدارة تقليدية قائمة على الاستجابة اللاحقة، إلى إدارة مائية ذكية استباقية تعتمد على التنبؤ، وتحليل البيانات، ودعم القرار في الزمن الحقيقي، الأمر الذي انعكس بشكل مباشر على رفع الكفاءة التشغيلية وتقليص الفاقد المائي إلى مستويات دنيا بلغت نحو 5%.

1.7.نتائج الدراسة:

خلصت الدراسة إلى مجموعة من النتائج تتمثل في:

- يشكل الابتكار الرقمي عاملا حاسما في تحسين كفاءة إدارة الموارد المائية وتقليص الفاقد المائي؛
- تؤكد التجربة السنغافورية أن محدودية الموارد الطبيعية يمكن تعويضها عبر الحوكمة الذكية والابتكار التكنولوجي؛
- تلعب البيئة المؤسسية، والبنية التحتية الرقمية، ورأس المال البشري دورا محوريا في نجاح التحول الرقمي المائي؛
- تكوين نظام مائي مرن يعتمد على مزيج متكامل (NEWater)، التحلية، تجميع مياه الأمطار والمياه المستوردة ما جعل سنغافورة نموذجا عالميا في التكيف مع التغير المناخي وندرة الموارد؛
- أثبتت التجربة السنغافورية أن التكامل بين التكنولوجيا والحوكمة الفعالة يمثل عاملًا أساسيًا في تحقيق الأمن المائي والاستدامة؛
- انخفاض الفاقد غير الإيرادي إلى حوالي 5% فقط، وهو من أدنى المعدلات عالميا، بفضل العدادات الذكية، أنظمة الكشف عن التسرب و (SCADA)؛
- أظهرت التجارب على العدادات الذكية أن 10% من المنازل كانت تعاني من تسربات خفية؛
- ترشيد السلوك والاكتشاف المبكر أدى إلى تقليل الاستهلاك بنحو 5% في المتوسط؛

- أظهرت الدراسة أن إعادة تدوير المياه واستخدام التحليلات التنبؤية ساعدا في تنويع مصادر المياه وتقوية القدرة على مواجهة التغيرات المناخية؛
- نقل التجربة السنغافورية إلى الدول النامية يواجه تحديات مرتبطة بالتمويل وضعف البنية الرقمية والأطر التنظيمية؛
- أكدت الدراسة أن تكييف التجربة السنغافورية يجب أن يتم وفق الخصوصيات الاقتصادية والمؤسساتية والتقنية لكل دولة؛
- تعميم النموذج السنغافوري في الدول التي تعاني من شح المياه ممكنا، لكنه مشروط بتكييفه مع السياقات الوطنية المختلفة.

2.7.التوصيات:

- ضرورة تبني استراتيجيات وطنية للتحول الرقمي في قطاع المياه وربطها بأهداف الأمن المائي والاستدامة البيئية؛
- تعزيز الاستثمار في البنية التحتية الرقمية للمياه، خاصة العدادات الذكية، وأنظمة الاستشعار وتقنيات تحليل البيانات الضخمة؛
- تطوير الأطر التنظيمية والمؤسساتية بما يدعم الحوكمة الذكية للمياه ويعزز التنسيق بين مختلف الجهات المعنية؛
- الاستثمار في بناء القدرات البشرية وتكوين الكفاءات المتخصصة في إدارة الأنظمة الذكية وتحليل البيانات والأمن السيبراني؛
- تشجيع استخدام الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في الكشف المبكر عن التسربات وتحسين كفاءة الشبكات المائية؛
- تعزيز الوعي المجتمعي بأهمية ترشيد استهلاك المياه من خلال التطبيقات الرقمية والمنصات الذكية؛
- اعتماد مقاربة تدريجية لتكييف التجربة السنغافورية في الدول النامية، مع مراعاة الإمكانات الاقتصادية ومستوى الرقمنة والخصوصيات الوطنية؛
- دعم الشراكات بين الحكومات والقطاع الخاص ومراكز البحث العلمي لتطوير حلول رقمية مبتكرة في مجال إدارة الموارد المائية. إدماج الابتكار الرقمي ضمن سياسات التكيف مع التغيرات المناخية وتعزيز الأمن المائي على المدى الطويل.

8. قائمة المراجع:

رابح دارم، سيد أحمد حاج عيسى، و لحشم قاسمية . (2020). معوقات الابتكار الرقمي في المؤسسات الجزائرية -دراسة حالة عينة من المؤسسة الجزائرية-. *مجلة البديل الاقتصادي، 06*(02)، 11-26.

حورية جاوي. (2024). الابتكار التشريعي والحلول التقنية في تعزيز الأمن المائي على الصعيدين الوطني والدولي. *مجلة البحوث العلمية في التشريعات البيئية، 14*(01)، 113-137.

رشيد سعد الله ، و حسين قانة. (2021). دور التطبيقات الرقمية في تحسين خدمات مرفق الجزائرية للمياه -دراسة لنموذج ميداني بولاية الجلفة، ونموذج مقتح لولاية واد سوف. *مجلة البحوث الإدارية والاقتصادية، 05*(02)، 73-87.

عائشة بن النوي. (2020). الحوكمة المائية - دراسة لحالة الجزائر-. *مجلة الجوكمة، المشؤولية الاجتماعية والتنمية المستدامة، 02*(02)، 61-92.

عبد القادر صافي. (2021). مساهمة الابتكار في تطوير وترقية المؤسسات الناشئة. *مجلة المدبر، 08*(01)، 269-301.

محمد لمين علون، و وسيلة السبتي. (2019). مزايا ومعيقات الابتكار المفتوح في منظمات الأعمال. *مجلة الاقتصاد الدولي والعولمة، 02*(02)، 145-163.

نصيرة صالحي. (2016). الأمن المائي في سياق مقاربة حوكمة المياه. *المجلة الجزائرية للأمن والتنمية*(09)، 83-94.

Ai-Jie Wang ،Hewen Li ،Zhejun He ،Yu Tao و ،Hongcheng Wang .(2024) .Digital Twins for Wastewater Treatment: A Technical Review .*ELSEVIER* .35-21 ،*36* ، doi:https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.04.012

Chandan Banerjee ،Anik Bhaduri و ،Chitresh Saraswat 24) .March, 2022 .(Digitalization in Urban Water Governance: Case Study of Bengaluru and Singapore .*Frontiers in Environmental Science* .*10* ،doi:https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.816824

CSC Singapore) .April, 2007 .(*Water Management in Singapore* 30 تاريخ الاسترداد .december, https://knowledge.csc.gov.sg/ethos-issue-02/water-management-in-singapore/ ،من 2025

H.M. Ramos ،A. Kuriqi ،M. Besharat ،E. Creaco ،E. Tasca ،O.E. Coronado-Hernández . . . ،P. Iglesias-Rey 15) .March, 2023 .(Smart Water Grids and Digital Twin for the Management of System Efficiency in Water Distribution Networks .*Water* من الاسترداد تم .(15)*6* ، https://www.mdpi.com/2073-4441/15/6/1129

Juan Pablo García-Martín ،Antonio Torralba ،Eduardo Hidalgo-Fort ،David Daza و ،Ramón González-Carvajal .(2023) .IoT solution for smart water distribution networks based on a low-power wireless network, combined at the device-level: A case study .*Internet of Things* .*22* ،doi:https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100746

Luigi Berardi, Daniele B. Laucelli and Orazio Giustolisi Francesco G. Ciliberti .(2023) .Digital Water Services using Digital Twin paradigm .*IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* .doi:10.1088/1755-1315/1136/1/012002

Minakshi Satpute, Poonam Hanwate, Amrapali Lokhande Pratiksha Mahajan .(2025) .AI and Big Data for Optimized Water Resource Management in Arid Regions .*Trends in Transport Engineering and Applications*.(01)*12* ،

Nirmal Kumar Balaraman ،Krunal Patel و ،Nagender Reddy .(2025) .Smart Water Management: Integrating PLC and SCADA Technologies for Sustainable Urban Infrastructure ،*01* . الصفحات305-312. SCITEPRESS– Science and Technology من الاسترداد تم . https://www.scitepress.org/Papers/2025/137580/137580.pdf

PUB 15) .APRIL, 2025 .(*Singapore Industrial Water Revolution* من ،2025 12 30 تاريخ الاسترداد . Singapore's National Water Agency: https://www.pub.gov.sg/Resources/News-Room/Featured-Stories/2025/Singapore-Industrial-Water-Revolution

PUB 26) .December, 2025 .(*Singapore's National Water Agency* 30 تاريخ الاسترداد .December, https://www.pub.gov.sg/public/waterloop/water-conservation ،من 2025

T. Robles ،R. Alcarria ،D. Martín ،M. Navarro ،R. Calero ،S. Iglesias و ،M. López .(2015) .An IoT Based Reference Architecture for Smart Water Management Processes .*Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications* تم .(1)*6* ، الاسترداد منhttps://isyou.info/jowua/papers/jowua-v6n1-1.pdf

Water policy in Singapore 16) .Mai, 2017 .(*[Singapore Handbook of Public Policy] Water policy in Singapore* 02 تاريخ الاسترداد .january, 2026 من ،https://lkyspp.nus.edu.sg/gia/article/water-policy-in-singapore

Wissal Ed-Dehbi ،Mustapha Ahlaqqach و ،Jamal Benhra .(2025) .Artificial Intelligence for Optimal Water Resource Management: A Literature Review .*Engineering Proceedings* ، .(01)*97*doi: https://doi.org/10.3390/engproc2025097052

Yongyu Dai ،Zhengwei Huang ،Naveed Khan و ،Muwaffaq Safiyanu Labbo 27) .June, 2025 .(Smart Water Management: Governance Innovation, Technological Integration, and Policy Pathways Toward Economic and Ecological Sustainability .*Water* تم الاسترداد من ،*13* (17). https://www.mdpi.com/2073-4441/17/13/1932

Zulkifli Che Zalina ،Salem Garfan ،Mohammed Talal ،A. H. Alamoodi ،Amneh Alamleh و ، Ibraheem Y. Y. Ahmaro .(2022) .IoT-Based Water Monitoring Systems: A Systematic Review .*Water* .(22)*14* ،doi: https://doi.org/10.3390/w14223621