

دراسة تحليلية لتحقيق استدامة الموارد المائية في البحرين: التحديات والفرص الاستراتيجية

سالم اذعار الرويلي

باحث دكتوراه في إدارة الموارد البشرية، كلية العلوم الإدارية، جامعة العلوم التطبيقية، مملكة البحرين
salem333399@hotmail.com

Analytical Study to Achieve Sustainability of Water Resources in Bahrain: Strategic Challenges and Opportunities

Salem Edhaar Alrowaili

PhD Researcher in Human Resource Management, College of Administrative Sciences,
Applied Science University, Kingdom of Bahrain
salem333399@hotmail.com

DOI: 10.21608/ijppe.2025.443487

URL: [http://doi.org/ 10.21608/ijppe.2025.443487](http://doi.org/10.21608/ijppe.2025.443487)

تاريخ استلام البحث: 2024/11/07، وتاريخ قبوله: 2025/02/01

توثيق البحث: الرويلي، سالم. (2025). دراسة تحليلية لتحقيق استدامة الموارد المائية في البحرين: التحديات والفرص الاستراتيجية. *المجلة الدولية للسياسات العامة في مصر*، 4(3)، 41-12.

دراسة تحليلية لتحقيق استدامة الموارد المائية في البحرين: التحديات والفرص الاستراتيجية

المستخلص

يهدف هذا البحث إلى دراسة وتحليل أبرز التحديات التي تواجه إدارة الموارد المائية في مملكة البحرين، حيث تعاني المملكة من أزمة مائية متزايدة؛ نتيجة ندرة الموارد الطبيعية والاعتماد الكبير على تحلية مياه البحر لتأمين الاحتياجات من المياه العذبة. وتستعرض الدراسة أثر التغيرات المناخية والنمو السكاني المتسارع في زيادة الطلب على المياه، مما يشكل ضغطاً كبيراً على استدامة هذا المورد الحيوي. وتعتمد منهجية البحث على تحليل الأدبيات السابقة وبيانات ميدانية حول أنماط استهلاك المياه وكفاءة تقنيات التحلية، بالإضافة إلى دراسة دور المياه المعالجة في تقليل الطلب على المياه العذبة. وتُبرز النتائج أن تحسين كفاءة استهلاك المياه وتوسيع استخدام المياه المعالجة يُسهمان بشكل كبير في تخفيف الضغوط على الموارد المتاحة، حيث تدعم هذه الإجراءات التوازن بين العرض والطلب. وبناءً على النتائج التي توصلت إليها الدراسة، توصي بضرورة تطوير تقنيات تحلية تعتمد على الطاقة المتجددة للحد من التأثير البيئي، وتوسيع استخدام المياه المعالجة في القطاعات الزراعية والصناعية من خلال تحسين أساليب المعالجة. كما توصي بتبني سياسات مائية مرنة تشمل أنظمة تسعير متغيرة تشجع على ترشيد الاستهلاك، وتعزيز التعاون بين دول مجلس التعاون الخليجي لتبادل التقنيات والمعرفة الحديثة في مجال إدارة المياه. كذلك، سعت الدراسة إلى وضع إطار عمل شامل يدعم تحقيق الأمن المائي وتعزيز استدامة الموارد المائية للأجيال القادمة، بهدف زيادة قدرة البحرين على مواجهة التحديات البيئية والاقتصادية المتزايدة. وفي ضوء ما تقدم، توصي الدراسة بإجراء بحوث مستقبلية تركز على تقييم فاعلية التقنيات المستدامة في تحلية المياه، ودراسة سلوك المستهلكين تجاه سياسات ترشيد الاستهلاك، بالإضافة إلى استكشاف حلول مبتكرة لمواجهة التغيرات المناخية وتأثيرها على الموارد المائية في البحرين.

الكلمات الدالة: تحلية المياه، إدارة الموارد المائية، الاستدامة المائية، الميزان المائي، مملكة البحرين

المقدمة

تُعدّ مشكلة ندرة المياه من أبرز التحديات البيئية والاقتصادية التي تواجه العديد من دول العالم، ولا سيما الدول ذات المناخ الجاف مثل مملكة البحرين؛ إذ تؤدي الظروف المناخية الصعبة، والتغيرات البيئية المتسارعة، والنمو السكاني السريع إلى تفاقم أزمة المياه (Fanack Water, 2022). وتُعتبر البحرين من أكثر الدول تأثرًا بهذه الأزمة، مما يضطرها إلى الاعتماد شبه الكامل على تحلية مياه البحر كمصدر رئيسي للمياه العذبة لتلبية احتياجات السكان، ويؤدي هذا الاعتماد الكبير إلى زيادة تكاليف الإنتاج، مما يُثير تحديات بيئية تتعلق بتأثير عمليات التحلية على البيئة البحرية وارتفاع استهلاك الطاقة (UN-Water, 2023).

وتأسيسًا على ما سبق، تتبع أهمية هذا البحث في تقديم رؤية متكاملة لمواجهة هذه التحديات، بالاعتماد على منهجيات علمية وعملية تتماشى مع الاستراتيجيات الوطنية، وتدعم جهود البحرين في تحقيق استدامة الموارد المائية (المجلس الأعلى للبيئة، 2024). وتهدف هذه الدراسة إلى تحليل أزمة المياه في البحرين بعمق، واستقصاء العوامل التي تساهم في ندرة المياه، بدءًا من الظروف البيئية والمناخية، مرورًا بالتحديات التقنية والاقتصادية، ووصولًا إلى استعراض استراتيجيات تحسين كفاءة إدارة الموارد المائية (Fanack Water, 2022). ولا يقتصر البحث على تحديد التحديات فقط، بل يسعى إلى تقديم حلول عملية مستندة إلى تجارب دولية ناجحة وسياسات مستدامة يمكن للبحرين الاستفادة منها (UN-Water, 2023).

وتتجاوز هذه الدراسة الطرح النظري إلى تقديم توصيات تطبيقية تتناسب مع الإمكانيات المحلية، والاستفادة من موارد البلاد المتاحة. فعلى سبيل المثال، يركز البحث على دراسة الجدوى الاقتصادية والبيئية للتحويل إلى تقنيات تحلية أكثر كفاءة وأقل استهلاكًا للطاقة، مثل الاعتماد على الطاقة المتجددة في محطات التحلية (البنك الدولي، 2020)، وتقنيات إعادة تدوير المياه المعالجة للاستخدامات غير المنزلية. كما يُبرز البحث ضرورة ترسيخ ثقافة الاستدامة وترشيد استهلاك المياه بين مختلف شرائح المجتمع، مع تقديم حلول عملية قابلة للتطبيق في القطاعات السكنية والصناعية والزراعية (المجلس الأعلى للبيئة، 2024).

ويأتي توقيت هذا البحث في ظل تزايد ندرة الموارد المائية، مما يجعل تكاليف إدارة المياه عبئًا متزايدًا على الميزانية الوطنية (Fanack Water, 2022). ومع تزايد التحديات الاقتصادية والبيئية، تمثل هذه الدراسة أساسًا لوضع سياسات مرنة وفعالة تضمن تلبية احتياجات الأجيال الحالية والمستقبلية من المياه، وتساهم في تعزيز قدرة البحرين على التعامل مع تحديات المياه بطريقة مستدامة (UN-Water, 2023).

بالإضافة إلى ما سبق، يوفر هذا البحث رؤية شاملة لأزمة المياه في البحرين، مع التركيز على الجوانب العملية التي تدعم صناع القرار في المملكة. ويطمح البحث إلى أن تكون التوصيات المقدمة بمثابة خطوات عملية تساهم في تعزيز قدرة البحرين على تحقيق استدامة الموارد المائية، بما يدعم الرؤية الوطنية والأهداف البيئية طويلة المدى (المجلس الأعلى للبيئة، 2024).

ورغم تعدد الدراسات التي تناولت تحديات إدارة الموارد المائية في البحرين ودول الخليج، فإن معظمها ركز على الجوانب النظرية أو التجارب المقارنة دون تقديم حلول تطبيقية متكاملة تتناسب مع خصوصية الوضع البحريني (Fanack Water, 2022). كما أن هناك نقصاً واضحاً في الأبحاث الميدانية التي تربط بين كفاءة تقنيات التحلية الحديثة، واستخدام المياه المعالجة، وتقييم الأثر الاقتصادي والبيئي لهذه الحلول ضمن السياق المحلي (UN-Water, 2023). ومن هنا، يسعى هذا البحث إلى سد هذه الفجوة من خلال تحليل معمق للواقع البحريني، وتقديم إطار عملي وتوصيات قابلة للتنفيذ تدعم صناع القرار في تبني سياسات مائية مستدامة وفعالة (البنك الدولي، 2020).

مشكلة البحث

تتمثل مشكلة البحث في التحديات الكبيرة التي تواجه البحرين لتحقيق استدامة مواردها المائية، وذلك بسبب ندرة الموارد الطبيعية وتأثيرات التغير المناخي. ويعتمد توفير المياه بشكل شبه كامل على عمليات تحلية مياه البحر، مما يرفع من التكاليف من جانب ويؤدي إلى آثار بيئية ملحوظة من جانب آخر. علاوةً على ذلك، يساهم النمو السكاني والتوسع العمراني في زيادة الطلب على المياه، مما يضع ضغطاً إضافياً على النظام البيئي ويشكل عبئاً على الاقتصاد الوطني.

بناءً على ما سبق، يطرح البحث السؤال الرئيسي التالي: كيف يمكن للبحرين مواجهة التحديات المائية الحالية وتحقيق استدامة مواردها في ظل الظروف البيئية والاقتصادية المعقدة؟

أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى فهم وتحليل العوامل التي تسهم في أزمة المياه في البحرين، مع التركيز على تقييم السياسات والاستراتيجيات الحالية المتعلقة بإدارة الموارد المائية. وتسعى الدراسة إلى تقديم توصيات مبنية على الأدلة العلمية والتجارب الدولية والمحلية، بهدف توفير حلول مبتكرة ومستدامة لتعزيز الأمن المائي في البحرين.

يتمثل الهدف في مساعدة البحرين على تحليل الوضع المائي بالمملكة بهدف تطوير استراتيجية شاملة لإدارة الموارد المائية، بما يشمل تحسين كفاءة استخدام المياه، وزيادة الاعتماد على المياه المعالجة، وتطوير تقنيات تحلية مياه البحر بطرق تقلل من الآثار البيئية والاقتصادية. إضافةً إلى ذلك، يهدف البحث إلى تعزيز التعاون الإقليمي بين دول مجلس التعاون الخليجي في إدارة الموارد المائية، بهدف تحقيق تكامل إقليمي يساهم في تحسين استدامة هذه الموارد. وفي سياق ذلك يتناول البحث ما يلي:

- الميزان المائي في البحرين (المصادر والاحتياجات أو الاستخدامات للموارد المائية في البحرين).
- التقييم الاقتصادي والبيئي (التكلفة، وإنتاجية الوحدة في اليوم، واستهلاك الطاقة) لأنواع المختلفة من تكنولوجيات تحلية المياه في ظل استخدام أنواع مختلفة من الطاقة في التشغيل.
- تكلفة إنشاء محطات المياه المعالجة أو التكنولوجيا الحديثة لمعالجة المياه واستخدامها في الري والصناعة.

- تكلفة تحسين البنية التحتية لأنظمة المياه والصرف الصحي.
- حساب تكلفة حصاد مياه الأمطار ومقارنتها بتكنولوجيا تحلية المياه المتطورة.
- الطرق والوسائل الحديثة لترشيد استخدام مياه الشرب والاستخدام المنزلي والصناعي.
- وأخيراً، تحليل مدى قدرة التعاون الإقليمي في تخفيف الأعباء المتعلقة بأزمة المياه.

أهمية البحث

تبرز أهمية هذا البحث في سعيه لمواجهة إحدى أهم المشكلات البيئية والاقتصادية التي تهدد البحرين ودول الخليج العربي، والمتمثلة في الاعتماد المتزايد على تحلية مياه البحر. إذ تُعد هذه التقنية عبئاً مزدوجاً من حيث التكلفة الاقتصادية المرتفعة والتأثيرات البيئية السلبية، نظراً لما تتطلبه من استثمارات ضخمة في البنية التحتية، واستهلاك كميات كبيرة من الطاقة. بالإضافة إلى ذلك، فإن زيادة استهلاك المياه مع النمو السكاني والتوسع العمراني تؤثر سلباً على استدامة الموارد الطبيعية. لذا، يُعد هذا البحث محورياً في هذا السياق، إذ يقدم حلولاً مبتكرة ومستدامة ويستند إلى التجارب العالمية الناجحة، وهو مما يمكن أن يساعد البحرين في تطوير استراتيجيات مرنة وفعالة لإدارة مواردها المائية (Fanack Water, 2020).

علاوة على ذلك، يتماشى هذا البحث مع رؤية البحرين 2030 وأهداف التنمية المستدامة التي وضعتها الأمم المتحدة، والتي تركز على ضمان توفر المياه وخدمات الصرف الصحي لجميع الأفراد. ومن هذا المنطلق، تأتي أهمية هذا البحث في كونه يوفر إطاراً متكاملًا يمكن أن يساهم في تحقيق تلك الأهداف، حيث يطرح مقترحات عملية تتوافق مع متطلبات البحرين الفريدة، ويدعم استدامة الموارد المائية بما يلبي احتياجات الأجيال القادمة (UN-Water, 2023).

المنهجية ومصادر البيانات

استند البحث إلى منهجية تحليلية تجمع بين الأسلوبين الكمي والنوعي لاستعراض التحديات المرتبطة بإدارة الموارد المائية في البحرين، مع الاعتماد على البيانات الميدانية والمصادر الأكاديمية ذات الصلة. وفي هذا السياق، تم تحليل الإحصاءات المتاحة حول استهلاك المياه، ومعدلات التحلية، واستخدام المياه المعالجة، بالإضافة إلى دراسة تأثير التغيرات المناخية على ندرة المياه. كما تضمن مراجعة الأدبيات السابقة التي تناولت تجارب دولية وإقليمية في إدارة المياه، بهدف استخلاص الدروس المستفادة وتحديد الفرص المتاحة لتطوير استراتيجيات فعالة في البحرين.

وعلى صعيد التحليل الكمي، تناول البحث دراسة بيانات استهلاك المياه وتطورها عبر السنوات، بينما ساعد التحليل النوعي في فهم الأبعاد البيئية والاجتماعية والسياسات المتعلقة بالمشكلة. بالإضافة إلى ذلك، تطرق البحث إلى مقارنة التجارب مع دول أخرى مشابهة، مثل سنغافورة وبعض دول الخليج، لتحديد الفروق واستخلاص أفضل الممارسات التي يمكن تطبيقها في البحرين.

أما بالنسبة لمصادر البيانات، فقد اعتمد البحث على عدة مصادر متنوعة، شملت التقارير الحكومية الصادرة عن وزارة شؤون الكهرباء والماء، والدراسات الأكاديمية المنشورة في المجالات العلمية، بالإضافة إلى البيانات الميدانية التي تم جمعها من محطات تحلية المياه ومرافق معالجة المياه في البحرين. وقد أتاح هذا التنوع في مصادر البيانات بناء صورة شاملة ودقيقة عن واقع إدارة الموارد المائية في المملكة.

الإضافة البحثية

يسعى هذا البحث لسد فجوات معرفية في الأدبيات الحالية حول إدارة الموارد المائية في البحرين، وذلك من خلال تحليل شامل يعزز من تبني سياسات مستدامة وتقنيات حديثة لتحسين الإدارة المائية. وتتميز عن الأبحاث السابقة بدمج الأدلة من مصادر عالمية ومحلية، وتطبيقها عملياً في السياق البحريني، مما يوفر توصيات عملية قابلة للتنفيذ تتوافق مع التحديات البيئية والاقتصادية لدعم الأمن المائي المستدام.

كما يُقدم البحث إطاراً عملياً لصانعي السياسات والمختصين في قطاع المياه، من خلال رؤى لتعزيز التعاون بين الجهات الرسمية والمجتمع المحلي، واستلهام التجارب الدولية لرفع كفاءة استخدام المياه وتحقيق التنمية المستدامة. كما يُبرز البحث أهمية التعاون الإقليمي في حل قضايا المياه عبر تبادل المعرفة والتجارب، مما يجعلها مرجعاً أساسياً لصانعي السياسات وذوي الاختصاص، ويوفر دليلاً عملياً لتحسين الاستدامة المائية وضمان الأمن المائي للأجيال القادمة.

مراجعة الأدبيات

تتناول الأدبيات المتعلقة بإدارة الموارد المائية موضوع ندرة المياه من زوايا متعددة، حيث تسلط الضوء على التحديات التي تواجه الدول ذات المناخ الجاف، وخاصة في منطقة الخليج العربي، وتقدم دراسات متنوعة يمكن تصنيفها إلى ثلاث فئات رئيسية، هي: الدراسات النظرية، والدراسات التطبيقية، والدراسات المقارنة. وفيما يلي عرض لكل منها.

أولاً: الدراسات النظرية

تسلط العديد من الدراسات النظرية الضوء على الأبعاد الاقتصادية والاجتماعية لإدارة المياه في المناطق التي تعاني من ندرة الموارد. فعلى سبيل المثال، تشير الأدبيات الحديثة إلى أن تعزيز مشاركة القطاع الخاص في إدارة قطاع المياه في البحرين ودول الخليج يمكن أن يسهم في تحسين كفاءة استخدام الموارد المائية، خاصة مع توجه بعض الحكومات إلى خصخصة بعض القطاعات المرتبطة بإمدادات المياه، مما قد يؤدي إلى تقليل الفاقد ورفع كفاءة الاستهلاك (Gulf Research Center, 2024).

بالإضافة إلى ذلك، تؤكد دراسات أخرى أن تحقيق الإدارة المستدامة للمياه في البحرين يتطلب تعاوناً وثيقاً بين الحكومة والقطاع الخاص وأفراد المجتمع المحلي، مع الاعتماد على سياسات تكاملية تهدف إلى الحفاظ على

الموارد الطبيعية المتاحة وتطويرها. وتُبرز الأدبيات أيضًا أهمية الإدارة المتكاملة للموارد المائية، وتوصي بتفعيل دور المجتمع والقطاع الخاص في دعم السياسات المائية المستدامة (Fanack Water, 2020).

وتساهم هذه الدراسات النظرية في إثراء النقاش حول أفضل الممارسات في الإدارة المستدامة للمياه، وتوفر توجيهات لصانعي السياسات في البحرين لاتخاذ قرارات مبنية على أسس علمية تدعم الأمن المائي على المدى الطويل. كما تركز الأدبيات بشكل خاص على التحديات الاقتصادية المرتبطة بعمليات تحلية المياه وتأثيراتها البيئية، حيث تشير التحليلات الحديثة إلى أن العمليات الحالية بحاجة إلى تحسينات كبيرة لتصبح أكثر استدامة وفعالية (Al Saif et al., 2025).

ثانيًا: الدراسات التطبيقية

تركز الدراسات التطبيقية الحديثة على تقديم رؤى عملية حول كيفية تطبيق السياسات المائية الفعالة في البحرين، مع إبراز أهمية مشاركة المجتمع المحلي وتبني حلول تقنية متقدمة. فقد أشار تقرير برنامج الأمم المتحدة الإنمائي إلى أن حملات التوعية المجتمعية وبرامج ترشيد استهلاك المياه في البحرين ساهمت في رفع مستوى الوعي وتقليل معدلات الاستهلاك، كما أكد التقرير أن إشراك المجتمع المحلي يعد ركيزة أساسية في نجاح سياسات إدارة المياه، خاصة في ظل محدودية الموارد الطبيعية وزيادة الطلب نتيجة النمو السكاني والتوسع العمراني (برنامج الأمم المتحدة الإنمائي، 2022).

وفي السياق ذاته، أوضحت دراسة منشورة على منصة Fanack Water أن البحرين حققت تقدمًا ملموسًا في إعادة استخدام المياه المعالجة، حيث يتم توجيه جزء كبير من هذه المياه إلى قطاع الزراعة والصناعة، مما يخفف الضغط على المياه العذبة ويسهم في تحقيق أهداف الاستدامة. كما بينت الدراسة أن تطوير البنية التحتية لمحطات المعالجة وتوسيع نطاق استخدام المياه المعالجة يمثلان أحد المحاور الرئيسية في الاستراتيجية الوطنية للمياه (Fanack Water, 2022).

أما على صعيد التقنيات، فقد تناول بحث علمي مشترك بين جامعة البحرين وجامعة أكسفورد البريطانية التحديات التقنية في محطات التحلية، وركز على تحسين كفاءة الأغشية المستخدمة في تقنية التناضح العكسي، حيث أشار إلى أن تطوير هذه التقنيات يساهم في تقليل استهلاك الطاقة وخفض التكاليف التشغيلية، وهو ما يمثل خطوة مهمة نحو تحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية في قطاع المياه (University of Bahrain, 2020).

ثالثًا: الدراسات المقارنة

أظهرت الدراسات المقارنة أهمية تبادل الخبرات والمعرفة بين الدول التي تواجه تحديات مائية مماثلة. فقد تناول تقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) لعام 2022 تجارب دول مثل سنغافورة في مواجهة ندرة المياه، حيث اعتمدت هذه الدول على تقنيات متقدمة مثل تحلية المياه وإعادة تدويرها بكفاءة عالية. وتوضح هذه التجارب أن الاعتماد على التقنيات الحديثة يساهم في تقليل الاعتماد على الموارد التقليدية، كما يساعد في

الحد من الأثر البيئي المرتبط بعمليات التحلية. وتشير تقارير الهيئة إلى أن كل ارتفاع إضافي في درجات الحرارة العالمية يجعل تحقيق الأمن المائي أكثر صعوبة، خاصة في المناطق الأكثر عرضة للمخاطر المناخية مثل منطقة الخليج العربي، مما يؤكد أهمية التعاون الإقليمي وتبني الحلول التقنية المبتكرة لتعزيز استدامة الموارد المائية في المستقبل (IPCC, 2022).

كما أشار تقرير البنك الدولي (2024) حول دول مجلس التعاون الخليجي إلى أن التعاون الإقليمي في تطوير تقنيات التحلية المستدامة وتبادل المعرفة بين دول المجلس يمكن أن يقلل التكاليف ويحسن كفاءة إدارة الموارد، خاصة مع تزايد التحديات المرتبطة بالتغيرات المناخية وارتفاع الطلب على المياه. وأكد التقرير أن الشراكة مع تبادل الخبرات في مجال إدارة المياه تمثل ركيزة أساسية لتحقيق الأمن المائي المستدام في المنطقة (البنك الدولي، 2024).

التعليق العام على الأدبيات

تُظهر الأدبيات المتعلقة بإدارة الموارد المائية في البحرين ومنطقة الخليج أن القطاع يواجه تحديات هيكلية تشمل الظروف المناخية الصعبة، وندرة المياه العذبة، والاعتماد المفرط على تحلية مياه البحر. وتجمع العديد من الدراسات الحديثة على أن هذه التحديات تتطلب نهجاً متكاملًا ومستدامًا لإدارة الموارد المائية، بما يتضمن تضافر الجهود بين الحكومة والقطاع الخاص وتفعيل دور المجتمع المحلي.

من الملاحظ أن معظم الدراسات ركزت على الأبعاد النظرية والتطبيقية المتعلقة بإدارة المياه، مع اهتمام خاص بتجارب الدول الأخرى التي واجهت تحديات مشابهة، كوسيلة لتعزيز السياسات المائية المحلية. ومع ذلك، يظهر بعض النقص في الأدبيات فيما يتعلق بتطبيق حلول مبتكرة على أرض الواقع في البحرين، حيث تفتقر بعض الدراسات إلى التوصيات العملية التي يمكن تنفيذها لمواجهة أزمة المياه.

علاوة على ذلك، توضح الدراسات التطبيقية أن الجهود المبذولة في إدارة الموارد المائية ليست كافية لتحقيق الأمن المائي المستدام، وتشير إلى الحاجة الملحة إلى استراتيجيات تكنولوجية حديثة وفعالة، وتعاون إقليمي يُعزز من إمكانيات تحسين الكفاءة في استخدام المياه. لذا، تبرز أهمية هذا البحث من خلال سد بعض الفجوات المعرفية -المشار إليها سلفاً- وتقديم إطار متكامل يعزز فهم السياسات الحالية وتقديم توصيات عملية، مما يساهم في تحقيق الأمن المائي بطريقة تتماشى مع متطلبات البحرين الفريدة وظروفها البيئية والاقتصادية (جامعة الخليج العربي، 2025).

الإطار النظري

يتناول الإطار النظري أبرز التحديات التي تواجه الموارد المائية في مملكة البحرين، مع التركيز على تأثير التغيرات المناخية، ودور المياه المعالجة في تعزيز الأمن المائي، إلى جانب تحليل المصادر الحالية للمياه وسبل إدارتها لتحقيق الاستدامة في ظل ظروف بيئية ومناخية متغيرة.

التحديات المؤثرة على الموارد المائية بالبحرين

تُعتبر أزمة المياه من أكبر التحديات البيئية والتنمية عالمياً، إذ تعاني العديد من الدول من نقص حاد في الموارد المائية نتيجة التغيرات المناخية، والنمو السكاني السريع، وسوء إدارة الموارد الطبيعية. وتبرز منطقة الخليج العربي، خاصة مملكة البحرين، كواحدة من أكثر المناطق تأثراً بهذه الأزمة، حيث تعتمد بشكل شبه كامل على مصادر مائية غير تقليدية مثل تحلية مياه البحر لتلبية احتياجاتها المتزايدة، في ظل محدودية الموارد الطبيعية وتدهور جودة المياه الجوفية بفعل الاستنزاف والملوحة (EcoMENA, 2025).

تشير التقارير الدولية إلى أن البحرين تُصنف ضمن أكثر دول العالم تعرضاً للإجهاد المائي، حيث تعتمد بنسبة تزيد عن 90% على تحلية المياه لتأمين احتياجاتها، مع تزايد الضغوط الناتجة عن النمو السكاني والتوسع العمراني، وارتفاع الطلب على المياه في القطاعات المنزلية والصناعية والزراعية. وتُظهر البيانات أن نصيب الفرد من الموارد المائية المتجددة في البحرين من بين الأدنى عالمياً، مما يجعل تحقيق الأمن المائي هدفاً استراتيجياً يتطلب سياسات مبتكرة وإجراءات فعالة لتعزيز كفاءة استخدام الموارد وتطوير حلول مستدامة لإدارة الأزمة (The Daily Tribune, 2023).

وقد أكدت دراسات تحليلية أن التغيرات المناخية، مثل ارتفاع درجات الحرارة وتراجع معدلات الأمطار، تُساهم في تفاقم أزمة المياه في البحرين، حيث أدت إلى تراجع مستويات المياه الجوفية وارتفاع ملوحتها، وزيادة الاعتماد على محطات التحلية كثيفة الاستهلاك للطاقة، وما يرافق ذلك من تحديات بيئية واقتصادية، مثل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتأثير تصريف المياه المالحة على البيئة البحرية (Carnegie Endowment, 2024).

وتشير توقعات المنظمات الدولية إلى أن الطلب على المياه عالمياً قد يرتفع بنسبة 55% بحلول عام 2050، مما يضاعف الضغوط على المصادر المائية المتاحة، خاصة في المناطق الجافة مثل البحرين، ويستدعي تطوير استراتيجيات فعالة تشمل تحسين كفاءة التحلية، وتوسيع إعادة استخدام المياه، وتبني سياسات تسعير مرنة، وتعزيز الوعي المجتمعي حول أهمية ترشيد الاستهلاك (Save The Water, 2019).

يركز هذا البحث على تحليل التحديات المرتبطة بأزمة المياه في البحرين، واستعراض السياسات والاستراتيجيات المتبعة لتحقيق الاستدامة المائية، مع إبراز أهمية التكنولوجيا المتقدمة وإعادة استخدام المياه المعالجة كحلول رئيسية. كما يؤكد على ضرورة تعزيز التعاون الإقليمي والدولي في مجال إدارة الموارد المائية، وتقديم توصيات عملية مستندة إلى التجارب الدولية الناجحة، بما يدعم تحقيق الأمن المائي للأجيال القادمة (Green Climate Fund, 2018).

تأثير التغيرات المناخية

تُعتبر التغيرات المناخية من أبرز التحديات البيئية العالمية، إذ تؤثر بشكل مباشر على أنماط هطول الأمطار ودرجات الحرارة، وتؤدي إلى زيادة معدلات التبخر وتقلص كميات المياه المتاحة في الأنهار والبحيرات. وتواجه

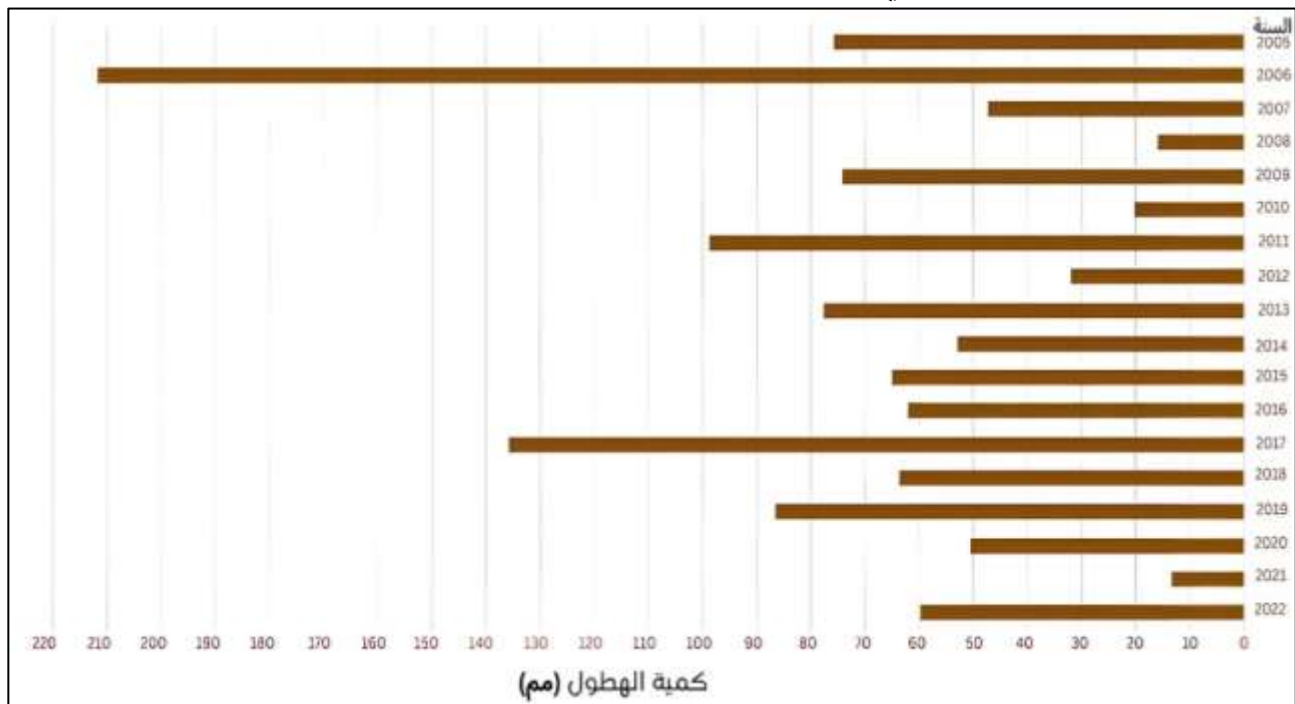
مناطق مثل الشرق الأوسط، ومنها البحرين، تأثيرات سلبية واضحة نتيجة الجفاف المتكرر، وتذبذب الهطول المطري، وارتفاع درجات الحرارة، مما ينعكس على توافر المياه ويهدد الأمن المائي والغذائي. وتشير تقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ إلى أن استمرار ارتفاع درجات الحرارة العالمية سيؤدي إلى المزيد من موجات الجفاف والفيضانات، ويزيد من صعوبة تحقيق الأمن المائي، خاصة في المناطق القاحلة مثل منطقة الخليج العربي (IPCC, 2021).

وفي البحرين، تُعد بيانات تساقط الأمطار من العوامل الأساسية التي تؤثر على توافر الموارد المائية، إذ يسهم هطول الأمطار في تجديد المياه الجوفية، ويوجه استراتيجيات إدارة المياه في المملكة. وعلى الرغم من اعتماد البحرين بشكل رئيسي على تحلية مياه البحر لتأمين احتياجاتها، فإن فهم الأنماط التاريخية لتساقط الأمطار يمثل أداة مهمة لتعزيز جهود الاستدامة في ظل التحديات المناخية والنمو السكاني المتسارع. وتؤكد الدراسات التطبيقية أن تقلبات الأمطار وتراجعها في السنوات الأخيرة من العوامل التي تزيد من الاعتماد على مصادر المياه غير التقليدية، وتفرض تحديات إضافية على السياسات المائية.

يوضح الشكل رقم (1) الاتجاهات التاريخية لهطول الأمطار السنوية في مملكة البحرين للفترة الممتدة من عام 2005 حتى عام 2022. ويتبين من البيانات وجود تذبذب كبير في كميات الأمطار من سنة إلى أخرى، حيث تراوحت القيم بين أقل من 20 مم في بعض السنوات إلى أكثر من 200 مم في سنوات استثنائية. ويُلاحظ أن المتوسط السنوي طويل الأمد للأمطار، يبلغ حوالي 71 مم.

الشكل 1

المجموع السنوي لهطول الأمطار في مملكة البحرين (2005-2022)



المصدر: (بوابة البيانات المفتوحة البحرينية، دون تاريخ أ).

تعكس هذه التقلبات الحادة في كميات الأمطار مدى هشاشة الوضع المائي في البحرين أمام التغيرات المناخية الإقليمية والعالمية، حيث تتكرر فترات الجفاف وتقل سنوات الهطول الغزير، مما يفرض ضغوطاً متزايدة على موارد المياه الجوفية والمياه السطحية المحدودة في المملكة. وفي ظل هذه التحديات المناخية، يصبح من الضروري النظر في العوامل الأخرى المؤثرة على منظومة المياه، وفي مقدمتها النمو السكاني المتسارع والزيادة المستمرة في الطلب على المياه، والتي تمثل بدورها تحدياً إضافياً أمام تحقيق الاستدامة المائية في البحرين.

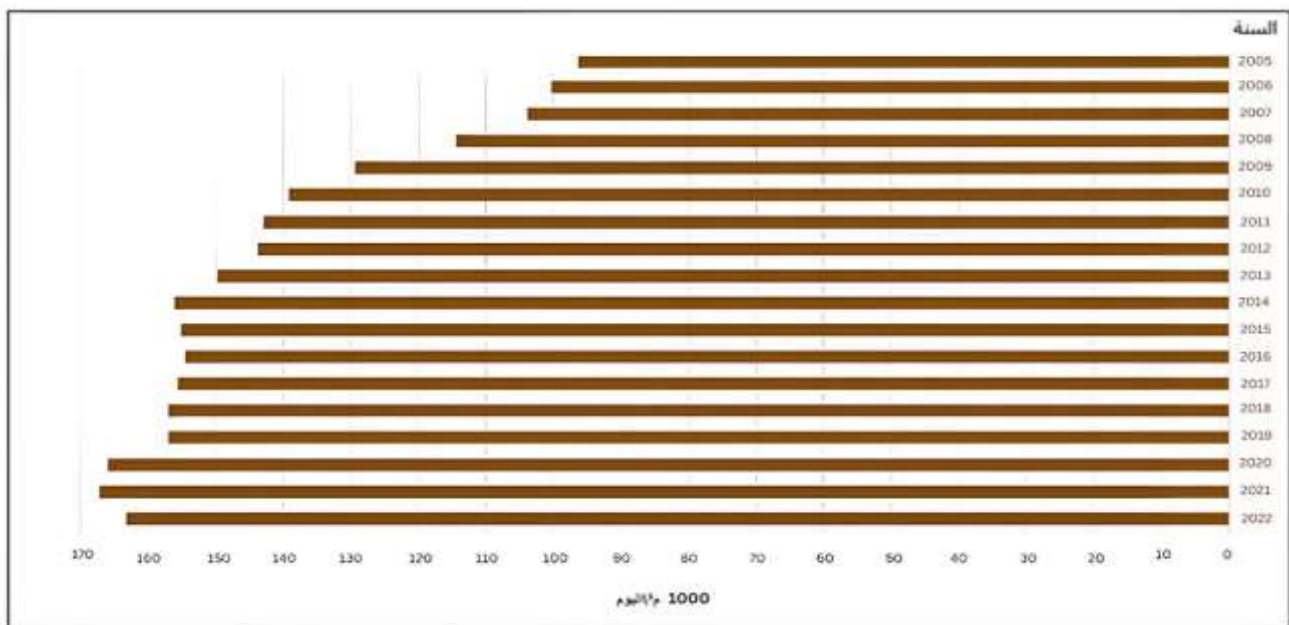
النمو السكاني واستهلاك المياه

يتزايد عدد سكان البحرين بوتيرة متسارعة، مما يؤدي إلى ارتفاع ملحوظ في الطلب على المياه بجميع القطاعات، ولا سيما مع التوسع العمراني والتحسين المستمر في مستويات المعيشة. وتعتمد المملكة بشكل كبير على تحلية مياه البحر لتلبية احتياجاتها اليومية، حيث تشكل المياه المحلاة أكثر من 60% من إجمالي استهلاك المياه، إلا أن هذا الاعتماد يرافقه تحديات اقتصادية وبيئية متزايدة، منها ارتفاع تكاليف التشغيل وتأثيرات سلبية على البيئة البحرية (Fanack Water, 2020).

ويوضح الشكل رقم (2) التطور الزمني لمعدل الاستهلاك اليومي للمياه في مملكة البحرين خلال الفترة من 2005 إلى 2022. ويتبين من الرسم البياني وجود زيادة مطردة في حجم الاستهلاك اليومي، حيث ارتفع المعدل من نحو 100 ألف متر مكعب يومياً في عام 2006 إلى أكثر من 166 ألف متر مكعب يومياً في عام 2020. ويعكس هذا النمو المتسارع في الاستهلاك أثر الزيادة السكانية والتوسع العمراني وارتفاع مستويات المعيشة، بالإضافة إلى التوسع في القطاعات الصناعية والخدمية.

الشكل 2

تطور معدل الاستهلاك اليومي للمياه في مملكة البحرين (2005-2022)



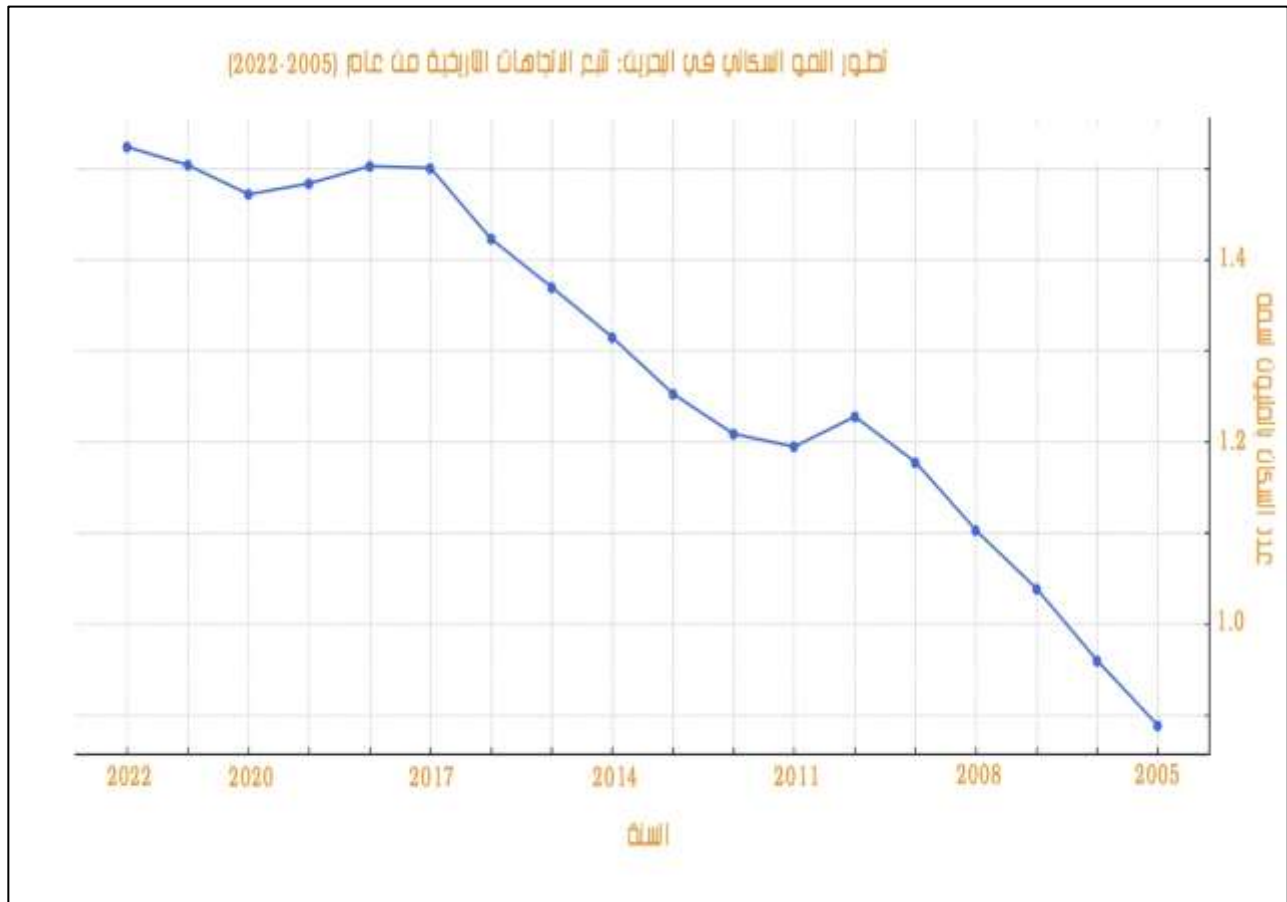
المصدر: (بوابة البيانات المفتوحة البحرينية، دون تاريخ ب).

تدل هذه البيانات على تصاعد الضغوط على منظومة المياه في المملكة، خاصة في ظل محدودية الموارد الطبيعية والاعتماد الكبير على تحلية مياه البحر كمصدر رئيسي لتلبية الاحتياجات اليومية. ويبرز من خلال التحليل أهمية تعزيز كفاءة استخدام المياه، وتطوير استراتيجيات لإدارة الطلب، وتوسيع الاعتماد على مصادر المياه غير التقليدية، مثل إعادة استخدام المياه المعالجة، لمواجهة التحديات المستقبلية وضمان استدامة الموارد المائية في البحرين (وزارة شؤون الكهرباء والماء، 2021).

ويوضح الشكل (3) الاتجاهات التاريخية للنمو السكاني في مملكة البحرين خلال الفترة من 2005 حتى 2022، استناداً إلى بيانات المركز الإحصائي الوطني. وشهد عدد السكان زيادة ملحوظة خلال هذه الفترة، حيث ارتفع من نحو 1.0 مليون نسمة في عام 2005 إلى أكثر من 1.6 مليون نسمة في عام 2022. ويعكس هذا التزايد المستمر في عدد السكان الضغوط المتزايدة على منظومة الموارد المائية في المملكة، إذ يرتبط النمو السكاني بشكل مباشر بزيادة الطلب على المياه العذبة في القطاعات المنزلية والصناعية والزراعية (CEIC Data, 2024).

الشكل 3

تطور النمو السكاني في البحرين: تتبع الاتجاهات التاريخية (2005 - 2022)



المصدر: من إعداد الباحث بالاعتماد على بيانات (البنك الدولي، 2024).

يمثل التحليل التاريخي لهذه البيانات أداة حيوية لتقدير الاحتياجات المستقبلية من المياه وتوجيه السياسات المائية بشكل أفضل، حيث يساعد صناع القرار في وضع استراتيجيات فعالة لإدارة الموارد المائية وتعزيز كفاءة استخدامها. كما تبرز أهمية التعليم والتوعية المجتمعية بشأن ترشيد استهلاك المياه، خاصة مع استمرار النمو السكاني، لضمان تحقيق الاستدامة المائية للأجيال القادمة (Borgen Project, 2024).

كفاءة تقنيات التحلية

تُعد تقنيات تحلية المياه الركيزة الأساسية لتوفير المياه العذبة في مملكة البحرين، نظرًا لندرة الموارد الطبيعية وتزايد الطلب الناتج عن النمو السكاني والتوسع الحضري. وتعتمد معظم محطات التحلية في البحرين على تقنيات تقليدية مثل التقطير الومضي متعدد المراحل (Multi-Stage Flash Distillation (MSF) والتقطير متعدد التأثير (MED) Multi-Effect Distillation، إلى جانب التوسع في استخدام تقنية التناضح العكسي (RO) Reverse Osmosis في السنوات الأخيرة.

ويوضح الجدول رقم (1) التطور التاريخي لمحطات التحلية في البحرين، حيث بدأت المسيرة بمحطة سترة التي افتتحت عام 1975 باستخدام تقنية MSF بطاقة تشغيلية تبلغ حوالي 113,600 متر مكعب يوميًا، تلتها محطة رأس أبو جرجور عام 1984، التي اعتمدت على تقنية RO بطاقة تشغيلية تبلغ 73,400 متر مكعب يوميًا. وفي عام 1990، بدأت محطة الدور القديمة باستخدام تقنية RO بطاقة تشغيلية تبلغ 45,500 متر مكعب يوميًا. أما محطة الحد التي افتتحت عام 1999، فتستخدم تقنيتي MSF و MED معًا، وتبلغ طاقتها التشغيلية حوالي 409,100 متر مكعب يوميًا. كما تشمل محطات ألبا التي بدأت العمل عام 2002، والتي تعتمد على تقنية MED بطاقة تشغيلية تبلغ 31,800 متر مكعب يوميًا. وفي عام 2012، افتتحت محطة الدور الجديدة التي تعتمد على تقنية RO بطاقة تشغيلية تصل إلى 218,200 متر مكعب يوميًا، مما يجعلها أكبر محطة تحلية في البحرين من حيث القدرة التشغيلية.

وتشير البيانات إلى أن تقنية التناضح العكسي (RO) أكثر كفاءة في استهلاك الطاقة مقارنة بتقنيات التقطير الومضي متعدد المراحل (MSF) والتقطير متعدد التأثير (MED)، حيث تتطلب تقنية MSF حوالي 17 كيلوواط/ساعة لإنتاج متر مكعب واحد من المياه، في حين تتطلب تقنية RO ما بين 3 إلى 4 كيلوواط/ساعة فقط. ورغم التحسن في كفاءة الطاقة، لا تزال محطات التحلية تعتمد بشكل كبير على الغاز الطبيعي كمصدر للطاقة، مما يفرض ضغوطاً على الميزانية الوطنية ويزيد من الأثر البيئي المرتبط بانبعاثات الكربون. لذلك، تتجه السياسات الوطنية نحو تطوير محطات تحلية تعتمد على مصادر الطاقة المتجددة، مثل مشروع محطة التناضح العكسي الجديدة في جزيرة حوار التي ستستخدم الطاقة الشمسية لتقليل التكاليف البيئية والاقتصادية.

الجدول 1

القدرة الإنتاجية اليومية لمحطات تحلية المياه في البحرين عام 2017

المحطة	نوع المياه الخام	السعة (متر مكعب/اليوم)	عدد الوحدات	التقنية المستخدمة	عام التشغيل	الملكية/الإدارة
محطة سترة لتحلية المياه	مياه البحر	113,600	6	التقطير الومضي متعدد المراحل (MSF)	1975	حكومية
رأس أبو جرجور	المياه الجوفية قليلة الملوحة	73,400	10	التناضح العكسي (RO)	1984	حكومية
محطة الدور	مياه البحر	45,500	8	التناضح العكسي (RO)	1990	حكومية
محطة الحد	مياه البحر	409,100	MSF 4) 14 and 10 (MED	التقطير الومضي متعدد المراحل + (MSF) التقطير متعدد التأثير (MED)	1999	مخصصة (يتم شراء الإنتاج بالكامل)
محطة ألبا	مياه البحر	31,800	4	التقطير متعدد التأثير (MED)	2002	خاصة (يتم شراء الإنتاج)
الدور - محطة التناضح العكسي	مياه البحر	218,200	غير محدد	التناضح العكسي (RO)	2012	خاصة (يتم شراء الإنتاج)
إجمالي قدرة تحلية المياه						891,600

المصدر: (وزارة شؤون الكهرباء والماء، 2021).

وفي المجمل، يُعد تطوير تقنيات تحلية أكثر كفاءة في استهلاك الطاقة، والانتقال إلى مصادر الطاقة المتجددة، من الأولويات الاستراتيجية لضمان استدامة قطاع المياه في البحرين، مع ضرورة الاستمرار في تحديث المحطات القديمة وتوسيع الاعتماد على التقنيات الحديثة. ولا يخفى أن استخدام مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية، لتشغيل محطات التحلية يمثل خطوة مهمة نحو تحقيق الاستدامة البيئية وتقليل الأثر الكربوني المرتبط بعمليات التحلية.

دور المياه المعالجة

تُعد المياه المعالجة من الموارد الحيوية التي تُسهم في تعزيز الأمن المائي في مملكة البحرين، خاصة في ظل محدودية الموارد الطبيعية واعتماد الدولة الكبير على التحلية. ووفق ما ورد في بوابة البحرين للبيانات المفتوحة، فقد شهدت المملكة تطوراً ملحوظاً في إنتاج ومعالجة المياه العادمة؛ حيث ارتفع متوسط المعالجة اليومية من نحو 169 ألف متر مكعب في عام 2005 إلى أكثر من 471 ألف متر مكعب يومياً بحلول عام 2022. ويُعزى هذا النمو إلى التوسع المستمر في شبكات الصرف الصحي وزيادة الطاقة الاستيعابية لمحطات المعالجة، وعلى رأسها محطة توبلي المركزية، التي تُعد الأكبر من حيث القدرة التشغيلية على مستوى المملكة، كما هو موضح في منصة

البيانات الرسمية (Bahrain Open Data Portal, 2022). وتشير البيانات المنشورة في الموقع إلى أن هذه الكميات تُعاد الاستفادة منها بشكل متزايد في ري المسطحات الخضراء والمجالات الصناعية، مما يعكس توجه البحرين نحو تعزيز استدامة الموارد وتقليل الاعتماد على المياه العذبة.

المصادر الحالية للمياه في البحرين وطرق إدارتها

تُعدّ مملكة البحرين من الدول ذات الموارد المائية المحدودة، حيث تعتمد بشكل رئيسي على أربعة مصادر رئيسية، هي: المياه الجوفية، وتحلية مياه البحر، والمياه المعالجة، ومياه الأمطار، حيث إن:

- **المياه الجوفية:** تتواجد في طبقتين رئيسيتين هما: طبقة الدمام وطبقة الرس-أم الرضمة، إلا أن هذه الموارد تعاني من الاستنزاف والملوحة المتزايدة نتيجة الاستخدام المفرط.
- **تحلية مياه البحر:** تُعد المصدر الرئيسي للمياه العذبة في البحرين، إذ تُنتج محطات التحلية أكثر من 60% من إجمالي الاستهلاك، مع استمرار الحاجة لتحسين كفاءة العمليات وتقليل التكاليف البيئية والاقتصادية (UN-ESCWA, 2021).
- **لمياه المعالجة:** تُستخدم بشكل متزايد في الزراعة والصناعة، بما يساهم في تقليل الضغط على المياه الجوفية والمحلاة.
- **مياه الأمطار:** تُعد مصدرًا محدودًا، وتُجمع في خزانات للاستخدام الزراعي وبعض الأغراض الأخرى، لكنها غير كافية لتلبية الاحتياجات السنوية، رغم دورها في تجديد بعض مصادر المياه الجوفية.

في ظل محدودية الموارد المائية الطبيعية في البحرين، تعتمد المملكة على مزيج متكامل من مصادر المياه لتلبية احتياجات القطاعات المختلفة، بما في ذلك الزراعة، والاستخدامات المنزلية، والصناعة. وتشير التقارير الرسمية إلى أن المياه المحلاة أصبحت المصدر الرئيسي لتوفير المياه العذبة، حيث شكلت ما يقارب 62% من إجمالي الموارد المائية في عام 2022، ويستمر الطلب عليها في الارتفاع سنويًا (وزارة شؤون البلديات والزراعة، 2023؛ Fanack Water, 2024).

أما المياه الجوفية، فلا تزال تشكل مصدرًا مهمًا، خاصة للقطاع الزراعي والصناعي، إلا أن استنزافها المتواصل يفرض تحديات كبيرة على استدامتها. وتشير البيانات إلى أن كميات المياه الجوفية المستخدمة في عام 2022 بلغت نحو 34 مليون متر مكعب، مع استمرار الضغط عليها بسبب الطلب الزراعي المتزايد (Statista, 2024).

وإلى جانب ذلك، تلعب المياه المعالجة دورًا متزايد الأهمية في دعم القطاع الزراعي والصناعي، حيث تم إنتاج أكثر من 165 مليون متر مكعب من المياه المعالجة في عام 2022، مما ساهم في تخفيف الضغط عن المصادر التقليدية (Fanack Water, 2024). وفي المقابل، تظل مياه الأمطار محدودة جدًا من حيث الكمية، إذ لم

تتجاوز 3.8 ملايين متر مكعب في العام ذاته، مما يدفع الجهات المعنية إلى مواصلة جهودها لتحسين تقنيات جمع وتخزين مياه الأمطار بهدف تعزيز الأمن المائي في المملكة (وزارة شؤون البلديات والزراعة، 2023).

وتعكس هذه الأرقام مدى الترابط بين توافر الموارد المائية واستخداماتها في البحرين، وتبرز الحاجة إلى إدارة فعالة ومستدامة لضمان تلبية الاحتياجات الحالية والمستقبلية (وزارة شؤون البلديات والزراعة، 2023) (Fanack Water, 2024) (Statista, 2024).

المصادر الرئيسية للمياه في البحرين

تعتمد مملكة البحرين على ثلاثة مصادر رئيسية للمياه، على النحو التالي:

- **تحلية مياه البحر:** تمثل المصدر الرئيسي للمياه العذبة في المملكة، حيث توفر أكثر من 60% من الاحتياجات السنوية. وتستخدم محطات التحلية تقنيات متقدمة مثل التقطير الومضي متعدد المراحل (MSF) والتناضح العكسي (RO)، مما يتطلب استثمارات كبيرة في الطاقة والبنية التحتية. إلا أن ارتفاع التكاليف والتحديات البيئية المرتبطة بزيادة ملوحة مياه البحر تشكل عقبة أمام استدامة هذا المصدر على المدى الطويل. لذلك، تعمل الحكومة على تحسين كفاءة هذه المحطات وتوسيع قدراتها، مع التوجه نحو الطاقة المتجددة لتقليل الأثر البيئي (Fanack Water, 2024).
- **المياه الجوفية:** تُمثل مصدرًا هامًا لكنه محدود، حيث تقتصر المياه العذبة على طبقات معينة مثل طبقة الدمام التي تتغذى من مصادر إقليمية. وفي سياق مُنصل، أدى الإفراط في استخراج المياه الجوفية إلى انخفاض منسوبها وزيادة ملوحتها، مما قلل من صلاحيتها للاستخدام، خاصة في الزراعة. وفي الإطار ذاته، تعتمد البحرين على سياسات للحد من الاستنزاف وتشجيع إعادة الاستخدام، مع التركيز على تقنيات الري الحديثة لرفع كفاءة الاستهلاك (UN-Water, 2023).
- **المياه المعالجة:** تلعب المياه المعالجة دورًا متزايد الأهمية في تلبية الاحتياجات غير المنزلية مثل الري الزراعي وتخضير المناطق الحضرية، مما يساهم في تخفيف الضغط على مصادر المياه العذبة. ومع ذلك، فإن التوسع في استخدام المياه المعالجة يتطلب تطوير أنظمة المعالجة ورفع كفاءة التقنيات المستخدمة، بالإضافة إلى زيادة الاستثمار في التكنولوجيا لضمان جودة المياه وسلامتها للاستخدامات المختلفة (Jiménez & Asano, 2008; Gude, 2017).

استراتيجيات إدارة الموارد المائية في البحرين

لمواجهة تحديات أزمة المياه وضمان استدامة الموارد، اعتمدت البحرين مجموعة من الاستراتيجيات، أبرزها:

❖ الاستراتيجية الوطنية للمياه 2030. تهدف إلى تحقيق الاستدامة عبر تطوير سياسات فعالة وإجراءات متكاملة.

❖ مجلس الموارد المائية. يشرف على تنسيق السياسات وتنفيذها لضمان الاستخدام الأمثل للموارد.

- ❖ التشريعات واللوائح. تشمل قوانين تنظيم استخدام المياه والحفاظ على جودتها، مثل قانون رقم 2006/33 بشأن خدمات الصرف الصحي.
- ❖ التعاون الإقليمي. تسعى البحرين لتعزيز التعاون مع دول مجلس التعاون الخليجي لتبادل المعرفة والتقنيات في إدارة المياه (وزارة شؤون البلديات والزراعة، 2023).

ترتكز هذه الاستراتيجيات على ثلاثة محاور رئيسية:

- **تحسين كفاءة استهلاك المياه:** تتبنى البحرين تقنيات ري حديثة وإدارة الطلب على المياه في القطاعات المختلفة، حيث إن:

➤ القطاع الزراعي: يعتمد بشكل كبير على المياه الجوفية، مما يفرض ضغطاً كبيراً على هذا المورد، مما أدى إلى تشجع الحكومة المزارعين على استخدام تقنيات الري بالتنقيط وزراعة المحاصيل الأقل استهلاكاً للمياه، مما يساهم في تقليل الاستنزاف (Fanack Water, 2024).

➤ المنازل والمؤسسات العامة: تركز الجهود على التوعية وترشيد الاستهلاك، ودعم تركيب الأجهزة الموفرة للمياه، وفرض تعريفات متدرجة لتشجيع الاستخدام الرشيد. ومع النمو السكاني، تراجع نصيب الفرد من المياه بشكل ملحوظ، مما يستدعي تعزيز الكفاءة في جميع القطاعات (UN-Water, 2023).

➤ القطاع الصناعي يشجع على إعادة تدوير المياه واستخدام المياه المعالجة في العمليات الصناعية، حيث يساهم ذلك في تقليل الطلب على المياه العذبة وتحقيق الاستدامة البيئية. وقد بينت الدراسات أن إعادة استخدام المياه في الصناعة يؤدي إلى تقليل استهلاك المياه العذبة وخفض التكاليف التشغيلية، إضافة إلى تقليل الأثر البيئي الناتج عن تصريف المياه الملوثة (Jiménez & Asano, 2008; Gude, 2017).

- **تطوير تقنيات تحلية المياه وإعادة استخدامها.** تولي البحرين أهمية متزايدة لتطوير تقنيات تحلية المياه وإعادة استخدامها، في ظل الاعتماد الكبير على التحلية لتلبية معظم احتياجاتها من المياه العذبة. وقد ركزت السياسات الوطنية خلال السنوات الأخيرة على تحديث محطات التحلية باستخدام تقنيات متقدمة، مثل التقطير الومضي متعدد المراحل (MSF) والتناضح العكسي المحسن (RO)، بهدف تقليل استهلاك الطاقة وخفض التكاليف التشغيلية والبيئية. فعلى الرغم من أن التحلية تتطلب استثمارات ضخمة في البنية التحتية والطاقة، فإن تحسين كفاءة التقنيات أدى إلى خفض تكلفة إنتاج المتر المكعب إلى ما بين 0.5 و1.5 دولار أمريكي، مع انخفاض استهلاك الطاقة في محطات RO إلى نحو 3-4 كيلوواط/ساعة للمتر المكعب، مقارنةً بحوالي 17 كيلوواط/ساعة في تقنيات MSF التقليدية (Fanack Water, 2024).
- وتوسعت مملكة البحرين بشكل ملحوظ في إعادة استخدام المياه المعالجة إلى جانب الاعتماد على التحلية، حيث يتم توجيه نسبة كبيرة من المياه المعالجة للري الزراعي وتخضير المناطق الحضرية، مما يخفف الضغط على الموارد المائية العذبة ويقلل من التكاليف التشغيلية. وتشير الدراسات إلى أن تكلفة معالجة

مياه الصرف الصحي في البحرين أقل بكثير من تكلفة تحلية المياه، كما أن استهلاك الطاقة في محطات المعالجة في المملكة لا يتجاوز 0.8 كيلوواط/ساعة لكل متر مكعب. ويُعتبر تعزيز إعادة استخدام المياه المعالجة أحد أكثر الحلول الاقتصادية والبيئية فاعلية في قطاعات الزراعة والصناعة في البحرين (Fanack Water, 2020; Stantec, 2023).

كما تعتمد البحرين على شراكات فعالة مع القطاع الخاص في إنشاء وتشغيل محطات التحلية والمعالجة، مما ساهم في تحسين كفاءة الخدمات وتقليل التكاليف الاستثمارية والتشغيلية، إلى جانب تحفيز تبني التقنيات الحديثة ذات الكفاءة العالية في استهلاك الطاقة (MEED, 2020).

ورغم الاستثمارات الحكومية الكبيرة في قطاع التحلية، لا تزال التكاليف المرتفعة للطاقة والآثار البيئية تمثل تحدياً رئيسياً أمام استدامة هذا القطاع، مما يجعل الاستثمار في تقنيات التحلية المتقدمة وتحسين كفاءة العمليات أولوية اقتصادية واستراتيجية للبحرين. وعلى صعيد آخر، تُظهر المقارنات بين التقنيات المختلفة أن التناضح العكسي المحسن يُعد الأكثر كفاءة من حيث استهلاك الطاقة وتكاليف التشغيل، إذ تتراوح تكلفة إنتاج المتر المكعب بين 0.5 و1.5 دولار أمريكي، ويبلغ استهلاك الطاقة من 3 إلى 4 كيلوواط/متر مكعب. وفي المقابل، يُعد التقطير الومضي متعدد المراحل (MSF) الأعلى في استهلاك الطاقة، حيث يصل إلى 17 كيلوواط/متر مكعب، وتبلغ تكلفة الإنتاج فيه ما بين 1.8 و2.5 دولار أمريكي للمتر المكعب، فضلاً عن ارتفاع الأثر البيئي نتيجة الانبعاثات الكربونية. أما إعادة استخدام المياه المعالجة، فتمثل الحل الأكثر اقتصادية والأفضل بيئياً في بعض الاستخدامات مثل الري، إذ تتراوح تكلفتها بين 0.2 و0.5 دولار أمريكي للمتر المكعب، مع استهلاك طاقة منخفض جداً يتراوح من 0.13 إلى 0.8 كيلوواط/متر مكعب، خاصة عند استخدام مصادر الطاقة المتجددة (Fanack Water, 2024؛ بوابة البيانات المفتوحة البحرينية، 2023).

وتشير البيانات الحديثة إلى أن تكلفة حصاد مياه الأمطار في البحرين لا تزال أقل بكثير من تكلفة تحلية المياه، لا سيما في السنوات التي شهدت وفرة في الهطول مثل عام 2017. فعلى سبيل المثال، بلغت تكلفة حصاد مياه الأمطار في عام 2022 نحو 0.62 دولار أمريكي لكل متر مكعب، بينما وصلت تكلفة تحلية المياه إلى 1.5 دولار أمريكي للمتر المكعب في نفس العام. ويلاحظ أن تكلفة التحلية ارتفعت تدريجياً مع ارتفاع أسعار الطاقة، في حين بقيت تكلفة حصاد مياه الأمطار أقل تقلباً، وإن كانت تتأثر بشكل مباشر بتغيرات المناخ وكميات الهطول السنوية. وتعكس هذه الأرقام أهمية تحقيق توازن بين استثمارات التحلية وحصاد مياه الأمطار، مع مراعاة التأثيرات المناخية والاقتصادية لضمان استدامة الموارد المائية بأقل تكلفة ممكنة (Fanack Water, Statista, 2024) (2022).

ويعرض الجدول رقم (2) مقارنة تفصيلية بين كميات مياه الأمطار السنوية وتكلفة حصادها، مقابل تكلفة تحلية المياه في البحرين خلال الفترة من 2005 إلى 2022.

الجدول 2

تطور كميات مياه الأمطار وتكلفة حصادها مقارنة بتكلفة تحلية المياه في البحرين (2005-2022)

السنة	كمية الأمطار (مليون م ³)	تكلفة حصاد الأمطار (دولار/م ³)	تكلفة التحلية (دولار/م ³)	المصدر
2005	34.2	0.48	2.20	بوابة البيانات المفتوحة البحرينية (دون تاريخ أ)؛ Fanack Water (2022)
2008	29.5	0.55	2.10	بوابة البيانات المفتوحة البحرينية (دون تاريخ أ)؛ Statista (2024)
2010	65.7	0.50	2.00	بوابة البيانات المفتوحة البحرينية (دون تاريخ أ)؛ Fanack Water (2022)
2012	54.1	0.53	1.95	بوابة البيانات المفتوحة البحرينية (دون تاريخ أ)؛ Fanack Water (2022)
2015	36.0	0.60	1.92	بوابة البيانات المفتوحة البحرينية (دون تاريخ أ)؛ Statista (2024)
2017	41.3	0.58	1.88	بوابة البيانات المفتوحة البحرينية (دون تاريخ أ)؛ Statista (2024)
2018	49.7	0.52	2.10	بوابة البيانات المفتوحة البحرينية (دون تاريخ أ)؛ Fanack Water (2024)
2019	67.8	0.63	1.85	بوابة البيانات المفتوحة البحرينية (دون تاريخ أ)؛ Fanack Water (2024)
2020	39.7	0.75	1.90	بوابة البيانات المفتوحة البحرينية (دون تاريخ أ)؛ Fanack Water (2024)
2021	52.2	0.66	1.45	بوابة البيانات المفتوحة البحرينية (دون تاريخ أ)؛ Fanack Water (2024)
2022	58.4	0.62	1.50	Fanack بوابة البيانات المفتوحة البحرينية (دون تاريخ أ)؛ Water (2024)

المصدر: تم الحصول على بيانات كميات الأمطار السنوية من بوابة البيانات المفتوحة البحرينية، بينما تم تقدير تكلفة حصاد مياه الأمطار استناداً إلى تقارير Fanack Water (2022، 2024) و Statista (2024)، مع استقراء بعض السنوات بناءً على الاتجاهات العامة في البيانات المنشورة. أما بيانات تكلفة تحلية المياه، فقد تم جمعها من تقارير Fanack Water (2022، 2024) و Statista (2024).

تحسين البنية التحتية لأنظمة المياه والصرف الصحي

تُعد عملية تطوير البنية التحتية لأنظمة المياه والصرف الصحي من الأولويات الاستراتيجية في مملكة البحرين، في ظل التحديات البيئية والاقتصادية المتزايدة التي تواجه قطاع المياه. وتستثمر الحكومة البحرينية سنوياً مبالغ كبيرة لتعزيز كفاءة الشبكات وتقليل الفاقد، مع الالتزام بتحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية على المدى البعيد. وتشمل هذه الجهود تحديث شبكات توزيع المياه، وتوسعة وبناء محطات معالجة مياه الصرف الصحي، وتطبيق تقنيات متقدمة للكشف عن التسربات، بالإضافة إلى رفع كفاءة عمليات الصيانة الدورية وتطوير مشاريع حصاد مياه الأمطار، خاصة لتلبية احتياجات القطاع الزراعي والصناعي.

وبالنظر إلى محدودية البيانات التفصيلية المنشورة من الجهات الحكومية حول التوزيع الدقيق للاستثمارات، فقد تم تقدير التكاليف المدرجة في الجدول رقم (3) بالاعتماد على متوسطات الإنفاق الحكومي المعلن، وتحليل تقارير المنظمات الدولية مثل Fanack Water (2024) وبرنامج الأمم المتحدة الإنمائي (2022)، بالإضافة إلى مراجعة بيانات وزارة الأشغال وشؤون البلديات والتخطيط العمراني (2023). وتعكس هذه التقديرات النطاق المالي

المتوقع لكل فئة رئيسية من مشاريع البنية التحتية، بناءً على حجم المشاريع المنفذة وأولويات الاستثمار المعلنة في السنوات الأخيرة.

الجدول 3

تقديرات تكلفة تحسين البنية التحتية لأنظمة المياه والصرف الصحي في البحرين (2023-2024)

ملاحظات	التكلفة التقديرية (مليون دولار)	الفئة
تحديث الأنابيب، رفع كفاءة التوزيع، تقليل الفاقد	45	تطوير شبكات توزيع المياه
توسعة محطة توبلي ومحطات معالجة جديدة	70	بناء وتوسعة محطات معالجة مياه الصرف
صيانة محطات المياه والصرف وتحديث المعدات	25	الصيانة الدورية وتحديث المعدات
تطبيق تقنيات حديثة للكشف عن التسربات	15	تحسين أنظمة الكشف عن التسربات
إنشاء شبكات لجمع مياه الأمطار واستخدامها في الري والصناعة	10	مشاريع حصاد مياه الأمطار

المصدر: جميع الأرقام الواردة في الجدول تقديرية ومن إعداد الباحث بناءً على تحليل بيانات منشورة في التقارير الحكومية البحرينية، وتقارير المنظمات الدولية مثل (Fanack Water (2024) وبرنامج الأمم المتحدة الإنمائي (2022)، وذلك في ظل غياب بيانات تفصيلية منشورة لكل بند على حدة. وتعكس هذه التقديرات متوسطات الإنفاق السنوي على مشاريع المياه والصرف الصحي في البحرين خلال عامي 2023 و2024.

تشمل محاور التطوير ما يلي:

- تطوير شبكات توزيع المياه: يجري تحديث الشبكات وصيانة الأنابيب بشكل دوري وتطبيق أنظمة متقدمة للكشف عن التسربات، مما يقلل من الهدر ويعزز كفاءة الموارد المائية (Hossain & Noor, 2022).
- بناء محطات معالجة مياه الصرف الصحي: تركز البحرين على تطوير محطات حديثة مثل محطة توبلي التي تعتمد على تقنية المعالجة الثلاثية لإنتاج مياه عالية الجودة صالحة للاستخدام الزراعي، مما يقلل الضغط على الموارد التقليدية (Fanack Water, 2022).
- إدارة المياه المشتركة مع الدول المجاورة: تواصل البحرين التنسيق مع السعودية لضمان استدامة المياه الجوفية المشتركة، مما يحقق التوازن الاقتصادي والبيئي (Al-Harbi & Al-Dosary, 2022).
- الاستثمار في حصاد مياه الأمطار: يمثل حصاد الأمطار حلاً فعالاً لتقليل الاعتماد على المياه التقليدية، حيث يمكن استخدام المياه المجمعة في الري والمساحات الخضراء، مما يساهم في خفض التكاليف وتحقيق إدارة مستدامة للموارد (Green Climate Fund, 2018).

وتؤكد الدراسات أن هذه الاستثمارات في البنية التحتية تُسهم في خفض التكاليف وزيادة الكفاءة الاقتصادية، وتدعم تحقيق الأمن المائي في البحرين على المدى الطويل.

التحديات البيئية والاقتصادية لتحلية المياه وإعادة استخدامها

تشكل عمليات تحلية المياه وإعادة استخدامها في البحرين تحديات بيئية واقتصادية كبيرة، إذ تتطلب استهلاكاً مرتفعاً للطاقة، مما يؤدي إلى زيادة التكاليف التشغيلية ويضغط على الميزانية العامة للدولة. وتعتمد البحرين بشكل

أساسي على الغاز الطبيعي كمصدر للطاقة في محطات التحلية، مما يجعلها عرضة لتقلبات أسعار الوقود الأحفوري ويزيد من انبعاثات الكربون (Ghaly & Al-Ismail, 2020).

ومن الناحية البيئية، ينتج عن تحلية المياه تصريف كميات كبيرة من المياه المالحة والمخلفات الكيميائية إلى البحر، مما يؤثر سلبيًا على الحياة البحرية ويرفع ملوحة المياه الساحلية. كما أن الانبعاثات الكربونية الناتجة عن استهلاك الطاقة في محطات التحلية تُسهم في زيادة البصمة البيئية للقطاع المائي (Al-Farisi & Al-Shaikh, 2019). ولهذه الأسباب، تسعى البحرين إلى تبني تقنيات الطاقة المتجددة في تشغيل محطات التحلية، وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، بما يسهم في خفض التكاليف والآثار البيئية (Al-Harbi & Al-Dosary, 2022).

ملاح أساسية ل خطة مقترحة لتنمية وإدارة الموارد المائية في مملكة البحرين

تتطلب مواجهة أزمة المياه في البحرين وضع إطار عملي شامل لتطوير استراتيجيات فعالة تضمن استدامة الموارد المائية وتعزيز كفاءة استخدامها. وتستند الخطة المقترحة إلى الاستراتيجية الوطنية للمياه، مع تحديد الجهات المسؤولة وتوزيع الأدوار بوضوح، وتشمل الإجراءات التالية:

1. إنشاء لجنة تنسيقية عليا: لتوحيد جهود إدارة الموارد المائية بين الجهات الحكومية والقطاع الخاص، مع مراجعة دورية للتقدم المحرز.
2. التحول إلى تقنيات تحلية متجددة: عبر تبني الطاقة الشمسية ومصادر الطاقة النظيفة لتشغيل محطات التحلية، مما يقلل التكاليف والانبعاثات على المدى الطويل.
3. إعادة تدوير المياه المعالجة: توسيع استخدام المياه المعالجة في الزراعة والصناعة لتقليل الضغط على المياه العذبة.
4. حملات توعية مجتمعية: رفع الوعي العام حول أهمية ترشيد استهلاك المياه من خلال حملات إعلامية وبرامج تعليمية في المدارس والمجتمع.
5. التعاون الإقليمي: تعزيز التعاون مع دول مجلس التعاون الخليجي في مشاريع إدارة المياه المشتركة وتبادل التقنيات والخبرات.
6. إطار قانوني لتعزيز الاستدامة: تطوير وتحديث القوانين المائية لتشجيع الترشيد والاستهلاك المستدام للمياه.
7. نظام رصد وتحليل الاستهلاك: تركيب عدادات ذكية لرصد استهلاك المياه وتحليل البيانات لدعم السياسات المستقبلية وتحسين كفاءة الإدارة.

وتعتمد هذه الخطة على الشراكة بين القطاعين العام والخاص، وتطوير تقنيات جديدة في تحلية المياه وإعادة استخدامها، مع التركيز على تنويع مصادر المياه وتحسين الكفاءة، بما يضمن تحقيق الأمن المائي والاستدامة البيئية والاقتصادية في المملكة (Fanack Water, 2024).

تجارب دول أخرى في إدارة المياه

تُعد تجارب دول، مثل: السعودية، وإسرائيل، وإسبانيا، واليابان، وسنغافورة، والإمارات العربية المتحدة، نماذج رائدة في مواجهة تحديات ندرة المياه، حيث نجحت هذه الدول في تطوير حلول مبتكرة تجمع بين التكنولوجيا المتقدمة والإدارة المتكاملة للموارد المائية. فعلى سبيل المثال، تعتمد المملكة العربية السعودية بشكل كبير على تحلية مياه البحر باستخدام تقنيات متطورة مثل التناضح العكسي، إلى جانب تطبيق أنظمة الري الذكي في الزراعة لرفع كفاءة استهلاك المياه (Al-Saidi & Saliba, 2021).

أما إسرائيل، فقد حققت تقدماً ملحوظاً من خلال دمج تقنيات تحلية المياه مع إعادة تدوير المياه بنسبة تفوق 80%، إضافة إلى استخدام أنظمة الري بالتنقيط التي تعد من أكثر التقنيات كفاءة في العالم. بينما في إسبانيا، يُركز على استدامة المياه الجوفية وإعادة استخدام المياه المعالجة، بينما تطبق اليابان تقنيات متقدمة في إعادة تدوير المياه الصناعية وتطوير حلول لتحسين كفاءة الاستهلاك في القطاعات المختلفة (Ghaly & Al-Ismael, 2020).

وفي سنغافورة، اعتمدت الحكومة استراتيجية شاملة لإدارة المياه، تجمع بين تحلية المياه، وجمع مياه الأمطار، واستخدام المياه المعالجة. ويُعتبر مشروع "NEWater" من أبرز الأمثلة العالمية، حيث تتم معالجة المياه المستعملة وتحويلها إلى مياه صالحة للاستخدام في الشرب والصناعة، مما يقلل الاعتماد على المصادر التقليدية. أما الإمارات العربية المتحدة، فقد استثمرت بكثافة في تقنيات تحلية المياه وتطوير بنية تحتية متكاملة لتوزيع المياه، مع تطبيق تقنيات الري الذكي في الزراعة لترشيد الاستهلاك (Sadiq & El-Houjami, 2003).

وتعكس هذه التجارب أهمية التكنولوجيا المستدامة والتعاون الدولي في تحقيق إدارة فعالة للموارد المائية، مع التركيز على الحلول المتكاملة التي تشمل التحلية، وإعادة التدوير، وتقنيات الري الحديثة، مما يساهم في مواجهة تحديات المياه العالمية (Fanack Water, 2024).

وعند مقارنة هذه التجارب مع الوضع في البحرين، يمكن استخلاص عدة دروس عملية؛ أبرزها ضرورة تعزيز الاستثمار في تقنيات التحلية الحديثة، وتوسيع إعادة استخدام المياه المعالجة، وتفعيل برامج التوعية المجتمعية لترشيد الاستهلاك. كما ينبغي على البحرين تعزيز التعاون الإقليمي والدولي لتبادل المعرفة والخبرات، بما يدعم تطوير استراتيجيات مبتكرة تضمن استدامة الموارد المائية للأجيال القادمة.

النتائج

تشير نتائج البحث إلى أن تحلية المياه تظل المصدر الأساسي لتلبية احتياجات مملكة البحرين من المياه العذبة، وهو ما يعكس محدودية الموارد الطبيعية المتجددة في البلاد. إلا أن هذا الاعتماد الكبير على التحلية يأتي بتكلفة اقتصادية وبيئية مرتفعة؛ إذ تعتمد محطات التحلية بشكل رئيسي على الغاز الطبيعي كمصدر للطاقة، مما يجعلها عرضة لتقلبات أسعار الوقود الأحفوري ويرفع من تكاليف الإنتاج. كما أن عمليات التحلية تؤدي إلى تصريف كميات كبيرة من المياه المالحة والمخلفات الكيميائية إلى البحر، مما يؤثر سلباً على الحياة البحرية ويزيد من ملوحة المياه الساحلية. وبالإضافة إلى ذلك، تساهم هذه العمليات في انبعاثات كربونية مرتفعة نتيجة استهلاك الطاقة، وهو ما يفاقم الأثر البيئي للتحلية.

أما فيما يخص إعادة استخدام المياه المعالجة، فقد أظهرت النتائج أن هذه المياه تمثل حلاً مهماً لتخفيف الضغط على المياه العذبة، خاصة في القطاعات الزراعية والصناعية. ومع ذلك، لا تزال هناك تحديات تتعلق بتحسين كفاءة أنظمة المعالجة، وضمان جودة المياه المعالجة، وزيادة ثقة المستهلكين في استخدامها. ويتطلب ذلك دعمًا تقنيًا وماليًا مستمرًا لتوسيع نطاق إعادة الاستخدام وتحقيق الفوائد المرجوة على مستوى الموارد والاقتصاد الوطني.

كما أظهرت الدراسة أن النمو السكاني السريع والتوسع العمراني في البحرين يؤديان إلى زيادة ملحوظة في استهلاك المياه، مما يرفع الضغوط الإدارية والاقتصادية المرتبطة بإدارة الطلب على المياه. وهذا الواقع يفرض ضرورة تطوير استراتيجيات مبتكرة لإدارة الطلب، وتحسين كفاءة الاستهلاك، وتبني حلول تقنية متقدمة لضمان استدامة الموارد.

وتؤكد النتائج أن التعاون الإقليمي والدولي يعد عاملاً حيوياً لتحقيق استدامة الموارد المائية في البحرين، حيث يمكن لدول مجلس التعاون الخليجي تبادل الخبرات والتقنيات، وتطوير سياسات مشتركة تساهم في تخفيف الضغط على الموارد المائية وتحقيق الأمن المائي الإقليمي. كما تبرز التجارب الدولية الناجحة في تنويع مصادر المياه وتطبيق التكنولوجيا الحديثة كأحد الحلول الفعالة لتحقيق الاستدامة على المدى الطويل.

وأخيراً، يتطلب تحقيق الأمن المائي في البحرين نهجاً متكاملًا يوازن بين تلبية الطلب المتزايد على المياه وضمان استدامة الموارد الطبيعية. ويشمل ذلك تنفيذ سياسات مبتكرة في التحلية، وتوسيع نطاق إعادة استخدام المياه المعالجة، واعتماد تقنيات موفرة للطاقة، وتعزيز التعاون الإقليمي، وتطوير نظم مراقبة ذكية لرصد الاستهلاك وتحليل البيانات لدعم اتخاذ القرار.

التوصيات

في ضوء ما توصل إليه البحث من نتائج حول واقع إدارة الموارد المائية في مملكة البحرين والتحديات البيئية والاقتصادية التي تواجهها، تبرز أهمية صياغة توصيات عملية وقابلة للتطبيق تساهم في دعم صناع القرار والجهات المعنية في تطوير سياسات واستراتيجيات فعالة لتحقيق الاستدامة المائية. وتأتي هذه التوصيات استنادًا إلى الأدلة والبيانات التي جمعتها الدراسة، مع مراعاة خصوصية الظروف المحلية وأفضل الممارسات الدولية ذات الصلة، بحيث تكون موجهة بشكل واضح للجهات التنفيذية وصناع السياسات، وتستجيب للاحتياجات الفعلية للمملكة في ظل التغيرات المناخية والنمو السكاني المستمر. وفيما يلي عرض لأبرز التوصيات التي خلص إليها البحث:

1. تطوير تقنيات التحلية المستدامة

- الاستثمار في تقنيات تحلية منخفضة الطاقة، مثل اعتماد الطاقة الشمسية أو مصادر الطاقة المتجددة الأخرى لتشغيل محطات التحلية، بهدف تقليل التكاليف البيئية والاقتصادية المرتبطة بعمليات التحلية (Ghaly & Al-Ismael, 2020).
- تبني تقنيات متقدمة مثل التناضح العكسي المتطور (Advanced Reverse Osmosis) الذي يقلل من استهلاك الطاقة ويحسن كفاءة التحلية، مع الاستمرار في تحديث المحطات القائمة.

2. تعزيز إعادة استخدام المياه المعالجة

- توسيع نطاق استخدام المياه المعالجة في الزراعة، والري، وتخضير المناطق العامة والصناعية، مع تطوير أنظمة معالجة متقدمة لضمان جودة المياه وسلامتها للاستخدام (Fanack Water, 2024).
- تقديم حوافز للقطاعات الزراعية والصناعية التي تستخدم المياه المعالجة، بما يساهم في تعزيز الاستدامة وتخفيف الضغط على موارد المياه العذبة.

3. تنويع مصادر المياه

- تبني مشاريع تجميع مياه الأمطار وإنشاء خزانات احتياطية لتحسين توافر المياه خلال فترات الجفاف.
- تعزيز استكشاف واستخدام المياه الجوفية بطرق مستدامة، من خلال أنظمة الرصد والاستخدام الرشيد، مع مراعاة عدم استنزاف المخزون الجوفي.

4. تطبيق نظام تسعير مائي ديناميكي

- تطبيق نظام تسعير يعتمد على معدلات الاستهلاك ونوعية الاستخدام، بما يشجع الأفراد والقطاعات على ترشيد استهلاك المياه.
- ربط التسعير بتكاليف الإنتاج الفعلية لتحفيز الاستخدام الرشيد للمياه، مما يساهم في تقليل الهدر وتحقيق الاستدامة الاقتصادية.

5. إطلاق برامج توعية مجتمعية

- تطوير برامج توعية شاملة تركز على ترشيد استهلاك المياه في المنازل والمؤسسات، وتعزيز وعي الأجيال الجديدة من خلال تضمين مفاهيم الحفاظ على المياه في المناهج الدراسية.
- التعاون مع وسائل الإعلام لنشر رسائل توعية تؤكد أهمية الحفاظ على المياه كمسؤولية مجتمعية.

6. تعزيز التشريعات والسياسات المائية

- تطوير إطار قانوني متكامل يدعم الإدارة المستدامة للموارد المائية، ويشمل التشريعات اللازمة لحماية المياه من التلوث وضمان توزيعها بعدالة (وزارة شؤون البلديات والزراعة، 2023).
- تشجيع الشراكات بين القطاعين العام والخاص لتطوير البنية التحتية للمياه، وتعزيز الابتكار في إدارة المياه من خلال تقديم حوافز للشركات التي تتبنى ممارسات مستدامة.

7. تعزيز التعاون الإقليمي والدولي

- دعم التعاون مع الدول المجاورة لمواجهة تحديات المياه المشتركة، بما في ذلك تبادل الخبرات حول تقنيات التحلية وإعادة الاستخدام، وتنسيق السياسات المائية لتحقيق الأمن المائي الإقليمي.
- المشاركة في المبادرات العالمية التي تدعم الأبحاث المتعلقة بالموارد المائية، مما يتيح للبحرين الاستفادة من الخبرات والتقنيات الحديثة المتاحة عالمياً (Al-Saidi & Saliba, 2021).

8. الاستفادة من التجارب الدولية

- استعراض وتطبيق أمثلة ناجحة من دول أخرى، مثل تجربة سنغافورة في إدارة المياه، وتكييفها بما يتناسب مع الظروف المحلية لتحقيق الأمن المائي على المدى الطويل.
- اعتماد استراتيجيات إدارة تعتمد على البيانات والابتكارات التقنية، مما يساهم في تحقيق كفاءة أعلى في توزيع المياه وضمان استدامتها.

ومن خلال تنفيذ هذه التوصيات بشكل متكامل، يمكن لمملكة البحرين تعزيز استدامة مواردها المائية وتحقيق الأمن المائي للأجيال القادمة، رغم التحديات المناخية والنمو السكاني المستمر.

قيود البحث

واجه البحث عدداً من القيود التي يجب أخذها في الاعتبار عند تفسير النتائج. أولاً، اعتمد التحليل على بيانات رسمية وإحصائية متاحة حتى عام 2022، مما قد لا يعكس بدقة التطورات السريعة أو التغيرات الطارئة في سياسات إدارة المياه أو أنماط الاستهلاك خلال السنوات الأخيرة. ثانياً، اقتصرت الدراسة على تحليل البيانات الثانوية والتقارير المنشورة، دون إجراء مسوحات ميدانية أو مقابلات مباشرة مع أصحاب المصلحة، وهو ما قد يؤثر على شمولية النتائج. كما أن بعض المؤشرات الاقتصادية والبيئية، مثل التكاليف الفعلية لتحلية المياه أو الانبعاثات الكربونية، تم تقديرها استناداً إلى متوسطات إقليمية ودولية في ظل غياب بيانات محلية دقيقة. وأخيراً،

ركز البحث على البحرين كنموذج، وقد تختلف جدوى التوصيات عند تطبيقها في دول أو مناطق ذات ظروف مناخية واقتصادية مختلفة.

الدراسات المستقبلية في هذا الصدد

تشير نتائج البحث إلى الحاجة لتوسيع نطاق الدراسات المستقبلية في مجال إدارة الموارد المائية في البحرين ودول الخليج. ومن أبرز الاتجاهات المقترحة: تطوير نماذج محاكاة ديناميكية لرصد آثار التغير المناخي والنمو السكاني على منظومة المياه الوطنية، ودراسة الجدوى الاقتصادية والبيئية لتقنيات التحلية المعتمدة على الطاقة المتجددة. كما تبرز أهمية إجراء دراسات ميدانية حول فاعلية برامج التوعية المجتمعية وسلوك المستهلكين في القطاعات المختلفة، وتحليل أثر السياسات المائية على كفاءة الاستهلاك الفعلي. ويُوصى أيضاً بتعزيز البحث في مجال حصاد مياه الأمطار وإعادة تغذية المياه الجوفية، وإجراء مقارنات بين البحرين ودول ذات تجارب ناجحة مثل سنغافورة والإمارات للاستفادة من الخبرات الدولية في تطوير سياسات مبتكرة ومستدامة.

تنفيذ البحث والجهات المستفيدة منه

يمكن تطبيق نتائج وتوصيات هذا البحث عملياً من قبل وزارات شؤون البلديات والزراعة والكهرباء والماء في البحرين، والتي يمكنها الاستفادة من التحليل المقارن لتطوير استراتيجيات وسياسات فعالة لإدارة الموارد المائية. كما يستفيد القطاع الخاص، خاصة الشركات العاملة في مجالات التحلية والمعالجة، من نتائج البحث في توجيه الاستثمارات نحو حلول أكثر استدامة وكفاءة. وتوفر النتائج إطاراً مرجعياً للباحثين والمؤسسات الأكاديمية لتطوير دراسات تطبيقية أو مقارنة في مجال إدارة المياه. وكذلك، يمكن للمنظمات الإقليمية والدولية، مثل مجلس التعاون الخليجي والمنظمات البيئية، الاستفادة من إطار العمل المقترح لتعزيز التعاون ونقل المعرفة بين دول المنطقة. وأخيراً، يستفيد المجتمع البحريني من تنفيذ التوصيات عبر تحسين جودة وكفاءة خدمات المياه، وتعزيز الأمن المائي ورفع الوعي المجتمعي حول أهمية الترشيد والاستدامة.

المراجع

المراجع العربية

برنامج الأمم المتحدة الإنمائي. (2022). التقرير السنوي حول استدامة الموارد المائية في البحرين. تم الاسترجاع في 6 يوليو 2024

من: <https://www.undp.org/ar/bahrain/publications>

Barnamej al-Umam al-Muttahida al-Inmaii. (2022). Al-taqrir al-sanawi hawla istidamat al-mawarid al-maiyya fi al-Bahrayn. Retrieved on July 6, 2024 from:

<https://www.undp.org/ar/bahrain/publications>

البنك الدولي. (2020، 26 مارس). من الندرة إلى الاستدامة: مسيرة دول الخليج نحو تحقيق الأمن المائي. تم الاسترجاع في 6

يوليو 2024 من:

<https://www.albankaldawli.org/ar/news/opinion/2024/03/26/from-scarcity-to-sustainability-the-gcc-s-journey-towards-water-security>

Al-Bank al-Duwali. (2020, 26 Mars). Min al-nadra ila al-istidama: Masirat duwal al-Khalij nahwa tahqiq al-amn al-mai. Retrieved on July 6, 2024 from:

<https://www.albankaldawli.org/ar/news/opinion/2024/03/26/from-scarcity-to-sustainability-the-gcc-s-journey-towards-water-security>

البنك الدولي. (2024، 26 مارس). من الندرة إلى الاستدامة: مسيرة دول الخليج نحو تحقيق الأمن المائي. تم الاسترجاع في 6

يوليو 2024 من:

<https://www.worldbank.org/ar/news/opinion/2024/03/26/from-scarcity-to-sustainability-the-gcc-s-journey-towards-water-security>

Al-Bank al-Duwali. (2024, 26 Mars). Min al-nadra ila al-istidama: Masirat duwal al-Khalij nahwa tahqiq al-amn al-mai. Retrieved on July 6, 2024 from:

<https://www.worldbank.org/ar/news/opinion/2024/03/26/from-scarcity-to-sustainability-the-gcc-s-journey-towards-water-security>

بوابة البيانات المفتوحة البحرينية. (2023). إنتاج ومعالجة مياه الصرف الصحي في البحرين. تم الاسترجاع في 19 يونيو 2024

من: <https://www.data.gov.bh/explore/dataset/wastewater-generation-and-treatment/analyze/>

Bawwabat al-Bayanat al-Maftuha al-Bahrainiyya. (2023). Intaj wa mualajat miyah al-sarf al-sihhi fi al-Bahrayn. Retrieved on June 19, 2024 from:

<https://www.data.gov.bh/explore/dataset/wastewater-generation-and-treatment/analyze/>

بوابة البيانات المفتوحة البحرينية. (دون تاريخ أ). كميات الأمطار في البحرين حسب الأشهر. تم الاسترجاع في 19 يونيو 2024

من: <https://www.data.gov.bh/explore/dataset/rainfall-in-by-month/analyze/>

Bawwabat al-Bayanat al-Maftuha al-Bahrainiyya. (Dun Tarikh A). Kamiyyat al-amtar fi al-Bahrayn hasb al-ashhur. Retrieved on June 19, 2024 from:

<https://www.data.gov.bh/explore/dataset/rainfall-in-by-month/analyze/>

بوابة البيانات المفتوحة البحرينية. (دون تاريخ ب). متوسط استهلاك المياه اليومي. تم الاسترجاع في 19 يونيو 2024 من:

<https://www.data.gov.bh/explore/dataset/average-daily-water-consumption0/analyze/?flg=ar-001&sort=year>

Bawwabat al-Bayanat al-Maftuha al-Bahrainiyya. (Dun Tarikh B). Mutawassit istihlak al-miyah al-yawmi. Retrieved on June 19, 2024 from:

<https://www.data.gov.bh/explore/dataset/average-daily-water-consumption0/analyze/?flg=ar-001&sort=year>

المجلس الأعلى للبيئة. (2024). المحافظة على المياه في البحرين. تم الاسترجاع في 6 يوليو 2024 من:

<https://www.sce.gov.bh/المحافظةعلىالمياه>

Al-Majlis al-Ala lil-Bia. (2024). Al-muhafaza ala al-miyah fi al-Bahrayn. Retrieved on July 6, 2024 from:

<https://www.sce.gov.bh/المحافظةعلىالمياه>

جامعة الخليج العربي. (2025، 18 فبراير). ندوة تناقش سبل تطبيق الذكاء الاصطناعي في قطاع المياه في دول مجلس التعاون الخليجي. تم الاسترجاع في 26 فبراير 2025 من:

<https://www.agu.edu.bh/ar/events/akdt-drwrt-tzyz-mmarsat-adart-almyah-almstdamt-ndwt-tnaqsh-sbl-ttbyq-aldhka-alastnay-fy-qta?language=ar>

Jamiyat al-Khalij al-Arabi. (2025, 18 Fibrayir). Nadwa tunaqish subul tatbiq al-dhaka al-istinaai fi qita al-miyah fi duwal Majlis al-Taaawun al-Khaliji. Retrieved on February 26, 2025 from:

<https://www.agu.edu.bh/ar/events/akdt-drwrt-tzyz-mmarsat-adart-almyah-almstdamt-ndwt-tnaqsh-sbl-ttbyq-aldhka-alastnay-fy-qta?language=ar>

وزارة الأشغال وشؤون البلديات والتخطيط العمراني. (2023). مشاريع المياه والصرف الصحي في البحرين. المنامة: وزارة الأشغال وشؤون البلديات والتخطيط العمراني.

Wizarat al-Ashghal wa Shuun al-Baladiyyat wa al-Takhtit al-Umrani. (2023). Mashari al-miyah wa al-sarf al-sihhi fi al-Bahrayn. Al-Manama: Wizarat al-Ashghal wa Shuun al-Baladiyyat wa al-Takhtit al-Umrani.

وزارة شؤون البلديات والزراعة. (2023). الاستراتيجية الوطنية للمياه في البحرين. المنامة: وزارة شؤون البلديات والزراعة.

Wizarat Shuun al-Baladiyyat wa al-Ziraa. (2023). Al-istratijiyya al-wataniyya lil-miyah fi al-Bahrayn. Al-Manama: Wizarat Shuun al-Baladiyyat wa al-Ziraa.

وزارة شؤون الكهرباء والماء. (2021). الإحصائيات السنوية لاستهلاك المياه في البحرين. تم الاسترجاع في 6 يوليو 2024 من: <https://www.ewa.bh/>

Wizarat Shuun al-Kahraba wa al-Ma. (2021). Al-ihsaiyyat al-sanawiyya li-istihlak al-miyah fi al-Bahrayn. Retrieved on July 6, 2024 from: <https://www.ewa.bh/>

المراجع الأجنبية

- Al Saif, A., Al-Kuwaiti, A., Al-Zayani, H., & Ahmed, R. (2025). Evaluating future alternatives for a sustainable water management system in the Kingdom of Bahrain. *Journal of Water Resource and Protection*, 17(3), 1–18.
- Al-Farisi, O., & Al-Shaikh, H. (2019). Environmental impacts of seawater desalination in the Arabian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 678–685.
- Al-Harbi, S., & Al-Dosary, A. (2022). Transboundary groundwater management in the GCC: Challenges and opportunities. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(3), 112–123.
- Al-Saidi, M., & Saliba, T. (2021). Water desalination in the Middle East and North Africa: History, current status, and future prospects. *Water*, 13(6), 849. <https://doi.org/10.3390/w13060849>
- Borgen Project. (2024, June 7). 10 facts about freshwater and sanitation in Bahrain. <https://borgenproject.org/10-facts-about-freshwater-and-sanitation-in-bahrain/>
- Carnegie Endowment. (2024, April 19). *The looming climate and water crisis in the Middle East and North Africa*. <https://carnegieendowment.org/research/2024/04/the-looming-climate-and-water-crisis-in-the-middle-east-and-north-africa?lang=en>
- CEIC Data. (2024). *Bahrain population, 1950–2024*. Retrieved July 6, 2025, from <https://www.ceicdata.com/en/indicator/bahrain/population>
- EcoMENA. (2025, January 12). *Water scarcity in Bahrain*. Retrieved July 6, 2025, from <https://www.ecomena.org/water-scarcity-in-bahrain/>
- Fanack Water. (2022, June 9). *Water challenges in Bahrain*. Retrieved July 6, 2025, from <https://water.fanack.com/ar/bahrain/water-challenges-bahrain/>
- Fanack Water. (2024). *Water resources in Bahrain*. Retrieved July 5, 2025, from <https://water.fanack.com/ar/bahrain/water-resources-bahrain/>
- Fanack Water. (2024). *Water use in Bahrain*. Retrieved July 5, 2025, from <https://water.fanack.com/bahrain/water-uses-bahrain/>
- Ghaly, A., & Al-Ismail, M. (2020). Economic and environmental challenges of water desalination in the Gulf. *Desalination and Water Treatment*, 190, 1–12.
- Green Climate Fund. (2018, October 20). *Enhancing climate resilience of the water sector in Bahrain (SAP003)*. Retrieved July 5, 2025, from <https://www.greenclimate.fund/project/sap003>

- Gulf Research Center. (2024, October 20). *Water issues in the GCC countries: Status, challenges, and solutions*. Retrieved July 5, 2025, from <https://www.grc.net/single-commentary/196>
- Gude, V. G. (2017). Desalination and water reuse: Sustainability perspectives. *Science of the Total Environment*, 576, 825–837.
- Hossain, M., & Noor, M. (2022). Water infrastructure management in the Gulf region. *Middle East Journal of Water Resources*, 11(2), 45–61.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Chapter 4: Water. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, et al. (Eds.), *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 553–672). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-4/>
- Jiménez, B., & Asano, T. (2008). *Water reuse: An international survey of current practice, issues and needs*. IWA Publishing.
- MEED. (2020, August 27). *Bahrain ramps up its PPP plans*. Retrieved July 5, 2025, from <https://www.meed.com/bahrain-ramps-up-its-ppp-plans>
- Sadiq, R., & El-Houjami, M. (2003). Water reuse and desalination in the United Arab Emirates: A review. *Desalination*, 152(1–3), 183–190.
- Save the Water. (2019, June 13). *World water demand will increase 55% by 2050*. Retrieved July 5, 2025, from <https://savethewater.org/water-demand-to-increase-55-globally-by-2050/>
- Statista. (2024). *Production volume of desalinated water in Bahrain 2007–2022*. Retrieved July 5, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/800386/bahrain-production-volume-desalinated-water/>
- Stantec. (2023). *Guidelines and procedures for wastewater re-use in Bahrain*. Retrieved from <https://www.stantec.com/en/projects/middle-east-projects/guidelines-procedures-for-wastewater-reuse-bahrain>
- The Daily Tribune. (2023, May 10). *Consumption of water on the rise in Bahrain*. Retrieved July 5, 2025, from <https://www.newsofbahrain.com/bahrain/82329.html>
- University of Bahrain. (2020, March 9). *UOB publishes the first joint scientific research in cooperation with the British University of Oxford*. Retrieved July 5, 2025, from <https://science.uob.edu.bh/2020/03/09/uob-publishes-the-first-joint-scientific-research-in-cooperation-with-the-british-university-of-oxford/>
- UN-Water. (2023, February). *What progress looks like – Bahrain*. Retrieved July 5, 2025, from https://www.unwater.org/sites/default/files/2023-03/sdg6_acceleration_snapshot_642_bahrain_feb_2023.pdf
- UN-ESCWA, 2021. *Bahrain: Water Development Report*. United Nations Economic and Social Commission for Western Asia.

Analytical Study to Achieve Water Resource Sustainability in Bahrain: Strategic Challenges and Opportunities

Abstract

This study analyzes the most prominent challenges facing water resource management in the Kingdom of Bahrain, which suffers from an increasing water crisis due to the scarcity of natural resources and heavy reliance on seawater desalination to secure fresh water. This study reviewed the impact of climate change and rapid population growth on the increasing water demand, which places significant pressure on the sustainability of this vital resource. The research methodology relies on analyzing previous literature and field data on water consumption patterns and desalination technology efficiency, in addition to examining the role of treated water in reducing the demand for fresh water. The results highlight that improving water consumption efficiency and expanding the use of treated water significantly contribute to alleviating pressures on available resources, as these measures support a balance between supply and demand. Based on the findings of this study, it is necessary to develop desalination technologies dependent on renewable energy to reduce the environmental impact and expand the use of treated water in the agricultural and industrial sectors by improving treatment methods. It also recommends adopting flexible water policies, including variable pricing systems that encourage rational consumption, and enhancing cooperation among Gulf Cooperation Council countries to exchange technologies and modern knowledge in water management. Likewise, this study sought to establish a comprehensive framework that supports achieving water security and enhancing water resource sustainability for future generations, aiming to increase Bahrain's capacity to confront the growing environmental and economic challenges. In light of the foregoing, this study recommends conducting future research that focuses on evaluating the effectiveness of sustainable technologies in water desalination, studying consumer behavior toward rational consumption policies, and exploring innovative solutions to address climate change and its impact on water resources in Bahrain.

Keywords: Water desalination, water resource management, water sustainability, water balance, Bahrain