الأثر الاقتصادي للتحول الرقمي في تحسين كفاءة إدارة الموارد المائية وتقليل الفاقد المائي: دراسة تحليلية تطبيقية على قطاع المياه في ليبيا

أمان محمد الرمالي
قسم الإقتصاد الزراعي - كلية الزراعة - جامعة طرابلس

المستخلص

هدفت هذه الدراسة إلى تحليل الأثر الاقتصادي للتحول الرقمي في تحسين كفاءة إدارة الموارد المائية، وتقليل الفاقد المائي في قطاع المياه الليبي، واعتمدت الدراسة على المنهج الكمي التحليلي من خلال تطوير نموذج اقتصادي قائم على تحليل التكلفة والعائد، وتحليل السيناريوهات لتقييم الجدوى الاقتصادية للاستثمار في التقنيات الرقمية المستخدمة في إدارة شبكات المياه، بما في ذلك العدادات الذكية، وأجهزة الاستشعار، وأنظمة المراقبة والتحكم الرقمية، وتم بناء ثلاثة سيناريوهات تحليلية افترضت خفض الفاقد المائي بنسبة 10% و20% و30%، استناداً إلى تقديرات واقعية لكمية المياه المنتجة ومعدلات الفاقد المائي وتكاليف إنتاج المياه في ليبيا، كما تم توظيف مجموعة من المؤشرات الاقتصادية الكمية شملت: الوفورات المالية السنوية، والمنافع الاقتصادية التراكمية، والعائد على الاستثمار، وفترة استرداد الاستثمار. وأظهرت النتائج أن التكلفة الاقتصادية السنوية للفاقد المائي في قطاع المياه الليبي قد تصل إلى نحو 630 مليون دينار ليبي، كما بينت أن تطبيق تقنيات التحول الرقمي يمكن أن يحقق وفورات مالية سنوية تتراوح بين 63 و189 مليون دينار ليبي وفقاً لمستوى خفض الفاقد المائي، وعلى أساس عمر اقتصادي للمشروع يبلغ عشر سنوات، تراوحت المنافع الاقتصادية التراكمية بين 630 مليون و1.89 مليار دينار ليبي، كما تراوحت فترة استرداد الاستثمار بين نحو ثمانية أشهر وسنة و11 شهراً، مما يعكس الجدوى الاقتصادية المرتفعة للاستثمار في التحول الرقمي. وتخلص الدراسة إلى أن التحول الرقمي يمثل استثماراً استراتيجياً واعداً لتعزيز الكفاءة التشغيلية وتقليل الخسائر الاقتصادية ودعم استدامة إدارة الموارد المائية في ليبيا، وتوصي بتبني استراتيجية وطنية للتحول الرقمي وتطوير البنية التحتية الرقمية وتعزيز القدرات المؤسسية الداعمة للإدارة الذكية للمياه.

الكلمات الدالة: التحول الرقمي، الفاقد المائي، الكفاءة التشغيلية، تحليل التكلفة والعائد، العائد على الاستثمار.

المقدمة

يشهد قطاع المياه عالمياً تحولاً متسارعاً نحو توظيف التقنيات الرقمية والأنظمة الذكية بهدف تحسين كفاءة إدارة الموارد المائية وتعزيز الاستدامة التشغيلية والاقتصادية، وقد أصبح التحول الرقمي أحد المداخل الحديثة لتطوير مرافق المياه من خلال استخدام تقنيات، مثل: إنترنت الأشياء، والعدادات الذكية، وتحليل البيانات، والذكاء الاصطناعي، بما يسهم في تحسين عمليات المراقبة والكشف المبكر عن التسربات ورفع كفاءة تشغيل شبكات المياه .(World Bank, 2022) ويعد الفاقد المائي من أبرز التحديات التي تواجه قطاع المياه، خاصة في الدول التي تعاني من محدودية الموارد المائية وارتفاع تكاليف التشغيل، فالفاقد المائي لا يقتصر أثره على فقدان كميات من المياه المنتجة، بل يمتد ليشكل خسائر اقتصادية مباشرة نتيجة تحمل تكاليف الإنتاج والضخ والنقل دون تحقيق عائد اقتصادي أو خدمي مقابلها،

للاتصال: د. أمان محمد الرمالي. قسم الإقتصاد الزراعي – كلية الزراعة – جامعة طرابلس
هاتف: 3177 542 92 218 + **البريد الالكتروني: a.ramali@yahoo.co.uk**
استلمت بتاريخ: 13 / 06 / 2026 **أجيزت بتاريخ: 04 / 08 / 2026**

وتشير الأدبيات الحديثة إلى أن ارتفاع معدلات الفاقد المائي يرتبط: بضعف الكفاءة التشغيلية، وتقادم البنية التحتية، وغياب أنظمة المراقبة والإدارة الذكية .(Musa & Rahman, 2023) وفي ليبيا، تزداد أهمية هذه القضية في ظل الاعتماد الكبير على: المياه الجوفية، وارتفاع تكاليف إنتاج المياه، وتحديات البنية التحتية لشبكات المياه، إلى جانب محدودية استخدام التقنيات الرقمية في إدارة وتشغيل هذه الشبكات، ويؤدي ذلك إلى ارتفاع معدلات الفاقد المائي، وما يترتب عليها من خسائر اقتصادية وتشغيلية تؤثر في كفاءة إدارة الموارد المائية واستدامتها. (Wheida & Verhoeven, 2007) ورغم تزايد الاهتمام الدولي بالتحول الرقمي في قطاع المياه، فإن معظم الدراسات السابقة ركزت على الجوانب التقنية والتشغيلية المرتبطة باستخدام التقنيات الرقمية، في حين أن مشكلة الدراسة تتمثل في محدودية الدراسات والأبحاث التي تتناول قياس الأثر الاقتصادي للتحول الرقمي في تقليل الفاقد المائي، خصوصاً في البيئة الليبية، وندرة الدراسات التي توظف نماذج التحليل الاقتصادي الكمي لقياس العلاقة بين التحول الرقمي والكفاءة التشغيلية والعوائد الاقتصادية الناتجة عن خفض الفاقد المائي.

أهداف الدراسة:

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل الأثر الاقتصادي للتحول الرقمي في تحسين كفاءة إدارة الموارد المائية، وتقليل الفاقد المائي في قطاع المياه الليبي، وذلك من خلال تطوير نموذج اقتصادي كمي قائم على تحليل التكلفة والعائد، وتحليل السيناريوهات لقياس الوفورات المالية والعائد على الاستثمار الناتج عن تطبيق التقنيات الرقمية في إدارة شبكات المياه، واستناداً إلى نتائج التحليل الاقتصادي، تهدف الدراسة –أيضاً- إلى تقديم مقترحات سياسات وبرامج تنفيذية لتطوير الإدارة الرقمية للموارد المائية في ليبيا، بما يعزز كفاءة تشغيل قطاع المياه، ويدعم تحقيق الاستدامة المائية.

مواد و طرائق البحث

اعتمدت هذه الدراسة على المنهج الكمي التحليلي (Quantitative Analytical Approach) بهدف تحليل الأثر الاقتصادي للتحول الرقمي في تحسين كفاءة إدارة الموارد المائية وتقليل الفاقد المائي في قطاع المياه الليبي، ويستند هذا المنهج على توظيف أدوات التحليل الاقتصادي الكمي لقياس العلاقة بين تطبيق التقنيات الرقمية وتحسين الكفاءة التشغيلية والعوائد الاقتصادية الناتجة عن خفض الفاقد المائي، وتشير الأدبيات الحديثة إلى أن التحول الرقمي يسهم في تحسين أداء مرافق المياه من خلال: توظيف العدادات الذكية، وإنترنت الأشياء، وتحليل البيانات، وأنظمة المراقبة الذكية للكشف المبكر عن التسربات وتحسين إدارة الشبكات. (World Bank, 2022; Biswas & Tortajada, 2023) ولتقييم الجدوى الاقتصادية للاستثمار في التقنيات الرقمية، اعتمدت الدراسة على منهج تحليل التكلفة والعائد (Cost-Benefit Analysis)، الذي يعد من أكثر الأساليب استخداماً في تقييم المشروعات والاستثمارات المرتبطة بالبنية التحتية والخدمات العامة؛ حيث يتيح مقارنة التكاليف الاستثمارية المتوقعة بالمنافع الاقتصادية المتحققة من المشروع، ومن ثم تقدير مدى جدواه الاقتصادية (Boardman et al., 2018)، وفي هذه الدراسة، تم توظيف هذا الأسلوب لقياس العوائد الاقتصادية الناتجة عن تقليل الفاقد المائي، وتحسين الكفاءة التشغيلية في ظل تطبيق تقنيات التحول الرقمي، كما استخدمت الدراسة أسلوب تحليل السيناريوهات (Scenario Analysis) لقياس حساسية النتائج الاقتصادية تجاه مستويات مختلفة من خفض الفاقد المائي الناتج عن تطبيق التحول الرقمي. واستناداً إلى الأدبيات المتعلقة بإدارة المياه الذكية، افترضت الدراسة وجود علاقة إيجابية بين التحول الرقمي وتحسين الكفاءة التشغيلية لشبكات المياه، وأن تحسين الكفاءة التشغيلية يؤدي إلى تقليل الفاقد المائي وتحقيق وفورات مالية وعوائد

اقتصادية. (Rojek & Studzinski, 2019; Giudicianni et al., 2019) وبناءً على ذلك، تم تطوير نموذج اقتصادي يربط بين التحول الرقمي والكفاءة التشغيلية وتقليل الفاقد المائي والعوائد الاقتصادية الناتجة عنه، واعتمد النموذج الاقتصادي على مجموعة من المؤشرات الكمية شملت: كمية المياه المنتجة سنوياً، وكمية الفاقد المائي، ومتوسط تكلفة إنتاج المتر المكعب من المياه، ومعدل خفض الفاقد المائي، وحجم الوفورات المالية، وتكلفة الاستثمار في التقنيات الرقمية، والعائد على الاستثمار (ROI)، وتم استخدام هذه المتغيرات في حساب التكلفة الاقتصادية للفاقد المائي وتقدير الوفورات المالية المتوقعة الناتجة عن تقليل الفاقد. ولأغراض التحليل الكمي، تم بناء ثلاثة سيناريوهات اقتصادية افتراضية تعكس مستويات مختلفة من تطبيق التحول الرقمي في قطاع المياه، تمثلت في خفض الفاقد المائي بنسبة 10% و20% و30% على التوالي، وقد استندت هذه السيناريوهات إلى ما تشير إليه الأدبيات والتجارب الدولية بشأن قدرة التقنيات الرقمية على تحسين كفاءة إدارة شبكات المياه وتقليل الفاقد المائي بدرجات متفاوتة وفق مستوى النضج الرقمي والتشغيلي للمؤسسات المائية (PUB Singapore, 2023; UN-Water, 2020). كما اعتمدت الدراسة على مجموعة من البيانات التقديرية والمؤشرات المستندة إلى واقع قطاع المياه في ليبيا والدراسات والتقارير ذات الصلة، وذلك لغرض بناء السيناريوهات التطبيقية وتقدير الأثر الاقتصادي المتوقع للتحول الرقمي في إدارة الموارد المائية.

النموذج الاقتصادي للدراسة استناداً إلى مبادئ تحليل التكلفة والعائد (Cost-Benefit Analysis) التي تعد من أكثر الأدوات استخداماً في تقييم الجدوى الاقتصادية للمشروعات والاستثمارات العامة (Boardman et al., 2018)، تم تطوير نموذج اقتصادي كمي لقياس الأثر الاقتصادي المتوقع للتحول الرقمي في تقليل الفاقد المائي في قطاع المياه الليبي، ويهدف النموذج إلى تقدير المنافع الاقتصادية الناتجة عن تحسين الكفاءة التشغيلية لشبكات المياه في ظل تطبيق التقنيات الرقمية، من خلال الربط بين حجم الفاقد المائي وتكلفة إنتاج المياه ومستوى خفض الفاقد الناتج عن التحول الرقمي، وينطلق النموذج من فرضية مفادها أن تطبيق التقنيات الرقمية، مثل: العدادات الذكية، وأنظمة الاستشعار والمراقبة الذكية، يسهم في تحسين الكفاءة التشغيلية لشبكات المياه، الأمر الذي يؤدي إلى تقليل الفاقد المائي، وتحقيق وفورات مالية يمكن استخدامها لتقييم الجدوى الاقتصادية للاستثمار الرقمي. (World Bank, 2022; Rojek & Studzinski, 2019) واعتمد النموذج على مجموعة من المتغيرات الاقتصادية الكمية التي تمثل عناصر التكلفة والعائد المرتبطة بإدارة شبكات المياه، وشملت: كمية المياه المنتجة، وكمية الفاقد المائي، ومتوسط تكلفة إنتاج المتر المكعب، ومعدل خفض الفاقد المائي، وحجم الوفورات المالية، وتكلفة الاستثمار في التقنيات الرقمية، والعائد على الاستثمار، والجدول رقم (1) يبين المتغيرات المستخدمة في النموذج الاقتصادي، في حين الجدول رقم (2) يبين معادلات النموذج الاقتصادي، وقد استخدمت هذه المتغيرات في بناء معادلات النموذج الاقتصادي وتقدير الآثار الاقتصادية المتوقعة للتحول الرقمي في قطاع المياه.

كما اعتمدت الدراسة فترة عمر اقتصادي قدرها عشر سنوات لمشروع التحول الرقمي في قطاع المياه، استناداً إلى العمر التشغيلي المتوقع للعدادات الذكية وأجهزة الاستشعار وأنظمة المراقبة والتحكم الرقمية المستخدمة في إدارة شبكات المياه، وبناءً على ذلك، تم تقدير المنافع الاقتصادية التراكمية المتحققة خلال فترة التحليل من خلال تجميع الوفورات المالية السنوية المتوقعة على مدى عشر سنوات، وذلك بهدف توفير تقييم أكثر شمولاً للجدوى الاقتصادية للاستثمار في التحول الرقمي.

جدول 1. متغيرات النموذج الاقتصادي

المتغير	الرمز	التعريف الإجرائي للمتغير
كمية المياه المنتجة سنوياً	W_p	تمثل إجمالي كمية المياه المنتجة والمضخوخة إلى شبكات التوزيع خلال سنة واحدة، وتقاس بالمليون متر مكعب.
معدل الفاقد المائي	L_r	يمثل نسبة المياه المفقودة إلى إجمالي كمية المياه المنتجة، سواء نتيجة التسربات الفنية أو الفواقد التجارية أو أخطاء القياس، ويقاس كنسبة مئوية من إجمالي الإنتاج المائي.
حجم الفاقد المائي	W_l	يمثل الكمية الفعلية للمياه المفقودة سنوياً بسبب التسربات وضعف الكفاءة التشغيلية قبل تطبيق تقنيات التحول الرقمي، ويتم حسابه بضرب كمية المياه المنتجة في معدل الفاقد المائي، ويقاس بالمليون متر مكعب.
متوسط تكلفة إنتاج المتر المكعب من المياه	C_w	يمثل متوسط التكلفة الاقتصادية لإنتاج ونقل وتوزيع متر مكعب واحد من المياه، ويقاس بالدينار الليبي لكل متر مكعب.
التكلفة الاقتصادية للفاقد المائي	E_c	تمثل القيمة المالية للمياه المفقودة سنوياً، ويتم احتسابها بضرب حجم الفاقد المائي في متوسط تكلفة إنتاج المتر المكعب من المياه، وتقاس بالمليون دينار ليبي.
نسبة خفض الفاقد المائي الناتجة عن التحول الرقمي	D_r	تمثل مقدار الانخفاض المتوقع في حجم الفاقد المائي نتيجة تطبيق التقنيات الرقمية في إدارة شبكات المياه، وتقاس كنسبة مئوية.
الوفورات المالية السنوية	S	تمثل القيمة المالية المتحققة نتيجة تقليل الفاقد المائي بعد تطبيق التحول الرقمي، وتقاس بالمليون دينار ليبي سنوياً.
تكلفة الاستثمار في التقنيات الرقمية	I	تمثل إجمالي النفقات الرأسمالية المطلوبة لتطبيق تقنيات التحول الرقمي في شبكات المياه، وتشمل العدادات الذكية وأجهزة الاستشعار وأنظمة المراقبة والتحكم الرقمية، وتقاس بالمليون دينار ليبي.
العائد على الاستثمار	ROI	يمثل نسبة صافي العائد المالي المتحقق من الاستثمار في التحول الرقمي إلى إجمالي تكلفة الاستثمار، ويستخدم كمؤشر لتقييم الجدوى الاقتصادية للاستثمار، ويقاس كنسبة مئوية.
فترة استرداد الاستثمار	PP	تمثل المدة الزمنية اللازمة لاسترداد تكلفة الاستثمار الأولية من خلال الوفورات المالية السنوية الناتجة عن تطبيق التحول الرقمي، وتقاس بعدد السنوات.
العمر الاقتصادي للمشروع	T	يمثل الفترة الزمنية التي يتوقع خلالها أن تحقق مكونات مشروع التحول الرقمي، بما في ذلك العدادات الذكية وأجهزة الاستشعار وأنظمة المراقبة والتحكم الرقمية، منافع اقتصادية وتشغيلية قبل الحاجة إلى إحلالها أو تحديثها بصورة جوهرية، ويقاس بعدد السنوات، وقد افترضت الدراسة عمراً اقتصادياً مقداره عشر سنوات استناداً إلى العمر التشغيلي المتوقع للتقنيات الرقمية المستخدمة في إدارة شبكات المياه.
المنافع الاقتصادية التراكمية.	CB	تمثل إجمالي المنافع أو الوفورات المالية المتحققة من تطبيق تقنيات التحول الرقمي خلال العمر الاقتصادي للمشروع، ويتم احتسابها من خلال تجميع الوفورات المالية السنوية المتوقعة على مدى فترة التحليل، وتعبر عن القيمة الاقتصادية الكلية المتولدة عن الاستثمار في التحول الرقمي خلال دورة حياة المشروع، وتقاس بالمليون دينار ليبي.

المصدر: إعداد الباحثة.

جدول 2: معادلات النموذج الاقتصادي

المؤشر	المعادلة
حجم الفاقد المائي	حجم الفاقد المائي = كمية المياه المنتجة × معدل الفاقد المائي $W_l = W_p \times L_r$
التكلفة الاقتصادية للفاقد	التكلفة الاقتصادية للفاقد = حجم الفاقد المائي × متوسط تكلفة إنتاج المتر المكعب $E_c = W_l \times C_w$
حجم الفاقد المائي بعد التحول الرقمي	حجم الفاقد بعد التحول الرقمي = حجم الفاقد الحالي × (1 – نسبة خفض الفاقد) $W_{l2} = W_l \times (1 - D_r)$ $\boldsymbol{W_{l_2}}$ = حجم الفاقد المائي بعد التحول الرقمي
الوفورات المالية السنوية	الوفورات المالية = (حجم الفاقد قبل التحول الرقمي – حجم الفاقد بعد التحول الرقمي) × متوسط تكلفة إنتاج المتر المكعب $S = (W_l - W_{l2}) \times C_w$
العائد على الاستثمار	العائد على الاستثمار = (الوفورات المالية – تكلفة الاستثمار) ÷ تكلفة الاستثمار × 100 $ROI = \frac{S - I}{I} \times 100$
فترة استرداد الاستثمار	فترة الاسترداد = تكلفة الاستثمار ÷ الوفورات المالية السنوية $PP = \frac{I}{S}$
المنافع الاقتصادية التراكمية	المنافع التراكمية = الوفورات المالية السنوية × العمر الاقتصادي للمشروع $CB = S \times T$
العائد على الاستثمار طويل الأجل	العائد على الاستثمار طويل الأجل = (المنافع الاقتصادية التراكمية – تكلفة الاستثمار) ÷ تكلفة الاستثمار × 100 $ROI = \frac{CB - I}{I} \times 100$

المصدر: إعداد الباحثة.

السيناريوهات الاقتصادية (Scenario Analysis)

لأغراض التحليل، تم تطوير ثلاثة سيناريوهات تحليلية لقياس الأثر الاقتصادي المتوقع للتحول الرقمي في قطاع المياه الليبي؛ وذلك من خلال افتراض مستويات مختلفة من خفض الفاقد المائي بما يوفر أساساً كمياً لدعم قرارات الاستثمار في قطاع المياه في ليبيا؛ حيث بلغت هذه المستويات 10% و20% و30%، واعتمد التحليل على تقدير الوفورات المالية السنوية الناتجة عن تقليل الفاقد المائي، ثم احتساب المنافع الاقتصادية التراكمية على مدى العمر الاقتصادي المفترض للمشروع والبالغ عشر سنوات، إضافة إلى تقدير العائد على الاستثمار وفترة استرداد رأس المال، والجدول رقم (3) يبين السيناريوهات التطبيقية الثلاثة الرئيسية التي استخدمت للتحليل الاقتصادي.

جدول 3. السيناريوهات التطبيقية للتحول الرقمي

السيناريو	نسبة تقليل الفاقد	مستوى التحول الرقمي	طبيعة التطبيق
السيناريو الأول	10 %	محدود	تطبيق جزئي للتقنيات الرقمية في بعض الشبكات
السيناريو الثاني	20 %	متوسط	توسع متوسط في استخدام الأنظمة الذكية والمراقبة
السيناريو الثالث	30 %	متقدم	تطبيق متكامل للتحول الرقمي وإدارة البيانات

المصدر: إعداد الباحثة.

ومنطق هذه السيناريوهات، هو استنادها إلى افتراض أن التوسع في تطبيق التقنيات الرقمية يؤدي إلى تحسين تدريجي في كفاءة إدارة شبكات المياه؛ مما ينعكس في صورة انخفاض متزايد في معدلات الفاقد المائي، وتحقيق وفورات مالية متزايدة، وتكمن أهمية النموذج الاقتصادي في أنه يوفر إطاراً كمياً لقياس العلاقة بين التحول الرقمي وتقليل الفاقد المائي والعوائد الاقتصادية الناتجة عنه، كما يسمح بتحويل الآثار التشغيلية للتحول الرقمي إلى مؤشرات اقتصادية قابلة للقياس، بما يساعد صناع القرار في تقييم الجدوى الاقتصادية للاستثمار في التقنيات الرقمية، واتخاذ قرارات قائمة على التحليل الكمي، وبذلك، يمثل النموذج الاقتصادي أداة تحليلية تدعم الانتقال من التقييم الوصفي للتحول الرقمي إلى التقييم الاقتصادي القائم على قياس التكلفة والعائد على الاستثمار في قطاع المياه الليبي.

التحليل الكمي وبناء السيناريوهات الاقتصادية التطبيقية

يهدف هذا الجزء إلى قياس الأثر الاقتصادي المتوقع للتحول الرقمي في تقليل الفاقد المائي في قطاع المياه في ليبيا، وذلك من خلال بناء سيناريوهات كمية افتراضية تستند إلى تقديرات واقعية لمعدلات الفاقد المائي وتكاليف إنتاج المياه، ويعتمد التحليل على مقارنة الوضع الحالي قبل تطبيق التحول الرقمي مع ثلاثة من السيناريوهات التي تفترض تحسن كفاءة إدارة شبكات المياه نتيجة استخدام التقنيات الرقمية، ولأغراض بناء السيناريوهات، تعتمد الدراسة على مجموعة من الافتراضات الكمية المستندة إلى تقديرات واقعية لقطاع المياه في ليبيا، والجدول رقم (4) يبين الافتراضيات الأساسية التي تم استخدامها في النموذج الاقتصادي لأغراض التحليل الاقتصادي الكمي.

جدول 4. الافتراضات الأساسية المستخدمة في النموذج الاقتصادي

المتغير	القيمة المفترضة	الوحدة
كمية المياه المنتجة سنوياً	1.20	مليار م^3
معدل الفاقد المائي الحالي	35	%
حجم الفاقد المائي السنوي	420	مليون م^3
متوسط تكلفة إنتاج المتر المكعب	1.5	دينار ليبي/ م
التكلفة الاقتصادية السنوية للفاقد المائي	630	مليون دينار
تكلفة الاستثمار في التحول الرقمي	120	مليون دينار
العمر الاقتصادي للمشروع	10	سنة

المصدر :إعداد الباحثة استناداً إلى البيانات والافتراضات المعتمدة في الدراسة.

السيناريوهات التطبيقية للتحول الرقمي

اعتمدت الدراسة على ثلاثة سيناريوهات افتراضية لقياس الأثر الاقتصادي المتوقع للتحول الرقمي، الجدول رقم (5) يبين السيناريو التطبيقي الأول، وهو خفض الفاقد بنسبة 10%، والجدول رقم (6) يبين السيناريو التطبيقي الثاني، وهو خفض الفاقد بنسبة 20%، والجدول رقم (7) يبين السيناريو التطبيقي الثالث، وهو خفض الفاقد بنسبة 30%، في حين الجدول رقم (8) يبين نتائج السيناريوهات التطبيقية الثلاثة للتحول الرقمي.

جدول 5. السيناريو التطبيقي الأول- خفض الفاقد المائي بنسبة 10%

البند	طريقة الحساب
كمية الفاقد بعد التحول الرقمي	$W_{l_2} = W_l \times (1 - 0.10)$ $W_{l2} = 378$ مليون $م^3$
كمية المياه التي تم توفيرها	42 مليون $م^3$
التوفير المالي	$S = 42.000.000 \times 1.5$ $S = 63$ مليون دينار ليبي
العائد على الاستثمار (ROI)	$ROI = \frac{63 - 120}{120} \times 100$ $ROI = \% - 47.5$
المنافع الاقتصادية التراكمية	$CB = 63 \times 10 = 630$ مليون دينار
العائد على الاستثمار طويل الأجل	$ROI = \frac{630 - 120}{120} \times 100$ $ROI = 425\%$
فترة الاسترداد	$PP = \frac{120}{63} = 1.90$ $PP = 1.90$ سنة $0.90 \times 12 = 10.8$ شهر فترة الاسترداد ≈ سنة واحدة و11 شهراً.

المصدر :إعداد الباحثة استناداً إلى البيانات والافتراضات المعتمدة في الدراسة

يمثل هذا السيناريو مستوى محدوداً من تطبيق التحول الرقمي؛ حيث يتم استخدام التقنيات الرقمية بصورة جزئية في بعض مناطق الشبكة، مثل تركيب عدد محدود من العدادات الذكية أو أنظمة مراقبة التسربات، وتشير نتائج هذا السيناريو إلى أن خفض الفاقد المائي بنسبة 10% يحقق وفورات مالية قدرها 63 مليون دينار ليبي، وهي وفورات غير كافية لتغطية تكلفة الاستثمار الرقمي المقدرة بـ120 مليون دينار ليبي.

جدول 6. السيناريو التطبيقي الثاني خفض الفاقد المائي بنسبة 20%

البند	طريقة الحساب
كمية الفاقد بعد التحول الرقمي	$W_{l_2} = W_l \times (1 - 0.20)$ $W_{l2} = 336$ مليون $م^3$
كمية المياه التي تم توفيرها	84 مليون $م^3$
التوفير المالي	$S = 84.000.000 \times 1.5$ $S = 126$ مليون دينار ليبي
العائد على الاستثمار (ROI)	$ROI = \frac{126 - 120}{120} \times 100$ $ROI = \% 5$
المنافع الاقتصادية التراكمية	$CB = 126 \times 10 = 1260$ مليون دينار
العائد على الاستثمار طويل الأجل	$ROI = \frac{1260 - 120}{120} \times 100$ $ROI = 950\%$
فترة الاسترداد	$PP = \frac{120}{126} = 0.95$ $PP = 0.95$ سنة $0.95 \times 12 = 11.4$ شهر فترة الاسترداد ≈ 11 شهراً ونصف الشهر تقريباً

المصدر :إعداد الباحثة استناداً إلى البيانات والافتراضات المعتمدة في الدراسة.

يمثل هذا السيناريو مستوى متوسطاً من التحول الرقمي؛ حيث يتم تطبيق التقنيات الرقمية في نطاق أوسع داخل شبكات المياه، بما يسمح بتحسين أكبر في المراقبة والكشف المبكر عن التسربات وإدارة عمليات الصيانة، وتوضح نتائج هذا السيناريو أن خفض الفاقد المائي بنسبة 20% يحقق وفورات مالية قدرها 126 مليون دينار ليبي.

جدول 7. السيناريو التطبيقي الثالث خفض الفاقد المائي بنسبة 30%

البند	طريقة الحساب
كمية الفاقد بعد التحول الرقمي	$W_{l_2} = W_l \times (1 - 0.30)$ $W_{l2} = 294$ مليون $م^3$
كمية المياه التي تم توفيرها	126 مليون $م^3$
التوفير المالي	$S = 126.000.000 \times 1.5$ $S = 189$ مليون دينار ليبي
العائد على الاستثمار (ROI)	$ROI = \frac{189 - 120}{120} \times 100$ $ROI = \% 57.5$
المنافع الاقتصادية التراكمية	$CB = 189 \times 10 = 1890$ مليون دينار
العائد على الاستثمار طويل الأجل	$ROI = \frac{1890 - 120}{120} \times 100$ $ROI = 1475\%$
فترة الاسترداد	$PP = \frac{120}{189} = 0.63$ $PP = 0.63$ سنة $0.63 \times 12 = 7.56$ شهر فترة الاسترداد ≈ 7 أشهر ونصف الشهر

المصدر :إعداد الباحثة استناداً إلى البيانات والافتراضات المعتمدة في الدراسة.

يمثل هذا السيناريو مستوى متقدماً من التحول الرقمي؛ حيث يتم تبني أنظمة رقمية متكاملة لإدارة شبكات المياه، تشمل: المراقبة اللحظية، وأنظمة الإنذار المبكر، وتحليل البيانات، وإدارة الأصول والصيانة الوقائية، وتشير نتائج هذا السيناريو إلى أن خفض الفاقد المائي بنسبة 30% يحقق وفورات مالية سنوية قدرها 189 مليون دينار ليبي.

جدول 8. نتائج السيناريوهات التطبيقية الاقتصادية للتحول الرقمي في قطاع المياه الليبي

المؤشر	السيناريو الأول	السيناريو الثاني	السيناريو الثالث
نسبة خفض الفاقد المائي	% 10	% 20	% 30
قيمة المياه المستردة (مليون دينار/ سنة)	63	126	189
تكلفة الاستثمار (مليون دينار)	120	120	120
المنافع الاقتصادية التراكمية خلال 10 سنوات (مليون دينار)	630	1260	1890
العائد على الاستثمار طويل الأجل (ROI)	% 425	% 950	% 1475
فترة الاسترداد (سنة)	سنة 11 شهراً	11 شهراً	8 أشهر

المصدر: إعداد الباحثة استناداً إلى حسابات النموذج الاقتصادي.

النتائج والمناقشة

أولاً- نتائج الافتراضات الأساسية للنموذج.

أظهرت نتائج النموذج الاقتصادي أن كمية المياه المنتجة سنوياً في قطاع المياه الليبي تبلغ نحو 1.2 مليار متر مكعب، في حين يقدر معدل الفاقد المائي بنحو 35% من إجمالي الإنتاج؛ أي: ما يعادل حوالي 420 مليون متر مكعب سنوياً، كما بينت النتائج أن التكلفة الاقتصادية السنوية للفاقد المائي تصل إلى نحو 630 مليون دينار ليبي، وهو ما يعكس حجم الخسائر الاقتصادية المرتبطة بعدم كفاءة إدارة شبكات المياه وارتفاع معدلات الفاقد .

ثانياً- النتائج التشغيلية (نتائج الأثر التشغيلي للتحول الرقمي).

تشير نتائج السيناريوهات التحليلية إلى أن تطبيق تقنيات التحول الرقمي يسهم في خفض الفاقد المائي بدرجات متفاوتة وفق مستوى التحسن في الكفاءة التشغيلية، ففي السيناريو الأول، أدى خفض الفاقد بنسبة 10% إلى استرداد نحو 42 مليون متر مكعب من المياه سنوياً، في حين ارتفعت الكمية المستردة إلى 84 مليون متر مكعب و126 مليون متر مكعب في السيناريوهين الثاني والثالث على التوالي. وتدل هذه النتائج على أن توظيف التقنيات الرقمية في إدارة شبكات المياه يمكن أن يسهم بصورة مباشرة في تحسين كفاءة استخدام الموارد المائية والحد من الهدر، الجدول (9) يوضح تأثير التحول الرقمي على الفاقد المائي نفسه.

جدول 9. الأثر التشغيلي للتحول الرقمي على الفاقد المائي

المؤشر	الوضع الحالي	السيناريو الأول	السيناريو الثاني	السيناريو الثالث
نسبة خفض الفاقد المائي	-	% 10	% 20	% 30
حجم الفاقد المائي (مليون م^3)	420	378	336	294
كمية المياه المستردة (مليون م^3)	-	42	84	126
نسبة التحسن في الكفاءة التشغيلية (%)	-	% 10	% 20	% 30

المصدر: إعداد الباحثة استناداً إلى نتائج حسابات النموذج الاقتصادي

ثالثاً- النتائج الاقتصادية للتحول الرقمي

أظهرت النتائج الاقتصادية أن الوفورات المالية السنوية الناتجة عن خفض الفاقد المائي بلغت نحو 63 مليون دينار ليبي في السيناريو الأول، و126 مليون دينار في السيناريو الثاني، و189 مليون دينار في السيناريو الثالث، وعند احتساب المنافع الاقتصادية التراكمية على أساس عمر اقتصادي للمشروع يبلغ عشر سنوات، ارتفعت هذه المنافع إلى 630 مليون دينار و1260 مليون دينار و1890 مليون دينار على التوالي؛ مما يشير إلى وجود عوائد اقتصادية كبيرة يمكن تحقيقها من الاستثمار في التحول الرقمي بقطاع المياه، كما أوضحت النتائج أن فترة استرداد الاستثمار تراوحت بين سنة و11 شهراً في السيناريو الأول، و11 شهراً في السيناريو الثاني، و8 أشهر فقط في السيناريو الثالث، وهو ما يعكس سرعة استرداد التكاليف الاستثمارية مقارنة بحجم الوفورات المالية المتحققة، كما ارتفع العائد على الاستثمار بصورة ملحوظة مع زيادة نسبة خفض الفاقد المائي؛ مما يؤكد أن تحسين الكفاءة التشغيلية لشبكات المياه يمثل عاملاً رئيسياً في تعزيز الجدوى الاقتصادية لمشروعات التحول الرقمي، والجدول

(10) يبين النتائج الاقتصادية المتوقعة للتحول الرقمي وفق السيناريوهات التطبيقية الثلاثة، في حين الجدول (11) يبين المقارنة النوعية بين السيناريوهات التطبيقية الثلاثة.

جدول 10. النتائج الاقتصادية المتوقعة للتحول الرقمي وفق السيناريوهات الاقتصادية التطبيقية الثلاثة

المؤشر الاقتصادي	السيناريو الأول	السيناريو الثاني	السيناريو الثالث
الوفورات المالية السنوية (مليون دينار)	63	126	189
المنافع الاقتصادية التراكمية خلال 10 سنوات (مليون دينار)	630	1260	1890
تكلفة الاستثمار (مليون دينار)	120	120	120
العائد على الاستثمار طويل الأجل (ROI)	% 425	% 950	% 1475
فترة استرداد الاستثمار	سنة و11 شهراً	11 شهراً	8 أشهر

المصدر: إعداد الباحثة استناداً إلى نتائج حسابات النموذج الاقتصادي.

جدول 11. المقارنة النوعية للمؤشرات الاقتصادية بين السيناريوهات الاقتصادية التطبيقية الثلاثة

البند	السيناريو الأول	السيناريو الثاني	السيناريو الثالث
مستوى خفض الفاقد المائي	محدود	متوسط	مرتفع
مستوى الوفورات المالية	متوسط	مرتفع	مرتفع جداً
سرعة استرداد الاستثمار	متوسطة	مرتفعة	مرتفعة جداً
الجدوى الاقتصادية الكلية	جيدة	مرتفعة	مرتفعة جداً
المساهمة في الاستدامة المائية	متوسطة	مرتفعة	مرتفعة جداً

المصدر: إعداد الباحثة استناداً إلى نتائج حسابات النموذج الاقتصادي.

وتتفق هذه النتائج مع ما أشارت إليه العديد من الدراسات الحديثة التي أكدت أن استخدام التقنيات الرقمية، مثل: العدادات الذكية، وأجهزة الاستشعار، وأنظمة المراقبة الذكية، يسهم في تحسين أداء شبكات المياه وتقليل الفاقد المائي ورفع الكفاءة التشغيلية **(Rojek & Studzinski, 2019; Giudicianni et al., 2019)**. كما تتوافق مع نتائج الدراسات والتقارير الدولية التي أوضحت أن التحول الرقمي أصبح أداة فعالة لتعزيز استدامة الموارد المائية، وتحسين إدارة مرافق المياه، وخفض التكاليف التشغيلية على المدى الطويل **(World Bank, 2022; Biswas & Tortajada, 2023)**.

وتشير النتائج بصورة عامة إلى أن الاستثمار في التحول الرقمي لا يقتصر أثره على الجوانب التقنية والتشغيلية فحسب، بل يمتد ليحقق مكاسب اقتصادية مباشرة من خلال تقليل الفاقد المائي وزيادة كفاءة استخدام الموارد المتاحة، وعليه، فإن تبني برامج التحول الرقمي في قطاع المياه الليبي يمكن أن يمثل خياراً استراتيجياً يسهم في تحسين الأداء المؤسسي وتعزيز الاستدامة المائية والاقتصادية في المدى الطويل.

وفي السياق الليبي، تكتسب هذه النتائج أهمية خاصة في ظل التحديات التي تواجه قطاع المياه، والمتمثلة في ارتفاع معدلات الفاقد المائي، وتقادم أجزاء من البنية التحتية لشبكات التوزيع، وارتفاع تكاليف إنتاج ونقل المياه، إلى جانب محدودية استخدام التقنيات الرقمية في عمليات المراقبة والتشغيل. وتشير النتائج إلى أن الاستثمار في تقنيات التحول الرقمي يمكن أن يوفر أداة فعالة لتحسين كفاءة إدارة الشبكات المائية، وتعزيز القدرة على الكشف المبكر عن التسربات ومراقبة الاستهلاك وإدارة الموارد المائية بصورة أكثر كفاءة، كما أن الوفورات المالية المتوقعة من خفض الفاقد المائي يمكن أن تسهم في دعم جهود تطوير البنية التحتية المائية، وتحسين جودة الخدمات المقدمة للمواطنين، الأمر الذي يعزز من فرص تحقيق الاستدامة المائية والاقتصادية في ليبيا على المدى الطويل.

الاستنتاج

هدفت هذه الدراسة إلى تحليل الأثر الاقتصادي للتحول الرقمي في تحسين كفاءة إدارة الموارد المائية وتقليل الفاقد المائي في قطاع المياه الليبي، من خلال توظيف نموذج اقتصادي كمي قائم على تحليل التكلفة والعائد، وتحليل السيناريوهات لتقييم الجدوى الاقتصادية للاستثمار في التقنيات الرقمية، وقد أظهرت النتائج أن الفاقد المائي يمثل أحد أبرز التحديات الاقتصادية التي تواجه قطاع المياه في ليبيا؛ إذ تقدر تكلفته الاقتصادية السنوية بنحو 630 مليون دينار ليبي، وهو ما يعكس حجم الخسائر الناتجة عن ضعف الكفاءة التشغيلية واعتماد أساليب الإدارة التقليدية. كما بينت الدراسة أن تطبيق تقنيات التحول الرقمي، مثل: العدادات الذكية، وأجهزة الاستشعار، وأنظمة المراقبة والتحكم الرقمية، يمكن أن يسهم بصورة ملموسة في خفض الفاقد المائي وتحسين كفاءة تشغيل شبكات المياه، بما يحقق وفورات مالية سنوية تتراوح بين 63 و189 مليون دينار ليبي وفقاً لمستويات التحسن في الكفاءة التشغيلية .

وأظهرت نتائج تحليل السيناريوهات أن الجدوى الاقتصادية للاستثمار في التحول الرقمي ترتفع كلما انخفضت معدلات الفاقد المائي؛ حيث أمكن استرداد تكاليف الاستثمار خلال فترة تراوحت بين ثمانية أشهر وسنة وأحد عشر شهراً، مع تحقيق عائد على الاستثمار بلغ نحو 57.5% في السيناريو الأكثر كفاءة، وتؤكد هذه النتائج أن التحول الرقمي لا يمثل مجرد تحديث تقني لشبكات المياه، بل يعد استثماراً استراتيجياً يعزز الكفاءة التشغيلية، ويخفض الخسائر الاقتصادية، ويدعم استدامة الموارد المائية، من خلال تحسين جودة البيانات، وتطوير نظم المراقبة، وتعزيز كفاءة اتخاذ القرار القائم على البيانات. كما توضح الدراسة أن تحقيق هذه المنافع يتطلب: توافر بنية تحتية رقمية متطورة، وأطر مؤسسية وتشريعية داعمة، ومنظومة فعالة لحوكمة البيانات وإدارة الأصول المائية. واستناداً إلى نتائج التحليل الاقتصادي والنموذج الكمي الذي طورته الدراسة، يتضح أن تطوير الإدارة الرقمية للموارد المائية في ليبيا ينبغي أن يعتمد على حزمة متكاملة من السياسات والبرامج، تتجاوز إدخال التقنيات الحديثة إلى بناء منظومة مؤسسية متكاملة للتحول الرقمي، ويشمل ذلك إعداد: استراتيجية وطنية للتحول الرقمي في قطاع المياه، وتطوير منصة وطنية موحدة لبيانات الموارد المائية تربط بين الجهات المعنية، والتوسع التدريجي في استخدام العدادات الذكية وأجهزة الاستشعار وأنظمة المراقبة الرقمية، مع تحديث البنية التشريعية والتنظيمية بما يدعم حوكمة البيانات والتحول نحو الإدارة الذكية للمياه. كما تؤكد الدراسة أهمية إطلاق برامج وطنية لبناء القدرات البشرية في مجالات: تحليل البيانات، وإنترنت الأشياء، والذكاء الاصطناعي، والأمن السيبراني، إلى جانب اعتماد تحليل التكلفة والعائد كأداة رئيسية لتقييم أولويات الاستثمار في مشروعات التحول الرقمي، وتعزيز الشراكات مع القطاع الخاص والمؤسسات الدولية لدعم تمويل هذه المشروعات ونقل الخبرات التقنية، ومن شأن تطبيق هذه السياسات

والبرامج أن يسهم في: تقليل الفاقد المائي، وتحسين كفاءة الإنفاق العام، وتعزيز الأمن المائي، ودعم الاستدامة الاقتصادية والبيئية لقطاع المياه في ليبيا . وبذلك، تخلص الدراسة إلى أن التحول الرقمي يمثل مدخلاً استراتيجياً لإصلاح قطاع المياه الليبي، ليس فقط من خلال تحسين الأداء التشغيلي وتقليل الفاقد المائي، وإنما –أيضًا- عبر إرساء نموذج حديث للإدارة يعتمد على البيانات والابتكار والحوكمة الرقمية، بما يعزز قدرة القطاع على مواجهة التحديات المستقبلية، وتحقيق الاستخدام المستدام للموارد المائية.

المراجع

1. Biswas, A. K., & Tortajada, C., 2023, Digital technologies and the future of urban water management, International Journal of Water Resources Development, 39(2), 189–205.
2. Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L., 2018, Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice, Cambridge University Press, Cambridge.
3. Giudicianni, C., Di Nardo, A., Di Natale, M., & Santonastaso, G., 2019, Dynamic water network management using smart systems, Procedia Engineering, 119, 944–953.
4. Musa, H., & Rahman, A., 2023, Non-revenue water reduction through digital transformation: A comparative analysis, Water Policy, 25(4), 611–629.
5. PUB Singapore, 2023, Smart Water Grid and Digital Water Management, Public Utilities Board, Singapore.
6. Rojek, I., & Studzinski, J., 2019, Detection and localization of water leaks in water distribution networks using IoT, Sustainability, 11(18), 5187.
7. UN-Water, 2020, Digital Technologies for Water Management, United Nations, New York.
8. Wheida, E., & Verhoeven, R., 2007, An alternative solution of the water shortage problem in Libya, Water Resources Management, 21(6), 961–982.
9. World Bank, 2022, Digital Transformation for Water Security, World Bank Group, Washington, DC.

THE LIBYAN JOURNAL OF AGRICULTURE
Volume (31), No. (2), 2026: 35 - 48

The Economic Impact of Digital Transformation on Enhancing Water Resources Management Efficiency and Reducing Water Losses: An Applied Analytical Study of Libya's Water Sector.

Aman M. Ramali

Department of Agricultural Economics - Faculty of Agriculture - University of Tripoli

ABSTRACT

This study aims to analyse the economic impact of digital transformation on improving water resources management efficiency and reducing water losses in Libya's water sector. A quantitative analytical approach was employed through the development of an economic model integrating cost-benefit analysis and scenario analysis to assess the economic feasibility of investing in digital technologies used in water network management, including smart meters, sensors, and digital monitoring and control systems. The study developed three analytical scenarios based on reducing water losses by 10%, 20%, and 30%, using realistic assumptions regarding water production, water loss rates, and production costs in Libya. Several quantitative economic indicators were applied, including annual financial savings, cumulative economic benefits, return on investment, and payback period. The results revealed that the annual economic cost of water losses in Libya may reach approximately LYD 630 million. The implementation of digital transformation technologies could generate annual financial savings ranging from LYD 63 million to LYD 189 million, depending on the level of water loss reduction achieved. Over an assumed project lifetime of ten years, cumulative economic benefits were estimated to range between LYD 630 million and LYD 1.89 billion. The findings also indicated that the investment payback period ranges from approximately eight months to one year and eleven months, highlighting the strong economic feasibility of digital transformation initiatives in the water sector. The study concludes that digital transformation represents a strategic investment capable of enhancing operational efficiency, reducing economic losses, and supporting sustainable water resource management in Libya. It recommends adopting a national digital transformation strategy, strengthening digital infrastructure, and enhancing institutional capacities to support smart water management.

Key Words: Digital Transformation, Water Losses, Operational Efficiency, Cost-Benefit Analysis, Return on Investment.

Corresponding Author: Aman Ramali **Department of Agricultural Economics - Faculty of Agriculture - University of Tripoli**

Phone: +218 92 542 3177 **Email: a.ramali@yahoo.co.uk**

Received: 13/06/2026 **Accepted: 04/08/2026**