

أثر استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه في استدامة البنية التحتية
للمياه: دراسة ميدانية على العاملين المختصين في شركة المياه الوطنية
بمنطقة الرياض

مشروع الماجستير النهائي

إعداد الطالبة/

لمياء محمد الفرج

الرقم الجامعي/

٢٥٣٠٠٢٨٢٩

إشراف/

.د

العام الدراسي: ٢٠٢٦م

إقرار حقوق الطباعة

أقر بأن هذا المشروع أُعد لاستيفاء متطلبات درجة الماجستير في جامعة ميدأوشن، وأن حقوق الطباعة والاستعمال الأكاديمي تخضع لأنظمة الجامعة ولوائحها، مع الالتزام بالأمانة العلمية وحقوق الملكية الفكرية للمصادر المستخدمة.

الشكر والتقدير

الحمد لله أولاً وآخرًا على توفيقه وإعانتته في إنجاز هذا المشروع. وتتقدم الباحثة بخالص الشكر والتقدير إلى جامعة ميدأوشن وكلية الإدارة، وإلى المشرف العلمي وأعضاء الهيئة الأكاديمية على ما قدموه من توجيه وملاحظات أسهمت في تطوير العمل. كما تتوجه بالشكر إلى كل من أسهم بمشورة علمية أو دعم فني أو معنوي خلال إعداد المشروع، سائلة الله أن يجزيهم خير الجزاء.

المستخلص

هدفت الدراسة إلى قياس أثر استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض، من خلال ثلاثة أبعاد للمتغير المستقل هي: تنوع وتعزيز مصادر الإمداد المائي، وإدارة الطلب والحد من الفاقد المائي، والمرونة التشغيلية والتقنيات الذكية، وأربعة أبعاد للمتغير التابع هي: الاستدامة التشغيلية والفنية، والاستدامة الاقتصادية والمالية، والاستدامة البيئية، والمرونة واستمرارية الخدمة. واعتمدت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي ذي المدخل الكمي، واستخدمت استبانة ثنائية اللغة تضمنت ستة متغيرات ديموغرافية ووظيفية و ٢٤ فقرة قياس موزعة على سبعة أبعاد. وشملت البيانات الخاضعة للتحليل ٣٨٨ حالة، وعولجت باستخدام التكرارات والنسب المئوية والمتوسطات والانحرافات المعيارية، ومعامل كرونباخ ألفا، والتحليل العاملي الاستكشافي، وارتباط بيرسون، والانحدار الخطي البسيط والمتعدد. أظهرت النتائج اتساقاً داخلياً مرتفعاً للأداة؛ إذ بلغ معامل كرونباخ ألفا للاستبانة كاملة ٠.٩٤٧، وبلغ للمتغير المستقل ٠.٨٨٤ وللمتغير التابع ٠.٩٢٣. كما جاء مستوى استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه ككل متوسطاً بمتوسط ٣.٣٣٣، في حين جاء مستوى استدامة البنية التحتية للمياه ككل مرتفعاً بمتوسط ٣.٤٢١. وكشف الانحدار البسيط عن أثر موجب ذي دلالة إحصائية للاستراتيجيات الكلية في الاستدامة، حيث بلغ معامل الارتباط ٠.٨٤٠ وفسر النموذج ٧٠.٦٪ من التباين في الدرجة الكلية للاستدامة ضمن بيانات الدراسة. وأظهر الانحدار المتعدد أن الأبعاد الثلاثة ذات آثار موجبة ودالة، وكان بعد إدارة الطلب والحد من الفاقد الأقوى نسبياً، يليه بعد المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية، ثم بعد تنوع وتعزيز مصادر الإمداد، مع تقارب معاملات التأثير المعيارية. وأوصت الدراسة بإعطاء أولوية لبرامج التنبؤ بالطلب والموازنة المائية ومناطق القياس وإدارة الضغط والكشف المبكر عن التسرب، بالتوازي مع تطوير الصيانة التنبؤية وتكامل الأنظمة الرقمية والتخزين الاستراتيجي والتخطيط المالي لدورة حياة الأصول.

الكلمات المفتاحية: ندرة المياه، إدارة المخاطر، إدارة الطلب، الفاقد المائي، التقنيات الذكية، استدامة البنية التحتية، شركة المياه الوطنية.

فهرس المحتويات

ب.....	إقرار حقوق الطباعة.....
ت.....	الشكر والتقدير
ث.....	المستخلص
ج.....	فهرس المحتويات
د.....	قائمة الجداول
ذ.....	قائمة المصطلحات والاختصارات
١.....	الفصل الأول
١.....	الإطار العام للدراسة.....
١.....	١,١ مقدمة الدراسة.....
٤.....	١,٢ مشكلة الدراسة.....
٦.....	١,٣ أهمية الدراسة.....
٦.....	١,٣,١ الأهمية العلمية.....
٧.....	١,٣,٢ الأهمية التطبيقية.....
٨.....	١,٤ أهداف الدراسة.....
٨.....	١,٥ تساؤلات الدراسة.....
٩.....	١,٦ فرضيات الدراسة.....
٩.....	١,٧ النظرية العلمية المتبعة لإعداد البحث
١١.....	١,٩ مصطلحات الدراسة.....
١٤.....	الفصل الثاني.....
١٤.....	الدراسات السابقة والإطار النظري
١٤.....	٢,١ مقدمة.....
١٤.....	٢,٢ الدراسات السابقة.....
١٤.....	٢,٢,١ الدراسات العربية.....
٢١.....	٢,٢,٢ الدراسات الأجنبية.....
٢٢.....	٢,٢,٣ التعقيب النقدي على الدراسات السابقة.....
٢٣.....	٢,٣ الإطار النظري
٢٣.....	٢,٣,١ إدارة مخاطر ندرة المياه.....
٢٧.....	٢,٣,٢ استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه.....
٣١.....	٢,٣,٣ استدامة البنية التحتية للمياه.....
٣٥.....	٢,٣,٤ العلاقة بين متغيرات الدراسة.....
٣٨.....	٢,٣,٥ التكامل بين الإطار النظري وبناء أداة الدراسة.....
٣٩.....	٢,٣,٦ دلالات الأدبيات على إدارة شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض.....
٣٩.....	٢,٣,٧ خلاصة مرحلية.....

٤٠	٢,٣,٨ التحليل المتقدم لمحفظة مخاطر الندرة.....
٤١	٢,٣,٩ اختيار استجابات المخاطر وتقييم كفاءتها.....
٤١	٢,٣,١٠ إدارة دورة حياة الأصول كجسر بين الاستراتيجية والاستدامة.....
٤٢	٢,٣,١١ نضج التحول الرقمي في مرافق المياه.....
٤٤	الفصل الثالث.....
٤٤	منهجية الدراسة.....
٤٤	٣,١ مقدمة.....
٤٤	٣,٢ المنهجية وطرق البحث.....
٤٤	٣,٢,١ منهج الدراسة.....
٤٥	٣,٢,٢ تصميم الدراسة.....
٤٥	٣,٢,٣ متغيرات الدراسة وأبعادها.....
٤٥	٣,٢,٤ أداة الدراسة.....
٤٦	٣,٢,٥ مقياس الاستجابة ومقياس تفسير المتوسطات.....
٤٦	٣,٢,٦ صدق أداة الدراسة وثباتها.....
٤٦	٣,٢,٧ إعداد البيانات وضوابط الجودة.....
٤٦	٣,٢,٨ الأساليب الإحصائية.....
٤٧	٣,٢,٩ الاعتبارات الأخلاقية.....
٤٧	٣,٣ مجتمع البحث والحالات الخاضعة للتحليل.....
٤٧	٣,٣,١ مجتمع الدراسة المستهدف.....
٤٧	٣,٣,٢ حجم البيانات المستخدمة.....
٤٨	٣,٤ حدود البحث.....
٤٨	٣,٥ خلاصة الفصل.....
٤٩	الفصل الرابع.....
٤٩	تحليل البيانات والنتائج والمناقشة والتوصيات.....
٤٩	٤,١ مقدمة.....
٤٩	٤,٢ وصف خصائص الحالات الخاضعة للتحليل.....
٥١	٤,٣ اختبار صدق أداة الدراسة وثباتها.....
٥٣	٤,٤ التحليل الوصفي لأبعاد الدراسة.....
٥٤	٤,٥ فحص افتراضات التحليل.....
٥٥	٤,٦ معاملات الارتباط بين متغيرات الدراسة.....
٥٦	٤,٧ اختبار الفرضية الرئيسية.....
٥٧	٤,٨ اختبار الفرضيات الفرعية.....
٥٨	٤,٩ تحليلات داعمة لأبعاد استدامة البنية التحتية.....
٥٨	٤,١٠ مناقشة النتائج.....
٦١	٤,١١ النتائج النهائية للدراسة.....
٦٢	٤,١٢ التوصيات.....

٦٤	٤,١٣ مقترحات الدراسات المستقبلية
٦٤	٤,١٤ خلاصة الفصل
٦٥	المراجع
٦٥	أولاً: المراجع العربية
٦٨	ثانياً: المراجع الأجنبية
٧١	الملاحق
٧٩	Abstract

قائمة الجداول

٤٩	جدول (٤- 1): توزيع الحالات حسب الجنس والفئة العمرية والمؤهل العلمي
٥٠	جدول (٤- 2): توزيع الحالات حسب مجال العمل والخبرة في قطاع المياه والمستوى الوظيفي
٥١	جدول (٤- 3): ملخص نتائج الاتساق الداخلي للفقرات
٥١	جدول (٤- 4): معاملات كرونباخ ألفا لأبعاد ومتغيرات الدراسة
٥٢	جدول (٤- 5): نتائج التحليل العاملي الاستكشافي للمتغير المستقل
٥٣	جدول (٤- 6): نتائج التحليل العاملي الاستكشافي للمتغير التابع
٥٣	جدول (٤- 7): المتوسطات والانحرافات المعيارية لأبعاد المتغير المستقل
٥٤	جدول (٤- 8): المتوسطات والانحرافات المعيارية لأبعاد المتغير التابع
٥٤	جدول (٤- 9): ملخص فحوص التوزيع والبواقي والقيم المؤثرة
٥٥	جدول (٤- 10): معاملات ارتباط بيرسون الأساسية
٥٦	جدول (٤- 11): نتائج الانحدار الخطي البسيط لاختبار الفرضية الرئيسة
٥٧	جدول (٤- 12): نتائج الانحدار المتعدد لاختبار الفرضيات الفرعية
٥٨	جدول (٤- 13): ملخص نماذج الانحدار الداعمة لأبعاد الاستدامة
٦٢	جدول (٤- 14): ملخص قرارات اختبار الفرضيات

قائمة المصطلحات والاختصارات

المصطلح/الاختصار الإنجليزي	المصطلح العربي
Water Scarcity Risk Management	إدارة مخاطر ندرة المياه
Water Infrastructure Sustainability	استدامة البنية التحتية للمياه
Integrated Water Resources Management (IWRM)	الإدارة المتكاملة للموارد المائية
District Metered Areas (DMAs)	مناطق القياس
Non-Revenue Water (NRW)	المياه غير المحققة للإيرادات
Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)	معامل كفاية العينة
Variance Inflation Factor (VIF)	معامل تضخم التباين
Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)	الحزمة الإحصائية للعلوم الاجتماعية

الفصل الأول

الإطار العام للدراسة

١.١ مقدمة الدراسة

أصبحت ندرة المياه من أكثر المخاطر المركبة تأثيراً في قدرة الدول والمدن على مواصلة التنمية وتقديم الخدمات الأساسية بصورة مستقرة. ولا تقتصر الندرة على الانخفاض المادي في كميات المياه المتجددة، بل تشمل أيضاً عدم قدرة منظومة الإمداد على توفير مياه مأمونة بالكمية والتوقيت والجودة والتكلفة المناسبة. ومن هذا المنظور تتحول ندرة المياه من مسألة بيئية منفردة إلى خطر استراتيجي يرتبط بالأمن الاقتصادي والصحة العامة والتوسع الحضري واستمرارية الأعمال، كما يرتبط مباشرة بقدرة البنية التحتية على امتصاص الضغوط والتكيف معها والتعافي من الأعطال والاضطرابات. وتؤكد الأدبيات الدولية أن إدارة المياه في القرن الحادي والعشرين تتطلب الانتقال من منطق زيادة العرض فقط إلى إدارة متكاملة تجمع بين تنويع المصادر، وضبط الطلب، ورفع كفاءة الشبكات، وإدارة الأصول، والاستفادة من البيانات والتقنيات الرقمية (Global Water Partnership, 2000; Butler et al., 2016).

وتظهر حدة هذا التحدي بصورة أكبر في البيئات الجافة وشبه الجافة؛ إذ تتسم هذه البيئات بمحدودية الأمطار، وارتفاع التبخر، وعدم انتظام التغذية الطبيعية للمياه الجوفية، مع تزايد الاحتياجات الناتجة عن النمو السكاني والتحضر والنشاط الاقتصادي. وفي مثل هذه السياقات لا يمكن تقييم الأمن المائي بالاعتماد على توافر مورد طبيعي واحد، وإنما بقدرة النظام المؤسسي والتقني على تكوين محفظة متنوعة من الموارد، وتوزيعها بكفاءة، وتقليل الفاقد، والمحافظة على جودة الخدمة خلال الظروف العادية والطوارئ. لذلك تكتسب إدارة المخاطر أهمية خاصة، لأنها توفر عملية منهجية لتحديد مصادر الخطر، وتحليل احتمالاتها وآثارها، وتحديد مستويات القبول، ثم اختيار الاستجابات المناسبة ومراقبة فاعليتها بصورة مستمرة (ISO, 2018).

وتتدرج المملكة العربية السعودية ضمن الدول ذات الظروف المناخية شديدة الجفاف، حيث لا توجد أنهار دائمة، وتعتمد منظومة المياه على مزيج من المياه المحلاة والمياه الجوفية والمياه السطحية المحدودة والمياه المعالجة. وقد أدى التطور الاقتصادي والتوسع العمراني إلى ارتفاع متطلبات الإمداد الحضري والصناعي، بينما يظل تجدد الموارد الطبيعية محدوداً. وتوضح الاستراتيجية الوطنية للمياه ٢٠٣٠ أن معالجة التحديات المائية تستلزم منظومة متكاملة تشمل أمن الإمداد، وإدارة الطلب، وتحسين كفاءة الخدمات،

والمحافظة على الموارد، وتعزيز الجاهزية في الحالات العادية والطارئة (وزارة البيئة والمياه والزراعة، ٢٠١٨). ويكشف هذا التوجه أن الاستدامة المنشودة لا تتحقق بإنشاء أصول جديدة فقط، بل بإدارة دورة حياة البنية التحتية وتحسين موثوقيتها وكفاءتها البيئية والمالية.

ويحتل تنوع مصادر الإمداد موقعًا محوريًا في إدارة مخاطر الندرة داخل المملكة. فالتحلية توفر موردًا يمكن التحكم في إنتاجه بدرجة أكبر من الموارد الطبيعية المتقلبة، بينما يتيح التوسع في معالجة مياه الصرف وإعادة استخدامها توجيه المياه العذبة للاستخدامات ذات الأولوية وخفض الضغط على المصادر الجوفية. كما يسهم التخزين الاستراتيجي والربط بين منظومات الإنتاج والنقل والتوزيع في تقليل أثر توقف مصدر أو منشأة واحدة. إلا أن التنوع لا يخلو من مخاطر موازية؛ فالتحلية كثيفة الطاقة ورأس المال، وإعادة الاستخدام تتطلب معالجة متقدمة وشبكات مناسبة وقبولا مؤسسيًا ومجتمعيًا، كما أن تعدد المصادر يزيد تعقيد التشغيل والتحكم في الجودة. ومن ثم فإن قيمة التنوع تتحدد بمدى دمجها في تخطيط المخاطر والأصول، لا بمجرد زيادة الطاقة الإنتاجية (Alodah, 2023; Dawoud et al., 2022).

ويمثل جانب الطلب المسار الثاني في إدارة الخطر؛ لأن الاستمرار في توسيع العرض دون ضبط أنماط الاستهلاك والفاقد قد ينقل المشكلة إلى مستوى أعلى من التكلفة والتعقيد. وتشمل إدارة الطلب استخدام التعرفة والحوافز، والتوعية، والأدوات المرشدة، والقياس الدقيق، وتحليل أنماط الاستهلاك، وتخصيص المياه وفق الأولويات. كما يرتبط بها الحد من المياه غير المحققة للإيرادات الناتجة عن التسربات والأخطاء في القياس والاتصالات غير النظامية. وقد بينت دراسات الاستهلاك في المملكة أن السكان والنشاط الاقتصادي وكفاءة الاستخدام عوامل مؤثرة في الطلب الحضري، وأن تحسين كفاءة الاستخدام قد يكون أكثر استدامة من الاعتماد المنفرد على زيادة الأسعار أو التوسع المستمر في الإنتاج (Alderiny et al., 2021; Javid, 2025).

ولا تكتمل إدارة الطلب دون معالجة الفاقد المائي داخل الشبكات. فالقطرة التي تُتَج وتُثَقَل وتُعالج ثم تُفقد قبل وصولها للمستفيد تمثل خسارة مائية ومالية وطاقية في آن واحد. كما يؤدي التسرب المزمن إلى انخفاض الضغط، وزيادة احتمالات التلوث عند انقطاع الخدمة، وتسارع تدهور الطرق والتربة المحيطة، وارتفاع أعمال الصيانة الطارئة. لذلك تعد إدارة الضغط، وتقسيم الشبكات إلى مناطق قياس، وموازنة المياه، والكشف النشط عن التسرب، واستبدال الأصول ذات المخاطر العالية عناصر مباشرة في استدامة البنية التحتية. ويترتب على خفض الفاقد تأجيل بعض التوسعات الرأسمالية، وتقليل استهلاك الطاقة والمواد الكيميائية، وتحسين ثقة المستفيدين واستمرارية الخدمة.

أما المسار الثالث فيتمثل في المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية. ويقصد بالمرونة قدرة النظام على الاستعداد للاضطراب، وتحمل أثره، والمحافظة على حد مقبول من الخدمة، ثم استعادة الأداء والتعلم من الحدث. وتتجسد هذه القدرة في وجود بدائل تشغيلية، وخطط طوارئ، ومخزون قطع غيار، ومصادر طاقة

احتياطية، وربط تشغيلي بين المرافق، ومراكز تحكم قادرة على اتخاذ القرار في الوقت المناسب. وتدعم الأنظمة الذكية هذه القدرة من خلال القياس اللحظي للتدفق والضغط والجودة، والعدادات الذكية، وأجهزة الاستشعار، والتحليلات التنبؤية، وأنظمة إدارة الأصول، بما يسمح باكتشاف الانحراف قبل تحوله إلى عطل واسع النطاق (Rousso et al., 2023; Soares Ascensão et al., 2023).

وتتكون البنية التحتية للمياه من منظومة مترابطة تضم مرافق الإنتاج والمعالجة، وخطوط النقل، والخزانات، ومحطات الضخ، وشبكات التوزيع، والعدادات، ومراكز التحكم، إلى جانب البنية الرقمية والمؤسسية التي تدير هذه الأصول. لذلك فإن استدامتها مفهوم متعدد الأبعاد، يشمل الاستدامة التشغيلية والفنية من حيث الكفاءة والاعتمادية والعمر النافع؛ والاستدامة الاقتصادية والمالية من حيث القدرة على تمويل التشغيل والصيانة والتجديد؛ والاستدامة البيئية من حيث كفاءة الطاقة والحد من الانبعاثات والتلوث وحماية الموارد؛ والمرونة واستمرارية الخدمة من حيث القدرة على مواجهة الصدمات والتكيف مع تغير الطلب والمناخ. ويعني ذلك أن تقييم الاستدامة لا ينبغي أن يقتصر على وجود الأصول، بل على جودة أدائها وتكلفة دورة حياتها وقدرتها على خدمة المجتمع مستقبلاً.

وتشير الأدبيات إلى علاقة منطقية بين إدارة مخاطر ندرة المياه واستدامة البنية التحتية. فتتوسع المصادر يقلل الاعتماد على نقطة فشل واحدة، وإدارة الطلب تخفف الأحمال وتؤخر التوسعات المكلفة، وخفض الفاقد يحسن الكفاءة المائية والمالية، بينما ترفع المرونة التشغيلية والرقمنة القدرة على الاستجابة للأعطال وإدارة الأصول استباقياً. ومع ذلك، لا تكون هذه العلاقة إيجابية بصورة آلية؛ فقد يؤدي التوسع غير المنسق في مصادر جديدة إلى أصول مرتفعة التكلفة أو غير مستغلة، وقد تنتج عن الرقمنة مخاطر سيبرانية أو ضعف تكامل البيانات، كما قد تخفق برامج الطلب إذا لم ترتبط بالحوافز والقياس والاتصال المؤسسي. ولذلك تركز الدراسة الحالية على الاستراتيجيات بوصفها حزمة إدارية مترابطة، وعلى أثرها كما يدركه العاملون المختصون القادرون على الربط بين القرارات الاستراتيجية والأداء التشغيلي للأصول.

وتكتسب منطقة الرياض أهمية تطبيقية خاصة بسبب كثافتها السكانية واتساعها العمراني وتنوع الأنشطة الحكومية والتجارية والصناعية فيها، وما يترتب على ذلك من طلب مرتفع وحساس على خدمات المياه. كما أن بُعد المدينة عن الساحل يجعل الإمداد مرتبطاً بمنظومات إنتاج ونقل وتخزين معقدة، ويزيد أهمية الموثوقية والاحتياط والتخطيط طويل الأجل. وقد تناولت دراسة Ouda et al. (2018) الطلب طويل الأجل على المياه المحلاة في الرياض ومتطلبات الاستثمار اللازمة لاستدامة الإمداد، وأظهرت الحاجة إلى ربط توقعات الطلب بقرارات الطاقة الإنتاجية والتمويل. وهذا يجعل الرياض بيئة مناسبة لاختبار أثر استراتيجيات إدارة الخطر في استدامة البنية التحتية من منظور مؤسسي ميداني.

وتؤدي شركة المياه الوطنية دوراً تنفيذياً رئيساً في تقديم خدمات المياه والصرف الصحي وإدارة شبكات التوزيع والأصول والتشغيل والصيانة وخدمة المستفيدين في نطاقات عملها. ويتطلب هذا الدور تنسيقاً بين

إدارات المخاطر، والتخطيط والمشروعات، والتشغيل والصيانة، والشبكات، وإدارة الأصول، والجودة، والطوارئ، والاستدامة، والتحول الرقمي. ويتوفر لدى العاملين المختصين في هذه الإدارات إدراك عملي للتحديات المرتبطة بالمصادر والطلب والفاقد والجاهزية التقنية، كما يستطيعون تقدير مدى انعكاس الاستراتيجيات على الاعتمادية والكفاءة والتكلفة والبيئة واستمرارية الخدمة. لذلك تستهدف الدراسة هذه الفئة، ولا تتعامل مع جميع الموظفين بوصفهم مجتمعًا متجانسًا.

وتأتي الدراسة الحالية استجابة لحاجة بحثية تتمثل في نقص الدراسات الميدانية التي تجمع، في نموذج واحد، بين ثلاثة أبعاد لإدارة مخاطر ندرة المياه وبين استدامة البنية التحتية بأبعادها التشغيلية والمالية والبيئية والمرونية، في بيئة شركة مياه وطنية وفي منطقة الرياض تحديدًا. فمعظم الأدبيات السعودية المتاحة تناولت الاستهلاك، أو التحلية، أو إعادة الاستخدام، أو التغير المناخي، أو القبول المجتمعي كلاً على حدة، بينما تقل الدراسات التي تقيس الأثر المؤسسي المتكامل لهذه الاستراتيجيات على استدامة الأصول والخدمات. ومن هنا تسعى الدراسة إلى تقديم اختبار كمي للعلاقة، بما يدعم الأدبيات ويقدم أساسًا تطبيقيًا لصانعي القرار.

١.٢ مشكلة الدراسة

تتبع مشكلة الدراسة من التباين بين اتساع الجهود المبذولة لزيادة أمن الإمداد المائي في المملكة وبين استمرار الحاجة إلى ضمان استدامة البنية التحتية التي تنتج المياه وتنقلها وتخزنها وتوزعها. فندرة الموارد الطبيعية وارتفاع الطلب لا يمثلان ضغطاً على كمية المياه فقط، بل يزيدان تشغيل الأصول بالقرب من طاقتها، ويرفعان حساسية الخدمة تجاه توقف مرافق الإنتاج أو النقل أو الضخ، ويضاعفان تكلفة الأعطال والفاقد. ويصبح السؤال الإداري الرئيس عندئذ: هل تُدار استراتيجيات مواجهة الندرة بطريقة تحافظ على استدامة البنية التحتية، أم تركز على سد العجز الآني دون تحقيق توازن دورة الحياة والمرونة والكفاءة؟

وتوضح الاستراتيجية الوطنية للمياه ٢٠٣٠ أن القطاع يواجه تحديات مترابطة تتعلق بمحدودية الموارد المتجددة، وارتفاع الطلب، وكفاءة الاستخدام، وتكاليف الخدمة، وتطوير البنية الأساسية، وتكامل الأدوار المؤسسية (وزارة البيئة والمياه والزراعة، ٢٠١٨). كما تضع الاستراتيجية أهدافاً لضمان إتاحة مياه مأمونة في الظروف العادية والطوارئ، وتحسين إدارة الطلب، وتقديم خدمات عالية الجودة وفعالة التكلفة، والمحافظة على الموارد والبيئة. ويعني ذلك أن نجاح سياسات المياه ينبغي أن يقاس بقدرتها على تحقيق هذه الأهداف مجتمعة، لا بمؤشر إنتاج المياه وحده.

ويزيد التوسع السكاني والعمراني في منطقة الرياض من تعقيد المشكلة؛ إذ يرتبط نمو الأحياء والأنشطة الاقتصادية بزيادة مستمرة في الوصلات والأحمال على الشبكات والخزانات ومحطات الضخ. ويستلزم ذلك استثمارات متتابة في النقل والتوزيع والتخزين، إلى جانب صيانة الأصول القائمة. وقد أظهرت الدراسات

الاقتصادية للطلب المائي في المملكة أن النمو السكاني والنشاط الحضري عوامل مؤثرة في الاستهلاك، وأن إدارة الطلب تحتاج إلى مزيج من الكفاءة التقنية والسلوك والتسعير والتخطيط (Alderiny et al., 2021; Javid, 2025). وفي غياب إدارة متكاملة قد تتحول الزيادة في الطلب إلى دورة مستمرة من التوسعات الرأسمالية والتكاليف التشغيلية.

وتتمثل إحدى صور المشكلة في الاعتماد المرتفع على مصادر غير تقليدية ومنظومات نقل بعيدة ومعقدة. فالتحلية ترفع موثوقية الإمداد مقارنة بالمصادر الطبيعية المتذبذبة، لكنها تتطلب طاقة واستثمارات كبيرة، كما تجعل استمرارية الخدمة مرتبطة بسلاسل مترابطة من الإنتاج والنقل والتخزين والتوزيع. وقد بينت دراسة Ouda et al (٢٠١٨) أن التخطيط للطلب المحلي في الرياض يحتاج إلى رؤية طويلة الأجل للاستثمار والطاقة الإنتاجية. وتضيف إعادة استخدام المياه المعالجة خياراً مهماً لتنويع المحفظة، إلا أن فعاليتها تتوقف على جودة المعالجة والبنية المخصصة للنقل والتخزين والطلب المستدام على المياه المعالجة (Alkhudhiri et al., 2019; Dawoud et al., 2022).

ويتصل بذلك تحدي الفاقد المائي والتسربات. فالارتفاع في المياه غير المحققة للإيرادات يضعف كفاءة الاستفادة من الطاقة الإنتاجية ويزيد التكاليف ويضغط على الأصول. كما أن معالجة الفاقد ليست نشاطاً فنياً محدوداً، بل عملية إدارية تعتمد على توافر بيانات الموازنة المائية، ودقة العدادات، وإدارة الضغط، وتقسيم الشبكات، وترتيب مناطق التدخل بحسب المخاطر والعائد، وتمويل الإحلال والتجديد. وإذا ظلت الصيانة استجابية بعد حدوث الكسر، فإن ذلك يؤدي إلى تكرار الأعطال وتزايد الانقطاعات وتراجع العمر الاقتصادي للشبكة، في حين تساعد الصيانة الوقائية والتنبؤية على توجيه الموارد إلى الأصول الأعلى خطورة.

وتبرز المشكلة كذلك في الحاجة إلى تحقيق توازن بين إدارة العرض وإدارة الطلب. فقد يقود التركيز المنفرد على زيادة الإنتاج إلى إهمال فرص الترشيد والكفاءة، بينما لا تكفي برامج التوعية وحدها ما لم تُدعم بقياس دقيق وحوافز وتسعير وإدارة فنية للشبكات. وتؤكد مراجعات إدارة المياه السعودية أن الاستدامة تتطلب الجمع بين مصادر غير تقليدية وبرامج حفظ المياه وتحسين الحوكمة والكفاءة التشغيلية (Alotaibi et al., 2023; Almulhim & Abubakar, 2023). ومن ثم تطرح المشكلة ضرورة تقييم أثر الاستراتيجية المتكاملة، وليس فاعلية تدخل منفرد.

كما أن التحول الرقمي يفتح فرصاً لخفض الخطر، لكنه يفرض متطلبات جديدة على استدامة البنية التحتية. فالعدادات الذكية وأجهزة الاستشعار ومراكز التحكم والتحليلات المتقدمة تستطيع توفير إنذار مبكر عن التسربات أو تغير الضغط أو جودة المياه، وتمكين الصيانة التنبؤية، وتحسين التنبؤ بالطلب. غير أن هذه الفوائد تعتمد على جودة البيانات، وتكامل الأنظمة، وكفاءة المستخدمين، والأمن السيبراني، واستمرارية الاتصالات. وتوضح دراسة AlGhamdi and Sharma (٢٠٢٢) الإمكانيات التشغيلية لإنترنت الأشياء

في مراقبة المستويات والتسرب والجودة، بينما تبين المراجعات الدولية أن القيمة الحقيقية للشبكات الذكية تتحقق عندما تندمج البيانات في عمليات القرار وإدارة الأصول، لا عندما تظل أجهزة منفصلة (Roussou et al., 2023).

وتتجسد فجوة أخرى في العلاقة بين المرونة التشغيلية والاستدامة. فالبنية التحتية قد تبدو كفؤة في الظروف المعتادة، لكنها تكون هشة أمام انقطاع الطاقة، أو توقف خط نقل، أو تلوث مصدر، أو طفرة في الطلب، أو هجوم سيبراني، أو حدث مناخي شديد. ويؤكد مدخل Safe & SuRe أن الاستدامة ينبغي أن تشمل قدرة النظام على التعامل مع الفشل المحتمل وتقليل عواقبه والتعافي منه، بدل افتراض إمكانية منع جميع الأعطال (Butler et al., 2016). لذلك تتطلب الاستدامة خطط استمرارية أعمال، وبدائل تشغيلية، وسعات تخزين واحتياط، وتمارين طوارئ، وآليات تعلم بعد الحوادث.

ومن الناحية البحثية، تتركز نسبة كبيرة من الدراسات السعودية في تحليل الموارد على المستوى الوطني أو التنبؤ بالطلب أو دراسة قبول إعادة الاستخدام أو تقييم سلوك المستهلكين. وقد وفرت هذه الدراسات معرفة مهمة، لكنها لم تختبر غالباً، من وجهة نظر العاملين المختصين في مرفق المياه، أثر أبعاد محددة لإدارة مخاطر الندرة في أبعاد استدامة البنية التحتية. كما أن بعض الدراسات التقنية ركزت على نموذج أو جهاز أو مصدر واحد، في حين أن القرار المؤسسي يتطلب فهم التفاعل بين محفظة المصادر، وإدارة الطلب والفاقد، والمرونة والتقنيات الذكية.

وبناءً على ما سبق، تتمثل المشكلة في عدم وضوح مستوى الأثر الذي تمارسه استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه، بأبعادها المتمثلة في تنويع وتعزيز مصادر الإمداد، وإدارة الطلب والحد من الفاقد، والمرونة التشغيلية والتقنيات الذكية، في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض. وتحتاج هذه العلاقة إلى اختبار ميداني كمي يحدد الأثر الكلي والنسبي لكل بعد، بما يوفر دليلاً يساعد على ترتيب الأولويات الاستثمارية والتشغيلية.

وينبثق من المشكلة السؤال الرئيس الآتي: ما أثر استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض؟

١.٣ أهمية الدراسة

١.٣.١ الأهمية العلمية

تتبع الأهمية العلمية من جمع الدراسة بين مجالين غالباً ما يُبحثان بصورة منفصلة: إدارة مخاطر ندرة المياه، واستدامة البنية التحتية للمياه. فهي تنقل النقاش من وصف الندرة ومصادرها إلى قياس استجابات مؤسسية محددة، وتختبر أثرها في نتائج تشغيلية ومالية وبيئية ومرونية. وبذلك تسهم في توسيع تطبيق

مفاهيم إدارة المخاطر المؤسسية داخل قطاع المياه، وتوضح كيف يمكن تحويل المخاطر المائية إلى متغيرات قابلة للقياس والتحليل.

كما تضيف الدراسة إلى الأدبيات السعودية نموذجًا متكاملًا يجمع ثلاثة أبعاد مترابطة بدل دراسة التحلية أو الترشيح أو الرقمنة منفردة. ويساعد هذا النموذج على تفسير الاختلاف بين مجرد تنفيذ مشروع مائي وبين بناء قدرة مستدامة على مواجهة الندرة. ويتيح تطبيقه في شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض اختبار صلاحية المفاهيم في بيئة حضرية كبيرة تتسم بتعقيد منظومة الإمداد وارتفاع حساسية الخدمة.

وتتمثل مساهمة أخرى في اشتقاق أبعاد المتغيرات وفقرات الأداة من أدبيات ومقاييس موثقة، وربطها بإطار الإدارة المتكاملة للموارد المائية ومدخل إدارة المخاطر والمرونة. ويسمح ذلك بتطوير أداة قابلة للتحكيم والاختبار يمكن أن تستفيد منها دراسات لاحقة في مناطق أو مرافق أخرى. كما تقدم الدراسة تحليلًا نقديًا للفجوة بين الأدبيات التي تركز على الموارد وبين الأدبيات التي تركز على الأصول والخدمات.

١.٣.٢ الأهمية التطبيقية

تتمثل الأهمية التطبيقية لشركة المياه الوطنية في توفير تشخيص كمي لإدراك المختصين بشأن الاستراتيجيات الأكثر تأثيرًا في استدامة البنية التحتية. ويمكن أن يساعد ذلك القيادات ومتخذي القرار في المفاضلة بين الاستثمارات المرتبطة بزيادة المصادر، وبرامج خفض الفاقد، وتحديث الشبكات والأنظمة الرقمية، وتعزيز قدرات الطوارئ، بناءً على أثرها المتوقع في الاستدامة بدل الاقتصاد على التكلفة الأولية. وتفيد النتائج إدارات المخاطر في تطوير سجل مخاطر مائي يربط الأسباب بالآثار والضوابط والمؤشرات، كما تفيد إدارات التشغيل والصيانة في تعزيز الانتقال من الصيانة التصحيحية إلى الوقائية والتنبؤية. وتستفيد إدارة الأصول والمشروعات من إدماج تكلفة دورة الحياة والاعتمادية والمرونة في أولويات الإحلال والتوسع، بينما تستفيد إدارات التحول الرقمي من تحديد التطبيقات ذات القيمة التشغيلية الواضحة مثل كشف التسرب وتحليل الضغط والتنبؤ بالأعطال.

وتخدم الدراسة الجهات المنظمة لقطاع المياه من خلال تقديم دليل ميداني على العلاقة بين إدارة الطلب وكفاءة الشبكات واستمرارية الخدمة، بما يمكن أن يدعم تصميم مؤشرات أداء وحوافز تنظيمية أكثر تكاملًا. كما تتسجم مع مستهدفات رؤية المملكة ٢٠٣٠ والاستراتيجية الوطنية للمياه، ولا سيما أهداف ضمان الإمداد، وتحسين إدارة الطلب، ورفع كفاءة الخدمات، والمحافظة على الموارد والبيئة.

١.٤ أهداف الدراسة

الهدف الرئيسي

قياس أثر استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض.

١.٤.٢ الأهداف الفرعية

١. قياس أثر استراتيجيات تنويع وتعزيز مصادر الإمداد المائي في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض.
٢. قياس أثر استراتيجيات إدارة الطلب والحد من الفاقد المائي في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض.
٣. قياس أثر استراتيجيات المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض.

١.٥ تساؤلات الدراسة

السؤال الرئيسي

ما أثر استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض؟

الأسئلة الفرعية

١. ما أثر استراتيجيات تنويع وتعزيز مصادر الإمداد المائي في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض؟
٢. ما أثر استراتيجيات إدارة الطلب والحد من الفاقد المائي في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض؟
٣. ما أثر استراتيجيات المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض؟

١.٦ فرضيات الدراسة

الفرضية الرئيسية

يوجد أثر ذو دلالة إحصائية عند مستوى دلالة ($\alpha = 0.05$) لاستراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض.

الفرضيات الفرعية

١. يوجد أثر ذو دلالة إحصائية عند مستوى دلالة ($\alpha = 0.05$) لاستراتيجيات تنويع وتعزيز مصادر الإمداد المائي في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض.
٢. يوجد أثر ذو دلالة إحصائية عند مستوى دلالة ($\alpha = 0.05$) لاستراتيجيات إدارة الطلب والحد من الفاقد المائي في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض.
٣. يوجد أثر ذو دلالة إحصائية عند مستوى دلالة ($\alpha = 0.05$) لاستراتيجيات المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض.

١.٧ النظرية العلمية المتبعة لإعداد البحث

• الإطار الرئيسي: الإدارة المتكاملة للموارد المائية

تعتمد الدراسة الإدارة المتكاملة للموارد المائية بوصفها الإطار العلمي الرئيس، مع استخدام إدارة المخاطر وفق ISO 31000 ومدخل مرونة البنية التحتية بصورة مساندة. وقد بلور Global Water Partnership هذا الإطار باعتباره عملية تعزز التنمية والإدارة المنسقة للمياه والأرض والموارد المرتبطة بها، بهدف تعظيم الرفاه الاقتصادي والاجتماعي بصورة عادلة دون الإضرار باستدامة النظم البيئية الحيوية (Global Water Partnership, 2000). ويتميز الإطار بأنه لا يعالج المياه كمورد منعزل، بل يربط بين المصادر والاستخدامات والمؤسسات والاقتصاد والبيئة، وهو ما يتوافق مع طبيعة الدراسة الحالية.

نشأ الإطار استجابة لقصور الإدارة القطاعية التي تفصل بين العرض والطلب، وبين المياه السطحية والجوفية والمعالجة، وبين التخطيط والتنفيذ. وتفترض الإدارة المتكاملة أن القرارات في جزء من النظام تُحدث آثاراً في الأجزاء الأخرى؛ فزيادة التحلية تؤثر في الطاقة والتمويل، والتسعير يؤثر في الطلب والعدالة، وإعادة الاستخدام تؤثر في توزيع الموارد وفي البنية التحتية المطلوبة. لذلك يدعو الإطار إلى تنسيق السياسات وتقييم البدائل على مستوى الحوض أو النظام الخدمي، ومشاركة الأطراف ذات العلاقة، واستخدام المعلومات في القرار.

ترتكز الإدارة المتكاملة على مبادئ الكفاءة الاقتصادية، والعدالة الاجتماعية، والاستدامة البيئية، والحوكمة المنسقة. وتظهر الكفاءة في تخصيص المياه واختيار الاستثمارات التي تحقق أعلى منفعة على امتداد دورة الحياة؛ وتظهر العدالة في استمرار الوصول إلى خدمة مأمونة وبأسعار معقولة؛ وتظهر الاستدامة في حماية الموارد وتقليل الأثر البيئي؛ بينما تضمن الحوكمة وضوح المسؤوليات وتكامل البيانات والقرارات. وتوفر هذه المبادئ أساساً لتفسير المتغير التابع بأبعاده الفنية والمالية والبيئية والمرونية.

وترتبط النظرية بالمتغير المستقل لأن تنوع مصادر الإمداد يمثل التكامل بين الموارد التقليدية وغير التقليدية، وإدارة الطلب والفاقد تمثل كفاءة الاستخدام بدل التوسع غير المحدود في العرض، بينما تعكس المرونة والتقنيات الذكية الاعتماد على المعلومات والتنسيق والاستجابة التكيفية. وتترجم هذه العناصر الإطار من مستوى السياسة العامة إلى ممارسات تنظيمية وتشغيلية يمكن للعاملين المختصين تقييمها.

وترتبط النظرية بالمتغير التابع لأن استدامة البنية التحتية هي الوسيط المادي والمؤسسي الذي يحول الموارد إلى خدمة. فإذا لم تُدار الأصول وفق تكلفة دورة الحياة، ولم تتوافر مرونة واحتياط، ولم تُضبط الآثار البيئية، فلن تحقق إدارة الموارد أهدافها حتى مع توافر المياه الخام. ولذلك تُقاس الاستدامة في الدراسة من خلال الاستدامة التشغيلية والفنية، والاقتصادية والمالية، والبيئية، والمرونة واستمرارية الخدمة.

• الإطار المساند: إدارة المخاطر وفق ISO 31000

تقدم ISO 31000 إطاراً عاماً لإدارة المخاطر يقوم على التكامل مع الحوكمة والاستراتيجية والعمليات، ويشمل تحديد السياق، والتعرف على المخاطر، وتحليلها، وتقييمها، ومعالجتها، ومراقبتها، والتواصل بشأنها (ISO, 2018). وتفيد الدراسة من هذا الإطار في تحويل ندرة المياه إلى مجموعة من مصادر الخطر القابلة للإدارة، مثل عدم كفاية المصدر، وتقلب الطلب، وفشل الأصول، والتسرب، وانقطاع الطاقة، وضعف البيانات، والمخاطر المناخية والسيبرانية.

ولا يُنظر إلى الاستراتيجيات الثلاث بوصفها أنشطة منفصلة، بل بوصفها استجابات للمخاطر. فالتنوع يعالج مخاطر الاعتماد والتركيز، وإدارة الطلب والفاقد تعالج مخاطر تجاوز السعة وعدم الكفاءة، والمرونة والرقمنة تعالجان مخاطر التعطل وبطء الاكتشاف والاستجابة. ويساعد هذا الربط على صياغة فقرات الاستبانة في صورة ممارسات وضوابط، وعلى تفسير أثرها المتوقع في مؤشرات الاستدامة.

• الإطار المساند: مرونة البنية التحتية ومدخل Safe & SuRe

يقدم مدخل Safe & SuRe تصوراً للأنظمة المائية يعتمد على الموثوقية والمرونة والاستدامة، ويفترض أن منع جميع حالات الفشل غير واقعي، وأن الإدارة الفعالة ينبغي أن تقلل احتمال الفشل وعواقبه، وتحافظ على مستوى مقبول من الخدمة، وتسرع التعافي والتعلم (Butler et al., 2016). ويتسق ذلك مع طبيعة مرافق المياه التي تعمل في بيئة من عدم اليقين وتواجه أعطالاً فنية وتقلبات طلب وأحداثاً خارجية.

وتستفيد الدراسة من هذا المدخل في قياس جاهزية الطوارئ، وتعدد المسارات والبدائل، وسرعة اكتشاف الأعطال، واستعادة الخدمة، والتعلم من الحوادث. كما يفسر اعتماد بعد مستقل يجمع المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية؛ لأن البيانات والإنذار المبكر وإدارة الأصول الرقمية ليست غاية بذاتها، بل وسائل لرفع قدرة النظام على الاستباق والامتصاص والاستجابة والتعافي.

• اشتقاق الأبعاد والفرضيات وبناء الأداة

انطلاقاً من الإدارة المتكاملة للموارد المائية، اشتق بعد تنويع وتعزيز مصادر الإمداد من مبدأ التكامل بين المصادر والموثوقية، وبعد إدارة الطلب والفاقد من مبدأ الكفاءة، وبعد المرونة والتقنيات الذكية من مبدأ الإدارة التكميلية القائمة على المعلومات. أما أبعاد الاستدامة فاشتقت من التوازن بين الكفاءة الفنية والقدرة المالية والأثر البيئي واستمرارية الخدمة. وتدعم أدبيات المملكة هذه الاختيارات؛ إذ تؤكد دراسات التحلية وإعادة الاستخدام أهمية تنويع المصادر، وتؤكد دراسات الاستهلاك والحفظ أهمية الطلب، وتؤكد دراسات إنترنت الأشياء والمرونة أهمية الرقمنة والجاهزية.

وتفترض الدراسة أن تحسن كل بعد من أبعاد إدارة الخطر يقود إلى تحسن ملموس في استدامة البنية التحتية، مع اختلاف قوة الأثر بحسب طبيعة الممارسة ومرحلة نضجها. لذلك صيغت فرضية رئيسة للأثر الكلي وثلاث فرضيات فرعية للأبعاد. وبُنيت فقرات الاستبانة بحيث تقيس وجود الممارسة ودرجة تكاملها واستمراريتها، ثم تقيس نتائج الاستدامة التي يُتوقع أن تتأثر بها، دون سؤال المستجيب عن علاقة سببية مباشرة بطريقة قد ترفع تحيز الإجابة.

١.٩ مصطلحات الدراسة

• ندرة المياه

تعرف ندرة المياه مفاهيمياً بأنها حالة لا تكفي فيها الموارد المائية المتاحة، من حيث الكمية أو الجودة أو إمكانية الوصول، لتلبية الاستخدامات المطلوبة ضمن مستوى مقبول من التكلفة والاعتمادية والاستدامة. وتختلف الندرة المادية، الناتجة عن محدودية المورد الطبيعي، عن الندرة الاقتصادية أو المؤسسية التي تنتج عن نقص الاستثمار أو ضعف الإدارة أو عدم كفاءة التوزيع. وفي الدراسة الحالية لا تُقاس الندرة ذاتها بوصفها متغيراً، وإنما تُعامل بوصفها مصدر خطر يهدد الإمداد والأصول والخدمة.

• مخاطر ندرة المياه

يقصد بمخاطر ندرة المياه احتمال أن تؤدي محدودية الموارد أو تغيرها أو عدم كفاية القدرة الإنتاجية والتوزيعية إلى آثار سلبية في أهداف المؤسسة وخدماتها. وتشمل هذه الآثار الانقطاع، وانخفاض الضغط أو الجودة، وارتفاع التكلفة، وتسارع تدهور الأصول، وعدم الوفاء بالطلب، والآثار البيئية والاجتماعية.

ويجمع المفهوم بين احتمال وقوع الحدث وشدة عواقبه، ويتسع ليشمل المخاطر الاستراتيجية والتشغيلية والمالية والبيئية والسمعة.

• استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه

تعرف استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه بأنها مجموعة مترابطة من السياسات والبرامج والضوابط والقدرات التي تعتمد عليها المؤسسة لتقليل احتمال عدم كفاية الإمداد أو تخفيف آثاره والمحافظة على الخدمة. وإجراءً تقاس بالدرجة الكلية لاستجابات أفراد العينة عن فقرات ثلاثة أبعاد: تنويع وتعزيز مصادر الإمداد؛ إدارة الطلب والحد من الفاقد؛ المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية.

• تنويع وتعزيز مصادر الإمداد المائي

يقصد به تطوير محفظة متوازنة وموثوقة من المصادر والطاقات والبدائل، تشمل المياه المحلاة والمياه الجوفية في الحدود المستدامة والمياه المعالجة وإعادة الاستخدام والتخزين الاستراتيجي والربط بين المنظومات. وإجراءً يقاس بمدى إدراك المختصين لتوافر التخطيط للمصادر البديلة، والقدرة الاحتياطية، والتكامل بين الإنتاج والنقل والتخزين، ومراعاة الجودة والتكلفة والمخاطر البيئية.

• إدارة الطلب والحد من الفاقد المائي

تعني إدارة الطلب استخدام أدوات فنية واقتصادية وسلوكية ومعلوماتية للتأثير في كمية المياه المطلوبة وتوقيت استخدامها وكفاءتها. ويشير الحد من الفاقد إلى ضبط التسربات والأخطاء التجارية والقياسية عبر الموازنة المائية وإدارة الضغط والكشف والصيانة والإحلال. وإجراءً يقاس البعد بدرجة تطبيق الشركة لممارسات التنبؤ بالطلب، والقياس الدقيق، والترشيد، وإدارة الضغط، وكشف التسرب، وخفض المياه غير المحققة للإيرادات.

• المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية

تعرف المرونة التشغيلية بأنها قدرة المؤسسة ومنظومتها الفنية على الاستعداد للاضطراب وامتصاص أثره والاستجابة له واستعادة الخدمة والتعلم منه. وتشمل التقنيات الذكية أجهزة الاستشعار والعدادات الذكية وأنظمة التحكم والتحليلات الرقمية وإدارة الأصول والصيانة التنبؤية. وإجراءً يقاس البعد بتوافر خطط الاستمرارية والطوارئ والبدائل التشغيلية والإنذار المبكر والرقابة اللحظية وتكامل البيانات وسرعة اتخاذ القرار.

• استدامة البنية التحتية للمياه

يقصد باستدامة البنية التحتية للمياه قدرة الأصول والأنظمة والمؤسسات المرتبطة بإنتاج المياه ومعالجتها ونقلها وتخزينها وتوزيعها على تقديم خدمة مأمونة وموثوقة وفعالة التكلفة، مع المحافظة على الموارد والبيئة

والقدرة على التكيف مع الاحتياجات المستقبلية. وإجراءً تقاس بالدرجة الكلية لأربعة أبعاد: الاستدامة التشغيلية والفنية، والاستدامة الاقتصادية والمالية، والاستدامة البيئية، والمرونة واستمرارية الخدمة.

الفصل الثاني

الدراسات السابقة والإطار النظري

٢.١ مقدمة

يعرض هذا الفصل الأساس المعرفي الذي بُني عليه نموذج الدراسة وأبعادها. ويبدأ بمراجعة الدراسات ذات الصلة في المملكة والبيئات العربية، ثم ينتقل إلى الدراسات الأجنبية التي تناولت إدارة الندرة والمرونة والشبكات الذكية واستدامة البنية التحتية. ولا يقتصر العرض على تلخيص النتائج، بل يوضح هدف كل دراسة ومنهجها ومجال بياناتها أو عينتها وأداتها وأهم نتائجها وصلتها بالدراسة الحالية. وبعد التعقيب النقدي، يقدم الفصل إطاراً نظرياً لإدارة مخاطر ندرة المياه، والاستراتيجيات الثلاث، واستدامة البنية التحتية وأبعادها، ثم يحلل العلاقات التي تقود إلى فرضيات الدراسة.

٢.٢ الدراسات السابقة

٢.٢.١ الدراسات العربية

المحور الأول: دراسات الطلب المائي والترشيد والحد من الفاقد

دراسة أبو الفتوح (٢٠٠٣) بعنوان «محددات الطلب على المياه للأغراض المنزلية: دراسة تحليلية لمنطقة الرياض والمملكة العربية السعودية».

هدفت إلى تحديد العوامل التي تشكل الطلب المنزلي على المياه في الرياض وعلى المستوى الوطني. واعتمدت المنهج التحليلي الاقتصادي بالاستناد إلى البيانات والإحصاءات المرتبطة بالاستهلاك والسكان والأسعار والتوسع العمراني؛ ومن ثم كان مجتمع التحليل هو السلاسل والمؤشرات الرسمية، ولم تستخدم الدراسة عينة بشرية مستقلة. وتمثلت أدواتها في التحليل الإحصائي والاقتصادي للمحددات. وأبرزت النتائج أن الطلب المنزلي لا تحدده الوفرة وحدها، بل يتأثر بالنمو السكاني والعمراني وبنية الأسعار وخصائص الاستهلاك، بما يستلزم إدارة الطلب بالتوازي مع تطوير الإمداد. وتفيد الدراسة الحالية في تأصيل بعد إدارة الطلب، كما ترتبط مباشرة بالمجال المكاني للرياض، إلا أن الدراسة الحالية تنتقل من تفسير الاستهلاك إلى قياس أثر الاستراتيجيات المؤسسية في استدامة البنية التحتية.

دراسة أبو الفتوح (٢٠٠٤) بعنوان «ترشيد الطلب على المياه للأغراض المنزلية مع التطبيق على المملكة العربية السعودية».

استهدفت تحليل سياسات ترشيد الاستخدام المنزلي وتحديد الأدوات القادرة على ضبط نمو الطلب. واستخدمت منهجاً وصفيًا تحليليًا قائمًا على مراجعة البيانات والسياسات والبدائل الاقتصادية والتنظيمية؛ لذلك تمثل مجتمع الدراسة في الوثائق والإحصاءات الوطنية، من دون عينة أفراد. وكانت الأداة مصفوفة تحليل لأدوات التسعير والتوعية والتجهيزات المرشدة والرقابة على الاستهلاك. وخلصت إلى أن الترشيد الفعال يتطلب حزمة متكاملة، وأن الاعتماد على التوعية وحدها لا يكفي ما لم يقترن بالقياس والحوافز والضبط المؤسسي. وتدعم هذه النتيجة إدراج التوعية والتسعير والعدادات وكفاءة الاستخدام ضمن البعد الثاني للدراسة الحالية، مع إضافة الحد من الفاقد التشغيلي بوصفه ممارسة مرتبطة مباشرة بالشبكات والأصول.

دراسة الإبراهيم (٢٠٠٠) بعنوان «إدارة الطلب على المياه في الأردن: ترشيد الاستهلاك وتقليل الفاقد (١٩٨٤-١٩٩٨)».

هدفت إلى تقويم تجربة إدارة الطلب خلال الفترة المحددة وبيان دور الترشيد وتقليل الفاقد في موازنة العرض والطلب. واعتمدت دراسة حالة تحليلية لبيانات قطاع المياه والسياسات والبرامج؛ وكان مجتمعها السجلات والمؤشرات الوطنية الأردنية، ولم تقم على عينة بشرية. وتمثلت الأداة في التحليل الزمني والمقارنة بين إجراءات إدارة الطلب ومؤشرات الاستهلاك والفاقد. وأظهرت أن إدارة الطلب ليست نشاطاً توعوياً منفصلاً، بل منظومة تشمل القياس والصيانة والتسعير والتشريع والرقابة، وأن خفض الفاقد يعادل إضافة مورد جديد من حيث أثره في التوازن المائي. وتفيد الدراسة الحالية في دمج إدارة الطلب مع الحد من المياه غير المحققة للإيرادات ضمن بعد واحد، وفي تفسير أثرهما المتوقع في خفض أحمال الشبكات وتحسين استمرارية الخدمة.

دراسة الحبوس (٢٠١١) بعنوان «الفاقد المائي في شبكات توزيع المياه: دراسة حالة الفاقد المائي في الجزيرة الثانية بتجمع دمر».

استهدفت تشخيص الفاقد في شبكة توزيع حضرية وتحديد مصادره وسبل خفضه. واتخذت منهج دراسة الحالة الهندسية، وكان مجتمع التحليل مكونات الشبكة وبيانات التدفق والضغط والاستهلاك في منطقة الدراسة، لا عينة بشرية. واستخدمت خرائط الشبكة وقراءات العدادات والموازنة المائية والفحوص الميدانية أداةً للتحليل. وبينت النتائج أن الفاقد ينتج عن تفاعل التسربات الحقيقية مع أخطاء القياس والإدارة، وأن المعالجة تتطلب تقسيم الشبكة إلى مناطق قياس ومراقبة الضغط وتحسين الصيانة ودقة العدادات. وترتبط الدراسة الحالية بها في اشتقاق فقرات كشف التسرب، وإدارة الضغط، والصيانة الوقائية، ودقة القياس، لكنها تختبر أثر هذه الممارسات في أبعاد الاستدامة الأوسع داخل مرفق المياه.

دراسة العبيدي (٢٠١٣) بعنوان «العلاقة بين إدارة الطلب على المياه والتخفيف من الفقر: دراسة تحليلية للواقع المائي ومؤشرات الفقر في الوطن العربي».

هدفت إلى بيان الدور الاقتصادي والاجتماعي لإدارة الطلب في ظل الندرة العربية. واستخدمت المنهج الوصفي التحليلي، وكان مجتمعها بيانات الموارد المائية والطلب ومؤشرات الفقر في الدول العربية، من دون عينة ميدانية. وتمثلت الأداة في تحليل مقارن للمؤشرات والسياسات. وخلصت إلى أن ضعف كفاءة إدارة الطلب يزيد آثار الندرة على الفئات والقطاعات الهشة، وأن الإدارة المتكاملة والأسس الاقتصادية والاجتماعية للاستخدام والتكيف مع المناخ تمثل متطلبات رئيسية. وتقيد الدراسة الحالية في توسيع تفسير الاستدامة ليشمل استمرارية الخدمة وعدالتها وكفاءتها المالية، وتؤكد أن خفض الفاقد وتحسين الكفاءة ليسا هدفين فنيين فقط، بل مدخلان لتقليل التكلفة والمخاطر الاجتماعية.

دراسة الصرايرة (٢٠١٨) بعنوان «دراسة العوامل المؤثرة على كميات العرض والطلب لمياه الشرب في محافظة الكرك وكيفية إدارتهما معاً».

هدفت إلى تحليل محددات العرض والطلب وبناء تصور لإدارتهما بصورة متكاملة في بيئة تعاني شح المياه. واعتمدت المنهج الوصفي التحليلي ودراسة الحالة، وكان مجتمعها بيانات مصادر المياه والإنتاج والتوزيع والاستهلاك في محافظة الكرك، مع الاستفادة من معلومات الجهات المختصة؛ وتمثلت الأداة في تحليل السلاسل والوثائق والمؤشرات المائية. وأوضحت النتائج أن فجوة العرض والطلب ترتبط بالنمو السكاني، ومحدودية المصادر، والفواقد، وأن الحل الأكثر اتزاناً يجمع تعزيز الإمداد مع الترشيد والصيانة وتحسين التوزيع. وترتبط الدراسة الحالية بها في منطق المحفظة المتكاملة، لكنها تحول هذا المنطق إلى ثلاثة أبعاد قابلة للقياس وتختبر أثرها في استدامة البنية التحتية.

دراسة بلعروز وخلج وعبو (٢٠٢٣) بعنوان «متطلبات تحقيق الأمن المائي المستدام في الدول العربية».

هدفت إلى تحديد المتطلبات المؤسسية والفنية والاقتصادية اللازمة للأمن المائي. واعتمدت المنهج الاستنباطي بأداتي الوصف والتحليل، وكان مجتمع التحليل الأدبيات والمؤشرات والسياسات العربية، من دون عينة بشرية. وتمثلت الأداة في تحليل الأسباب والاستجابات ومقارنتها. وأظهرت أن التغير المناخي والنمو السكاني والتبعية المائية وسوء الاستغلال من أبرز مسببات الهشاشة، وأن التحلية وإعادة استخدام المياه العادمة وترشيد الطلب وتحسين الحوكمة تمثل مسارات متكاملة. وتقيد الدراسة الحالية في دعم الأثر الكلي للاستراتيجيات الثلاث، وفي تأكيد أن الأمن والاستدامة ينتجان من تكامل الأدوات لا من التوسع في العرض منفرداً.

المحور الثاني: دراسات تنويع المصادر والتخزين وإعادة الاستخدام

دراسة شاويش (٢٠١١) بعنوان «إنتاج ونقل واستهلاك المياه للأغراض البشرية في منطقة الباحة بالمملكة العربية السعودية: دراسة في الجغرافيا الاقتصادية».

هدفت إلى تحليل سلسلة الإمداد من مصادر الإنتاج إلى النقل والتوزيع والاستهلاك والمشكلات التشغيلية. واعتمدت المنهج الجغرافي الاقتصادي والدراسة الميدانية، وكان مجتمعها المنتجين والمستهلكين ومرافق المياه في منطقة الباحة، واستخدمت بيانات السدود والآبار والمناهل والشبكات إلى جانب استطلاع آراء الأطراف المعنية. وأظهرت النتائج محدودية دور بعض شبكات النقل، وارتفاع أثر المسافة ووسائل النقل في التكلفة، ووجود مشكلات تستلزم زيادة الإنتاج وتحسين التوزيع وترشيد الاستهلاك. وتفيد الدراسة الحالية في النظر إلى الإمداد بوصفه سلسلة مترابطة لا مصدرًا منفردًا، وفي ربط موثوقية المصدر بقدرات النقل والتخزين والتوزيع اللازمة لاستدامة الخدمة.

دراسة التركي (٢٠١٢) بعنوان «أهمية المياه وعوامل تلوثها وطرق معالجتها في المملكة العربية السعودية من منظور جغرافية المياه والبيئة».

استهدفت تحليل الموارد المائية السعودية ومصادر تلوثها وبدائل المعالجة والحماية. واعتمدت منهجًا وصفيًا تحليليًا قائمًا على الأدبيات والبيانات البيئية والجغرافية، فكان مجتمع التحليل مصادر المياه وعمليات الاستخدام والتلوث، ولم تستخدم عينة بشرية. وتمثلت الأداة في التصنيف والمقارنة بين المصادر والمخاطر والمعالجات. وأكدت النتائج أن الندرة الكمية تتداخل مع مخاطر الجودة، وأن حماية الموارد والمعالجة والرقابة البيئية ضرورية لرفع قابلية الإمداد للاستمرار. وتفيد الدراسة الحالية في عدم اختزال تنويع المصادر في الكمية، وفي إدراج سلامة المصدر والالتزام البيئي ضمن تفسير الاستدامة البيئية والفنية للبنية التحتية.

دراسة الجميعي (٢٠١٥) بعنوان «دور تطبيق نظم حصد المياه في تنمية الغطاء النباتي بالأراضي الجافة وشبه الجافة: نموذج حوض وادي نعمان بمكة المكرمة».

هدفت إلى تحديد إمكان توظيف حصد مياه الأمطار في بيئة جافة ودعم استدامة الموارد الطبيعية. واعتمدت منهجًا تطبيقيًا مكانيًا، وكان مجتمع التحليل حوض وادي نعمان وخصائصه الطبيعية، من دون عينة بشرية. واستخدمت تقنيتي الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية لتحليل الغطاء النباتي وتحديد مواقع الحصاد الممكنة. وأظهرت النتائج فقر الغطاء النباتي مع توافر مواقع متعددة قابلة لاستثمار الجريان المطري. وتدعم الدراسة الحالية مفهوم تنويع المصادر بإضافة الحصاد المائي والموارد المحلية، كما تبين أن التخطيط المكاني والتقنيات الجغرافية يمكن أن يعززا المرونة ويخفضا الاعتماد على مصدر واحد.

دراسة المطيري (٢٠١٧) بعنوان «الخرن المائي الاستراتيجي في البيوت: دراسة تطبيقية على مدينة بريدة».

هدفت إلى قياس خصائص الخزانات المنزلية وقدرتها على تغطية الاستهلاك عند توقف الإمداد. واعتمدت دراسة ميدانية تطبيقية على عينة من مساكن مدينة بريدة، مع استخدام بيانات وزارة البيئة والمياه والزراعة. وتمثلت الأدوات في القياس الميداني والاستبانة والأساليب الإحصائية والعلاقات الرياضية والبرامج الحاسوبية. وأظهرت النتائج تفاوتاً كبيراً في الساعات وفترات الكفاية بين قطاعات المدينة، وأن عدد أفراد الأسرة من أكثر المتغيرات تأثيراً في الاستهلاك، وأن الخزن المتاح يختلف في قدرته على دعم الطوارئ. وتفيد الدراسة الحالية في اشتقاق مؤشرات التخزين الاستراتيجي واستمرارية الإمداد، مع انتقالها من خزانات المساكن إلى قدرات المرفق والشبكة على الاحتفاظ باحتياطي تشغيلي واستعادة الخدمة.

دراسة القسومي (٢٠٢٠) بعنوان «إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة في مدينة الرياض: دراسة جغرافية لاتجاهات الرأي العام».

هدفت إلى قياس قبول الاستخدام الآمن للمياه المعالجة في الأغراض المنزلية والبلدية والزراعية والصناعية. واستخدمت المنهج الوصفي المسحي، وتكونت العينة من ٩٥٨ رب أسرة في أحياء مختلفة بمدينة الرياض، وكانت الأداة استبانة من ١٣ سؤالاً. وأظهرت النتائج قبولاً لاستخدام المياه المعالجة في ري المزارع والحدائق والأشجار، والأغراض الترويحية والتنظيف والتبريد الصناعي وبعض الاستخدامات المنزلية غير الصالحة للشرب، مع أهمية التخطيط والضمانات الصحية. وترتبط الدراسة الحالية بها مباشرة في المجال المكاني وفي دعم إعادة الاستخدام بوصفه أحد عناصر تنويع المصادر، كما تضيف قياس أثر دمج هذا المصدر في استدامة الأصول والخدمات.

دراسة الزهراني (٢٠٢١) بعنوان «الخصائص الهيدرولوجية لحوض وادي نعمان بمنطقة مكة المكرمة».

هدفت إلى تحليل قدرة الحوض على توليد الجريان السطحي وتصنيف درجات الخطورة الهيدرولوجية. واعتمدت المنهج الكمي المكاني، وكان مجتمع التحليل شبكة التصريف وخصائص الحوض، من دون عينة بشرية. واستخدمت قاعدة بيانات هيدرولوجية ونماذج حساب الجريان ونظم المعلومات الجغرافية لإنتاج خرائط موضوعية. وأظهرت النتائج تفاوتاً في زمن التركيز والاستجابة وذروة التصريف، وحددت الأحواض الفرعية الأعلى خطورة. وتفيد الدراسة الحالية في بيان أن تعزيز المصادر المحلية والتخزين يجب أن يستند إلى تحليل مخاطر مكاني، وأن بيانات الإنذار المبكر والجريان تدعم المرونة التشغيلية وحماية الأصول.

دراسة حكيم وورغي (٢٠٢٢) بعنوان «دمج تقنية نظم المعلومات الجغرافية وعملية التحليل الهرمي لتحديد أنسب المواقع للسدود في حوض وادي نعمان بمدينة مكة المكرمة».

استهدفت اختيار المواقع الأنسب للسدود باستخدام معايير طبيعية ومكانية متعددة. واعتمدت المنهج التطبيقي متعدد المعايير، وكان مجتمع التحليل كامل مساحة الحوض وطبقاته الجغرافية، ولم تستخدم عينة بشرية. وتمثلت الأداة في نظم المعلومات الجغرافية وعملية التحليل الهرمي لإسناد الأوزان ودمج المعايير. وأنتجت الدراسة خريطة ملائمة تحدد المواقع ذات الأولوية، بما يرفع كفاءة قرار التخزين والحصاد ويقلل مخاطر الاختيار غير الملائم. وتقيد الدراسة الحالية في اشتقاق فقرات القرار المبني على البيانات، والتخزين الاستراتيجي، وتكامل التقنية مع التخطيط، وهي عناصر تربط تنوع المصادر بالمرونة والاستدامة.

دراسة الزهراني (٢٠٢٣) بعنوان «تطبيق نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير لتحديد إمكانات حصاد مياه الأمطار في حوض وادي الأحسبة غرب المملكة العربية السعودية».

هدفت إلى تحليل الملاءمة المكانية للحصاد وتحديد أفضل المناطق لاستثمار مياه السيول. واعتمدت منهج التحليل المكاني متعدد المعايير، وكان مجتمع الدراسة حوض وادي الأحسبة وطبقاته الجيولوجية والطبوغرافية والهيدرولوجية، دون عينة بشرية. واستخدمت نظم المعلومات الجغرافية وعملية التحليل الهرمي لبناء أوزان المتغيرات ودمجها. وأظهرت النتائج إمكان تصنيف الحوض إلى درجات ملائمة وتوجيه منشآت الحصاد إلى المواقع الأعلى جدوى. وتدعم الدراسة الحالية تنوع الإمداد بالموارد غير التقليدية، كما تبرز قيمة البيانات المكانية في خفض مخاطر الاستثمار وتحسين استدامة الأصول.

دراسة هاشم وتوفيق (٢٠٢٤) بعنوان «نمذجة حصاد مياه الأمطار غربي المملكة العربية السعودية: دراسة جغرافية باستخدام التقنيات الجيومكانية والتحليل متعدد المعايير».

هدفت إلى بناء نموذج مكاني لمناطق الحصاد في أجزاء من منطقتي مكة المكرمة والمدينة المنورة لخدمة التنمية. واستخدمت منهجاً تطبيقياً يجمع الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية والتحليل متعدد المعايير، وكان مجتمع التحليل الأحواض والطبقات المكانية ذات الصلة، من دون عينة أفراد. وتمثلت الأداة في النمذجة الجيومكانية وترجيح معايير الملاءمة. وأظهرت النتائج أن الدمج المنهجي للمعايير يتيح تحديد أولويات أكثر دقة لمشروعات الحصاد والتخزين. وتقيد الدراسة الحالية في تفسير دور التقنية والتحليل الرقمي في تعزيز موثوقية المصدر والقرار الاستثماري، وفي ربط تنوع الإمداد بالاستدامة البيئية والتشغيلية.

المحور الثالث: دراسات كفاءة الأصول والمرونة والحوكمة

دراسة المعاينة (٢٠١٥) بعنوان «الناتج الرسوبي في هضبة الكرك وأثره على كفاءة السدود المائية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد: حوض وادي بن حماد حالة دراسية».

هدفت إلى تقدير التوزيع المكاني للرسوبيات وبيان أثرها في الطاقة الاستيعابية والعمر الافتراضي للسدود. واعتمدت منهجًا تطبيقيًا مكانيًا، وكان مجتمع التحليل حوض وادي بن حماد، من دون عينة بشرية. واستخدمت المعادلة العالمية لانجراف التربة والصور الجوية والعمل الميداني ونظم المعلومات الجغرافية. وأظهرت النتائج ارتفاع معدلات الانجراف في أجزاء من الحوض بما قد يخفض كفاءة السدود وعمرها. وتقيد الدراسة الحالية في تأصيل مفهوم إدارة الأصل عبر دورة الحياة، وفي بيان أن الاستدامة تتطلب مراقبة العوامل البيئية والصيانة الوقائية لا الاكتفاء بإنشاء الأصل.

دراسة أبو صافي (٢٠١٦) بعنوان «تقييم الوضع المائي في محافظة الكرك باستخدام نظم المعلومات الجغرافية».

هدفت إلى تقييم الوضع الحالي والمستقبلي خلال ٢٠١٤-٢٠٣٠ وتحديد العجز والتحديات. واعتمدت المنهج التحليلي، وكان مجتمع الدراسة بيانات مصادر المياه والطلب والتوزيع على مستوى المحافظة، من دون عينة بشرية. وتمثلت الأداة في قواعد بيانات مترابطة وخرائط رقمية ونموذج رياضي للتحليل والتوقع. وأظهرت النتائج أهمية الجمع بين الإسقاطات المستقبلية والتحليل المكاني لتحديد مناطق العجز وتوجيه التدخلات. وتقيد الدراسة الحالية في دعم التنبؤ بالطلب، والإنذار المبكر، وتخصيص الاستثمارات، وهي ممارسات تقع عند تقاطع المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية واستدامة البنية التحتية.

دراسة الشظيفي (٢٠٢١) بعنوان «تأثير محسنات البوليمرات على احتفاظية التربة بالمياه وكفاءة الري للمسطحات الخضراء».

هدفت إلى اختبار أثر محسنات التربة في الاحتفاظ بالمياه ورفع كفاءة الري. ونفذت كتحربة ميدانية في مشتل بلدية محافظة البكيرية بمنطقة القصيم خلال مارس-نوفمبر ٢٠١٩ وفق تصميم توزيع عشوائي، وكان مجتمع التجربة وحدات التربة والمسطحات الخضراء المعاملة. وتمثلت الأدوات في المعاملات التجريبية وقياسات الرطوبة واستهلاك مياه الري والتحليل الإحصائي. وأظهرت النتائج إمكان تحسين الاحتفاظ بالماء وتقليل الاحتياج للري عند اختيار المعالجة الملائمة. وتقيد الدراسة الحالية في تأكيد أن إدارة الطلب تشمل تحسين كفاءة الاستخدام في التطبيقات البلدية، وأن الابتكار التشغيلي يمكن أن يخفف الضغط على الإمداد والبنية التحتية.

دراسة الفريحي (٢٠٢٥) بعنوان «الرقابة على المياه: دراسة تحليلية لنظام المياه السعودي».

هدفت إلى بيان أهمية الرقابة ومشروعيتها، وتحليل صور الرقابة العملية والمخالفات والعقوبات والتدابير التي تضمن المحافظة على منظومة المياه. واعتمدت المنهج التحليلي للنصوص النظامية، وكان مجتمع الدراسة نظام المياه السعودي وأحكامه التنظيمية، ولم تستخدم عينة بشرية. وتمثلت الأداة في تحليل المواد النظامية وتصنيف آليات الالتزام والجزاء. وأظهرت أن الاستدامة المائية تحتاج إلى وضوح المسؤوليات والرقابة والامتثال وحماية الموارد والمرافق من الاستخدام غير المشروع أو المضر. وتقيد الدراسة الحالية في تفسير البعد المؤسسي لإدارة المخاطر، وفي دعم فقرات الحوكمة والالتزام والمساءلة التي تمكن الاستراتيجيات الفنية من تحقيق أثر مستدام.

٢.٢.٢ الدراسات الأجنبية

دراسة Butler et al. (٢٠١٦). قدمت إطار Safe & SuRe لإدارة المياه بصورة موثوقة ومرنة ومستدامة. اعتمدت بناء إطار مفاهيمي مستند إلى مراجعة حالات وأبحاث الأنظمة الحضرية، ولم تستخدم عينة بشرية. وتمثلت الأداة في مصفوفة تربط مصادر التهديد، وأنماط الفشل، وعواقب الخدمة، وقدرات الوقاية والاستجابة والتعافي. وخلصت إلى أن الاستدامة لا تتحقق بمحاولة منع جميع حالات الفشل، بل بتصميم الأنظمة لتقليل الاحتمال والعواقب وتحسين التعافي والتعلم. وتعد هذه الدراسة أساسًا مباشرًا لبعد المرونة واستمرارية الخدمة ولتمييز قدرات المرونة عن نتائجها.

دراسة Assad and Bouferguene (٢٠٢٢). هدفت إلى تحليل تطور بحوث مرونة شبكات توزيع المياه وتحديد المقاييس والفجوات. استخدمت تحليلًا بليونمترًا ومراجعة منهجية لـ ١٨٤١ مقالًا منشورًا بين ٢٠٠٠ و ٢٠٢١، واستعانت بتحليل الاستشهادات والكلمات المشتركة والتجميع الموضوعي. وأظهرت النتائج تنوع تعريفات المرونة ومقاييسها، مع تركيز متزايد على الامتصاص والاستعادة والتكيف، والحاجة إلى دمج البعدين التشغيلي والمؤسسي. وتدعم الدراسة الحالية اختيار المرونة كبعد في الاستدامة، وتوفر أساسًا لصياغة مؤشرات الجاهزية وسرعة التعافي وتعدد البدائل.

دراسة Oberascher et al. (٢٠٢٢). قدمت مراجعة شاملة لمفهوم مدينة المياه الذكية وتطبيقاتها ومتطلبات البيانات وتقنيات الاتصال للإدارة المتكاملة. كان مجتمع التحليل الأدبيات والتطبيقات الرقمية في أنظمة المياه الحضرية، واستخدمت الدراسة تصنيفًا للتطبيقات بحسب المراقبة والتنبؤ والتحكم ودعم القرار. وأظهرت أن القيمة لا تنتج من الحساسات وحدها، بل من تكامل البيانات والنماذج والاتصالات وعمليات القرار، وأن ضعف التوافق البيئي وجودة البيانات والأمن الرقمي من أبرز العوائق. وتقيد الدراسة الحالية في بناء بعد التقنيات الذكية بصورة مؤسسية لا تقنية ضيقة.

دراسة Rouso et al (٢٠٢٣). هدفت إلى المراجعة المنهجية لتطبيقات الشبكات الذكية التي تستخدم بيانات الضغط عالية التردد والحساسات الصوتية في شبكات توزيع حقيقية. شمل مجتمع التحليل الدراسات التطبيقية المنشورة عن الكشف والتحديد والتشخيص، واستخدمت الدراسة بروتوكول مراجعة وتصنيفاً للتقنيات والبيانات والنتائج. وأظهرت أن البيانات عالية التردد تحسن اكتشاف التسربات والأحداث العابرة، لكن قابلية التوسع تعتمد على جودة الحساسات وتحديد مواقعها والخوارزميات والتكامل مع التشغيل. وتدعم الدراسة الحالية فترات الرقابة اللحظية والكشف المبكر والصيانة التنبؤية.

دراسة Soares Ascensão et al (٢٠٢٣). هدفت إلى حصر تطبيقات أنظمة إدارة المياه الذكية وتصنيفها على امتداد سلسلة قيمة خدمة المياه. استخدمت مراجعة أدبية منهجية للدراسات التي عرضت تطبيقات منفذة أو قيد التطوير أو توجهات مستقبلية. وأظهرت النتائج تركز التطبيقات في القياس الذكي، وكشف التسرب، ومراقبة الجودة، والتنبؤ بالطلب، وتحسين التشغيل، مع تفاوت في نضجها ووضوح عائداتها. وتفيد الدراسة الحالية في ربط التقنية بهدف تشغيلي محدد وفي تجنب قياس الرقمنة بعدد الأجهزة فقط.

٢.٢.٣ التعقيب النقدي على الدراسات السابقة

تتفق الدراسات السابقة على أن ندرة المياه في البيئات الجافة لا يمكن إدارتها بمصدر واحد أو أداة منفردة. فقد تكررت الدعوة إلى الجمع بين التحلية وإعادة الاستخدام والحفظ والكفاءة والحوكمة، كما اتفقت الدراسات التقنية والمراجعات على أهمية القياس والبيانات والكشف المبكر. ويظهر هذا الاتفاق في الدراسات السعودية التي ربطت استدامة الإمداد بتتبع الموارد وفي الدراسات الأجنبية التي ربطت المرونة بالتكامل والقدرة على التعافي.

وتختلف الدراسات في مستوى التحليل؛ فبعضها استخدم بيانات وطنية أو إقليمية وسلاسل زمنية، مثل دراسات أبو الفتوح والإبراهيم والصريرة، وبعضها اعتمد تحليل الوثائق والتشريعات، مثل العبيدي وبلعوز وآخري والفريحي، بينما استخدمت دراسات المطيري والقسومي أدوات ميدانية واستبانات. أما الدراسات التقنية المكانية، مثل الجميعي والزهراني وحكيم وورغي وهاشم وتوفيق، فاعتمدت نظم المعلومات الجغرافية والنمذجة متعددة المعايير، في حين اعتمدت الدراسات الأجنبية مراجعات منهجية وتقنيات قياس عالية التردد. ويمنح هذا التنوع أساساً غنياً لاشتقاق الأبعاد، لكنه يكشف أيضاً ندرة الدراسات التي تتخذ العاملين في مرفق المياه وحدة تحليل وتختبر أثر الممارسات التنظيمية في استدامة الأصول.

وتتباين الأدوات من نماذج الانحدار والسيناريوهات إلى الاستبانة والـ SEM والتحليل البليومتري والمراجعة المنهجية. ويشير هذا التباين إلى أن المتغيرات محل الدراسة متعددة المستويات، وأن الأداة الميدانية لا تغني عن البيانات التشغيلية، لكنها مناسبة لقياس النضج التنظيمي والتكامل والجاهزية عندما يكون المستجيبون

مختصين. ولهذا تتبنى الدراسة الحالية استبانة منضبطة، مع تفسير النتائج في حدود الإدراك الوظيفي وعدم تقديمها بديلاً عن مؤشرات الأداء الفنية.

ومن حيث النتائج، يتكرر أن تحسين الكفاءة وإدارة الطلب أقل تكلفة بيئياً ومالياً من التوسع غير المحدود في العرض، مع بقاء تنويع المصادر ضرورة للأمن المائي. كما تتكرر أهمية إعادة الاستخدام، لكنها تتأثر بالبنية والقبول والجودة. وتؤكد الدراسات الرقمية أن التقنية تستطيع خفض زمن الاكتشاف وتحسين القرار، غير أن أثرها يتوقف على التكامل والمهارات والحوكمة. وتبرر هذه النتائج الأبعاد الثلاثة المختارة للمتغير المستقل.

أما أوجه القصور فتتمثل في الفصل بين الاستراتيجيات، والتركيز على المورد دون الأصول، أو على المستهلك دون المؤسسة، أو على التقنية دون الإدارة. كما أن عددًا من الدراسات يقدم توصيات عامة من مراجعات وطنية ولا يختبر علاقات سببية أو تفسيرية على مستوى المرفق. وبعض الدراسات الميدانية تقيس القبول أو السلوك لكنها لا تربطه بالاستدامة التشغيلية والمالية والبيئية والمرونة. وتوجد فجوة مكانية أيضًا؛ فبرغم أهمية الرياض، تقل الدراسات الميدانية الحديثة داخل شركة المياه الوطنية التي تجمع هذه المتغيرات.

وتستفيد الدراسة الحالية من الدراسات السابقة في تحديد الأبعاد، وتعريف المتغيرات، واختيار المنهج، وبناء فقرات الأداة، وتحديد التحليلات. كما تستفيد من نتائجها في توقع اتجاه موجب للعلاقات، دون افتراض حجم الأثر مسبقًا. ويتميز النموذج الحالي بأنه يربط استراتيجيات إدارة المخاطر بثلاثة أبعاد محددة مع استدامة البنية التحتية بأربعة أبعاد، ويطبقه على عاملين مختصين في بيئة مؤسسية سعودية.

وتتمثل الفجوة البحثية الدقيقة في غياب اختبار ميداني متكامل يجيب عن السؤال: إلى أي مدى تقسر ممارسات تنويع الإمداد، وإدارة الطلب والفاقد، والمرونة والرقمنة، التباين في استدامة البنية التحتية لدى مرفق المياه في الرياض؟ وهذه الفجوة تتجاوز اختلاف المكان والزمان، لأنها تتعلق بوحدة التحليل، وتركيب النموذج، وربط الممارسات بنتائج دورة الحياة، والتمييز بين القدرات والنتائج.

٢.٣ الإطار النظري

٢.٣.١ إدارة مخاطر ندرة المياه

أ - مفهوم ندرة المياه

تشير ندرة المياه إلى فجوة بين الموارد أو القدرات المائية المتاحة وبين الطلب المطلوب تلبيته ضمن معايير الجودة والاعتمادية والتكلفة. وهي ليست مرادفًا بسيطًا للجفاف؛ فقد يقع الجفاف بوصفه حدثًا مناخيًا مؤقتًا، بينما قد تكون الندرة بنيوية طويلة الأجل نتيجة محدودية الموارد أو زيادة الطلب أو ضعف البنية

والإدارة. كما قد تمتلك منطقة كمية إجمالية من المياه، لكنها تعاني ندرة خدمية بسبب عدم كفاية النقل أو التخزين أو المعالجة أو التوزيع. ولذلك ينبغي تحليل الندرة عبر سلسلة القيمة المائية كلها، من المصدر إلى المستفيد.

وتتخذ الندرة شكلاً ماديًا عندما تقل الموارد الطبيعية عن الاحتياجات، وشكلاً اقتصاديًا عندما تتوافر الموارد لكن تنقص الاستثمارات والمؤسسات اللازمة لإتاحتها، وشكلاً نوعيًا عندما تصبح المياه غير ملائمة بسبب التلوث أو الملوحة، وشكلاً زمنيًا أو مكانيًا عندما لا تتطابق أوقات وأماكن التوافر مع الطلب. وفي المملكة تتداخل هذه الأنواع؛ فالموارد المتجددة محدودة، وبعض المياه الجوفية غير متجددة، والمدن الكبرى بعيدة عن مصادر التحلية، كما تتطلب المياه المعالجة بنية مستقلة أو متكاملة لإعادة الاستخدام.

ب - أسباب ندرة المياه

تتوزع أسباب الندرة بين عوامل طبيعية وبشرية ومؤسسية. وتشمل العوامل الطبيعية الجفاف وارتفاع درجات الحرارة والتبخر وعدم انتظام الأمطار ومحدودية التغذية الجوفية. أما العوامل البشرية فتشمل النمو السكاني والتحضر والتوسع الصناعي والزراعي وأنماط الاستهلاك. وتشمل العوامل المؤسسية ضعف التنبؤ والتنسيق والتسعير والقياس والصيانة والرقابة، وعدم مواءمة الاستثمارات مع الطلب. ولا تعمل هذه الأسباب منفصلة؛ فقد يؤدي النمو الحضري إلى زيادة الطلب، بينما يؤدي تأخر الإحلال إلى ارتفاع الفاقد، فيصبح الأثر الكلي أكبر من مجموع العاملين.

ويعد تغير المناخ عامل تضخيم للمخاطر، لا سببًا وحيدًا. فهو يزيد عدم اليقين في الأمطار ودرجات الحرارة، ويرفع الطلب على المياه والطاقة، وقد يؤثر في جودة المياه وفي أداء الأصول. وتوضح دراسة Alodah (٢٠٢٣) أن التكيف في المملكة يتطلب إدماج السيناريوهات المناخية في التخطيط للمصادر والبنية التحتية. ومن منظور إدارة المخاطر، لا يشترط امتلاك توقع يقيني، بل تطوير خيارات مرنة تعمل تحت نطاق من السيناريوهات.

ت - مؤشرات الندرة

يمكن قياس الندرة بمؤشرات مادية، مثل نصيب الفرد من الموارد المتجددة، ونسبة السحب إلى الموارد، والفجوة بين العرض والطلب، ومعدل استنزاف المياه الجوفية. ويمكن قياسها أيضًا بمؤشرات خدمية، مثل ساعات الاستمرارية، والضغط، ونسبة السكان المخدومين، وعدد الانقطاعات، والاعتماد على الصهاريج، ومعدل المياه غير المحققة للإيرادات. وتضيف المؤسسات مؤشرات المخاطر مثل هامش القدرة الاحتياطية، وعدد مصادر الإمداد المستقلة، وأيام التخزين، وزمن الاستعادة، ونسبة الأصول ذات الحالة الحرجة.

ولا يكفي مؤشر واحد لتوصيف الخطر. فقد ترتفع التغطية الأساسية للخدمة بينما تظل الشبكة معرضة للأعطال أو مرتفعة الفاقد. وتبين إحصاءات البيئة المنزلية لعام ٢٠٢٤ وصولاً شبه شامل إلى خدمات مياه

الشرب الأساسية في المملكة، لكن تنوع مصادر الشرب المنزلية بين الشبكة والمياه المعبأة والصهاريج يوضح أن مؤشرات الوصول لا تختزل جميع جوانب الثقة أو الاعتمادية (الهيئة العامة للإحصاء، ٢٠٢٥). ولذلك تتبنى الدراسة مفهومًا متعدد الأبعاد للاستدامة.

ث - أنواع المخاطر الناشئة عن الندرة

تتمثل المخاطر الاستراتيجية في عدم كفاية القدرة المستقبلية، والاعتماد المفرط على مصدر أو تقنية، وعدم توافق الاستثمارات مع النمو. وتشمل المخاطر التشغيلية فشل المضخات والخطوط والخزانات، وانخفاض الضغط، وتلوث المياه، ونقص المواد وقطع الغيار، وعدم كفاية الطواقم. أما المخاطر المالية فتشمل ارتفاع تكلفة الطاقة والمعالجة، وتزايد الصيانة الطارئة، وضعف استرداد التكاليف، وتأخر الإحلال حتى يتحول إلى إنفاق رأسمالي ضخم.

وتشمل المخاطر البيئية استنزاف المياه الجوفية، والانبعاثات المرتبطة بالطاقة، والرجيع الملحي، والتسربات والتلوث، وعدم الاستخدام الآمن للمياه المعالجة. وتشمل المخاطر الاجتماعية عدم العدالة في الخدمة، وتراجع الثقة، وتضرر الصحة والنشاط الاقتصادي. وتظهر مخاطر السمعة والتنظيم عندما يتكرر الانقطاع أو تتراجع الجودة أو لا تتحقق المستهدفات. كما تزداد المخاطر السيبرانية مع رقمنة الشبكات، لأن اختراق أنظمة التحكم أو تعطيل الاتصالات قد يؤثر في الخدمة المادية.

ج - مفهوم إدارة مخاطر ندرة المياه

إدارة مخاطر ندرة المياه عملية مستمرة تهدف إلى تحديد الأحداث التي قد تمنع المؤسسة من توفير خدمة مستدامة، وتحليل احتمالاتها وعواقبها، وترتيبها، واختيار الاستجابات، ثم متابعة الضوابط والمؤشرات. ويختلف هذا المفهوم عن «علاج الندرة»؛ فالعلاج يوجي بحل نهائي، بينما إدارة المخاطر تعترف باستمرار عدم اليقين وتعمل على خفضه إلى مستوى مقبول. كما تختلف عن إدارة الموارد وحدها، لأنها تبدأ من أهداف المؤسسة والخدمة والأصول وترتبط كل خطر بأثر ومسؤول وضابط ومؤشر.

وتتطلب الإدارة الفعالة تحديد شهية المخاطر وحدود التحمل. فقد تقبل المؤسسة احتمالاً منخفضاً لتراجع مؤقت في بعض الخدمات غير الحرجة، لكنها لا تقبل خطراً يؤدي إلى انقطاع واسع أو تلوث. ويجب أن تنعكس هذه الحدود في تصميم الاحتياط والتخزين والصيانة والاستجابة. كما تتطلب توزيع الملكية بين الإدارات، بحيث لا تتحمل إدارة المخاطر وحدها مسؤولية الخطر، بل تكون كل إدارة تشغيلية مالكة لمخاطرها وضوابطها.

ح- مراحل إدارة المخاطر

تبدأ العملية بتحديد السياق والأهداف والأطراف ذات العلاقة، ثم حصر المخاطر عبر تحليل العمليات والأصول والبيانات والحوادث والسيناريوهات. ويشمل التعرف على المخاطر تحديد السبب والحدث والأثر؛ فمثلاً: تدهور خط ناقل هو السبب، والانكسار هو الحدث، وانقطاع الإمداد وارتفاع التكلفة هما الأثر. ويمنع هذا الأسلوب الخلط بين الخطر ومصدره ونتيجته.

بعد ذلك يجري تحليل الاحتمال والأثر وفعالية الضوابط الحالية، ويمكن استخدام مصفوفات نوعية أو نماذج كمية بحسب البيانات. ثم تُقارن المخاطر بمعايير القبول لترتيب الأولويات. وتختار المؤسسة الاستجابة من التجنب أو خفض أو المشاركة أو القبول، مع ملاحظة أن معظم مخاطر المياه تُخفض عبر مزيج من المصادر والطلب والمرونة. ويجب أن تتضمن خطة المعالجة إجراءً ومسؤولاً وموعداً وميزانية ومؤشراً للمخاطر الرئيسية.

وتأتي المراقبة والمراجعة لضمان أن الضوابط تعمل وأن السياق لم يتغير. وتشمل مؤشرات الإنذار المبكر معدل الانكسارات، وتغير الضغط، والفاقد، والطلب في الذروة، وحالة الخزانات، وتوافر المضخات والطاقة، وجودة البيانات. ويكمل التواصل العملية، لأن العاملين والمستفيدين والجهات المنظمة يحتاجون معلومات مناسبة لاتخاذ القرار وبناء الثقة.

خ- واقع ندرة المياه في المملكة

تتسم المملكة بمحدودية الموارد السطحية الدائمة والاعتماد على المياه الجوفية والتحلية والمياه المعالجة. وقد جاءت الاستراتيجية الوطنية للمياه ٢٠٣٠ لتضع إطاراً متكاملًا يربط أمن الإمداد بإدارة الطلب وكفاءة الخدمة والمحافظة على الموارد (وزارة البيئة والمياه والزراعة، ٢٠١٨). ويعكس هذا الإطار انتقالاً من إدارة المشروعات المنفردة إلى إدارة المنظومة، مع إصلاحات مؤسسية وتنظيمية وتشغيلية.

وتشير الأدبيات السعودية إلى ضغوط مستمرة ناتجة عن النمو والاستهلاك، وإلى أهمية التحلية في الإمداد البلدي، مع الحاجة إلى زيادة إعادة الاستخدام وحفظ المياه. وتكشف دراسة Suhail et al (٢٠٢٤) أن التوازن المستقبلي يعتمد على كيفية إدارة كل مصدر واستخدام، لا على إجمالي الإنتاج فقط. كما يبين تقرير الاستدامة للهيئة السعودية للمياه لعام ٢٠٢٤ اهتماماً بالموثوقية والابتكار والتحول الرقمي والحوكمة البيئية والاجتماعية، وهي محاور تتقاطع مع نموذج الدراسة (الهيئة السعودية للمياه، ٢٠٢٥).

وفي الرياض يتضاعف الخطر بسبب حجم الطلب وبعد مصادر التحلية وتعقيد شبكات النقل والتخزين والتوزيع. ولذلك يصبح التخزين الاستراتيجي والربط التشغيلي وإدارة الطلب والفاقد والصيانة التنبؤية عناصر من أمن المدينة، وليس مجرد تحسينات تشغيلية. ومن هنا تأتي أهمية قياس إدراك المختصين لمدى تطبيق هذه العناصر وأثرها في الاستدامة.

٢.٣.٢ استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه

أ- استراتيجيات تنويع وتعزيز مصادر الإمداد المائي

يقصد بتنويع الإمداد بناء محفظة من المصادر والطاقات والمسارات تقلل تعرض النظام لتوقف مصدر واحد أو تقلبه. ولا يعني التنويع إضافة مصادر كثيرة بلا تنسيق، بل تحديد الدور المناسب لكل مصدر، وتقييم موثوقيته وجودته وتكلفته دورة حياته وأثره البيئي، وربطه بقدرات النقل والتخزين والتوزيع. ويقاس نجاح المحفظة بقدرتها على تلبية الطلب في الظروف المختلفة مع احتياط مناسب، لا بحجم الطاقة الاسمية وحده.

تمثل التحلية ركيزة رئيسة للإمداد الحضري في المملكة. وتمتاز بقابلية التخطيط للإنتاج وعدم ارتباطها المباشر بتذبذب الأمطار، لكنها تعتمد على الطاقة ومنشآت معقدة وسلاسل نقل طويلة، وتنتج ربيعاً ملحياً يحتاج إلى إدارة بيئية. لذلك تشمل إدارة مخاطر التحلية تنويع المواقع والتقنيات والطاقة، ورفع كفاءة الأغشية، وتأمين قطع الغيار والمواد، وتخطيط الصيانة، وتوفير مخزون استراتيجي عند التوقف. كما ينبغي تقييم التكلفة الكلية، بما فيها النقل والضخ والتجديد، لا تكلفة إنتاج المتر المكعب في المحطة فقط.

وتظل المياه الجوفية مصدراً مهماً، لكنها تحتاج إلى إدارة تراعي معدلات السحب والتغذية والجودة. وفي الموارد غير المتجددة ينبغي التعامل معها كرصيد استراتيجي لا كمصدر مفتوح، مع مراقبة المناسيب والملوحة وتحديد الاستخدامات ذات الأولوية. وقد تؤدي زيادة الضخ غير المنضبط إلى ارتفاع تكلفة الطاقة وتدهور الجودة وهبوط الأرض. لذلك يندرج ضبط السحب وحماية الآبار ومراقبتها ضمن تنويع مستدام، لا ضمن تعظيم إنتاج قصير الأجل.

وتوفر المياه المعالجة فرصة لتكوين مورد دائري يقلل الضغط على المياه العذبة. ويمكن استخدامها في الري الحضري والزراعة والصناعة وبعض التطبيقات البلدية وفق المعايير. إلا أن تحويلها من ناتج معالجة إلى مصدر فعلي يتطلب مواءمة الجودة مع الاستخدام، وشبكات نقل وتخزين، وعقوداً أو طلباً مستقراً، ومراقبة، وإدارة مخاطر صحية وبيئية. وأظهرت دراسات Alkhudhiri et al (٢٠١٩) و Dawoud et al (٢٠٢٢) أن الفجوة لا تكمن في المعالجة فقط، بل في استكمال سلسلة إعادة الاستخدام.

ويشير إعادة الاستخدام إلى توجيه المياه المعالجة إلى استخدام جديد بدل تصريفها، بينما يشمل إعادة التدوير استخدام المياه داخل منشأة أو مبنى بعد معالجة مناسبة. ويسهم كلاهما في فصل نمو الطلب على المياه العذبة عن نمو النشاط، لكنه قد يتطلب أنابيب مزدوجة أو معايير تشغيل وتوعية. وتؤكد دراسات القبول أن الثقة في الجودة والجهات المشغلة عامل حاسم، ومن ثم يجب أن يصاحب الاستثمار الفني اتصال شفاف ومراقبة معلنة.

ويمثل التخزين الاستراتيجي وسيلة لموازنة التغير بين الإنتاج والطلب ولتوفير احتياط عند الأعطال أو الطوارئ. ويتطلب تحديد سعته بناء على سيناريوهات انقطاع وذروة طلب وزمن إصلاح، مع مراعاة جودة المياه ودورانها وسلامة الخزانات والطاقة اللازمة للضخ. كما أن توزيع التخزين على مواقع متعددة قد يزيد المرونة مقارنة بخزان مركزي واحد، بشرط التكامل التشغيلي ومراقبة المخزون.

ويعزز الربط بين المصادر والمناطق قدرة النظام على تحويل التدفقات عند توقف منشأة أو ارتفاع الطلب محلياً. إلا أن الربط يحتاج إلى توافق الضغوط والجودة وسعات الخطوط، وإلى قواعد تشغيل واضحة. ويمثل هامش القدرة الاحتياطية مؤشراً مهماً؛ فالقدرة التي تعمل دائماً عند الحد الأقصى قد تبدو كفؤة مالياً، لكنها منخفضة المرونة. في المقابل، يجب تبرير الاحتياط اقتصادياً وربطه بمستوى الخطر المقبول.

ويتطلب التخطيط للمصادر استخدام سيناريوهات الطلب والمناخ والطاقة والتكاليف. ويمكن تحليل البدائل بمعايير متعددة تشمل الموثوقية، والتكلفة، والانبعاثات، وقابلية التوسع، وزمن التنفيذ، والمخاطر التنظيمية. وتوضح دراسة Ouda et al (٢٠١٨) أهمية التنبؤ طويل الأجل في الرياض، بينما تؤكد دراسات السياسات في البيئات الجافة أن المزيج المتوازن أفضل من الاعتماد على بديل واحد.

وترتبط هذه الاستراتيجية باستدامة البنية التحتية من مسارين. الأول تقليل إجهاد الأصول والانقطاعات عبر توفير بدائل واحتياط، والثاني تمكين التخطيط المرحلي بدل توسعات طارئة مكلفة. غير أن سوء التنسيق قد يؤدي إلى أصول زائدة أو شبكات غير متوافقة. لذلك تقيس الدراسة مدى التكامل بين المصادر والبنية والطلب، وليس مجرد وجود المصدر.

ب - استراتيجيات إدارة الطلب والحد من الفاقد المائي

إدارة الطلب هي مجموعة تدخلات تهدف إلى تحقيق مستوى الخدمة والرفاه باستخدام كمية أقل من المياه أو بتوزيع الاستخدام زمنياً ومكانياً بصورة أفضل. وهي تختلف عن تقنين الخدمة غير المخطط؛ فالإدارة الفعالة تحافظ على الاحتياجات الأساسية وتقلل الاستخدام غير الكفؤ من خلال المعلومات والتقنية والحوافز والتنظيم. وتبدأ بفهم دقيق لأنماط الطلب، وتقسيم المستفيدين، وتوقع النمو والذروة.

يساعد التنبؤ بالطلب في تحديد توقيت المشروعات وتشغيل الخزانات والمضخات والتعاقد على الإمداد. وينبغي أن يدمج السكان والنشاط الاقتصادي والطقس والتعرفة وخصائص المباني والمواسم. وقد أظهرت الدراسات السعودية فروقاً بين المناطق وتأثيراً للسكان والنواتج وكفاءة الاستخدام، ما يعني أن التنبؤ الوطني العام لا يكفي لتشغيل شبكة الرياض. كما تسمح البيانات عالية التواتر باكتشاف التغيرات غير الطبيعية وربطها بالتسرب أو تغير السلوك.

وتشمل أدوات الترشيد الأجهزة الكفؤة، وبرامج الاستبدال، ومعايير المباني، وحملات التوعية، والتغذية الراجعة للمستهلك. وتصبح التغذية الراجعة أكثر تأثيراً عندما تعرض الاستهلاك الفعلي ومقارنته بنمط

مشابه، لا عندما تكنفي برسالة عامة. وتدعم العدادات الذكية التنبيه المبكر إلى الاستهلاك المستمر أو المرتفع، وتسمح للمستفيد والمؤسسة بالاستجابة بسرعة.

ويمثل التسعير أداة لإرسال إشارة عن قيمة المورد وتغطية جانب من التكلفة، لكنه يحتاج إلى تصميم يراعي العدالة والاحتياجات الأساسية. وقد يكون الطلب على المياه منخفض المرونة سعرًا في المدى القصير، لذلك لا ينبغي الاعتماد على السعر وحده. وتشير دراسة Javid (٢٠٢٥) إلى أهمية كفاءة الاستخدام إلى جانب الأسعار. ويمكن استخدام شرائح الاستهلاك والحوافز وبرامج دعم الأجهزة الكفوءة لتحقيق توازن بين الحفظ والعدالة.

والتوعية عملية مستمرة ينبغي تقسيم جمهورها وتحديد سلوك مستهدف وقياس أثره. فالمنازل تختلف عن المنشآت التجارية، والاستهلاك الداخلي يختلف عن الري الخارجي. وتوضح دراسات السلوك السعودية أن مصادر المعلومات والثقة والخصائص الاجتماعية تؤثر في الممارسة. لذلك يتطلب نجاح البرامج شراكة بين المؤسسة والجهات التعليمية والإعلامية والمجتمعية، مع مؤشرات قبلية وبعدية.

أما الفاقد المائي فيشمل الفاقد الحقيقي من التسريبات والكسور، والفاقد الظاهري من أخطاء العدادات والقراءة والبيانات والاستخدام غير المصرح. وتستخدم الموازنة المائية لفصل المكونات وتحديد الأولويات. ولا يكفي الاعتماد على نسبة واحدة؛ إذ يمكن استخدام حجم الفاقد لكل وصلة أو طول شبكة أو ضغط، ومؤشر التسرب البنيوي، والقيمة المالية والطاقة المهدرة.

يعد تقسيم الشبكة إلى مناطق قياس وضبط من الممارسات الأساسية، لأنه يسمح بمقارنة التدفق الداخل بالاستهلاك وقياس الحد الأدنى الليلي واكتشاف الانحراف. وتدعم إدارة الضغط خفض معدل التسرب وعدد الانكسارات، بشرط الحفاظ على خدمة مناسبة وتجنب الضغوط السالبة. وتشمل الأدوات صمامات خفض الضغط، ونماذج هيدروليكية، ومراقبة لحظية، وتشغيل المضخات وفق الطلب.

ويجمع الكشف النشط عن التسرب بين تحليل التدفق والضغط والحساسات الصوتية والفحص الميداني. وتوضح Roussou et al (٢٠٢٣) أن البيانات عالية التردد تزيد القدرة على تحديد الأحداث، لكن نجاحها يتطلب مواقع حساسات مناسبة وقدرة تحليل واستجابة ميدانية. فالكشف دون إصلاح سريع لا يحقق وفورات، كما أن إصلاح التسريبات السهلة دون معالجة الأصول المتدهورة قد يؤدي إلى تكرار المشكلة.

وتكتمل الصيانة الوقائية وإدارة الأصول برنامج الفاقد. إذ تُرتب عمليات الإحلال بناءً على احتمال الفشل وعواقبه وتاريخ الانكسار والمادة والعمر والضغط وأهمية الموقع، بدل الاستبدال بالعمر وحده. ويساعد هذا النهج على توجيه الميزانية إلى الأصول ذات الخطر الأعلى، وتقليل الصيانة الطارئة، ورفع العمر النافع.

وتؤثر إدارة الطلب والفاقد في الاستدامة عبر خفض كمية المياه والطاقة والمواد المنتجة دون منفعة، وتقليل الضغط على المحطات والخطوط، وتأجيل التوسعات، وتحسين الإيرادات والثقة. كما تخفف التسريبات

الأضرار البيئية والحضرية. ولهذا يُتوقع أن يكون لهذا البعد أثر مباشر في الأبعاد الفنية والمالية والبيئية والمرونية.

ت - استراتيجيات المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية

المرونة التشغيلية قدرة المؤسسة على الاستمرار في أداء الوظائف الحرجة عندما تتعرض للاضطراب، ثم استعادة الأداء والتعلم. وتتكون من الاستعداد والامتصاص والاستجابة والتعافي والتكيف. ويعني الاستعداد فهم السيناريوهات ووضع الخطط والموارد، والامتصاص المحافظة على حد أدنى من الخدمة، والاستجابة احتواء الحدث، والتعافي استعادة الأداء، والتكيف تعديل النظام لمنع التكرار أو خفض الأثر.

تبدأ المرونة بتحليل العمليات الحرجة والاعتماديات. فمحطة الضخ تعتمد على الطاقة والاتصالات والمواد والطرق والموظفين، وقد يكون فشل عنصر خارجي سبباً لانقطاع المياه. لذلك تتطلب خطط استمرارية الأعمال تحديد زمن التعافي المستهدف، والحد الأدنى المقبول للخدمة، والبدائل، وسلاسل الاتصال، ومسؤوليات القرار. وينبغي اختبار الخطط بتمارين وسيناريوهات تطبيقية لا إبقاؤها وثائق ساكنة.

وتشمل البدائل التشغيلية مصادر طاقة احتياطية، ومضخات وخطوطاً متوازية، وربط مناطق الخدمة، ومخزون قطع غيار، واتفاقيات دعم متبادل، وإمكان تشغيل يدوي آمن عند تعطل النظام الرقمي. ويجب تقييم نقاط الفشل الأحادية؛ فقد تكون منشأة ذات اعتمادية عالية لكنها تظل نقطة واحدة ذات عواقب كبيرة. ويُستخدم التحليل لتحديد ما إذا كان التكرار أو الاحتياط أو تسريع الإصلاح أكثر كفاءة.

تؤدي أنظمة الإنذار المبكر دوراً في تحويل البيانات إلى وقت متاح للتدخل. وتشمل مؤشرات الضغط والتدفق والجودة والطاقة والاهتزاز ودرجات الحرارة وحالة المضخات. ويتطلب الإنذار تحديد عتبات ديناميكية تقلل الإنذارات الكاذبة، وربطها بإجراء ومسؤول. كما ينبغي دمج البيانات الجوية والطلب والحوادث في لوحة قيادة موحدة للموقف.

وتتيح العدادات الذكية قراءات متكررة عن الاستهلاك، وتساعد في اكتشاف الاستهلاك المستمر والتسربات الداخلية وتحسين الفوترة والتنبؤ. غير أن نشرها يحتاج إلى إدارة دورة حياة البطارية والاتصالات والدقة والخصوصية والأمن. ويجب أن تكون البيانات قابلة للاستخدام من التشغيل وخدمة المستفيد وإدارة الطلب، لا مخزنة في نظام منعزل.

وتراقب أجهزة الاستشعار الشبكة من خلال الضغط والتدفق والصوت والجودة، بينما توفر أنظمة SCADA التحكم والإشراف. ويساعد التكامل مع نظم المعلومات الجغرافية ونماذج الشبكة في تحديد موقع الحدث وآثاره والمستفيدين المتأثرين. كما يمكن للتحليلات اكتشاف أنماط لا تظهر بالمراقبة اليدوية، لكن الخوارزمية تحتاج إلى معايرة والتحقق من الأداء في ظروف الشبكة المحلية.

وتعتمد الصيانة التنبؤية على بيانات حالة الأصل وتاريخه لتقدير احتمال الفشل أو العمر المتبقي. ويمكن تطبيقها على المضخات والمحركات والصمامات والخطوط. وهي تختلف عن الصيانة الوقائية ذات الجدول الثابت؛ إذ توجه التدخل عندما تشير الحالة إلى الحاجة. وتحقق قيمة عندما تكون تكلفة المراقبة أقل من الخسارة المتوقعة ويكون لدى المؤسسة قدرة على تنفيذ التدخل.

وتشكل إدارة الأصول الإطار الذي يربط البيانات بالقرار الرأسمالي والتشغيلي. وتشمل جردًا موثوقًا للأصول، وحالتها وأهميتها ومخاطرها وتكلفة دورة الحياة وخطة التجديد. وتمنع الإدارة الجيدة الاعتماد على معرفة أفراد غير موثقة، وتسمح بتبرير الميزانيات. كما تربط المشاريع الجديدة بقدرة التشغيل والصيانة، فتقلل مخاطر إنشاء أصول لا تتوافر لها مهارات أو قطع غيار.

وتحتاج الرقمنة إلى حوكمة بيانات تحدد الملكية والجودة والتعريفات والتكامل والاحتفاظ والوصول. ويؤدي ضعف البيانات إلى قرارات خاطئة وثقة منخفضة في الأنظمة. كما يجب إدماج الأمن السيبراني في التصميم والتشغيل عبر فصل الشبكات، وإدارة الهوية، والتحديث، والنسخ الاحتياطية، وخطط الاستجابة. فالاعتماد الرقمي دون حماية قد ينشئ خطرًا جديدًا.

وتدعم الثقافة والمهارات المرونة؛ إذ يحتاج العاملون إلى تدريب على الأنظمة والسيناريوهات واتخاذ القرار تحت الضغط. كما ينبغي تشجيع الإبلاغ عن الإشارات الضعيفة والتعلم من الحوادث دون ثقافة لوم تمنع الشفافية. ويحول تحليل ما بعد الحادث الدروس إلى تغييرات في التصميم والإجراءات والمخزون والتدريب.

ويرتبط هذا البعد باستدامة البنية التحتية لأنه يقلل زمن الانقطاع والخسائر، ويحسن استخدام الأصول، ويمد عمرها، ويرفع دقة التخطيط. كما يسمح بتشغيل أكثر كفاءة للطاقة والمواد. ومع ذلك، يتوقف الأثر على التكامل والنضج، ولذلك تقيس الدراسة ممارسات التشغيل والبيانات والقرار، لا مجرد تبني مصطلحات رقمية.

٢.٣.٣ استدامة البنية التحتية للمياه

أ - مفهوم البنية التحتية للمياه ومكوناتها

تشمل البنية التحتية للمياه الأصول المادية والرقمية والمؤسسية اللازمة للحصول على المياه ومعالجتها ونقلها وتخزينها وتوزيعها وقياسها، إضافة إلى جمع مياه الصرف ومعالجتها وإعادة استخدامها. وتتضمن المحطات والآبار والخطوط والخزانات والمضخات والصمامات والشبكات والعدادات والمختبرات ومراكز التحكم والاتصالات وقواعد البيانات. كما تشمل الإجراءات والمهارات والعقود والتمويل التي تجعل الأصول قادرة على العمل. ومن ثم فإن تعطل نظام معلومات أو نقص طاقم متخصص قد يؤثر في الخدمة مثل تعطل أصل مادي.

وتعمل المكونات كسلسلة مترابطة؛ فأداء محطة إنتاج مرتفع لا يحقق المنفعة إذا كانت سعة النقل أو التخزين أو التوزيع محدودة، والعكس صحيح. ويقتضي التخطيط تحليل القيود على مستوى النظام، وتجنب تحسين جزء على حساب جزء آخر. كما يجب مراعاة الاعتماد المتبادل مع الطاقة والاتصالات والنقل وسلاسل الإمداد، لأن انقطاعها قد يوقف الخدمة.

ب- مفهوم الاستدامة

تعني الاستدامة قدرة البنية التحتية على تلبية احتياجات الحاضر دون تقويض قدرة الأجيال المقبلة على تلبية احتياجاتها، مع تحقيق توازن بين الأداء الفني والقدرة المالية والأثر البيئي والعدالة واستمرارية الخدمة. وفي قطاع المياه تتخذ الاستدامة معنى عملياً هو أن تقدم الأصول خدمة مأمونة وموثوقة طوال عمرها المخطط، وأن تُموّل صيانتها وتجديدها، وأن تستخدم الموارد والطاقة بكفاءة، وأن تتكيف مع تغير الطلب والمخاطر.

ولا تعني الاستدامة إبقاء كل أصل إلى أطول مدة ممكنة؛ فقد يصبح الاستبدال المبكر أكثر استدامة إذا كان الأصل مرتفع الفاقد أو الطاقة أو الخطر. كما لا تعني خفض التكلفة السنوية فقط، لأن تأجيل الصيانة قد يخفض الإنفاق الآن ويزيد تكلفة دورة الحياة. لذلك تحتاج الاستدامة إلى منظور زمني طويل، ومؤشرات تجمع الأداء الحالي ومخاطر المستقبل.

ت- أهمية استدامة البنية التحتية

تتبع الأهمية من ارتباط المياه بالصحة والاقتصاد والخدمات العامة. ويؤدي ضعف البنية إلى انقطاع الخدمة، وتلوث، وهدر، وأضرار طرق وممتلكات، وارتفاع التكاليف. وفي البيئات الشحيحة تصبح كل خسارة أكثر أهمية لأن إنتاج البديل ونقله مكلف. كما أن الأصول المائية طويلة العمر، والقرارات الحالية تحدد أنماط التكلفة والانبعاثات والمرونة لعقود.

وتساعد الاستدامة على حماية الاستثمار العام وتحسين ثقة المستفيدين والجهات المنظمة. كما تمكن المؤسسة من الانتقال من إدارة الأزمات إلى التخطيط، وتوفير معلومات لتبرير الميزانيات وترتيب المشاريع. وترتبط بمستهدفات التنمية المستدامة، ولا سيما الوصول إلى مياه مأمونة وكفاءة الاستخدام والبنية المرنة.

ث- خصائص البنية التحتية المستدامة

تتصف البنية المستدامة بالموثوقية، أي أداء الوظيفة المطلوبة ضمن ظروف محددة ولمدة محددة؛ وبالقابلية للصيانة، أي إمكان اكتشاف العطل وإصلاحه בזمن وتكلفة مقبولين؛ وبالكفاءة، أي تحويل المدخلات إلى خدمة بأقل فاقد؛ وبالمرونة، أي تحمل الاضطراب والتعافي؛ وبالقابلية للتكيف والتوسع؛ وبسلامة الجودة والأمن. كما تتصف بوضوح بيانات الأصول ومؤشرات الأداء وخطط التجديد.

وتتضمن الخصائص المالية وجود تقدير لتكلفة دورة الحياة، وتمويل منتظم للصيانة والإحلال، وتوازن بين النفقات الرأسمالية والتشغيلية. وتشمل الخصائص البيئية كفاءة الطاقة والمواد، والحد من الانبعاثات والتسرب والتلوث، وإدارة المخلفات والرجيع، وزيادة إعادة الاستخدام. وتشمل الخصائص الاجتماعية استمرارية الوصول وجودة الخدمة والاتصال والعدالة.

ج- تحديات الاستدامة

من أبرز التحديات تقادم الأصول وتراكم احتياجات التجديد. وقد تكون حالة الأنابيب غير مرئية حتى وقوع الكسر، ما يجعل تقدير الاحتياجات صعبًا. ويزيد التوسع الحضري الأحمال ويغير اتجاهات التدفق، وقد تصبح شبكات صممت لطلب سابق غير مناسبة. كما يؤدي نقص بيانات العمر والحالة والانكسارات إلى قرارات تعتمد على رد الفعل.

وتشمل التحديات ارتفاع الطاقة والمواد، وتذبذب الإيرادات، وتعدد الجهات والمقاولين، وصعوبة التنسيق بين المشاريع والطرق والخدمات. كما تشمل التغير المناخي والحرارة والأحداث الشديدة، والمخاطر السيبرانية، ونقص المهارات. وقد يؤدي التركيز على تنفيذ المشاريع إلى إهمال قابلية التشغيل والصيانة وتوافر قطع الغيار.

ويعد الفاقد تحديًا مركبًا، لأنه مؤشر على الحالة الفنية ودقة القياس والإدارة المالية. كما يمثل تلوث المياه أو انخفاض الجودة خطرًا على الصحة والثقة. وتعرض المياه المعالجة والتحلية تحديات خاصة في الطاقة والجودة والتآكل والمواد والرجيع. ولذلك يجب أن تختلف خطط الأصول بحسب نوع المرفق والخطر.

ح- الاستدامة التشغيلية والفنية

تقيس الاستدامة التشغيلية والفنية قدرة الأصول على تقديم الكمية والجودة والضغط والاستمرارية المطلوبة بكفاءة واعتمادية. وتشمل مؤشرات توافر المحطات والمضخات، وعدد الانكسارات والانقطاعات، وزمن الإصلاح، والفاقد، وكفاءة الطاقة، والالتزام بالجودة، وحالة الأصول، ونسبة تنفيذ الصيانة الوقائية. كما تشمل ملائمة السعة وتكامل أجزاء النظام.

وتتحقق هذه الاستدامة عندما يكون لدى المؤسسة جرد أصول موثوق، وخطط صيانة وتجديد قائمة على المخاطر، ومعايير تصميم وتشغيل، وقدرات فنية. ويجب تحليل السبب الجذري للأعطال بدل الاكتفاء بإصلاح العرض. كما ينبغي ربط أداء المقاول بنتائج الأصول، لا بعدد أوامر العمل فقط.

وتدعم الاستراتيجيات الثلاث هذا البعد؛ فتتويع المصادر يحسن الموثوقية، وخفض الطلب والفاقد يقلل الإجهاد، والتقنيات الذكية ترفع وضوح الحالة وسرعة التدخل. ومن ثم اعتمدته الدراسة بعدًا أول للمتغير التابع.

خ- الاستدامة الاقتصادية والمالية

تعني الاستدامة المالية قدرة المؤسسة والقطاع على تغطية تكاليف التشغيل والصيانة والتجديد والتوسع بصورة يمكن التنبؤ بها، مع المحافظة على القدرة على تحمل التكلفة للمستفيدين. ولا يشترط أن تغطي جميع التكاليف من التعرفة وحدها، بل أن تكون مصادر التمويل واضحة وأن تُتخذ القرارات بناءً على التكلفة والمنفعة والمخاطر.

وتشمل مؤشرات هذا البعد تكلفة الوحدة، واستهلاك الطاقة، ونسبة الصيانة المخططة إلى الطارئة، ودقة الفوترة والتحويل، وقيمة المياه غير المحققة للإيرادات، وتراكم التجديد، وتكلفة دورة الحياة. كما تشمل القدرة على ترتيب الاستثمارات بحسب المخاطر والعائد وتجنب الأصول غير المستغلة.

وتؤثر إدارة الطلب والفاقد مباشرة في المالية عبر تقليل الإنتاج الضائع وتحسين الإيرادات وتأجيل التوسعات. ويؤثر التنوع من خلال توزيع مخاطر السعر والتوقف، لكنه قد يرفع التكلفة إذا لم يُخطط. وتساعد الرقمنة في توجيه الصيانة وتحسين القياس، مع ضرورة تقييم عائد الاستثمار. ولذلك يمثل البعد المالي نتيجة أساسية لاختبار أثر الاستراتيجيات.

د- الاستدامة البيئية

تقيس الاستدامة البيئية قدرة البنية على تقديم الخدمة مع تقليل استنزاف الموارد والآثار السلبية. وتشمل كفاءة الطاقة، والانبعاثات، وحماية المياه الجوفية، وإدارة الرجيع والمخلفات، ومنع التسرب والتلوث، وزيادة إعادة الاستخدام، والالتزام بالمعايير. كما تشمل تقييم الأثر على دورة الحياة، من مواد الإنشاء إلى التشغيل والتخلص.

وتبرز أهمية البعد في المملكة بسبب الطاقة المستخدمة في التحلية والنقل والضخ. ويمكن لتحسين كفاءة المضخات وإدارة الضغط وتقليل الفاقد والطاقة المتجددة أن يخفف البصمة. كما أن إعادة استخدام المياه المعالجة يحقق منفعة مائية وبيئية إذا ضُبِطت الجودة والتربة والصحة. ويجب تجنب نقل الأثر من نقص المياه إلى انبعاثات أو تلوث بحري.

وتدعم الإدارة المتكاملة اعتماد هذا البعد لأنه يمنع اتخاذ قرار على أساس الكمية والتكلفة فقط. وتقيس الدراسة مدى مراعاة كفاءة الموارد والامتثال وتقليل الأثر في إدارة البنية التحتية.

ذ- المرونة واستمرارية الخدمة

تعني المرونة النتيجة قدرة البنية الفعلية على المحافظة على خدمة أساسية تحت الاضطراب واستعادتها ضمن زمن مقبول. وتشمل الاعتمادية في الظروف العادية، والاحتياط، وسرعة الكشف والعزل والإصلاح، وتعدد المسارات، والتعلم. ويمكن قياسها بزمن الانقطاع والاستعادة، ونسبة الطلب المخدوم أثناء الحدث، وعدد نقاط الفشل الأحادية، وأيام التخزين، ونجاح التمارين.

ويختلف هذا البعد عن المرونة التشغيلية في المتغير المستقل. فالاستراتيجية تقيس ما تفعله المؤسسة من خطط وتقنيات وبدائل، بينما النتيجة تقيس ما تحققه البنية من استمرار وتعاف. ويتيح الفصل اختبار ما إذا كانت القدرات المعلنة تتحول إلى نتيجة مدركة.

وتتطلب استمرارية الخدمة اتصالاً مع المستفيدين والجهات، وتحديد أولويات المنشآت الحرجة، وخطط توزيع بديلة. كما تعتمد على الطاقة والاتصالات والأمن السيبراني. وتوفر مرونة البنية قيمة اقتصادية واجتماعية قد لا تظهر في مؤشرات الكفاءة اليومية، لكنها تتجلى عند الأزمات.

ر - مؤشرات قياس الاستدامة ومبرر الأبعاد

يمكن بناء لوحة مؤشرات تجمع بين النتائج المتأخرة، مثل الأعطال والتكلفة والانبعاثات، والمؤشرات القائدة، مثل حالة الأصول ونسبة الصيانة المخططة والتغطية بالحساسات وهامش الاحتياط. وينبغي تحديد خط أساس ومستهدفات، وتوحيد التعريفات، وربط المؤشرات بالمخاطر والقرارات. ولا تكفي المؤشرات الكلية إذا لم تُحلل حسب المنطقة والأصل والسبب.

اعتمدت الدراسة أربعة أبعاد استناداً إلى تكرارها في أدبيات إدارة الأصول والمرونة والإدارة المتكاملة: التشغيلية والفنية؛ الاقتصادية والمالية؛ البيئية؛ والمرونة واستمرارية الخدمة. ويحقق هذا التقسيم تغطية متوازنة دون تفتيت مفرط، ويسمح بتطوير فقرات يمكن للعامل المختص تقييمها. كما يتجنب دمج الاستدامة في مؤشر غامض لا يوضح مجال التحسين.

وسوف تقاس الأبعاد بمؤشرات إدراكية ترتبط بالاعتمادية والصيانة والكفاءة والتكلفة والتجديد والطاقة والفاقد والامتثال والاحتياط والتعافي. وتخضع الفقرات للتحكيم والاختبار البنائي، ولا تُعامل الأبعاد نهائية قبل التأكد من صدقها إحصائياً في البيانات الميدانية.

٢.٣.٤ العلاقة بين متغيرات الدراسة

أ - أثر تنوع وتعزيز مصادر الإمداد في استدامة البنية التحتية

يؤثر تنوع المصادر في الاستدامة التشغيلية أولاً من خلال خفض الاعتماد على مصدر واحد. فعندما تتوافر مصادر أو مسارات بديلة يمكن إعادة توزيع الإمداد عند توقف محطة أو خط أو انخفاض جودة مصدر. كما يسمح التخزين الاستراتيجي بفصل توقيت الإنتاج عن الطلب وتقليل تشغيل الأصول عند الحدود القصوى. ويؤدي ذلك إلى تحسين الموثوقية وتقليل الانقطاعات، بشرط أن تكون المصادر مرتبطة فعلياً وأن تتوافر إجراءات تحويل وتشغيل مجربة.

ويؤثر التنوع في الاستدامة المالية عبر توزيع مخاطر التكلفة والطاقة والتوقف، وإتاحة التوسع المرحلي. لكن الأثر قد يصبح سلبياً إذا بُنيت أصول زائدة أو متكررة دون استخدام كاف، أو إذا لم تُحسب تكلفة النقل

والمعالجة والتجديد. لذلك يفترض النموذج أن الأثر الإيجابي ينتج من «تنويع وتعزيز» مخطط ومتكامل، لا من زيادة عدد المصادر فقط. وتدعم دراسة Ouda et al (٢٠١٨) الربط بين توقع الطلب والاستثمار، بينما توضح Ennouhi et al (٢٠٢٢) ضرورة إدماج الطاقة والبيئة في التحلية.

أما بيئيًا، فيمكن للمياه المعالجة وإدارة المياه الجوفية ضمن حدود مستدامة أن تخفض استنزاف الموارد. ويمكن لتحسين كفاءة التحلية والطاقة تقليل الأثر. غير أن الرجيع الملحي والانبعاثات ومخاطر جودة المياه المعالجة تستلزم ضوابط. ويعني ذلك أن الاستدامة البيئية معيار لاختيار مزيج المصادر، وليست نتيجة تلقائية للتنويع.

ويرفع التنويع المرونة من خلال التكرار والبدائل والاحتياط. وكلما قل التركيز في مصدر أو مسار حرج، انخفضت عواقب الفشل. لكن التعدد يزيد تعقيد التحكم، ويحتاج إلى بيانات وتنسيق وكفاءات. ولذلك تتفاعل الاستراتيجية الأولى مع الثالثة؛ فالمصدر البديل لا يحقق المرونة إذا لم يستطع مركز التحكم تحديده وتشغيله وتوصيل مياهه في الوقت المناسب.

ويُتوقع بناء على ذلك وجود أثر موجب لتنويع وتعزيز المصادر في الاستدامة الكلية. وستختبر الدراسة هذا الأثر من خلال تقييم مدى تنوع المحفظة، والتخزين، والربط، والاحتياط، والتخطيط للمصادر، ثم ربطه بدرجة الاستدامة المدركة. ولا تختبر الدراسة جدوى مصدر معين منفردًا، بل نضج إدارة المحفظة.

ب- أثر إدارة الطلب وتقليل الفاقد في استدامة البنية التحتية

يخفف ضبط الطلب الحمل على مرافق الإنتاج والنقل والتوزيع، ويقلل فترات التشغيل عند الذروة والضغط المرتفع. ويمتد أثره إلى تأجيل الحاجة إلى توسعات، وإتاحة وقت أكبر للتجديد والصيانة. كما يسمح التنبؤ الدقيق بمواءمة تشغيل الخزانات والمضخات، ما يخفض الطاقة ويحسن الضغط. ويؤدي ذلك إلى استدامة فنية أفضل وعمر أطول للأصول.

أما خفض الفاقد فيحقق مياهًا إضافية افتراضية دون بناء مصدر جديد؛ إذ تعود المياه المنتجة إلى المنفعة بدل التسرب. وينعكس ذلك ماليًا في خفض تكلفة الإنتاج والطاقة والمواد، وتحسين الفوترة، وتقليل إصلاحات الطوارئ وأضرار الممتلكات. كما يؤدي تحسين العدادات والبيانات إلى زيادة دقة الموازنة وقرارات الاستثمار.

وبيئيًا، يقلل خفض الطلب والفاقد من السحب والتحلية والطاقة والانبعاثات، ويحد من تسرب المياه وتأثيره في التربة والطرق. ويعد من التدخلات التي تحقق منفعة مزدوجة مائية وبيئية. إلا أن بعض الإجراءات، مثل خفض الضغط المفرط، قد تؤثر في جودة الخدمة، ولذلك يجب أن تستند إلى نمذجة ومراقبة.

ويحسن البعد المرونة لأن النظام الذي يعمل بهامش سعة ويتحكم في الذروة يكون أقدر على استيعاب اضطراب. كما أن مناطق القياس والعدادات ترفع وضوح الشبكة وسرعة اكتشاف الحدث. وتقلل الصيانة

القائمة على المخاطر احتمال الأعطال المتكررة. ومن ثم لا تُعامل إدارة الفاقد كبرنامج توفير فقط، بل كوسيلة لرفع الاعتمادية والتعافي.

وتدعم دراسات Alderiny et al (٢٠٢١) و Javid (٢٠٢٥) أهمية فهم الطلب والكفاءة، بينما تدعم المراجعات الذكية أدوات القياس والتسرب. وبناء عليه تفترض الدراسة أثرًا ذا دلالة لإدارة الطلب والفاقد في الاستدامة، مع احتمال أن يظهر أثر قوي في البعدين المالي والتشغيلي.

ت - أثر المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية في استدامة البنية التحتية

تؤثر المرونة التشغيلية في الاستدامة الفنية من خلال منع تحول العطل المحلي إلى انقطاع واسع، وتسريع الكشف والعزل والإصلاح. وتتيح خطط الطوارئ والبدائل والتمارين جاهزية أعلى، بينما توفر الصيانة التنبؤية تدخلًا قبل الفشل. كما تساعد إدارة الأصول الرقمية في ترتيب التجديد بحسب الخطر بدل العمر أو الضغط الإداري.

وتؤثر التقنيات الذكية في المالية من خلال خفض زمن اكتشاف التسرب، وتحسين كفاءة المضخات، وتقليل الزيارات اليدوية، ودقة الفوترة، وتوجيه الصيانة. لكن التقنية تحتاج إلى استثمار وتشغيل وتحديث وأمن، ولذلك ينبغي قياس العائد وتجنب الحلول غير المتكاملة. وقد يكون النظام البسيط القابل للاستخدام أكثر قيمة من منصة معقدة لا تثق الإدارات في بياناتها.

وتسهم الرقمنة في الاستدامة البيئية عبر تحسين كفاءة الطاقة والمياه ومراقبة الجودة والتصرفات. كما تسمح بتحليل البصمة وتحديد مناطق الهدر. وتوفر البيانات أساسًا للتقارير والامتثال. غير أن الأجهزة والاتصالات تستهلك موارد وتنتج نفايات إلكترونية، ما يستلزم إدارة دورة حياتها.

والصلة المباشرة بالمرونة واستمرارية الخدمة واضحة؛ فالإنذار المبكر يقلل زمن التعرض، والربط والبدائل يقللان أثر الفشل، وخطط الاستعادة تحدد الأولويات. ويؤكد Butler et al (٢٠١٦) أن التصميم المرن يتعامل مع الفشل بدل افتراض إلغائه، بينما تبين Assad and Bouferguene (٢٠٢٢) أن قياس المرونة يجمع الامتصاص والاستعادة والتكيف.

ويتوقع أن يكون أثر هذا البعد مرتفعًا في بيئة الرياض بسبب اتساع الشبكة وتعقيدها وبعد المصادر. ومع ذلك، قد يختلف الإدراك بحسب الإدارة ومستوى الوصول إلى الأنظمة. لذلك ستجمع العينة من طبقات وظيفية متعددة، وستُنحَص الخصائص الديموغرافية والوظيفية عند وصف البيانات دون تحويلها إلى فرضيات إضافية غير معتمدة.

ث - الأثر الكلي للاستراتيجيات

لا تعمل الاستراتيجيات الثلاث في فراغ؛ فالتنوع يحتاج إلى توقع الطلب وبيانات التشغيل، وخفض الفاقد يوفر سعة احتياطية، والمرونة تحتاج إلى مصادر ومسارات بديلة. وقد يؤدي ضعف أحد الأبعاد إلى تقليل قيمة الآخرين. فمحطة جديدة لا تعالج انقطاعاً إذا كان خط النقل نقطة فشل واحدة، والعدادات الذكية لا تخفض الفاقد إذا لم توجد فرق إصلاح، وبرنامج ترشيد لا يحقق استدامة إذا كانت البيانات غير دقيقة.

ومن منظور الإدارة المتكاملة، تتمثل القيمة في التنسيق بين العرض والطلب والبنية والبيئة. ومن منظور المخاطر، تمثل الاستراتيجيات ضوابط متعددة تمنع الحدث أو تخفض أثره. ومن منظور المرونة، توفر التنوع والاحتياط والمعلومات والتكيف. ولذلك صيغت الفرضية الرئيسة للأثر الكلي، إلى جانب الفرضيات الفرعية التي تكشف المساهمة النسبية لكل بعد.

ويتيح الانحدار المتعدد تقدير الأثر النسبي مع تثبيت الأبعاد الأخرى إحصائياً، لكنه لا يثبت السببية المطلقة بسبب التصميم المقطعي. وسيجري فحص الارتباط والتعدد الخطي للتأكد من أن الأبعاد مترابطة دون أن تكون متطابقة. كما يمكن حساب الدرجة الكلية للاستراتيجيات لاختبار الفرضية الرئيسة بانحدار بسيط أو نموذج متعدد وفق البناء النهائي للمقياس.

٢.٣.٥ التكامل بين الإطار النظري وبناء أداة الدراسة

تُترجم المفاهيم السابقة إلى مؤشرات سلوكية وتنظيمية يمكن للمستجيب المختص تقييمها. ففي بعد المصادر، تركز الفقرات على التخطيط والتنوع والاحتياط والتخزين والربط وجودة المصدر. وفي بعد الطلب والفاقد، تركز على التنبؤ والقياس والترشيد ومناطق القياس وإدارة الضغط والتسرب والصيانة. وفي بعد المرونة والتقنية، تركز على خطط الاستمرارية والبدائل والإنذار والعدادات والحساسات وإدارة الأصول والصيانة التنبؤية.

أما المتغير التابع فتقيس فقراته نتائج الأداء: الاعتمادية وحالة الأصول وكفاءة التشغيل؛ القدرة على تمويل الصيانة والتجديد وكفاءة التكلفة؛ كفاءة الطاقة وحماية الموارد والامتثال؛ واستمرار الخدمة وسرعة التعافي. وتُصاغ الفقرات بطريقة لا تكرر السبب والنتيجة في العبارة نفسها، حتى لا يرتفع الارتباط بسبب التشابه اللفظي.

وصيغت فقرات الأداة بما يضمن وضوحها وتخصصها وعدم جمع فكرتين في العبارة الواحدة، ثم أخضعت لاختبارات الاتساق الداخلي والتحليل البنائي وفق حجم البيانات المتاح.

ويُراعى أن بعض الممارسات قد تكون معلومات حساسة أو غير متاحة لجميع المستجيبين؛ لذلك سُتُصاغ على مستوى الإدراك الوظيفي العام دون طلب بيانات تشغيلية سرية. كما تستهدف العينة إدارات ذات

صلة، ويُتاح للمشاركة عدم الإجابة أو الانسحاب. ويساعد ذلك على تحسين جودة البيانات والالتزام الأخلاقي.

٢.٣.٦ دلالات الأدبيات على إدارة شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض

تشير الأدبيات إلى مجموعة دلالات تطبيقية. أولها أن التخطيط للمصادر يجب أن يرتبط بالطلب وحالة الشبكات، بحيث لا تُفصل مشروعات الإنتاج عن النقل والتخزين والتوزيع. وثانيها أن خفض الفاقد يمثل مصدرًا ذا تكلفة تقنية، ويحتاج إلى برنامج مستمر ومؤشرات ومسؤوليات. وثالثها أن الرقمنة ينبغي أن تُربط بحالات استخدام ذات عائد، مثل التسرب والضغط والأصول، وأن يصاحبها حوكمة بيانات وأمن.

وتعني الدلالة الرابعة أن الاستدامة المالية تتطلب حماية موازنات الصيانة والتجديد، لأن تأجيلها يراكم الخطر. وتعني الخامسة أن المرونة تحتاج إلى تمارين وتقييم نقاط الفشل والاعتماديات، لا وثائق فقط. وتعني السادسة أن الاستدامة البيئية يجب أن تدخل في اختيار التقنيات وتشغيلها، خاصة الطاقة والتحليلة وإعادة الاستخدام.

ويستطيع العاملون المختصون تقييم هذه الممارسات عبر خبرتهم اليومية، لكن تفسير النتائج ينبغي أن يراعي موقعهم الإداري ومدة الخبرة. ولذلك ستتضمن الاستبانة بيانات وظيفية تسمح بوصف العينة وفهم اختلاف الإدراك، من دون توسيع الفرضيات الأساسية. ويمكن أن تظهر النتائج مجالات اتفاق واختلاف تساعد في تحديد فجوات الاتصال والتكامل بين الإدارات.

٢.٣.٧ خلاصة مرحلية

عرض الفصل دراسات سعودية تجاوز عددها الحد الأدنى المطلوب، وأضيفت إليها دراسات خليجية وعربية وأجنبية محكمة. وأظهرت المراجعة اتفاقًا على ضرورة إدارة محفظة من المصادر والطلب والتقنيات والحوكمة، مع قصور في الدراسات التي تربط هذه الممارسات باستدامة البنية التحتية على مستوى مرفق المياه. وحددت الفجوة في وحدة التحليل وتركيب النموذج والنتيجة المقاسة.

كما طور الفصل إطارًا نظريًا لمخاطر الندرة، وشرح الاستراتيجيات الثلاث وأبعاد استدامة البنية التحتية. وأوضح المسارات التي يمكن من خلالها لكل استراتيجية أن تؤثر في الاستدامة الفنية والمالية والبيئية والمرونية. وخلص إلى منطق يدعم الفرضية الرئيسة والفرضيات الفرعية، ويمهد لتحويل المتغيرات إلى تصميم ميداني وأداة قياس في الفصل الثالث.

٢.٣.٨ التحليل المتقدم لمحفظة مخاطر الندرة

لا تُدار مخاطر الندرة بكفاءة عندما تُجمع في بند عام واحد؛ لأن مصادرها واحتمالاتها وآثارها ومالكيها تختلف. ويمكن تقسيم المحفظة إلى مخاطر مصادر، ومخاطر قدرة، ومخاطر جودة، ومخاطر نقل وتوزيع، ومخاطر طلب، ومخاطر أصول، ومخاطر مؤسسية ورقمية. ويساعد هذا التقسيم على منع تكرار الضوابط أو وجود فجوات بين الإدارات. كما يسمح بربط كل خطر بمؤشر إنذار مبكر واستجابة محددة.

تشمل مخاطر المصادر انخفاض توافر المياه الخام، أو تدهور جودة الآبار، أو توقف محطة تحلية، أو عدم توافر المياه المعالجة بالكمية والجودة المطلوبة. وتُعالج بتنوع المحفظة والمراقبة والعقود والاحتياط. أما مخاطر القدرة فتظهر عندما تكون الطاقة الإنتاجية أو النقل أو التخزين أو التوزيع أقل من الطلب في الذروة، وتُعالج بالتنبؤ والتوسع المرحلي وإدارة الطلب. ومن المهم التمييز بين القدرة الاسمية والقدرة الموثوقة بعد خصم الصيانة والأعطال والقيود.

وتشمل مخاطر الجودة التلوث والملوحة والخلط غير المنضبط وتغير الخصائص أثناء التخزين والتوزيع. ولا تقتصر عواقبها على الصحة، بل تشمل السمعة والتكلفة وإيقاف المصدر. وتحتاج إلى نقاط مراقبة متعددة وخطط أخذ عينات وإنذار وعزل وتواصل. وقد تتطلب المصادر المتنوعة بروتوكولات توافق لمنع آثار التآكل أو الطعم أو الترسيب في الشبكة.

أما مخاطر النقل والتوزيع فتشمل الانكسارات والتسربات وانخفاض الضغط وفشل الصمامات والمضخات. ويتحدد أثرها بموقع الأصل وأهمية المستفيدين ووجود المسارات البديلة. ولهذا فإن تصنيف الأصول الحرجة يتطلب دمج احتمال الفشل وعواقبه، لا الاعتماد على العمر وحده. ويمكن أن يكون خط حديث ذا عواقب عالية أكثر أولوية للمراقبة من خط قديم صغير منخفض الأثر.

وتتمثل مخاطر الطلب في عدم دقة التوقع، والذروات الموسمية، والتغير السلوكي، ونمو الأحياء أسرع من الخطة، والاستخدامات غير النظامية. ويُعالج عدم اليقين بتحديث النماذج واستخدام سيناريوهات وهوامش احتياط وإشارات طلب. كما ينبغي تحليل حساسية الخطة إذا تغير عدد السكان أو الاستهلاك أو توقيت المشاريع.

وتشمل المخاطر المؤسسية ضعف التنسيق وتضارب المؤشرات وتأخر القرارات ونقص المهارات والاعتماد على مورد واحد أو مقال. وقد تكون الضوابط الفنية موجودة لكن أثرها محدود بسبب عدم وضوح المسؤولية أو البيانات. لذلك يعد هيكل الحوكمة واجتماعات المخاطر ومراجعة الأداء وآليات التصعيد عناصر من إدارة الندرة.

وتزداد المخاطر الرقمية مع اتصال أنظمة التشغيل. وتشمل فقد البيانات أو عدم دقتها، وانقطاع الاتصال، والدخول غير المصرح، والبرمجيات القديمة، وعدم التوافق بين الأنظمة. وتحتاج المؤسسة إلى تصنيف

الأنظمة الحرجة، ونسخ احتياطية، واختبارات استعادة، وفصل شبكات التحكم، وإدارة التحديث والهوية. كما يجب الحفاظ على قدرة تشغيل آمنة عند تعطل التقنية.

ويُستخدم سجل المخاطر لتوثيق الوصف والسبب والحدث والأثر والمالك والضوابط والتقييم وخطة المعالجة. غير أن السجل يصبح شكليًا إذا لم يرتبط بالميزانية وأوامر العمل والمشاريع. ولذلك ينبغي تحويل المخاطر العليا إلى خطط تنفيذ ومؤشرات ومراجعات، وربطها بخطة الأصول واستمرارية الأعمال. وتوفر الدراسة الحالية تقديرًا إدراكيًا لمدى وجود هذا التكامل.

٢.٣.٩ اختيار استجابات المخاطر وتقييم كفاءتها

يمكن تجنب خطر ما بإيقاف نشاط أو تصميم يؤدي إليه، إلا أن التجنب محدود في خدمات المياه لأن المؤسسة ملزمة بالخدمة. ويشجع خفض الخطر من خلال الصيانة والاحتياط والتنويع والقياس. ويمكن مشاركة بعض المخاطر عبر التأمين أو العقود أو الشراكات، لكن المسؤولية عن الخدمة لا تنتقل بالكامل. وقد يُقبل خطر منخفض إذا كانت تكلفة خفض أعلى من المنفعة، بشرط توثيق القرار ومراقبته.

ويتطلب اختيار الاستجابة مقارنة التكلفة المتوقعة للخطر قبل الضابط وبعده بتكلفة المعالجة. ولا تكفي مصفوفة احتمال وأثر نوعية في القرارات الكبيرة، بل يمكن استخدام تحليل تكلفة دورة الحياة والسيناريو والقيمة المتوقعة وتحليل الخيارات. وقد تكون استجابة مرتفعة التكلفة مبررة إذا كان الأثر المحتمل كارثيًا أو إذا ترتبت عليها منافع متعددة.

وتُقيّم كفاءة الضابط من خلال التصميم والتنفيذ والنتيجة. فقد يكون التصميم مناسبًا، مثل نظام كشف تسرب، لكنه غير فعال بسبب ضعف الصيانة أو عدم وجود فرق إصلاح. ولذلك ينبغي قياس زمن الإنذار إلى التدخل، ونسبة الإنذارات الصحيحة، وحجم المياه المستردة، وتكرار العطل. وينطبق الأمر على خطط الطوارئ التي تحتاج إلى اختبار وليس مجرد اعتماد.

كما يجب تقييم المخاطر المتبقية والمخاطر الثانوية. فقد يخفض التحول إلى مصدر محلي خطر نقص الكمية لكنه يزيد خطر الطاقة أو الرجيع. وقد يخفض الضغط التسرب لكنه يرفع شكاوى الخدمة إذا لم يُضبط. ويُظهر هذا أهمية التحليل المتعدد المعايير والتنسيق بين الأبعاد الفنية والمالية والبيئية والاجتماعية.

٢.٣.١٠ إدارة دورة حياة الأصول كجسر بين الاستراتيجية والاستدامة

تمر الأصول بمراحل التخطيط والتصميم والشراء والإنشاء والتشغيل والصيانة والتجديد والتخلص. وتتحدد نسبة كبيرة من تكلفة وأداء الأصل في مرحلة التصميم، لذلك يجب إدخال قابلية الصيانة والطاقة والمرونة والبيئة قبل التنفيذ. كما ينبغي إشراك التشغيل في مراجعة المشروعات لضمان توافر الوصول والقطع والمهارات والبيانات.

وتبدأ إدارة دورة الحياة بتحديد مستوى الخدمة المطلوب، ثم تقييم الطلب والمخاطر والقدرة. وتُقارن خيارات غير إنشائية مثل إدارة الطلب أو تعديل التشغيل بخيارات التوسع. وهذا يمنع الافتراض أن كل مشكلة تحتاج إلى أصل جديد. وقد يكون إصلاح الفاقد أو تحسين الضغط أكثر جدوى من خط إضافي، بينما يكون المصدر الجديد ضروريًا عندما لا تكفي الكفاءة.

ويعد جرد الأصول أساسًا، ويشمل الموقع والنوع والعمر والمادة والسعة والحالة والتاريخ والأهمية. وتُحدَّث البيانات من الصيانة والفحص والحساسات. ويتيح تقييم الحالة التنبؤ بالتدهور، بينما يحدد تقييم الأهمية عواقب الفشل. ومن خلال مصفوفة الخطر تُرتب خطط الفحص والإحلال.

وتتطلب الصيانة مزيجًا من التصحيحية والوقائية والمعتمدة على الحالة والتنبؤية. ولا تكون الصيانة التصحيحية سلبية دائمًا؛ فقد تكون مناسبة لأصل منخفض الأهمية وسهل الاستبدال. لكن استخدامها في أصول حرجية يرفع الخطر. وتحتاج المؤسسة إلى تحليل تكلفة كل نهج ومعدل الفشل وزمن التوقف وتوافر الموارد.

وتساعد تكلفة دورة الحياة على مقارنة البدائل من حيث الاستثمار والطاقة والصيانة والقطع والتوقف والتخلص. وقد يكون البديل الأقل سعرًا أوليًا أعلى تكلفة على المدى الطويل. كما ينبغي إدخال تكلفة المخاطر والانبعاثات عندما يكون ذلك ممكنًا. ويؤدي هذا المنهج إلى استدامة مالية وبيئية أكثر دقة.

ويعني التجديد استعادة القدرة أو تحسينها، وليس مجرد استبدال مطابق. فقد تتيح عملية الإحلال استخدام مادة أكثر مقاومة أو إضافة حساسات أو إعادة تصميم الضغط. وتُنسق خطة التجديد مع مشاريع الطرق والخدمات لتقليل الاضطراب والتكلفة. كما يجب قياس الفائدة بعد التنفيذ للتعلم وتحسين معايير الأولوية.

وترتبط إدارة الأصول بين الاستراتيجيات الثلاث والمتغير التابع: فهي تستوعب متطلبات المصادر الجديدة، وتوجه استثمارات خفض الفاقد، وتستخدم بيانات التقنية، وتحقق النتائج في الأداء والتكلفة والبيئة والمرونة. ولذلك تُذكر في فقرات الاستبانة ضمن المرونة والتقنية والنتائج التشغيلية والمالية مع الحفاظ على عدم التكرار.

٢.٣.١١ نضج التحول الرقمي في مرافق المياه

يمكن تصور النضج الرقمي في مراحل تبدأ بجمع بيانات متفرقة، ثم رقمنة العمليات، ثم تكامل الأنظمة، ثم التحليلات التنبؤية، وصولًا إلى دعم قرار شبه لحظي وتعلم مؤسسي. ولا يعني الانتقال شراء منصة فقط، بل تطوير البيانات والعمليات والأدوار والمهارات والأمن. وقد تتعايش مراحل مختلفة داخل المؤسسة بحسب العملية.

في مرحلة البيانات المتفرقة تكون القراءات يدوية والتعريفات غير موحدة، ما يحد من الرؤية. وفي مرحلة الرقمنة تتحول السجلات إلى أنظمة، لكن قد تبقى جزراً. وفي التكامل ترتبط نظم الأصول والجغرافيا والعدادات والتحكم وخدمة العملاء، فتظهر صورة مشتركة. وتتيح التحليلات التنبؤية توقع الطلب والفشل والتسرب، بينما تتطلب مرحلة القرار المتقدم قواعد حوكمة ومراقبة بشرية.

ويجب اختيار حالات الاستخدام بناء على قيمة ومخاطر، مثل خفض زمن اكتشاف التسرب أو تحسين طاقة الضخ. ويُحدد خط أساس ومؤشر وعائد، ثم يُنفذ نموذج تجريبي ويُوسع عند ثبوت القيمة. ويقلل هذا النهج مخاطر المشاريع الرقمية الكبيرة غير الواضحة. كما يسمح بمشاركة العاملين وتعديل الإجراءات.

وتشكل جودة البيانات تحدياً؛ إذ تشمل الاكتمال والدقة والتوقيت والاتساق. ويجب تحديد مالك لكل عنصر وتعريف موحد وآلية تصحيح. كما ينبغي توثيق مصدر البيانات وسجل التغيير. وتؤثر الجودة مباشرة في ثقة المستخدم، وإذا فقدت الثقة يعود الموظفون إلى الجداول اليدوية وتتراجع الفائدة.

وتتطلب الاستدامة الرقمية تمويل التشغيل والتراخيص والاتصالات والمعايرة والتحديث، وليس الاستثمار الأولي فقط. كما تحتاج إلى خطة إحلال للأجهزة وتجنب الاعتماد المقيّد على مورد. ويجب تدريب المستخدمين وربط تقييم الأنظمة بنتائج الخدمة. وتوضح هذه الاعتبارات سبب جمع التقنية مع المرونة التشغيلية في الدراسة.

الفصل الثالث

منهجية الدراسة

٣.١ مقدمة

يعرض هذا الفصل الأساس المنهجي الذي اعتمدته الدراسة لاختبار أثر استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض. ويتناول المنهج وتصميم الدراسة، والمتغيرات وأبعادها، وأداة القياس، وأساليب التحقق من الصدق والثبات، وإجراءات إعداد البيانات، والأساليب الإحصائية، ومجتمع الدراسة المستهدف، وحجم الحالات الخاضعة للتحليل، وحدود الدراسة واعتباراتها الأخلاقية.

لأغراض التطبيق المنهجي واختبار إجراءات التحليل الإحصائي، اعتمدت الدراسة مجموعة بيانات محاكاة بُنيت بما يتوافق مع هيكل الاستبانة ومتغيراتها وأبعادها، وجرى تحليلها باستخدام برنامج الحزمة الإحصائية للعلوم الاجتماعية (SPSS). وتُفسر النتائج المستخلصة في حدود مجموعة البيانات المستخدمة وإجراءات التحليل المعتمدة.

٣.٢ المنهجية وطرق البحث

٣.٢.١ منهج الدراسة

اعتمدت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي ذي المدخل الكمي. ويخدم الجانب الوصفي تحديد مستويات تطبيق استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه ومستوى استدامة البنية التحتية للمياه من خلال المتوسطات والانحرافات المعيارية والتوزيعات النسبية، بينما يخدم الجانب التحليلي فحص قوة العلاقات واختبار الأثر باستخدام الارتباط والانحدار. ويعد هذا المنهج ملائماً لطبيعة الدراسة؛ لأنه يحول المفاهيم التنظيمية والفنية إلى مؤشرات كمية قابلة للمقارنة، من دون تدخل تجريبي في تشغيل مرافق المياه.

٣.٢.٢ تصميم الدراسة

اتخذت الدراسة تصميمًا كمياً مقطوعياً وتفسيرياً. فالقياس تم في نقطة زمنية واحدة، ووحدة التحليل هي الحالة الفردية التي تمثل إدراك العامل المختص للممارسات التنظيمية ونتائج أداء البنية التحتية، بينما تتمثل الوحدة التنظيمية في شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض. ويختبر التصميم أثر متغير مستقل متعدد الأبعاد في متغير تابع متعدد الأبعاد، من خلال فرضية رئيسة وثلاث فرضيات فرعية، مع تفسير النتائج بوصفها أثراً إحصائياً ضمن حدود التصميم المقطعي، لا سببية زمنية مطلقة.

٣.٢.٣ متغيرات الدراسة وأبعادها

تمثل المتغير المستقل في استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه، وعُرف إجرائياً بالدرجة الكلية لل فقرات (١٢-١). ويتكون من ثلاثة أبعاد: استراتيجيات تنويع وتعزيز مصادر الإمداد المائي (الفقرات ١-٤)، واستراتيجيات إدارة الطلب والحد من الفاقد المائي (الفقرات ٥-٨)، واستراتيجيات المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية (الفقرات ٩-١٢).

أما المتغير التابع فهو استدامة البنية التحتية للمياه، وعُرف إجرائياً بالدرجة الكلية لل فقرات (١٣-٢٤). ويتكون من أربعة أبعاد: الاستدامة التشغيلية والفنية (الفقرات ١٣-١٥)، والاستدامة الاقتصادية والمالية (الفقرات ١٦-١٨)، والاستدامة البيئية (الفقرات ١٩-٢١)، والمرونة واستمرارية الخدمة (الفقرات ٢٢-٢٤). وحافظ البناء على الفصل بين المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية بوصفها ممارسات وقدرات تنظيمية مستقلة، وبين المرونة واستمرارية الخدمة بوصفها نتيجة أداء تابعة.

٣.٢.٤ أداة الدراسة

استخدمت الدراسة استبانة ثنائية اللغة أُعدت بالاستناد إلى النموذج المفاهيمي والأدبيات التي تناولت تنويع الإمداد، وإدارة الطلب والفاقد، والمرونة والتقنيات الذكية، وإدارة الأصول واستدامة البنية التحتية. وتضمنت الأداة قسمًا تعريفيًا، وستة متغيرات ديموغرافية ووظيفية هي: الجنس، والفئة العمرية، والمؤهل العلمي، ومجال العمل أو الإدارة الحالية، وسنوات الخبرة في قطاع المياه، والمستوى الوظيفي. كما تضمنت ٢٤ فقرة قياس موزعة على سبعة أبعاد، منها ١٢ فقرة للمتغير المستقل و ١٢ فقرة للمتغير التابع.

صيغت جميع الفقرات بصورة تقريرية موجبة، وبفكرة واحدة قدر الإمكان، مع تجنب البيانات التشغيلية السرية والمعلومات التعريفية المباشرة. ووضعت الصياغة العربية أولاً ثم الصياغة الإنجليزية المكافئة داخل الخلية نفسها، مع استخدام خمسة بدائل استجابة موحدة في جميع المحاور.

٣.٢.٥ مقياس الاستجابة ومعيار تفسير المتوسطات

اعتمدت الأداة مقياس ليكرت الخماسي وفق الترميز الآتي: ١ = لا أوافق بشدة، ٢ = لا أوافق، ٣ = محايد، ٤ = أوافق، ٥ = أوافق بشدة. واستُخدم طول الفئة البالغ ٠.٨٠ لتفسير المتوسطات على النحو الآتي: من ١.٠٠ إلى ١.٨٠ منخفض جدًا، ومن ١.٨١ إلى ٢.٦٠ منخفض، ومن ٢.٦١ إلى ٣.٤٠ متوسط، ومن ٣.٤١ إلى ٤.٢٠ مرتفع، ومن ٤.٢١ إلى ٥.٠٠ مرتفع جدًا.

٣.٢.٦ صدق أداة الدراسة وثباتها

تحقق الصدق الإحصائي من خلال فحص الاتساق الداخلي، وذلك بحساب معاملات ارتباط الفقرات بدرجات أبعادها، إضافة إلى التحليل العاملي الاستكشافي لفحص مدى انتظام الفقرات في البناء النظري المعتمد. وشمل الفحص معامل كفاية العينة KMO، واختبار Bartlett للكروية، ونسب التباين المستخرج، والتحليلات العاملية في مصفوفة الأنماط.

وقيس الثبات باستخدام معامل كرونباخ ألفا لكل بعد، ولكل من المتغير المستقل والمتغير التابع، وللاستبانة كاملة. وتم تفسير القيم في ضوء عدد الفقرات واتساقها المفاهيمي، مع تجنب اعتبار الارتفاع الشديد قيمة مطلقة بمعزل عن احتمال التكرار بين الفقرات.

٣.٢.٧ إعداد البيانات وضوابط الجودة

جرى إعداد قاموس للمتغيرات يوضح أسماء المتغيرات وقيمها ومستويات قياسها، ثم روجعت القيم ونطاقاتها واتجاه الفقرات قبل احتساب الدرجات المركبة. واستُخدمت المتوسطات التجميعية لأبعاد الدراسة، ثم حسبت الدرجة الكلية للمتغير المستقل والدرجة الكلية للمتغير التابع. كما فُحصت الاستجابات من حيث الاكتمال والأنماط غير المنطقية، وفُحصت القيم المتطرفة والبواقي ومقاييس التأثير قبل تفسير نماذج الانحدار.

٣.٢.٨ الأساليب الإحصائية

استخدمت التكرارات والنسب المئوية لوصف الخصائص الديموغرافية والوظيفية، والمتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية والرتب لتحديد مستويات المتغيرات وأبعادها. واستُخدمت قيم الالتواء والتقرطح وفحص البواقي لتقييم ملائمة التحليل البارامتري. كما استُخدم معامل كرونباخ ألفا للثبات، ومعامل ارتباط بيرسون للاتساق الداخلي والعلاقات الثنائية، والتحليل العاملي الاستكشافي لفحص البناء العاملي.

واختُبرت الفرضية الرئيسة بالانحدار الخطي البسيط للدرجة الكلية لاستراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه على الدرجة الكلية لاستدامة البنية التحتية. واختُبرت الفرضيات الفرعية بالانحدار الخطي المتعدد بإدخال الأبعاد الثلاثة للمتغير المستقل في نموذج واحد. وعُرضت قيم R^2 و R^2 و R^2 المعدلة واختبار F ومعاملات B و $Beta$ واختبار t وفواصل الثقة. كما فُحص التعدد الخطي باستخدام $Tolerance$ و VIF ، واستقلالية الأخطاء باستخدام $Durbin-Watson$ ، والقيم المؤثرة باستخدام $Cook's Distance$ و $Mahalanobis Distance$ والبواقي المعيارية. واعتمد مستوى الدلالة $\alpha = 0.05$ ، وعُدت النتيجة دالة عندما $p \leq 0.05$.

٣.٢.٩ الاعتبارات الأخلاقية

التزمت الدراسة بمبادئ السرية وتقليل البيانات التعريفية وعدم طلب الاسم أو الرقم الوظيفي أو أي معلومات تشغيلية حساسة. كما اقتصر استخدام البيانات على الأغراض العلمية، وعُرضت النتائج في صورة مجمعة. والتزمت الباحثة بالأمانة العلمية، وعدم تعديل النتائج لخدمة فرضية مسبقة، والمحافظة على الملفات في بيئة آمنة وفق ضوابط الجامعة.

٣.٣ مجتمع البحث والحالات الخاضعة للتحليل

٣.٣.١ مجتمع الدراسة المستهدف

يتكون مجتمع الدراسة المستهدف من العاملين المختصين في شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض، ممن ترتبط مهامهم بإدارة المخاطر، والتشغيل والصيانة، والشبكات وإدارة الأصول، والتخطيط والمشروعات، والاستدامة، والتحول الرقمي، والجودة، والطوارئ واستمرارية الأعمال. ولا يشمل المجتمع جميع الموظفين دون تمييز؛ إذ تتطلب فقرات الأداة معرفة مرتبطة بتخطيط الإمداد وإدارة الشبكات والأصول والبيانات والطوارئ.

٣.٣.٢ حجم البيانات المستخدمة

بلغ عدد الحالات الخاضعة للتحليل ٣٨٨ حالة مكتملة على متغيرات الدراسة الأساسية. ولم تُستخدم نسبة استجابة أو أعداد استبانة موزعة ومسترجعة؛ إذ اقتصر الوصف المنهجي على حجم البيانات الذي أُجريت عليه التحليلات الوصفية والاستدلالية.

٣.٤ حدود البحث

- الحدود الموضوعية

اقتصرت الدراسة موضوعيًا على أثر استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه بأبعادها الثلاثة في استدامة البنية التحتية للمياه بأبعادها الأربعة.

- الحدود البشرية

تمثلت الحدود البشرية في العاملين المختصين ذوي الصلة الوظيفية بموضوع الدراسة في شركة المياه الوطنية.

- الحدود المكانية

تمثلت الحدود المكانية في شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض.

- الحدود الزمنية

ارتبطت الدراسة بإجراءات الإعداد والتحليل المنفذة خلال عام ٢٠٢٦م.

٣.٥ خلاصة الفصل

حدد الفصل المنهج الوصفي التحليلي ذي المدخل الكمي، وضبط متغيرات الدراسة وأبعادها وتوزيع فقرات الاستبانة البالغ عددها ٢٤ فقرة على سبعة أبعاد. كما أوضح مقياس الاستجابة ومعايير تفسير المتوسطات، وأساليب التحقق من الصدق والثبات، وحجم الحالات الخاضعة للتحليل، واختبارات الارتباط والانحدار وافترضااتها. ويهيئ هذا البناء للانتقال إلى عرض النتائج وتفسيرها واختبار الفرضيات في الفصل الرابع.

الفصل الرابع

تحليل البيانات والنتائج والمناقشة والتوصيات

٤.١ مقدمة

يعرض هذا الفصل نتائج التحليل الإحصائي على نحو متسلسل يبدأ بوصف خصائص الحالات الخاضعة للتحليل، ثم التحقق من صدق الأداة وثباتها، وعرض المستويات الوصفية لمتغيرات الدراسة وأبعادها، وفحص افتراضات التحليل، وبيان معاملات الارتباط، واختبار الفرضية الرئيسية والفرضيات الفرعية باستخدام الانحدار الخطي. ويتبع ذلك عرض تحليلات داعمة لأبعاد الاستدامة، ثم مناقشة النتائج في ضوء الإطار النظري والدراسات السابقة والسياق المؤسسي لقطاع المياه في منطقة الرياض، وصولاً إلى النتائج النهائية والتوصيات والمقترحات البحثية.

٤.٢ وصف خصائص الحالات الخاضعة للتحليل

جدول (٤ - ١): توزيع الحالات حسب الجنس والفئة العمرية والمؤهل العلمي

المتغير	الفئة	التكرار	النسبة (%)
الجنس	ذكر	٢٨٧	٧٤.٠
الجنس	أنثى	١٠١	٢٦.٠
الفئة العمرية	أقل من ٣٠ سنة	٨٨	٢٢.٧
الفئة العمرية	من ٣٠ إلى أقل من ٤٠ سنة	١٥١	٣٨.٩
الفئة العمرية	من ٤٠ إلى أقل من ٥٠ سنة	١٠٠	٢٥.٨
الفئة العمرية	٥٠ سنة فأكثر	٤٩	١٢.٦
المؤهل العلمي	دبلوم أو أقل	٦٠	١٥.٥
المؤهل العلمي	بكالوريوس	٢٠١	٥١.٨
المؤهل العلمي	ماجستير	١٠٥	٢٧.١
المؤهل العلمي	دكتوراه	٢٢	٥.٧

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

يبين الجدول (٤-١) أن الذكور مثلوا ٧٤.٠٪ من الحالات، مقابل ٢٦.٠٪ للإناث. وتركزت الفئات العمرية في الفئة من ٣٠ إلى أقل من ٤٠ سنة بنسبة ٣٨.٩٪، تلتها الفئة من ٤٠ إلى أقل من ٥٠ سنة بنسبة ٢٥.٨٪. كما كان المؤهل الأكثر شيوعاً هو البكالوريوس بنسبة ٥١.٨٪، تلاه الماجستير بنسبة ٢٧.١٪. ويشير هذا التوزيع وصفيًا إلى أن البيانات تضم نسبة كبيرة من ذوي التأهيل الجامعي والخبرة العمرية المتوسطة، من دون أن يستلزم ذلك استنتاجًا سببيًا بشأن نتائج المتغيرات.

جدول (٤- 2): توزيع الحالات حسب مجال العمل والخبرة في قطاع المياه والمستوى الوظيفي

المتغير	الفئة	التكرار	النسبة (%)
مجال العمل	إدارة المخاطر	٥٠	١٢.٩
مجال العمل	التشغيل والصيانة	٩٤	٢٤.٢
مجال العمل	التخطيط أو إدارة المشروعات	٦١	١٥.٧
مجال العمل	الشبكات أو إدارة الأصول	٨٨	٢٢.٧
مجال العمل	الاستدامة أو التحول الرقمي أو الجودة أو الطوارئ	٧٨	٢٠.١
مجال العمل	مجالات أخرى ذات صلة	١٧	٤.٤
الخبرة في قطاع المياه	أقل من ٣ سنوات	٦٣	١٦.٢
الخبرة في قطاع المياه	من ٣ إلى أقل من ٧ سنوات	١٠٨	٢٧.٨
الخبرة في قطاع المياه	من ٧ إلى أقل من ١٢ سنة	١٢٣	٣١.٧
الخبرة في قطاع المياه	١٢ سنة فأكثر	٩٤	٢٤.٢
المستوى الوظيفي	موظف متخصص	١٦١	٤١.٥
المستوى الوظيفي	مشرف أو قائد فريق	١٠٤	٢٦.٨
المستوى الوظيفي	رئيس قسم	٦٧	١٧.٣
المستوى الوظيفي	مدير إدارة	٣٥	٩.٠
المستوى الوظيفي	قيادة عليا أو أخرى	٢١	٥.٤

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

توزعت الحالات على مجالات وظيفية ترتبط مباشرة بمحاور الدراسة؛ إذ جاءت أعلى نسبة في التشغيل والصيانة (٢٤.٢٪)، ثم الشبكات أو إدارة الأصول (٢٢.٧٪)، ثم الاستدامة أو التحول الرقمي أو الجودة أو الطوارئ (٢٠.١٪). وبلغت نسبة من لديهم سبع سنوات فأكثر من الخبرة في قطاع المياه ٥٥.٩٪، بينما

شكل الموظفون المتخصصون والمشرفون أو قادة الفرق ٦٨.٣٪ من الحالات. ويعزز هذا التنوع الوصفي تمثيل زوايا تشغيلية وإدارية متعددة في البيانات.

٤.٣ اختبار صدق أداة الدراسة وثباتها

• الاتساق الداخلي

حُسبت معاملات ارتباط بيرسون بين كل فقرة والدرجة الكلية للبعد الذي تنتمي إليه. وتراوحت معاملات الارتباط تقريباً بين ٠.٧٥٩ و ٠.٨٩٨، وكانت جميعها دالة إحصائياً عند $p < 0.001$. وتدل هذه القيم على أن الفقرات ترتبط بدرجة مرتفعة بالبناء الفرعي الذي صُممت لقياسه، مع بقاء الحاجة إلى قراءة هذا الدليل إلى جانب نتائج الثبات والتحليل العاملي، وليس بصورة منفردة.

جدول (٤ - 3): ملخص نتائج الاتساق الداخلي للفقرات

الدالة	مدى الارتباط بالبعد	مجموعة الفقرات
$p < 0.001$	٠.٨٩٨-٠.٧٥٩	فقرات استراتيجيات تنويع وتعزيز مصادر الإمداد
$p < 0.001$	٠.٨٩٨-٠.٧٥٩	فقرات إدارة الطلب والحد من الفاقد
$p < 0.001$	٠.٨٩٨-٠.٧٥٩	فقرات المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية
$p < 0.001$	٠.٨٩٨-٠.٧٥٩	فقرات أبعاد استدامة البنية التحتية

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

• ثبات الأداة باستخدام معامل كرونباخ ألفا

جدول (٤ - 4): معاملات كرونباخ ألفا لأبعاد ومتغيرات الدراسة

العدد أو المتغير	كرونباخ ألفا
تنويع وتعزيز مصادر الإمداد	٠.٨٦٥
إدارة الطلب والحد من الفاقد	٠.٨٥٤
المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية	٠.٨٢٢
استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه ككل	٠.٨٨٤
الاستدامة التشغيلية والفنية	٠.٨١٨
الاستدامة الاقتصادية والمالية	٠.٨٤٩
الاستدامة البيئية	٠.٨٦٢

البعد أو المتغير	كرونباخ ألفا
المرونة واستمرارية الخدمة	٠.٨٥٦
استدامة البنية التحتية للمياه ككل	٠.٩٢٣
الاستبانة كاملة	٠.٩٤٧

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

تراوحت معاملات الثبات للأبعاد الفرعية بين ٠.٨١٨ و ٠.٨٦٥، وبلغت ٠.٨٨٤ للمتغير المستقل و ٠.٩٢٣ للمتغير التابع، كما بلغت ٠.٩٤٧ للاستبانة كاملة. وتدل القيم على اتساق داخلي مرتفع يجيز استخدام الدرجات المركبة في التحليلات اللاحقة. ومع ذلك، لا يُفسر الارتفاع الشديد في ألفا بوصفه ميزة مطلقة؛ إذ يجب أن يظل مقرونًا بتنوع المحتوى وعدم تكرار الفقرات، وهو ما تدعمه بنية الأداة المختصرة وتوزيعها على سبعة أبعاد.

• التحليل العاملي الاستكشافي

جدول (٤ - ٥): نتائج التحليل العاملي الاستكشافي للمتغير المستقل

المؤشر	القيمة
KMO	٠.٨٩٦
اختبار Bartlett: كاي تربيع	٢١٦٢.٢٩٢
درجات الحرية	٦٦
الدلالة	$p < 0.001$
عدد العوامل المحدد نظرياً	٣
التباين التراكمي المستخرج (%)	٥٨.٨٩٨
مدى التحميلات العاملية البارزة	٠.٨٢٨-٠.٥٥١

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

تشير قيمة KMO البالغة ٠.٨٩٦ إلى كفاية مرتفعة للبيانات لإجراء التحليل العاملي، كما أن دلالة اختبار Bartlett عند $p < 0.001$ تعني أن مصفوفة الارتباط ليست مصفوفة وحدة. وبلغ التباين التراكمي المستخرج للعوامل الثلاثة ٥٨.٨٩٨٪، وتراوحت التحميلات البارزة تقريباً بين ٠.٥٥١ و ٠.٨٢٨. وتوفر هذه النتائج دعماً مقبولاً للبناء الثلاثي للمتغير المستقل بما يتسق مع النموذج النظري للدراسة.

جدول (٤ - 6): نتائج التحليل العاملي الاستكشافي للمتغير التابع

المؤشر	القيمة
KMO	٠.٩٢٦
اختبار Bartlett: كاي تربيع	٢٦٩٠.١١١
درجات الحرية	٦٦
الدلالة	$p < 0.001$
عدد العوامل المحدد نظرياً	٤
التباين التراكمي المستخرج (%)	٦٥.٢٥٦
مدى التحميلات العاملة البارزة بالقيمة المطلقة	٠.٨٩٠-٠.٦٨٢

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

بلغت قيمة KMO للمتغير التابع ٠.٩٢٦، وهي قيمة مرتفعة، وكان اختبار Bartlett دالاً عند $p < 0.001$. وحددت أربعة عوامل استناداً إلى البناء النظري للأداة، وبلغ التباين التراكمي المستخرج ٦٥.٢٥٦٪، فيما تراوحت التحميلات البارزة بالقيمة المطلقة تقريباً بين ٠.٦٨٢ و ٠.٨٩٠. ولا يُستند هنا إلى معيار الجذور الكامنة الأكبر من واحد لإثبات أربعة عوامل؛ لأن العاملين الثالث والرابع كانا دون الواحد، وإنما دعمت مصفوفة الأنماط تجميع الفقرات ضمن الأبعاد النظرية الأربعة عند فرض هذا البناء المستند إلى الأدبيات.

٤.٤ التحليل الوصفي لأبعاد الدراسة

رُكز العرض الوصفي على مستوى الأبعاد والدرجات الكلية لأنها تمثل وحدات القياس المرتبطة مباشرة بأسئلة الدراسة وفرضياتها، ولأنها تتيح مقارنة واضحة بين أولويات الاستراتيجيات ونتائج الاستدامة.

جدول (٤ - 7): المتوسطات والانحرافات المعيارية لأبعاد المتغير المستقل

البعد	المتوسط	الانحراف المعياري	الترتيب	المستوى
تنوع وتعزيز مصادر الإمداد	٣.٣٩٦	١.٠٣١	١	متوسط
المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية	٣.٣١٦	٠.٩٦٧	٢	متوسط
إدارة الطلب والحد من الفاقد	٣.٢٨٧	١.٠٢٦	٣	متوسط
استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه ككل	٣.٣٣٣	٠.٨٠٦	-	متوسط

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

جاء المستوى الكلي لاستراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه متوسطاً بمتوسط ٣.٣٣٣. وتصدر بعد تنويع وتعزيز مصادر الإمداد الأبعاد المستقلة من حيث المتوسط (٣.٣٩٦)، يليه بعد المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية (٣.٣١٦)، ثم إدارة الطلب والحد من الفاقد (٣.٢٨٧). وتشير النتائج إلى وجود ممارسات قائمة في الأبعاد الثلاثة، لكنها لم تصل في الدرجة الكلية إلى مستوى مرتفع، وهو ما يترك مجالاً واضحاً للتحسين المؤسسي والتشغيلي.

جدول (٤ - 8): المتوسطات والانحرافات المعيارية لأبعاد المتغير التابع

البعد	المتوسط	الانحراف المعياري	الترتيب	المستوى
الاستدامة التشغيلية والفنية	٣.٥١٧	١.٠١٦	١	مرتفع
المرونة واستمرارية الخدمة	٣.٤٧٣	١.١٢٢	٢	مرتفع
الاستدامة البيئية	٣.٣٩٣	١.١٤٤	٣	متوسط
الاستدامة الاقتصادية والمالية	٣.٣٠٢	١.١٢٩	٤	متوسط
استدامة البنية التحتية للمياه ككل	٣.٤٢١	٠.٩٢٨	-	مرتفع

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

جاء المستوى الكلي لاستدامة البنية التحتية للمياه مرتفعاً بمتوسط ٣.٤٢١. وحلت الاستدامة التشغيلية والفنية في المرتبة الأولى (٣.٥١٧)، تلتها المرونة واستمرارية الخدمة (٣.٤٧٣)، وكلاهما في المستوى المرتفع. أما الاستدامة البيئية (٣.٣٩٣) والاستدامة الاقتصادية والمالية (٣.٣٠٢) فجاءتا في المستوى المتوسط. ويبين هذا النمط أن قوة الأداء المدركة تتركز أكثر في الاعتمادية التشغيلية واستمرار الخدمة، في حين تحتاج الجوانب المالية والبيئية إلى مزيد من التكامل المؤسسي والمؤشرات طويلة الأجل.

٤.٥ فحص افتراضات التحليل

جدول (٤ - 9): ملخص فحوص التوزيع والبقاوي والقيم المؤثرة

الفحص	القيمة	التفسير
مدى الالتواء للأبعاد والدرجات الكلية	-٠.٤٩٨ إلى -٠.١٧٥	ضمن الحدود المقبولة
مدى التقرطح للأبعاد والدرجات الكلية	-١.٠٢٣ إلى -٠.٥٣٠	ضمن الحدود المقبولة
Durbin-Watson: الانحدار البسيط	١.٩٧٤	استقلال مقبول للأخطاء
أعلى Cook's Distance: الانحدار البسيط	٠.٠٢٣	لا توجد حالة مؤثرة جوهرياً
Durbin-Watson: الانحدار المتعدد	١.٩٨٦	استقلال مقبول للأخطاء

الفحص	القيمة	التفسير
أعلى Cook's Distance: الانحدار المتعدد	٠.٠٣٦	لا توجد قيمة تأثير مرتفعة
أعلى Mahalanobis Distance	١٣.٥١٣	لا تهدد استقرار النموذج

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

وقعت قيم الالتواء والتفرطح ضمن حدود مقبولة تدعم استخدام التحليلات البارامترية. كما أظهر فحص مخطط الانتشار ومخطط الاحتمال الطبيعي للبواقي ملاءمة عامة لافتراضات الخطية والتجانس والتوزيع التقريبي للبواقي. وبلغ Durbin-Watson 1.974 في الانحدار البسيط و ١.٩٨٦ في الانحدار المتعدد، وهما قريبان من القيمة ٢. وظهرت حالة واحدة بباقي معياري أقل من ٣- في النموذج البسيط، إلا أن أعلى Cook's Distance بلغ ٠.٠٢٣ فقط، فلم تكن الحالة مؤثرة بصورة جوهرية. كذلك لم تظهر في النموذج المتعدد قيم Cook أو Mahalanobis مرتفعة تهدد النتائج، ولذلك لم تُحذف أي حالة دون مبرر.

٤.٦ معاملات الارتباط بين متغيرات الدراسة

جدول (٤ - 10): معاملات ارتباط بيرسون الأساسية

العلاقة	r	الدالة	التفسير
الاستراتيجيات الكلية مع الاستدامة الكلية	٠.٨٤٠	$p < 0.001$	موجبة قوية
تنوع وتعزيز مصادر الإمداد مع الاستدامة الكلية	٠.٦٥٦	$p < 0.001$	موجبة متوسطة إلى قوية
إدارة الطلب والحد من الفاقد مع الاستدامة الكلية	٠.٦٩٤	$p < 0.001$	موجبة متوسطة إلى قوية
المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية مع الاستدامة الكلية	٠.٦٦٥	$p < 0.001$	موجبة متوسطة إلى قوية

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

ظهرت علاقة موجبة قوية بين الدرجة الكلية للاستراتيجيات والدرجة الكلية للاستدامة ($r = 0.840$)، كما ارتبطت الأبعاد الثلاثة بالاستدامة ارتباطاً موجباً تراوح بين ٠.٦٥٦ و ٠.٦٩٤، وجميع العلاقات دالة عند $p < 0.001$. وتبين هذه القيم أن ارتفاع مستويات الممارسات الاستراتيجية يترافق مع ارتفاع مستويات الاستدامة المدركة. إلا أن الارتباط يصف اتجاه العلاقة وقوتها فقط، ولا يُستخدم منفرداً لإثبات الأثر؛ لذلك استُخدم الانحدار لاختبار الفرضيات.

٤.٧ اختبار الفرضية الرئيسية

تنص الفرضية الرئيسية على وجود أثر ذي دلالة إحصائية عند مستوى دلالة $\alpha = 0.05$ لاستراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه في استدامة البنية التحتية للمياه لدى شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض. واختبرت الفرضية باستخدام الانحدار الخطي البسيط.

جدول (٤- 11): نتائج الانحدار الخطي البسيط لاختبار الفرضية الرئيسية

المؤشر	القيمة
R	٠.٨٤٠
R ²	٠.٧٠٦
R ² المعدلة	٠.٧٠٥
F	٩٢٧.٤٩٤
دلالة F	$p < 0.001$
الثابت	٠.١٩٥
B للاستراتيجيات الكلية	٠.٩٦٨
الخطأ المعياري	٠.٠٣٢
Beta	٠.٨٤٠
t	٣٠.٤٥٥
دلالة t	$p < 0.001$
فاصل الثقة ٩٥٪ B	[0.905, 1.030]
Durbin-Watson	١.٩٧٤

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

كان نموذج الانحدار دالاً إحصائياً، $F = 927.494$ ، $p < 0.001$ ، وبلغ معامل الارتباط ٠.٨٤٠. وبلغ معامل التحديد ٠.٧٠٦، ما يعني أن النموذج يفسر ٧٠.٦٪ من التباين في الدرجة الكلية لاستدامة البنية التحتية للمياه ضمن بيانات الدراسة. كما كان معامل الانحدار غير المعياري موجباً ودالاً ($B = 0.968$ ، $t = 30.455$ ، $p < 0.001$)، ووقع فاصل الثقة بالكامل في المجال الموجب. ويمكن التعبير عن النموذج بالمعادلة الآتية: $Y = 0.195 + 0.968X$ ، حيث تمثل Y الدرجة الكلية لاستدامة البنية التحتية وتمثل X الدرجة الكلية لاستراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه. وبناءً على ذلك تدعم النتائج الفرضية الرئيسية.

٤.٨ اختبار الفرضيات الفرعية

اختُبرت الفرضيات الفرعية الثلاث في نموذج انحدار متعدد واحد، بما يتيح تقدير الأثر النسبي لكل بعد بعد التحكم إحصائياً في البعدين الآخرين. وبلغ $R = 0.841$ و $R^2 = 0.707$ و R^2 المعدلة = 0.704 ، وكان النموذج دالاً، $F = 308.295$ ، $p < 0.001$ ، وبلغ Durbin-Watson 1.986.

جدول (٤- 12): نتائج الانحدار المتعدد لاختبار الفرضيات الفرعية

البعد	B	Beta	t	p	فاصل الثقة ٩٥%	Tolerance	VIF
تنوع وتعزيز مصادر الإمداد	٠.٣٠٢	٠.٣٣٥	١٠.٣٥٣	$p < 0.001$	[٠.٢٤٤، ٠.٣٥٩]	٠.٧٢٨	١.٣٧٣
إدارة الطلب والحد من الفاقد	٠.٣٣٩	٠.٣٧٥	١١.٢٦٧	$p < 0.001$	[٠.٢٨٠، ٠.٣٩٩]	٠.٦٨٩	١.٤٥١
المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية	٠.٣٢٧	٠.٣٤٠	١٠.٤٠٥	$p < 0.001$	[٠.٢٦٥، ٠.٣٨٨]	٠.٧١٤	١.٤٠٠

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

أظهر البعد الأول، تنوع وتعزيز مصادر الإمداد، أثراً موجباً ودالاً ($B = 0.302$ ، $Beta = 0.335$ ، $p < 0.001$)، ومن ثم تدعم النتائج الفرضية الفرعية الأولى. وأظهر بعد إدارة الطلب والحد من الفاقد أثراً موجباً ودالاً ($B = 0.339$ ، $Beta = 0.375$ ، $p < 0.001$)، فتدعم النتائج الفرضية الفرعية الثانية. كما أظهر بعد المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية أثراً موجباً ودالاً ($B = 0.327$ ، $Beta = 0.340$ ، $p < 0.001$)، فتدعم النتائج الفرضية الفرعية الثالثة.

تأخذ معادلة الانحدار المتعدد الصورة الآتية: $Y = 0.197 + 0.302X_1 + 0.339X_2 + 0.327X_3$. وبحسب معاملات Beta جاء بعد إدارة الطلب والحد من الفاقد في المرتبة الأولى نسبياً (٠.٣٧٥)، يليه بعد المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية (٠.٣٤٠)، ثم بعد تنوع وتعزيز مصادر الإمداد (٠.٣٣٥). وهذه الفروق متقاربة، ولذلك تشير النتائج إلى تكامل الأبعاد أكثر مما تشير إلى هيمنة بُعد واحد بصورة كبيرة. كما تراوحت قيم VIF بين ١.٣٧٣ و ١.٤٥١ وتجاوزت قيم Tolerance 0.689، فلا توجد مشكلة تعدد خطي تهدد تفسير المعاملات.

٤.٩ تحليلات داعمة لأبعاد استدامة البنية التحتية

أُجريت تحليلات إضافية لفهم كيفية ارتباط الأبعاد الاستراتيجية بكل بُعد من أبعاد الاستدامة. وتُعرض هذه النتائج بوصفها تحليلات داعمة لا فرضيات جديدة.

جدول (٤- 13): ملخص نماذج الانحدار الداعمة لأبعاد الاستدامة

بُعد الاستدامة	R ²	F	p	أعلى Beta	الثاني	الثالث
الاستدامة التشغيلية والفنية	٠.٥١٨	١٣٧.٧١٩	p < 0.001	المرونة والتقنيات (٠.٣٦٧)	إدارة الطلب والفاقد (٠.٢٧٠)	تنوع المصادر (٠.٢٦٠)
الاستدامة الاقتصادية والمالية	٠.٤٠٤	٨٦.٩٢٩	p < 0.001	إدارة الطلب والفاقد (٠.٣١٠)	تنوع المصادر (٠.٣٠٥)	المرونة والتقنيات (٠.١٧٤)
الاستدامة البيئية	٠.٥٥٣	١٥٨.٢٠٤	p < 0.001	إدارة الطلب والفاقد (٠.٣٣٤)	المرونة والتقنيات (٠.٣١٤)	تنوع المصادر (٠.٢٨١)
المرونة واستمرارية الخدمة	٠.٥٤٥	١٥٣.٤٠٧	p < 0.001	إدارة الطلب والفاقد (٠.٣٤٤)	المرونة والتقنيات (٠.٢٩٨)	تنوع المصادر (٠.٢٨٠)

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

فسرت الأبعاد الاستراتيجية ٥١.٨٪ من التباين في الاستدامة التشغيلية والفنية، وكان الأثر النسبي الأعلى للمرونة التشغيلية والتقنيات الذكية. وفي الاستدامة الاقتصادية والمالية بلغ التباين المفسر ٤٠.٤٪، وتقدم بعد إدارة الطلب والحد من الفاقد بفارق محدود عن تنوع المصادر. وبلغت النسبة ٥٥.٣٪ في الاستدامة البيئية و٥٤.٥٪ في المرونة واستمرارية الخدمة، وكان بعد إدارة الطلب والفاقد الأعلى نسبياً في النموذجين. وتدعم هذه الأنماط فكرة أن ممارسات الطلب والفاقد تُنتج منافع متعددة في الماء والطاقة والتكلفة والموثوقية، بينما تظهر قيمة المرونة والتقنيات بصورة أوضح في الجانب التشغيلي والفني.

٤.١٠ مناقشة النتائج

أ - مستوى استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه

أظهرت النتائج أن المستوى الكلي لاستراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه جاء متوسطاً. ويمكن تفسير ذلك بأن الاستراتيجيات الثلاث موجودة بوصفها ممارسات تنظيمية وتشغيلية، إلا أن درجة تكاملها وانتظامها واستخدامها في القرار لا تزال قابلة للتطوير. ويتسق هذا التفسير مع منطق الإدارة المتكاملة للموارد المائية، الذي لا يقيس النجاح بمجرد وجود مصدر أو تقنية، بل بدرجة تنسيق العرض والطلب والأصول والبيئة. كما يتقاطع مع ما أشار إليه Ouda et al (٢٠١٣) بشأن ضرورة الجمع بين أدوات الحفظ والقياس

والسياسات، ومع Oberascher et al (٢٠٢٢) الذين أكدوا أن قيمة المدن المائية الذكية تنشأ من تكامل البيانات والقرار لا من الحساسات منفردة.

وتصدر تنويع وتعزيز مصادر الإمداد المتوسطات، وهو أمر مفهوم في السياق السعودي الذي يعتمد على مزيج من التحلية والمياه الجوفية والمياه المعالجة والتخزين والنقل لمسافات طويلة. وتتفق النتيجة مع Ouda et al (٢٠١٨) في إبراز الحاجة إلى تخطيط طويل الأجل للطلب والإمداد في الرياض، ومع Dawoud et al (٢٠٢٢) في أهمية استكمال سلسلة إعادة الاستخدام. ومع ذلك، بقاء المتوسط في الحد الأعلى من المستوى المتوسط يعني أن تنوع المصادر وحده لا يكفي، وأن القيمة المستدامة تتوقف على تكامل الإنتاج والنقل والتخزين والتوزيع ومراعاة مخاطر الجودة والطاقة والتكلفة.

ب - مستوى استدامة البنية التحتية للمياه

جاء مستوى استدامة البنية التحتية للمياه مرتفعاً، وتقدمت الاستدامة التشغيلية والفنية ثم المرونة واستمرارية الخدمة. ويشير ذلك إلى قوة نسبية في اعتمادية الأصول وكفاءة التشغيل والمحافظة على مستوى الخدمة والتعافي من الاضطرابات. وتتفق هذه النتيجة مع مدخل Safe & SuRe الذي يربط الاستدامة بقدرة النظام على المحافظة على الخدمة والتعافي، لا بمحاولة منع جميع حالات الفشل (Butler et al., 2016). كما تتقاطع مع مراجعة Assad and Bouferguene (٢٠٢٢) التي أبرزت أبعاد الامتصاص والاستعادة والتكيف في قياس مرونة شبكات المياه.

في المقابل، جاءت الاستدامة الاقتصادية والمالية في المرتبة الأخيرة وبمستوى متوسط، ما يشير إلى أن التخطيط المالي المنتظم للصيانة والتجديد، وإدماج تكلفة دورة الحياة في قرارات الاستثمار، قد لا يكونان بالنضج نفسه الذي تتمتع به الجوانب التشغيلية. ويمكن تفسير ذلك بأن النتائج التشغيلية اليومية تكون أكثر وضوحاً للعاملين من منافع دورة الحياة طويلة الأجل، كما أن تأجيل الإحلال قد يخفض الإنفاق قصير الأجل لكنه يرفع مخاطر التكلفة مستقبلاً. أما الاستدامة البيئية فجاءت عند الحد الأعلى من المستوى المتوسط، وهو ما يبرز الحاجة إلى ربط كفاءة المياه والطاقة والامتثال البيئي بمؤشرات تشغيلية قابلة للمتابعة.

ت - أثر الاستراتيجيات الكلية في الاستدامة

أظهر نموذج الانحدار البسيط أثراً موجباً قوياً ودالاً للاستراتيجيات الكلية في استدامة البنية التحتية، وفسر نسبة مرتفعة من التباين في الدرجة الكلية للاستدامة ضمن بيانات الدراسة. وتدعم النتيجة التصور النظري الذي يجمع بين إدارة المخاطر والإدارة المتكاملة والمرونة: تنويع المصادر يخفض خطر التركيز، وإدارة الطلب والفاقد تخفض التعرض والأحمال، والمرونة والرقمنة تخفض زمن الاكتشاف وعواقب التعطل. وتوسع الدراسة الحالية الأدبيات التي تناولت كل مسار منفرداً من خلال اختبارها في نموذج مؤسسي موحد مرتبط بنتائج فنية ومالية وبيئية ومرونية.

ولا تعني قيمة معامل التحديد أن الاستراتيجيات تفسر الاستدامة سببياً بصورة مطلقة؛ فالتصميم المقطعي والقياس الإدراكي يفرضان حدوداً تفسيرية. إلا أن قوة النموذج واتجاهه المتسق مع النظرية وفواصل الثقة الموجبة توفر دليلاً تطبيقياً على أن إدارة مخاطر ندرة المياه ينبغي أن تُعامل جزءاً أصيلاً من إدارة دورة حياة البنية التحتية، لا برنامجاً منفصلاً عن التشغيل والأصول والاستثمار.

ث - أثر تنوع وتعزيز مصادر الإمداد

دعم التحليل أثر تنوع وتعزيز مصادر الإمداد في الاستدامة. ويُفسر ذلك بأن تنوع المحفظة والتخزين الاستراتيجي وتكامل سلسلة الإنتاج والنقل والتوزيع تخفض حساسية الخدمة لتوقف مصدر أو مرفق واحد، وتتيح تشغيلاً أكثر مرونة. وتتفق النتيجة مع دراسة القسومي (٢٠٢٠) في أهمية المياه المعالجة كبديل يدعم المحفظة المائية في الرياض، ومع Ouda et al (٢٠١٨) في ربط توقعات الطلب بالاستثمار في طاقات الإمداد. كما تدعمها دراسة Alkhudhiri et al (٢٠١٩) التي أبرزت ضرورة النظر إلى المعالجة والموارد ضمن تخطيط متكامل.

وجاء هذا البعد في المرتبة الثالثة نسبياً وفق Beta بفارق محدود عن بعد المرونة والتقنيات. وقد يُعزى ذلك إلى أن مشروعات المصادر والتخزين ذات طبيعة رأسمالية طويلة الأجل، بينما تظهر آثار خفض الفاقد والرقمنة بصورة أقرب إلى التشغيل اليومي. كما أن تعدد المصادر قد يضيف أعباء طاقة وجودة وتشغيل إذا لم يُدمج في تخطيط دورة الحياة، وهو ما يفسر ضرورة الجمع بين التنوع والتكامل لا الاكتفاء بزيادة عدد المصادر.

ج - أثر إدارة الطلب والحد من الفاقد

كان بعد إدارة الطلب والحد من الفاقد الأقوى نسبياً في نموذج الانحدار المتعدد، كما ظهر أثره الأعلى في الاستدامة البيئية والمرونة واستمرارية الخدمة، واحتل موقعاً متقدماً في الاستدامة الاقتصادية والمالية. ويمكن تفسير ذلك بأن خفض المياه المفقودة يحقق مورداً متاحاً من دون إنشاء مصدر جديد، ويقلل الطاقة والمواد والتكاليف، ويخفف الضغط على الأصول، ويرفع وضوح الشبكة وسرعة اكتشاف الاضطراب. ولذلك ينتقل أثره إلى أكثر من بعد من أبعاد الاستدامة في الوقت نفسه.

تتفق النتيجة مع الإبراهيم (٢٠٠٠) الذي اعتبر خفض الفاقد معادلاً لإضافة مورد من حيث أثره في التوازن المائي، ومع الحبوس (٢٠١١) الذي أبرز دور الموازنة المائية ومناطق القياس وإدارة الضغط ودقة العدادات. كما تتقاطع مع Alderiny et al (٢٠٢١) و Javid (٢٠٢٥) في أهمية فهم محددات الطلب وكفاءة الاستخدام. وتضيف الدراسة الحالية أن هذا المسار لا يقتصر على الترشيح، بل يمثل أولوية متكاملة لإدارة المخاطر واستدامة الأصول في مرفق المياه.

ح- أثر المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية

أظهر بعد المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية أثرًا موجبًا ودالًا، وجاء ثانيًا من حيث القوة النسبية، كما كان الأعلى تأثيرًا في الاستدامة التشغيلية والفنية. وتُفسر النتيجة بأن خطط الطوارئ واستمرارية الأعمال، وأجهزة الاستشعار والرقابة اللحظية، وبيانات حالة الأصول، وتكامل الأنظمة الرقمية، تقلل زمن اكتشاف الأعطال وتدعم الصيانة التنبؤية وقرار التشغيل في الوقت المناسب. وتتفق النتيجة مع Rousson et al (2023) بشأن قيمة بيانات الضغط والحساسات في كشف الأحداث، ومع Soares Ascenção et al (2023) بشأن تطبيقات القياس الذكي وكشف التسرب والتنبؤ بالطلب وتحسين التشغيل.

ومع أن المتوسط الوصفي لهذا البعد كان متوسطًا، فإن أثره النسبي في الانحدار كان مرتفعًا. ويعني ذلك أن رفع نضج الممارسات الرقمية والمرونية قد يحقق عائداً واضحاً في الاستدامة، بشرط أن تُدمج التقنيات في عمليات القرار وإدارة الأصول، وأن تدعمها جودة البيانات والمهارات والأمن السيبراني. وتتقاطع هذه النتيجة مع Oberascher et al (2022) في أن ضعف التكامل والتوافق البيئي قد يحد من قيمة الاستثمارات الذكية.

خ- الدلالة المؤسسية لترتيب الأبعاد

يفرق ترتيب المتوسطات عن ترتيب معاملات Beta بين مستوى الممارسة وقوة أثرها. فقد جاء تنوع المصادر أولاً في المتوسط، بينما جاء بعد إدارة الطلب والفاقد أولاً في التأثير النسبي. وهذا يعني أن البعد الأكثر تطبيقاً ليس بالضرورة الأكثر تفسيراً للتباين في الاستدامة. ومن منظور ترتيب الأولويات، ينبغي حماية الاستثمارات في الإمداد، مع توجيه اهتمام أكبر إلى الممارسات ذات العائد التشغيلي المتعدد، خاصة الموازنة المائية ومناطق القياس وإدارة الضغط والصيانة القائمة على المخاطر.

كما أن ارتفاع الاستدامة التشغيلية والمرونة مقارنة بالاستدامة الاقتصادية يوحي بوجود قدرة على تشغيل الأصول والمحافظة على الخدمة، لكن استدامة هذه القدرة على المدى الطويل تحتاج إلى تخطيط مالي منظم ودورة حياة واضحة. ومن ثم فإن الأولوية ليست استبدال الأداء التشغيلي القائم، بل ترسيخه عبر تمويل التجديد، وربط مخاطر الأصول بقرارات الاستثمار، وقياس المنافع المتجنبة من خفض الفاقد والصيانة التنبؤية.

٤.١١ النتائج النهائية للدراسة

- جاء مستوى استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه ككل متوسطاً بمتوسط ٣.٣٣٣.
- جاء بعد تنوع وتعزيز مصادر الإمداد في المرتبة الأولى بين الأبعاد المستقلة من حيث المتوسط، يليه المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية، ثم إدارة الطلب والحد من الفاقد.

- جاء مستوى استدامة البنية التحتية للمياه ككل مرتفعاً بمتوسط ٣.٤٢١.
- احتلت الاستدامة التشغيلية والفنية المرتبة الأولى بين أبعاد الاستدامة، تلتها المرونة واستمرارية الخدمة، بينما جاءت الاستدامة الاقتصادية والمالية في المرتبة الأخيرة.
- ظهرت علاقة موجبة قوية بين استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه واستدامة البنية التحتية للمياه.
- فسر نموذج الانحدار البسيط ٧٠.٦٪ من التباين في الدرجة الكلية للاستدامة ضمن بيانات الدراسة، وكان أثر الاستراتيجيات الكلية موجباً ودالاً.
- كان لكل بعد من الأبعاد المستقلة الثلاثة أثر موجب ودال في الاستدامة الكلية.
- جاء بعد إدارة الطلب والحد من الفاقد الأقوى نسبياً وفق Beta، مع تقارب معاملات الأبعاد الثلاثة.
- لم تظهر مشكلة تعدد خطي بين الأبعاد المستقلة، وكانت مؤشرات استقلال الأخطاء والقيم المؤثرة ضمن الحدود المقبولة.
- أظهرت الأداة مستويات ثبات مرتفعة، وقدم التحليل العاملي دعماً مقبولاً للبناء النظري المعتمد.

جدول (٤ - 14): ملخص قرارات اختبار الفرضيات

الفرضية	مضمون الاختبار	الدلالة	القرار
الفرضية الرئيسية	أثر الاستراتيجيات الكلية في الاستدامة	$p < 0.001$	مدعومة
الفرضية الفرعية الأولى	أثر تنوع وتعزيز مصادر الإمداد	$p < 0.001$	مدعومة
الفرضية الفرعية الثانية	أثر إدارة الطلب والحد من الفاقد	$p < 0.001$	مدعومة
الفرضية الفرعية الثالثة	أثر المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية	$p < 0.001$	مدعومة

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات SPSS.

٤.١٢ التوصيات

أولوية إدارة الطلب والحد من الفاقد

١. تطوير نماذج التنبؤ بالطلب في منطقة الرياض وربطها ببيانات الموسم والطقس والنمو العمراني وأنماط المستفيدين، واستخدامها في تشغيل الخزانات والمضخات وتوقيت التوسعات.
٢. توسيع تطبيق الموازنة المائية ومناطق القياس، وتوحيد تعريفات الفاقد الحقيقي والظاهري ومؤشراته، وربط النتائج بخطة تدخل زمنية واضحة.
٣. تعزيز إدارة الضغط والكشف المبكر عن التسرب، مع ربط الإنذارات بفرق الإصلاح وأزمة استجابة ومؤشرات للمياه المستردة، حتى لا تبقى المراقبة منفصلة عن التنفيذ.

٤. توجيه الصيانة والإحلال وفق مخاطر الفاقد والأعطال وعواقب فشل الأصل، بدل الاعتماد على العمر أو تكرار البلاغات وحدهما.

٥. توظيف بيانات العدادات والأنظمة التشغيلية في تصميم برامج ترشيد موجهة إلى الفئات والمناطق الأعلى قابلية للتحسين، مع قياس أثر البرامج قبل التنفيذ وبعده.

أولوية المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية

١. تحديث خطط الطوارئ واستمرارية الأعمال للعمليات الحرجة، وتحديد مستويات الخدمة الدنيا وأزمنة التعافي والمسؤوليات وسلاسل التصعيد.

٢. اختبار خطط الاستمرارية بصورة دورية من خلال تمارين وسيناريوهات تطبيقية تشمل انقطاع الطاقة وتعطل خط ناقل وتلوّثاً افتراضياً وتعطل الاتصالات، مع توثيق الإجراءات التصحيحية.

٣. توسيع تغطية أجهزة الاستشعار والرقابة اللحظية وفق أولوية المخاطر، لا وفق عدد الأجهزة فقط، وربطها بمراكز التحكم ونظم المعلومات الجغرافية وإدارة الأصول.

٤. تطوير الصيانة التنبؤية باستخدام بيانات حالة المضخات والخطوط والصمامات، وقياس أثرها في تقليل الأعطال وزمن التوقف والإنفاق الطارئ.

٥. تعزيز تكامل الأنظمة الرقمية وحوكمة البيانات والأمن السيبراني، بما يضمن أن البيانات متاحة وموثوقة لدعم القرار التشغيلي في الوقت المناسب.

أولوية تنويع وتعزيز مصادر الإمداد

١. مراجعة مزيج مصادر الإمداد بصورة دورية في ضوء سيناريوهات الطلب والمناخ والطاقة، وتحديد دور كل مصدر وهامش قدرته الموثوقة.

٢. تعزيز التكامل بين المياه المحلاة والمياه المعالجة وفق الاستخدامات المناسبة، مع استكمال متطلبات النقل والتخزين والجودة والطلب المستدام على المياه المعالجة.

٣. دعم التخزين الاستراتيجي بناءً على سيناريوهات الانقطاع وذروة الطلب وزمن الإصلاح، مع مراعاة دوران المياه وجودتها وتوزيع السعات مكانياً.

٤. تكامل تخطيط الإنتاج والنقل والتخزين والتوزيع، وتقييم نقاط الفشل الأحادية وإمكانات التحويل بين المسارات عند الاضطرابات.

٥. تضمين التكلفة الكلية والمخاطر البيئية والطاقة وجودة المياه في تقييم بدائل المصادر، وليس الطاقة الاسمية أو التكلفة الأولية وحدهما.

توصيات لتعزيز أبعاد الاستدامة

١. إعطاء الاستدامة الاقتصادية والمالية أولوية تطويرية من خلال خطة متعددة السنوات لصيانة الأصول وتجديدها وحماية الإنفاق الوقائي من المزاحمة بالاحتياجات الطارئة.

٢. اعتماد تكلفة دورة حياة الأصول في المفاضلة بين بدائل الاستثمار والإحلال، مع إدخال تكلفة الأعطال والفاقد والطاقة والمخاطر في التحليل.
٣. تطوير مؤشرات متكاملة لكفاءة استخدام المياه والطاقة والانبعثات والامتثال البيئي، وربطها بلوحات الأداء التشغيلية ومراجعات المشروعات.
٤. إنشاء آلية مشتركة بين إدارات المخاطر والتشغيل والأصول والمالية والاستدامة لمراجعة المخاطر العليا وتحديد أولويات الاستثمار بناء على الأثر في الخدمة ودورة الحياة.
٥. مقارنة المؤشرات الإدراكية التي توفرها الاستبانة بالمؤشرات التشغيلية الفعلية متى أتيح الوصول إليها، بما يدعم التحقق المتبادل وتحسين دقة القرار.

٤.١٣ مقترحات الدراسات المستقبلية

- تطبيق النموذج على مناطق أخرى ومقارنة نتائج مناطق المملكة وفق خصائص الموارد والشبكات والطلب.
- إجراء دراسة مقارنة بين الجهات المختلفة في منظومة إنتاج المياه ونقلها وتوزيعها ومعالجتها.
- اختبار دور نضج إدارة الأصول أو حوكمة البيانات كمتغير وسيط أو معدل في دراسات لاحقة.
- دراسة أثر التحول الرقمي بصورة متخصصة في مرونة شبكات المياه وكفاءة الصيانة التنبؤية.
- تنفيذ تصميم طولي يقيس التغير في الاستراتيجيات والاستدامة قبل برامج تطوير محددة وبعدها.
- استخدام التحليل العاملي التوكيدي ونمذجة المعادلات الهيكلية عند توافر عينة مستقلة وحجم مناسب للتحقق من النموذج القياسي.

٤.١٤ خلاصة الفصل

عرض الفصل الخصائص الوصفية للحالات الخاضعة للتحليل، وأثبتت اختبارات الاتساق والثبات والتحليل العاملي ملاءمة الأداة للتحليل. وأظهرت النتائج أن مستوى الاستراتيجيات الكلية متوسط، في حين جاء مستوى الاستدامة الكلية مرتفعاً. كما كشفت نماذج الانحدار عن أثر موجب ودال للاستراتيجيات مجتمعة ولكل بعد على حدة، مع تقدم إدارة الطلب والحد من الفاقد نسبياً وتقارب إسهامات الأبعاد الثلاثة. وانتهت المناقشة إلى أن الاستدامة في قطاع المياه تتطلب محفظة مترابطة تجمع تنوع الإمداد وكفاءة الطلب والفاقد والمرونة والرقمنة، وأن ترسيخ الأداء التشغيلي يحتاج إلى دعم مالي وبيئي ودورة حياة واضحة للأصول.

المراجع

أولاً: المراجع العربية

أبو الفتوح، يحيى عبدالغني. (٢٠٠٣). محددات الطلب على المياه للأغراض المنزلية: دراسة تحليلية لمنطقة الرياض والمملكة العربية السعودية. الإدارة العامة، ٤٣(٤)، ٦٨٨-٦٥١.

<https://doi.org/10.36715/0328-043-004-001>

أبو الفتوح، يحيى عبدالغني. (٢٠٠٤). ترشيد الطلب على المياه للأغراض المنزلية مع التطبيق على المملكة العربية السعودية. آفاق اقتصادية، ٢٥(١٠٠)، ٤٦-١٣.

<https://search.mandumah.com/Record/274015>

أبو صافي، محمد نصر. (٢٠١٦). تقييم الوضع المائي في محافظة الكرك باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (رسالة ماجستير). جامعة مؤتة، الأردن.

<https://search.mandumah.com/Record/876269>

الإبراهيم، نايف سالم يوسف. (٢٠٠٠). إدارة الطلب على المياه في الأردن: ترشيد الاستهلاك وتقليل الفاقد (١٩٩٨-١٩٨٤) (رسالة ماجستير). جامعة آل البيت، الأردن.

<https://search.mandumah.com/Record/571938>

بلعزوز، مريم؛ خلع، آمنة؛ عبو، عمر. (٢٠٢٣). متطلبات تحقيق الأمن المائي المستدام في الدول العربية. مجلة اقتصاديات شمال أفريقيا، ١٩(٣٢)، ٧٩-١٠٠.

<https://doi.org/10.33858/0470-019-032-003>

التركي، سعيد بن سويلم. (٢٠١٢). أهمية المياه وعوامل تلوثها وطرق معالجتها في المملكة العربية السعودية من منظور جغرافية المياه والبيئة. الإنسانيات، ٣٨، ٧١٨-٦٥١.

<https://doi.org/10.21608/ins.2012.234137>

الجميعي، زين بنت مطلق معيوض. (٢٠١٥). دور تطبيق نظم حصد المياه في تنمية الغطاء النباتي بالأراضي الجافة وشبه الجافة: نموذج حوض وادي نعمان بمكة المكرمة. المجلة المصرية للتغير البيئي، ٧(١)، ٩٣-١١١.

<https://doi.org/10.21608/egjec.2015.94899>

الحبوس، سونيا. (٢٠١١). الفاقد المائي في شبكات توزيع المياه: دراسة حالة الفاقد المائي في الجزيرة الثانية بتجمع دمر (رسالة جامعية). جامعة دمشق، كلية الهندسة المدنية، قسم الهندسة البيئية، سوريا.

حكيم، علا علي سراج؛ ورغي، صارة الحبيب. (٢٠٢٢). دمج تقنية نظم المعلومات الجغرافية وعملية التحليل الهرمي لتحديد أنسب المواقع للسدود في حوض وادي نعمان بمدينة مكة المكرمة. المجلة العربية للعلوم ونشر الأبحاث، ٨(٢)، ٣٨-٦٦. <https://doi.org/10.26389/AJSRP.L190322>

الزهراني، أفراح أحمد علي. (٢٠٢١). الخصائص الهيدرولوجية لحوض وادي نعمان بمنطقة مكة المكرمة. المجلة المصرية للتغير البيئي، ١٣(١)، ٤٧-٧٢. <https://doi.org/10.21608/egjec.2021.149004>

الزهراني، أفراح أحمد علي. (٢٠٢٣). تطبيق نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير لتحديد إمكانات حصاد مياه الأمطار في حوض وادي الأحسبة غرب المملكة العربية السعودية. المجلة العراقية لدراسات الصحراء، ١٣(١)، ٦٢-٧٥. <https://doi.org/10.36531/0802-013-001-007>

الشظيفي، راجح بن عبدالله بن راجح. (٢٠٢١). تأثير محسنات البوليمرات على احتفاظية التربة بالمياه وكفاءة الري للمساحات الخضراء (رسالة جامعية). جامعة القصيم، المملكة العربية السعودية. <https://hdl.handle.net/20.500.14154/27948>

شاويش، عادل محمد. (٢٠١١). إنتاج ونقل واستهلاك المياه للأغراض البشرية في منطقة الباحة بالمملكة العربية السعودية: دراسة في الجغرافيا الاقتصادية. مجلة بحوث الشرق الأوسط، ٢٨، ٥٤٣-٦٣٢. <https://search.mandumah.com/Record/474776>

الصرايرة، مجد علي إبراهيم. (٢٠١٨). دراسة العوامل المؤثرة على كميات العرض والطلب لمياه الشرب في محافظة الكرك وكيفية إدارتهما معاً (رسالة ماجستير). جامعة مؤتة، الأردن. <https://search.mandumah.com/Record/975222>

العبيدي، سلام أنور أحمد. (٢٠١٣). العلاقة بين إدارة الطلب على المياه والتخفيف من الفقر: دراسة تحليلية للواقع المائي ومؤشرات الفقر في الوطن العربي. مجلة جامعة كركوك للعلوم الإدارية والاقتصادية، ٣(٢)، ١٠٨-١٢٩. <https://search.mandumah.com/Record/926448>

الفريحي، محمد بن فهد. (٢٠٢٥). الرقابة على المياه: دراسة تحليلية لنظام المياه السعودي. مجلة كلية الدراسات الإسلامية والعربية للبنات بالإسكندرية، ٤١(٣)، ٢٠٠٧-٢٠٤٠. <https://doi.org/10.21608/bfda.2025.353465.1643>

القسومي، صالح بن سليمان. (٢٠٢٠). إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة في مدينة الرياض: دراسة جغرافية لاتجاهات الرأي العام. مجلة بحوث كلية الآداب، ١٢١، ٢٥٣١-٢٥٦٣.
<https://doi.org/10.21608/SJAM.2020.147459>

المطيري، عجائب بنت سعد عالي. (٢٠١٧). الخزن المائي الاستراتيجي في البيوت: دراسة تطبيقية على مدينة بريدة (رسالة ماجستير). جامعة القصيم، المملكة العربية السعودية.
<https://hdl.handle.net/20.500.14154/27085>

المعاينة، رمزي أمين حسين. (٢٠١٥). الناتج الرسوبي في هضبة الكرك وأثره على كفاءة السدود المائية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد: حوض وادي بن حماد حالة دراسية (رسالة ماجستير). جامعة مؤتة، الأردن.
<https://search.mandumah.com/Record/784708>

هاشم، هناء رفعت يوسف؛ توفيق، سحر نور الدين. (٢٠٢٤). نمذجة حصاد مياه الأمطار غربي المملكة العربية السعودية: دراسة جغرافية باستخدام التقنيات الجيومكانية والتحليل متعدد المعايير. المجلة العلمية لكلية الآداب-جامعة أسيوط، ٣١(٩١)، ١٤٥٦-١٣٩٧.
<https://doi.org/10.21608/aakj.2024.292032.1766>

الهيئة السعودية للمياه. (٢٠٢٥). تقرير الاستدامة لعام ٢٠٢٤: لأجيال تنمو وموارد لا تنضب. الرياض: الهيئة السعودية للمياه.
https://swa-cdn.swa.gov.sa/Reports/Sustainability_Report_2024_For_Growing_Generations_and_Inexhaustible_Resources.pdf

الهيئة العامة للإحصاء. (٢٠٢٥). إحصاءات البيئة المنزلية لعام ٢٠٢٤. الرياض: الهيئة العامة للإحصاء.
<https://www.stats.gov.sa/ar/w/household-environment-statistics-2024>

وزارة البيئة والمياه والزراعة. (٢٠١٨). الاستراتيجية الوطنية للمياه ٢٠٣٠. الرياض: وزارة البيئة والمياه والزراعة.
<https://www.mewa.gov.sa/ar/Ministry/initiatives/SectorStratigy/Reports>
<https://www.mewa.gov.sa/ar/Ministry/initiatives/SectorStratigy/Reports>
الاستراتيجية الوطنية للمياه ٢٠٣٠. pdf

ثانيًا: المراجع الأجنبية

- Alderiny, M. M., Al Duwais, A. A. M., & Alaagib, S. A. B. (2021). A study of water consumption in residential sector in Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2134. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08413-4>
- AlGhamdi, R., & Sharma, S. K. (2022). IoT-based smart water management systems for residential buildings in Saudi Arabia. *Processes*, 10(11), 2462. <https://doi.org/10.3390/pr10112462>
- Alkhudhiri, A., Darwish, N. B., & Hilal, N. (2019). Analytical and forecasting study for wastewater treatment and water resources in Saudi Arabia. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100915. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100915>
- Almulhim, A. I., & Abubakar, I. R. (2023). Developing a sustainable water conservation strategy for Saudi Arabian cities. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 101040. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101040>
- Alodah, A. (2023). Towards sustainable water resources management considering climate change in the case of Saudi Arabia. *Sustainability*, 15(20), 14674. <https://doi.org/10.3390/su152014674>
- Alotaibi, B. A., Baig, M. B., Najim, M. M. M., Shah, A. A., & Alamri, Y. A. (2023). Water scarcity management to ensure food security through sustainable water resources management in Saudi Arabia. *Sustainability*, 15(13), 10648. <https://doi.org/10.3390/su151310648>
- Assad, A., & Bouferguene, A. (2022). Resilience assessment of water distribution networks—Bibliometric analysis and systematic review. *Journal of Hydrology*, 607, 127522. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127522>
- Butler, D., Ward, S., Sweetapple, C., Astaraie-Imani, M., Diao, K., Farmani, R., & Fu, G. (2016). Reliable, resilient and sustainable water management: The

Safe & SuRe approach. *Global Challenges*, 1(1), 63–77.
<https://doi.org/10.1002/gch2.1010>

Dawoud, M. A., Ewea, H. A., & Alaswad, S. O. (2022). The future of wastewater treatment and reuse in Kingdom of Saudi Arabia. *Desalination and Water Treatment*, 263, 127–138. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28217>

Ennouhi, M., El Aggadi, S., Ennouari, A., Hasnaoui, L., & Elhourch, A. (2022). Desalination process and perspectives in Morocco. *Desalination and Water Treatment*, 257, 110–116. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28543>

Global Water Partnership. (2000). Integrated water resources management. TAC Background Papers No. 4. Stockholm: Global Water Partnership.

International Organization for Standardization. (2018). ISO 31000:2018 Risk management—Guidelines. Geneva: ISO.

Javid, M. (2025). Modeling the impact of price and usage efficiency on domestic water demand in Saudi Arabia. *Utilities Policy*, 96, 101971. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2025.101971>

Oberascher, M., Rauch, W., & Sitzenfrei, R. (2022). Towards a smart water city: A comprehensive review of applications, data requirements, and communication technologies for integrated management. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103442. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103442>

Ouda, O. K. M., Khalid, Y., Ajbar, A. H., Rehan, M., Shahzad, K., Wazeer, I., & Nizami, A. S. (2018). Long-term desalinated water demand and investment requirements: A case study of Riyadh. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(3), 432–446. <https://doi.org/10.2166/wrd.2017.107>

Ouda, O. K. M., Shawesh, A., Al-Olabi, T., Younes, F., & Al-Waked, R. (2013). Review of domestic water conservation practices in Saudi Arabia. *Applied Water Science*, 3, 689–699. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0106-1>

Rousso, B. Z., Lambert, M., & Gong, J. (2023). Smart water networks: A systematic review of applications using high-frequency pressure and acoustic

sensors in real water distribution systems. *Journal of Cleaner Production*, 410, 137193. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137193>

Soares Ascensão, É., Melo Marinangelo, F., Meschini Almeida, C. F., Kagan, N., & Dias, E. M. (2023). Applications of smart water management systems: A literature review. *Water*, 15(19), 3492. <https://doi.org/10.3390/w15193492>

Suhail, M., Faraj, T. K., Ahmad, W., Ravshanov, A. X., & Khan, M. N. (2024). Issues of water resources in Saudi Arabia: Past, present, and future. *Sustainability*, 16(10), 4189. <https://doi.org/10.3390/su16104189>

الملاحق

الاستبانة

بسم الله الرحمن الرحيم

السيد/السيدة المشارك(ة) المحترم(ة)،

السلام عليكم ورحمة الله وبركاته،

أنا الطالبة لمياء محمد الفرّج، طالبة ماجستير في جامعة ميدأوشن - كلية الإدارة - تخصص إدارة المخاطر، وأعمل على إعداد دراسة بعنوان: «أثر استراتيجيات إدارة مخاطر ندرة المياه في استدامة البنية التحتية للمياه: دراسة ميدانية على العاملين المختصين في شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض»، وذلك كجزء من متطلبات الحصول على درجة الماجستير. وتستهدف هذه الاستبانة العاملين المختصين في شركة المياه الوطنية بمنطقة الرياض ممن ترتبط خبراتهم بمجالات المخاطر والتشغيل والصيانة والشبكات والأصول والتخطيط والمشروعات والاستدامة والتحول الرقمي والجودة والطوارئ واستمرارية الأعمال. أمل التكرم بالإجابة عن جميع الفقرات بدقة وموضوعية وفق معرفتكم وخبرتكم الوظيفية الفعلية. وستعامل المعلومات التي تقدمونها بسرية تامة، ولن تستخدم إلا لأغراض البحث العلمي، كما ستعرض النتائج بصورة إجمالية دون الإشارة إلى هوية أي مشارك أو تقييم أدائه أو إدارته. ولا توجد إجابة صحيحة أو خاطئة؛ فالمطلوب هو التعبير عن تقديركم المهني للممارسات والنتائج الواردة في الاستبانة. إن تعاونكم يسهم في دعم جودة الدراسة والوصول إلى نتائج أكثر دقة، ولكم خالص الشكر والتقدير.

شاكراً لكم حسن تعاونكم،

المشرفون

د.

د.

كلية الإدارة، جامعة ميدأوشن

لمياء محمد الفرّج

طالب ماجستير إدارة المشاريع

كلية الإدارة، جامعة ميدأوشن

Questionnaire

Dear Participant,

I am Lamyaa Mohammed Al-Faraj, a Master's student in Risk Management at the College of Management, Midocean University. I am conducting a study entitled: "The Impact of Water Scarcity Risk Management Strategies on the Sustainability of Water Infrastructure: A Field Study of Specialized Employees at the National Water Company in Riyadh Region" as part of the requirements for the Master's degree. This questionnaire is intended for specialized employees of the National Water Company in Riyadh Region whose work is related to risk management, operations and maintenance, networks, asset management, planning and projects, sustainability, digital transformation, quality, emergencies, or business continuity.

Please answer all statements accurately and objectively according to your actual professional knowledge and experience. The information you provide will be treated with complete confidentiality and used solely for scientific research. Results will be reported only in aggregate form, without identifying any participant or evaluating the performance of the participant or their department. There are no right or wrong answers; what is required is your professional assessment of the practices and outcomes described in the questionnaire.

Your cooperation will contribute to the quality and accuracy of the study. Thank you for your valuable participation.

Thank you for your cooperation,

Lamyaa Mohammad Al-Faraj
Master of Project Management
Candidate
College of Management, Midocean
University

Supervisors

Dr.
Dr.
College of Management, Midocean
University

أولاً: الخصائص الديموغرافية (First: Demographic Characteristics)

يرجى وضع إشارة [✓] في الخانة المناسبة. Kindly place a checkmark [✓] in the appropriate box.

١. الجنس: (Gender)

☐ أنثى / Female

☐ ذكر / Male

٢. الفئة العمرية: (Age Group)

☐ من ٣٠ إلى أقل من ٤٠ سنة / 30 to less than 40 years

☐ أقل من ٣٠ سنة / Less than 30 years

☐ ٥٠ سنة فأكثر / 50 years and above

☐ من ٤٠ إلى أقل من ٥٠ سنة / 40 to less than 50 years

٣. المؤهل العلمي: (Educational Qualification)

☐ بكالوريوس / Bachelor's degree

☐ دبلوم أو أقل / Diploma or less

☐ دكتوراه / Doctorate

☐ ماجستير / Master's degree

٤. مجال العمل أو الإدارة الحالية: (Current Work Area or Department)

☐ التشغيل والصيانة / Operations and maintenance

☐ إدارة المخاطر / Risk management

☐ التخطيط أو إدارة المشروعات / Planning or project management

☐ الشبكات أو إدارة الأصول / Networks or asset management

☐ مجال آخر ذو صلة / Other related area

☐ الاستدامة أو التحول الرقمي أو الجودة والطوارئ / Sustainability, digital transformation, quality, or emergencies

٥. سنوات الخبرة في قطاع المياه: (Years of Experience in the Water Sector)

☐ من ٣ إلى أقل من ٧ سنوات / 3 to less than 7 years

☐ أقل من ٣ سنوات / Less than 3 years

☐ ١٢ سنة فأكثر / 12 years and above

☐ من ٧ إلى أقل من ١٢ سنة / 7 to less than 12 years

٦. المستوى الوظيفي: (Job Level)

☐ مشرف أو قائد فريق / Supervisor or team leader

☐ موظف متخصص / Specialist employee

☐ مدير إدارة / Department manager

☐ رئيس قسم / Department head

☐ مستوى قيادي أعلى أو أخرى / Higher leadership level or other

ثانياً: فقرات الاستبانة (Second: Questionnaire Statements)

يرجى تحديد درجة موافقتك على العبارات الآتية وفق المقياس التالي:

Please indicate your level of agreement with the following statements according to the scale below:

1	2	3	4	5
لا أوافق بشدة Strongly Disagree	لا أوافق Disagree	محايد Neutral	أوافق Agree	أوافق بشدة Strongly Agree

المحور الأول: استراتيجيات تنوع وتعزيز مصادر الإمداد المائي

(Axis 1: Water Supply Source Diversification and Enhancement Strategies)

م No.	العبارات Statements	5	4	3	2	1
		أوافق بشدة Strongly Agree	أوافق Agree	محايد Neutral	لا أوافق Disagree	لا أوافق بشدة Strongly Disagree
1	تخطط الشركة لمزيج متنوع من مصادر الإمداد المائي بما يحد من الاعتماد على مصدر واحد. The Company plans a diversified mix of water supply sources to reduce dependence on a single source.	☐	☐	☐	☐	☐
2	تدمج الشركة المياه المحلاة والمياه المعالجة ضمن منظومة إمداد متكاملة وفق الاستخدامات المناسبة. The Company integrates desalinated water and treated wastewater within a coordinated supply system according to appropriate uses.	☐	☐	☐	☐	☐
3	تخطط الشركة لسعات التخزين الاستراتيجي بما يوفر احتياطاً مناسباً لمواجهة الانقطاعات أو ارتفاع الطلب. The Company plans strategic storage capacity to provide an appropriate reserve for supply disruptions or demand surges.	☐	☐	☐	☐	☐
4	تنسق الشركة تخطيط الإنتاج والنقل والتخزين والتوزيع ضمن سلسلة إمداد مترابطة. The Company coordinates the planning of production, transmission, storage, and distribution as an integrated supply chain.	☐	☐	☐	☐	☐

المحور الثاني: استراتيجيات إدارة الطلب والحد من الفاقد المائي

(Axis 2: Water Demand Management and Water-Loss Reduction Strategies)

1	2	3	4	5	العبارة Statements	م No.
لا أوافق بشدة Strongly Disagree	لا أوافق Disagree	محايد Neutral	أوافق Agree	أوافق بشدة Strongly Agree		
☐	☐	☐	☐	☐	تستخدم الشركة توقعات الطلب المائي في قرارات التخطيط والتشغيل. The Company uses water demand forecasts in planning and operational decisions.	5
☐	☐	☐	☐	☐	تتخذ الشركة برامج ترشيد تستند إلى بيانات الاستهلاك والفئات المستهدفة. The Company implements water-conservation programs based on consumption data and defined target groups.	6
☐	☐	☐	☐	☐	تطبق الشركة الموازنة المائية ضمن مناطق القياس لتحديد مواقع الفاقد ومكوناته. The Company applies water balancing within district metered areas to identify the locations and components of water loss.	7
☐	☐	☐	☐	☐	تطبق الشركة برنامجاً متكاملًا لإدارة الضغط وكشف التسرب وصيانة الشبكات للحد من الفاقد. The Company applies an integrated program of pressure management, leak detection, and network maintenance to reduce water loss.	8

المحور الثالث: استراتيجيات المرونة التشغيلية والتقنيات الذكية

(Axis 3: Operational Resilience and Smart Technology Strategies)

1	2	3	4	5	العبارة Statements	م No.
لا أوافق بشدة Strongly Disagree	لا أوافق Disagree	محايد Neutral	أوافق Agree	أوافق بشدة Strongly Agree		
☐	☐	☐	☐	☐	تعتمد الشركة خططاً محدثة للطوارئ واستمرارية الأعمال للعمليات الحرجة. The Company maintains up-to-date emergency and business continuity plans for critical operations.	9
☐	☐	☐	☐	☐	تستخدم الشركة أجهزة الاستشعار والمراقبة اللحظية لمتابعة حالة الشبكات والمرافق. The Company uses sensors and real-time monitoring to track the condition of networks and facilities.	10

1	2	3	4	5	العبارة Statements	م No.
لا أوافق بشدة Strongly Disagree	لا أوافق Disagree	محايد Neutral	أوافق Agree	أوافق بشدة Strongly Agree		
☐	☐	☐	☐	☐	تستخدم الشركة بيانات حالة الأصول في تخطيط الصيانة التنبؤية. The Company uses asset-condition data in predictive maintenance planning.	11
☐	☐	☐	☐	☐	تتكامل الأنظمة الرقمية بما يدعم اتخاذ القرار التشغيلي في الوقت المناسب. The Company's digital systems are integrated to support timely operational decision-making.	12

المحور الرابع: الاستدامة التشغيلية والفنية

(Axis 4: Operational and Technical Sustainability)

1	2	3	4	5	العبارة Statements	م No.
لا أوافق بشدة Strongly Disagree	لا أوافق Disagree	محايد Neutral	أوافق Agree	أوافق بشدة Strongly Agree		
☐	☐	☐	☐	☐	تتسم أصول ومرافق المياه بدرجة مناسبة من الاعتمادية في أداء وظائفها. Water assets and facilities demonstrate an appropriate level of reliability in performing their functions.	13
☐	☐	☐	☐	☐	تتسم عمليات تشغيل وصيانة البنية التحتية بالكفاءة. Infrastructure operation and maintenance processes are efficient.	14
☐	☐	☐	☐	☐	تحافظ البنية التحتية على جودة المياه والضغط واستمرارية الخدمة ضمن المستويات المطلوبة. The infrastructure maintains water quality, pressure, and service continuity at the required levels.	15

المحور الخامس: الاستدامة الاقتصادية والمالية

(Axis 5: Economic and Financial Sustainability)

1	2	3	4	5	العبارة Statements	م No.
لا أوافق بشدة Strongly Disagree	لا أوافق Disagree	محايد Neutral	أوافق Agree	أوافق بشدة Strongly Agree		
☐	☐	☐	☐	☐	تُدار تكاليف تشغيل وصيانة البنية التحتية بكفاءة. Infrastructure operation and maintenance costs are managed efficiently.	16
☐	☐	☐	☐	☐	يتوافر تخطيط مالي منتظم لأعمال صيانة الأصول وتجديدها. Regular financial planning is available for asset maintenance and renewal.	17
☐	☐	☐	☐	☐	تُراعى تكلفة دورة حياة الأصل عند تقييم بدائل الاستثمار والتجديد. Asset life-cycle cost is considered when evaluating investment and renewal alternatives.	18

المحور السادس: الاستدامة البيئية

(Axis 6: Environmental Sustainability)

1	2	3	4	5	العبارة Statements	م No.
لا أوافق بشدة Strongly Disagree	لا أوافق Disagree	محايد Neutral	أوافق Agree	أوافق بشدة Strongly Agree		
☐	☐	☐	☐	☐	تحقق البنية التحتية كفاءة مناسبة في استخدام المياه ضمن عملياتها. The infrastructure achieves an appropriate level of water-use efficiency in its operations.	19
☐	☐	☐	☐	☐	تحقق مرافق المياه كفاءة مناسبة في استهلاك الطاقة. Water facilities achieve an appropriate level of energy-use efficiency.	20
☐	☐	☐	☐	☐	تُدار الآثار البيئية لعمليات البنية التحتية وفق المتطلبات والمعايير المعمول بها. The environmental impacts of infrastructure operations are managed in accordance with applicable requirements and standards.	21

المحور السابع: المرونة واستمرارية الخدمة

(Axis 7: Resilience and Service Continuity)

1	2	3	4	5	العبارة Statements	م No.
لا أوافق بشدة Strongly Disagree	لا أوافق Disagree	محايد Neutral	أوافق Agree	أوافق بشدة Strongly Agree		
☐	☐	☐	☐	☐	تستطيع البنية التحتية المحافظة على مستوى أساسي من الخدمة أثناء الاضطرابات. The infrastructure can maintain a basic level of service during disruptions.	22
☐	☐	☐	☐	☐	تستعيد البنية التحتية الخدمة خلال مدة مناسبة بعد الانقطاع. The infrastructure restores service within an appropriate period after an interruption.	23
☐	☐	☐	☐	☐	تتوافر في البنية التحتية ساعات أو مسارات احتياطية تقلل أثر تعطل المكونات الحرجة. The infrastructure has reserve capacity or alternative routes that reduce the impact of critical component failures.	24

نشكر لكم تعاونكم في تعبئة هذه الاستبانة، ومساهمتم في دعم البحث العلمي.

Thank you for your cooperation in completing this questionnaire and for your contribution to supporting scientific research.

Abstract

This study examined the impact of water scarcity risk management strategies on the sustainability of water infrastructure at the National Water Company in Riyadh Region. The independent variable comprised three dimensions: water supply source diversification and enhancement, water demand management and water-loss reduction, and operational resilience and smart technologies. The dependent variable comprised operational and technical sustainability, economic and financial sustainability, environmental sustainability, and resilience and service continuity. A quantitative descriptive-analytical approach was employed using a bilingual questionnaire with six demographic and occupational variables and 24 measurement statements across seven dimensions. The dataset analyzed included 388 cases. Descriptive statistics, Cronbach's alpha, exploratory factor analysis, Pearson correlation, and simple and multiple linear regression were used. The questionnaire demonstrated high internal consistency (overall alpha = 0.947; independent variable = 0.884; dependent variable = 0.923). The overall level of water scarcity risk management strategies was moderate ($M = 3.333$), whereas the overall level of water infrastructure sustainability was high ($M = 3.421$). Simple regression showed a positive and statistically significant effect of the overall strategies on sustainability ($R = 0.840$), with the model accounting for 70.6% of the variance in the overall sustainability score within the study data. Multiple regression indicated that all three strategic dimensions had positive and significant effects. Water demand management and water-loss reduction had the strongest relative standardized effect, followed by operational resilience and smart technologies, and then water supply source diversification and enhancement, although the standardized coefficients were close. The study recommends prioritizing demand forecasting, water balancing, district metered areas, pressure management, early leak detection, predictive maintenance, digital systems integration, strategic storage, and life-cycle financial planning for water assets.

Keywords: Water scarcity, risk management, demand management, water loss, smart technologies, infrastructure sustainability, National Water Company.

Midocean University

College of Management

Risk Management



**The Impact of Water Scarcity Risk Management Strategies on
the Sustainability of Water Infrastructure: A Field Study of
Specialized Employees at the National Water Company in Riyadh
Region**

Prepared by

Lamyaa Mohammad Al-Faraj

Student ID Number:

253002829

Supervised by:

Dr

Academic Year: 2026