

Received	2026/09/10	تم استلام الورقة العلمية في
Accepted	2026/09/28	تم قبول الورقة العلمية في
Published	2026/09/29	تم نشر الورقة العلمية في

دراسة مقارنة لتحلية مياه البحر في ليبيا ودول الخليج (دراسة محطة زوارة)

*ليلى علي التومي¹، سعاد عمر سندوكو²

^{1,2} عضو هيئة تدريس - المعهد العالي للتقنية الصناعية - النجيلة - جنزور - ليبيا

*Laylatoomi72@gmail.com

الملخص

تعد تحلية مياه البحر خيار استراتيجيا لتعزيز الأمن المائي في الدول الساحلية الجافة، خاصة في ظل التزايد المستمر في الطلب على الموارد المائية، وهو ما دفع العديد من الدول الى التوسع في تبني تقنيات حديثة (عمروسي، 2019). تهدف هذه الدراسة إلى تحليل واقع تقنيات تحلية المياه في ليبيا ومقارنتها بالتقنيات المستخدمة في دول الخليج العربي التي تتجه بشكل متزايد نحو أنظمة التناضح العكسي (RO) عالية الكفاءة والمرتبطة بالطاقة المتجددة. واعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، استنادا إلى بيانات تشغيلية وتقارير علمية خلال الفترة (2008-2025)، مع تحليل أداء محطة زوارة كنموذج تطبيقي للأنظمة الحرارية. وتكشف النتائج عن استمرار الاعتماد على التحلية الحرارية في ليبيا وتحديدًا التقطير متعدد التأثير (MED) والتبخير الوميضي متعدد المراحل (MSF) في حين تتجه دول الخليج نحو تقنيات الأغشية، خاصة (RO) التي تتميز بكفاءة عالية وتوفر استهلاكًا نوعيًا للطاقة (SEC). تبين الاستهلاك النوعي للطاقة الكهربائية في محطة زوارة بلغ حوالي 14.5 kWh/m^3 ، وهو يتجاوز بكثير المعدل $3-6 \text{ kWh/m}^3$ الذي يمكن تحقيقه باستخدام أنظمة التناضح العكسي الحديثة. وتلخص الدراسة الى ان إستراتيجية التحديث ثنائية المسار تعد خيارا مبررا لليبيا: ففي المدى القريب، يمكن لدمج أسطح التبادل الحراري المحسنة بتقنية النانو والتسخين الشمسي الأولي في وحدات متعددة التأثير (MED) الحالية أن يقلل بشكل ملموس من كثافة استهلاك الطاقة. أما على المدى المتوسط الى الطويل، فان الاعتماد التدريجي لأنظمة التناضح

العكسي التي تعمل بالطاقة الشمسية يوفر المسار الأكثر الأمثل نحو تحلية المياه منخفضة الكربون وذات التكلفة الاقتصادية الفعالة. كما تم تحديد الإصلاحات المؤسسية التي تشمل حوكمة الصيانة، وتطوير القوى العاملة، والتمويل المختلط كعوامل تمكين حاسمة بنفس القدر لإنجاح هذا التحول.

الكلمات المفتاحية: تحلية مياه البحر، التناضح العكسي، الطاقة المتجددة، أغشية النانو، محطة زوارة، دول الخليج العربي.

A Comparative Study of Seawater Desalination in Libya and the Gulf Countries: The Zuwara Plant Study

*Layla Ali Toumi¹, Suad Omar Sandoko²

^{1,2} Faculty Members at: Higher of Institute of Industrial Technology – Alnajila,- Janzor- Libya

*Email: Laylatoomi72@gmail.com

Abstract

Seawater desalination represents a strategic option for enhancing water security in arid coastal countries, particularly under the continuous increase in water demand. This study analyses the current status of desalination technologies in Libya and benchmark them against the selected large-scale desalination plants in the Gulf countries. The study adopts a descriptive analytical approach based on operational data and scientific literature published between the period (2008–2025), with a focus on the Zuwara desalination plant as case study for thermal systems. The results indicate that Libya still relies mainly on thermal desalination technologies, specifically Multi-Effect Distillation (MED) and Multi-Stage Flash (MSF), while Gulf countries are rapidly shifting toward membrane technologies, especially "Reverse Osmosis (RO)", which delivers high-efficiency and significantly lower Specific Energy Consumption (SEC), whereas, The Zuwara plant exhibits a specific energy consumption of 14.5KWh/m³, significantly higher than the 3-6KWh/m³ achieved by advanced (RO) plants in Gulf countries. The study concludes that a dual-pathway modernization strategy. In

the short term, it suggests integrating nano-enhanced surfaces and solar preheating into existing Multi-Effect Distillation (MED) Units to reduce energy consumption. For the medium to long term, the gradual adoption of solar-powered Reverse Osmosis (RO) systems offers the most compelling pathway toward low-carbon and economically efficient water desalination. This study also identified institutional reforms, including maintenance governance, workforce development, and blended financing – as equally critical enabling factors for the success of this transition.

Keywords: Seawater desalination, Reverse osmosis, Renewable energy, Gulf countries, Nanotechnologies, Zuwara Desalination Plant.

1. المقدمة

تقع ليبيا في واحدة من أكثر المناطق جفافاً في العالم، حيث يسجل متوسط هطول الأمطار السنوي أقل من 100 مم في معظم أنحاء أرضها. وعلى الرغم من امتلاكها شريطاً ساحلياً على البحر الأبيض المتوسط يمتد لأكثر من 1.770 كيلومتر. إلا أن البلاد تشهد تزايداً مستمراً في الطلب على المياه في المدن الساحلية نتيجة النمو السكاني والتوسع العمراني الصناعي، في المقابل، تواجه الموارد التقليدية، مثل المياه الجوفية ومياه النهر الصناعي ضغوطاً متزايدة بسبب الاستنزاف وتذبذب الإمدادات، خاصة منذ عام 2011، بناءً على ذلك، أصبحت تحلية مياه البحر أحد أهم الحلول التقنية لتأمين مصادر مياه مستدامة، حيث تعتمد هذه العملية محلياً وعالمياً على تقنيات متعددة، تشمل الأنظمة الحرارية والأنظمة الغشائية مثل التناضح العكسي (RO) الذي يعد الأكثر كفاءة من حيث الاستهلاك النوعي للطاقة في الوقت الحالي مقارنة بالبدائل الحرارية. وفي المقابل يشهد قطاع تحلية المياه عالمياً تطوراً ملحوظاً في السنوات الأخيرة من خلال دمج الطاقة المتجددة، خاصة الطاقة الشمسية، بهدف تقليل تكاليف التشغيل العالية المعتمدة على الوقود الأحفوري (المريض، 2023). وإلى جانب ذلك، يسير البحث العلمي نحو دمج تقنيات النانو لتحسين أداء الأغشية والمقطرات، حيث أثبتت الدراسات أن دمج الجسيمات النانوية يساهم بفاعلية في تحسين الإنتاجية وتقليل الترسبات الملحية والتلوث البيولوجي. (Elimelech & Phillip, 2011) وعلى الرغم من هذه التطورات، لا يزال التباين واضح بين واقع تحلية المياه في ليبيا ونظيره في دول الخليج العربي، التي تعد من الرواد

عالمياً في هذا المجال من حيث القدرة الإنتاجية والتطور التقني، إذ تمتلك دول مثل الإمارات العربية المتحدة والمملكة العربية السعودية محطات تحلية عملاقة تعتمد على نماذج طاقة هجينة وتقنيات غشائية متطورة تتجاوز طاقتها الإنتاجية مليون متر مكعب يوميا للمحطة الواحدة (Moussa et al., 2022). وتأتي محطة زوارة للتقطير متعدد التأثير (MED) كمثال واقعي لهذا التباين، حيث تبلغ قدرتها الإنتاجية الاجمالية $80.000\text{m}^3/\text{day}$ (موزعة على مرحلتين بطاقة $40.000\text{m}^3/\text{day}$ لكل منهما) وبمعدل استهلاك نوعي يزيد بنحو ثلاثة الى أربعة أضعاف مقارنة بالمحطات الرائدة في دول الخليج ومن هنا، تبرز أهمية هذه الدراسة في تحليل وتوضيح هذه الفجوة في الأداء بين أنظمة تحلية المياه مع إجراء مقارنة مرجعية مع دول الخليج، بهدف تقييم الكفاءة التشغيلية وتحديد فرص التحسين المستقبلية.

2. الدراسات السابقة

تشكل معظم الدراسات العلمية المتعلقة بتحلية المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا قاعدة نظرية غنية تسمح بربط الحالة الليبية بمحيطها الاقليمي. وعلى المستوى العالمي وضع (Ghaffour et al., 2013) طارا شاملا لتقييم الجدوى الاقتصادية لتقنيات التحلية، لينتهوا الى أن تقنية التناضح العكسي (RO) باتت تهيمن تدريجيا على انشاء المحطات الجديدة عالميا، نظرا لانخفاض تكلفتها مقارنة بالبدائل الحرارية. وعلى المستوى دول الخليج وثق كل من (الياسري، 2022; Moussa et al., 2022) تطور المتسارع لهذا القطاع، مشيرين أن دول الخليج معا تستحوذ على أكثر من 45٪ من إجمالي الطاقة الإنتاجية المركبة لتحلية المياه عالميا (Alnouri et al., 2023). وقد رادت دولة الإمارات العربية المتحدة والمملكة العربية السعودية نماذج الطاقة الهجينة التي تربط مصادر الطاقة المتجددة بتقنيات الأغشية المتقدمة، محققين بذلك حجماً إنتاجياً وكفاءة في الطاقة كانا يبدوان بعيدي المنال قبل عقدين من الزمن. كما تتبع (الياسري، 2022) التطور التكنولوجي التدريجي عبر دول الخليج مستنتجاً أن الكويت والامارات تشغلان محطات تمثل النموذج القياسي الأحدث (State-of- the-art) عالمياً في هذا المجال. كما بينت الدراسات أن تقنية التناضح العكسي (RO) أصبحت الخيار الأكثر انتشاراً في محطات التحلية الحديثة، نتيجة لانخفاض استهلاكها للطاقة الذي يتراوح بين

25kWh/m³ مقارنة بالتقنيات الحرارية التي قد يتجاوز استهلاكها 3-6 kWh/m³ إضافة إلى انخفاض تكلفة إنتاج المياه، كذلك أشارت الأبحاث إلى أن دمج مصادر الطاقة المتجددة، خاصة الطاقة الشمسية، مع أنظمة التحلية يساهم في تحسين كفاءة التشغيل وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري (عمروسي، 2019: Zaidi et al., 2023). أما في الجانب الليبي، فإن المشهد البحثي شحيح بشكل ملحوظ، حيث تتمركز الدراسات الحالية حول ثلاث محاور: أولها، التوثيق الفني لمحطات محددة كما في تقييم (Abujazyah, 2024) لأداء محطة الزويتينة: وثانيها، استكشاف جدوى التطبيقات التجريبية للمقطرات الشمسية المبتكرة وهو ما سعى إليه (المريض، 2023: 2024 Razig, 2024) وثالثها، وتقييم الآثار البيئية والاقتصادية كما فعل (الطوبير، 2017) لمنطقة الخمس. وبناء على ذلك، فإن الدراسات التي تقيس أداء المحطات الليبية بالمعايير الإقليمية السائدة لا تزال محدودة إلى حد كبير، وهذا النقص هو الدافع الأساسي لإجراء الدراسة الحالية. ورغم أن (Elarbi et al., 2025) قد قدموا تقييماً تقنياً واقتصادياً لتقنيات التناضح العكسي (RO) والتقطير متعدد المراحل (MSF) والتقطير متعدد التأثير (MED) في ليبيا، موفرين بذلك ركيزة كمية حديثة لمقارنات التكلفة، إلا أن نطاق دراستهم لم يصل إلى بعد المقارنة المرجعية (Benchmarking) المستهدف في هذا البحث. ومن جهة أخرى تشير المعطيات الحالية إلى أن قطاع تحلية المياه في ليبيا لا يزال يعتمد بشكل أساسي على الأنظمة التقليدية، مع محدودية في التقنيات الحديثة ودمج الطاقة المتجددة، رغم توفر إمكانيات كبيرة للطاقة الشمسية، خاصة في المناطق الساحلية ذات الإشعاع الشمسي المرتفع. ويعكس ذلك وجود فجوة تقنية وتشغيلية عميقة بين ليبيا ودول الخليج، مما يستدعي إجراء دراسات تطبيقية ومقارنات مرجعية لتقييم إمكانية تطوير أنظمة التحلية بتقنيات أكثر كفاءة واستدامة.

3. مشكلة البحث

تتمثل المشكلة الأساسية التي تتناولها الدراسة في مفارقة واضحة، فليبيا تمتلك ساحلاً طويلاً، ومستويات عالية من الإشعاع الشمسي، وموارد كبيرة من الطاقة الهيدروكربونية، ومع ذلك فإن البنية التحتية لتحلية المياه فيها بمستوى من الكفاءة الفنية يقل كثيراً عن إمكانياتها الاستراتيجية. ومن هذه المفارقة تنبثق تساؤلان بحثيين رئيسيين:

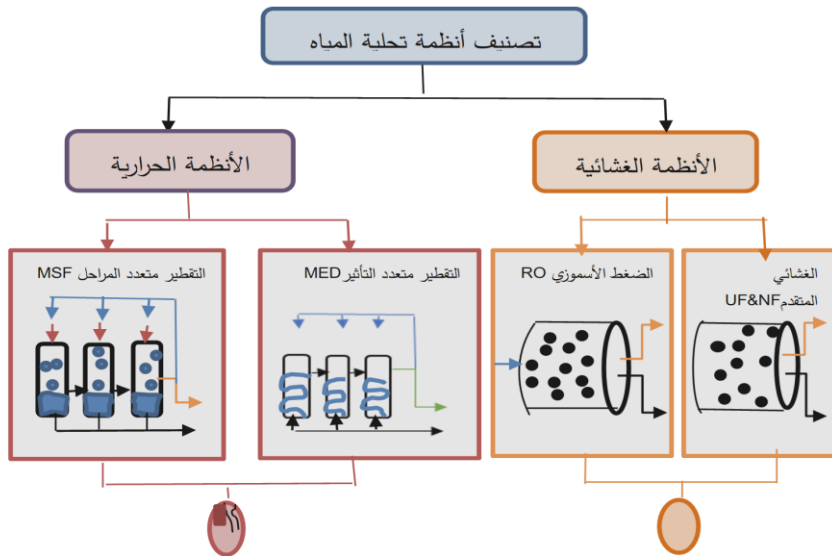
- ما حجم الفجوة التشغيلية والتكنولوجية بين محطات تحلية المياه الليبية (زوارة) ونظيراتها في دول الخليج، وذلك من حيث استهلاك الطاقة والكفاءة الإنتاجية؟
- ما المسارات الفنية والمؤسسية الأكثر ملائمة لسد هذه الفجوة، في ضوء الموارد المتاحة والقيود القائمة؟

4. منهجية البحث

- تعتمد هذه الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي المقارن (Benchmarking) لتقييم واقع تقنيات تحلية مياه البحر في ليبيا ومقارنتها بالأنظمة الحديثة في دول الخليج العربي. ولتحقيق أهداف البحث، تم تقسيم العمل التشغيلي إلى مستويات متكاملة تشمل:
- التحليل الهيدروليكي الهندسي:
اجراء حسابات هندسية تطبيقية دقيقة لمحطة تحلية زوارة كحالة دراسة عبر استخدام المعادلات الهيدروليكية الأساسية مثل معادلة Darcy-Weisbach لحساب فاقد الضغط، الناتجة عن الاحتكاك ومعادلة رقم رينولدز (Reynolds Number) لتحديد طبيعة التدفق، بالإضافة إلى حساب القدرة الكهربائية المطلوبة للضخ.
 - المقارنة المرجعية (Benchmarking):
مؤشرات الأداء التشغيلي ومعدلات الاستهلاك النوعي للطاقة (SEC) لمحطة زوارة مع محطات مرجعية رائدة في دول الخليج العربي، بهدف تقييم الفجوة التقنية واقتراح حلول تطويرية تعتمد على تقنيات النانو والطاقة الشمسية.
 - مصادر البيانات واختيار الحالة الدراسية:
تم اختيار محطة زوارة نظرا لتوفر الوثائق الهندسية ولان اعتمادها على التقنية الحرارية (MED) يوفر خط أساس مثالي للمقارنة مع نظم الاغشية الحديثة. ولضمان المصداقية العلمية، اعتمدت الدراسة بشكل مباشر على البيانات التشغيلية الرسمية الصادرة عن محطة تحلية زوارة للفترة من (2008 - 2025)، وتتميز هذه المنهجية بملء فجوة بحثية واضحة في الدراسات الليبية السابقة التي ركزت على تقييم المحطات بشكل منفرد دون ربطها إقليميا بالطفرة التكنولوجية لدول الخليج.

5. تصنيف أنظمة التحلية (Desalination Systems Classification)

تصنّف أنظمة تحلية المياه وفقاً لآلية فصل الأملاح ومصدر الطاقة المستخدم إلى نظامين أساسيين: الأنظمة الحرارية والأنظمة الغشائية (Ghaffour et al., 2013; Zaidi et al., 2023).



شكل (1): تصنيف أنظمة التحلية Desalination Systems Classification

المصدر: (Zaidi et al., 2023)

1.5- الأنظمة الحرارية (Thermal Desalination)

تعد أنظمة التبخير الحراري أحادية ومتعددة التأثير من التقنيات المعتمدة تاريخياً في التحلية الحرارية نظراً لاستقرارها التشغيلي عند التعامل مع الملوحة العالية (Al-Juwayhel et al., 1997) وتعتمد على التسخين لتبخير المياه ثم تكثيف البخار للحصول على المياه العذبة. تشمل تقنيات مثل:

- التقطير متعدد المراحل (MSF): تستخدم عدة مراحل ذات ضغوط منخفضة لتحسين الكفاءة الحرارية.
- التقطير متعدد التأثير (MED): يعتمد على عدة أحواض تتبخّر فيها المياه وتتكثف بالتتابع لاستغلال الحرارة.

ومن مزايا النظام الحراري انه يمكن استخدامه مع مياه شديدة الملوحة أو مياه بحرية شديدة الملوحة، وكذلك يمكن فيه استقرار التشغيل لفترات طويلة (Zaidi et al., 2023).

2.5- الأنظمة الغشائية (Membrane Desalination)

تعتمد على الضغط لدفع المياه عبر أغشية نصف نفاذة تفصل الأملاح والشوائب. تشمل تقنيات مثل:

- الضغط العكسي (RO–Reverse Osmosis): الأكثر استخدامًا عالميًا، يعتمد على غشاء شبه نفاذ لفصل الأملاح.
 - الغشائي المتقدم (NF/UF–Nanofiltration/Ultrafiltration): يستخدم للأغراض الصناعية أو لتخفيف الحمل على محطات RO.
- ومن مزاياه أنه ذو كفاءة أعلى في استهلاك الطاقة مقارنة بالحراري عند الأحجام الصغيرة والمتوسطة وعنده مرونة عالية في التوسع والتكامل مع الطاقة الشمسية أو تقنيات النانو. (Amy et al., 2021; Tiwari et al., 2021)

الجدول(1): مقارنة بين الأنظمة الحرارية والغشائية

الأنظمة الغشائية	الأنظمة الحرارية		المعيار
RO	MSF	MED	
فصل عبر الغشاء المدفوع بالضغط	التبخير الوميضي متعدد المراحل	تبخير وتكثيف متعدد التأثير	مبدأ التشغيل
متوسطة إلى عالية	عالية جدا	عالية	السعة الإنتاجية
عالية	مستقرة	مستقرة	الكفاءة
3-6KWh/m ³	12- 25KWh/m ³	8-18KWh/m ³	الاستهلاك النوعي للطاقة الكهربائية
لا يوجد	متوسط 8-15KWh/m ³	عالي 40-80KWh/m ³	الطلب على الطاقة الحرارية
متوسطة - منخفضة	عالية جدا	متوسطة - عالية	التكلفة الرأسمالية
15-20 سنة	25-30 سنة	20-25 سنة	العمر الافتراضي النموذجي للمحطة
جيد - يتطلب معالجة أولية	ممتاز	ممتاز جدا	التعامل مع المياه عالية الملوحة

دراسة مقارنة لتحلية مياه البحر في ليبيا ودول الخليج (دراسة محطة زوارة)

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-lo57>

الأنظمة الغشائية	الأنظمة الحرارية		المعيار
RO	MSF	MED	
ممتاز - عبر الخلايا الكهروضوئية	متوسط	جيد - عبر الطاقة الشمسية الحرارية	الدمج مع الطاقة المتجددة
عالية جدا	محدودة	متوسطة	القابلية للتوسع وزيادة الوحدات

المصدر: اعداد الباحثين بالاعتماد على (الياسري, 2022; Tiwari et al., 2021)

3.5 - تقنية النانو في تحلية المياه

تساهم تقنيات النانو، التي تتعامل مع مواد بحجم 1-100 نانومتر في تحسين أداء الأغشية من خلال زيادة النفاذية، وتقليل الترسبات الملحية (Scaling)، ومقاومة التلوث البيولوجي (Biofouling)، وتحسين العمر التشغيلي (Al-Karaghoul & Kazmetski, 2013).

- أغشية الترشيح النانوي (Nanofiltration – NF): كمرحلة تمهيدية قبل التناضح العكسي (RO) أو كبديل جزئي له في بعض التطبيقات، خاصة في معالجة المياه المتوسطة الملوحة. تتميز بقدرتها على إزالة الأملاح ثنائية التكافؤ (Ca^{2+} , Mg^{2+} ، -)، SO_4^{2-} والمواد العضوية وبعض المعادن الثقيلة مع ضغط تشغيل واستهلاك طاقة أقل مقارنة بأغشية RO التقليدية.

- أغشية التناضح العكسي المحسنة بالمواد النانوية (RO Membranes): يتم تحسين أداء أغشية التناضح العكسي (RO) من خلال دمج مواد نانوية متقدمة مثل أكسيد الغرافين، الأنابيب الكربونية النانوية (CNTs) وجسيمات الفضة النانوية (Silver nanoparticles, Ag) وثاني أكسيد السيليكون (SiO_2)، ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2)، مما يؤدي إلى زيادة تدفق المياه وتحسين مقاومة التلوث البيولوجي، وإطالة العمر التشغيلي للغشاء، وتقليل الضغط التشغيلي والطاقة المستهلكة.

- أغشية الغرافين (Graphene-based membranes): تعد أغشية الغرافين من التقنيات المتقدمة جداً في مجال تحلية المياه، إلا أنها لا تزال في مراحل التطوير والتطبيق

المحدود حتى الآن. وتمتاز نظريًا بنفاذية عالية جدًا للمياه، قدرة شبه كاملة على منع مرور الأملاح، استهلاك طاقة أقل مقارنة بأغشية RO التقليدية.

4.5- دمج الطاقة الشمسية في أنظمة التحلية

تتميز ليبيا بمعدلات إشعاع شمسي مرتفعة، مما يجعل الطاقة الشمسية خياراً مثالياً لدعم أنظمة التحلية، حيث يمكن دمج الطاقة الشمسية عبر أنظمة حرارية شمسية لتغذية وحدات MED، أو أنظمة كهروضوئية لتشغيل المضخات (المريض، 2023: Razig et al., 2024). ويساهم هذا الدمج في تقليل استهلاك الغاز الطبيعي وخفض التكلفة التشغيلية على المدى الطويل.

6. حالة الدراسة: محطة التحلية في زوارة

تقع محطة تحلية مياه البحر بزوارة شرق مدينة زوارة، وقد صممت من قبل شركة SIDEM الفرنسية بالاعتماد على تقنية التقطير متعدد التأثير (Multi- Effect Distillation, MED)، واكتملت سنة 2003. وتعتمد المحطة في تشغيلها على الغاز الطبيعي كمصدر رئيسي للطاقة، حيث تم ربطها بخط غاز يمتد لمسافة تقارب 10 كيلومترات من مجمع مليتة الصناعي، مما يضمن استمرارية الإمداد بالطاقة ويقلل من الاعتماد على الوقود التقليدي مثل الديزل، وتعد من أهم محطات التحلية على الساحل الغربي الليبي كونها نموذجاً تطبيقياً لدراسة أداء الأنظمة الحرارية في ليبيا، حيث تتيح تقييم الجوانب الهندسية والتشغيلية، إضافة إلى تحليل استهلاك الطاقة ومقارنتها بالأنظمة الحديثة المستخدمة في دول الخليج. كما تمثل حالة دراسية مناسبة لتحليل فرص تطوير قطاع التحلية في ليبيا، خصوصاً فيما يتعلق بدمج الطاقة المتجددة وتحسين الكفاءة التشغيلية (مفتاح، 2015). عدد الوحدات والطاقة الإنتاجية وفقاً للمصادر الحكومية الرسمية:

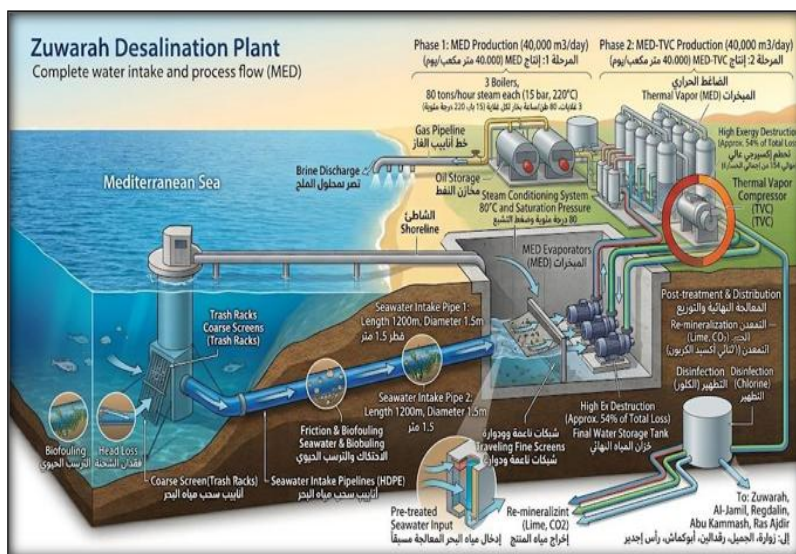
المرحلة الأولى: تضم ثلاث وحدات، وتعتمد على تقنية التحلية متعددة المراحل والتأثير (MED) بطاقة إنتاجية كلية تبلغ 40,000 م³/يوم.

المرحلة الثانية: تضم وحدتين وتعتمد على تقنية متعددة المراحل مع ضاغط حراري (MED-TVC)

بطاقة إنتاجية إجمالية تبلغ 40,000 م³/يوم. الإنتاج الكلي: تصل الطاقة الإنتاجية الاجمالية للمحطة الى 80,000 م³/يوم.

دراسة مقارنة لتحلية مياه البحر في ليبيا ودول الخليج (دراسة محطة زوارة)

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-lo57>



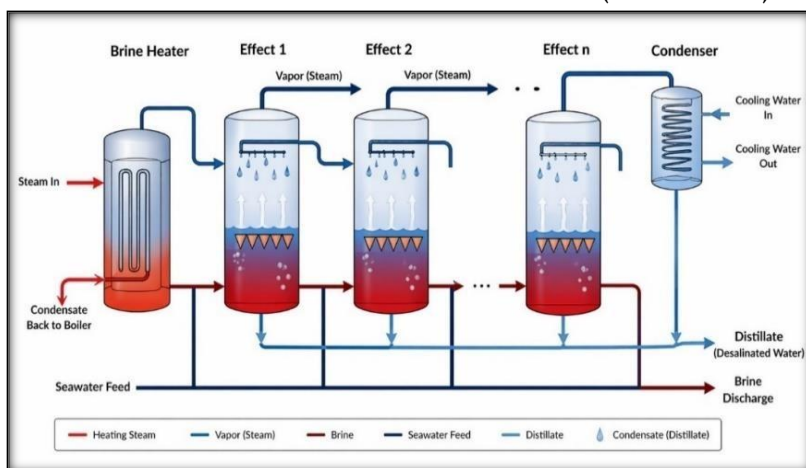
شكل (2): رسم توضيحي لمحطة تحلية زوارة (المصدر: اعداد الباحثين)



شكل (3): صور فوتوغرافية لمحطة التحلية في زوارة (المصدر: صفحة المعهد العالي لتقنيات شؤون المياه - العجيلات، منشور عن الزيارة الميدانية لمحطة تحلية مياه زوارة يونيو 2026)

1.6- الوصف التخطيطي للنظام MED

يوضح الشكل (4) نظام التقطير متعدد التأثيرات (MED) في صورة متكاملة، حيث يتم إدخال ماء البحر إلى المراحل الأولى (Effects)، ويتم تسخينه باستخدام البخار الخارجي، ثم ينتقل البخار الناتج تدريجيًا بين المراحل ليعمل كمصدر حراري للمرحلة التالية. في كل مرحلة يتم إنتاج جزء من الماء المقطر (Distillate)، بينما يزداد تركيز الأملاح في المحلول المتبقي (Brine) حتى يتم طرحه خارج النظام. كما يوضح الشكل دور المكثف في تحويل البخار إلى ماء عذب، مما يعكس مبدأ إعادة استخدام الطاقة الحرارية لتحسين الكفاءة (Tiwari, 1202).



شكل (4): المخطط التخطيطي لنظام التقطير متعدد التأثيرات (MED) (Adapted from) (Tiwari et al, 2021)

2.6- التحليل الهندسي (Engineering and Hydraulic Analysis)

والهيدروليكي يهدف هذا الجزء إلى تقييم الأداء الهيدروليكي لمحطة زوارة من خلال تحليل خصائص التدفق داخل أنابيب السحب، وحساب فواقد الضغط، وتحديد طبيعة الجريان، وربطها بالقدرة التشغيلية المطلوبة لعملية الضخ، وذلك باستخدام المعادلات الأساسية في ميكانيكا الموائع.

1.2.6- الخصائص الفيزيائية لمياه البحر

تعتمد الحسابات الهيدروليكية على الخصائص الفيزيائية لمياه البحر، والتي تؤثر بشكل مباشر على سلوك الجريان وفواقد الضغط وكفاءة انتقال الحرارة داخل النظام.

جدول (2): الخصائص الفيزيائية لمياه البحر

الخاصية	القيمة
الكثافة (ρ)	1025kg/m ³
اللزوجة (μ)	0.96×10^{-3} N.S/m ²
درجة الحرارة	25C°
العجلة (g)	9.81m/s ²

المصدر: اعداد الباحثين بالاعتماد دراسات سابقة

جدول(3) : مواصفات أنابيب السحب المستخدمة في التحليل

الوصف	الرمز	القيمة
قطر الأنبوب الرئيسي	D	1.2m
قطر الأنابيب الفرعية	D sub	0.4m
طول أنبوب مأخذ مياه البحر (الخط الرئيسي)	L	1.200m
مادة الأنابيب	-	GRP البلاستيك المسلح بالألياف الزجاجية
خشونة أنابيب GRP الحديثة	ε	0.00005
سرعة التدفق التشغيلية	V	2.0 m/s

المصدر: البيانات التشغيلية والتصميمية لمحطة (زوارة) 2025-2026

2.2.6- تحديد نظام التدفق (Reynolds Number)

لتحديد طبيعة الجريان داخل أنابيب السحب بقطر (D=1.2m) وسرعة تدفق = (V 2.0m/s) تم حساب رقم رينولدز وفق المعادلة

$$Re = \rho \cdot V \cdot D / \mu$$

$$1025 \times 2.0 \times 1.2 / 0.96 \times 10^{-3}$$

$$= 2,562,500$$

التدفق مضطرب (Turbulent) لأن $Re \gg 4.000$

3.2.6- فاقد الضغط في أنابيب السحب (Darcy-Weisbach)

نظرا لطبيعة الجريان المضطرب تماماً في خط السحب الرئيسي، تم حساب فاقد الارتفاع الهيدروليكي

(Head Loss) الناجم عن احتكاك المياه بالجدار الداخلي للأنابيب (h_f) باستخدام

معادلة Darcy–

Weisbach والتي تعد من أكثر المعادلات دقة في حساب الفواقد الهيدروليكية في

الأنابيب:

$$h_f = f \cdot (L/D) \cdot (v^2 / 2g)$$

طول الأنبوب ($L = 1200$ m) & القطر ($D = 1.2$ m) & السرعة ($v = 2$ m/s) معامل الاحتكاك $f=0.02$ بناء على (Moody Diagram) لطبيعة الأنابيب الخرسانية أو الفولاذية المبطننة

$$h_f = f \cdot (L/D) \cdot (v^2 / 2g)$$

$$v^2/2g = (2.0)^2 / (2 \times 9.81) = 0.2039 \text{ m}$$

$$L/D = 1,200/1.2 = 1,000$$

$$= 0.02 \times 1.000 \times 0.2039 \approx 4.077 \text{ m}$$

هذا يعني أن الاحتكاك يتسبب في فقدان طاقة ضغط تعادل هبوطا في مستوى الماء بمقدار 077.4 مترًا على طول خط الأنبوب وهذا قد يتطلب طاقة ضخ إضافية للتغلب عليه ولحساب فاقد الضغط:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h_f = 1025 \times 9.81 \times 4.077 = 40,995.4 \text{ Pa} \approx 0.41 \text{ bar}$$

4.2.6 – القدرة الهيدروليكية المطلوبة للضخ (Pumping Power Requirement)

لتقدير القدرة الهيدروليكية (Ph) اللازمة للتغلب على الفواقد الاحتكاك وضمان استمرارية تدفق الماء

(دون حساب كفاءة المضخة الميكانيكية)، تم تطبيق العلاقة الفيزيائية التي تربط هبوط الضغط ومعدل التدفق الحجمي كالتالي:

$$Ph = \Delta P \cdot Q$$

دراسة مقارنة لتحلية مياه البحر في ليبيا ودول الخليج (دراسة محطة زوارة)

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-lo57>

حيث Q هي التدفق الحجمي $Q = 2.262 \text{ m}^3/\text{s}$ وهذه القيمة تم حسابها بناء على قطر الأنبوب وسرعة التدفق

$$A = \pi \cdot D/4 = 3.1415 \times 1.2^2 / 4 = 1.131 \text{ m}^2$$

$$Q = A \times v = 1.131 \times 2.0 = 2.262 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Ph = 41.000 \times 2.262 \approx 92.742 \text{ Watt} \approx 92.7 \text{ KW}$$

وتمثل القيمة البالغة 92.7KW تقديرا هندسياً جزئياً لفاقد الاحتكاك في خط سحب مياه البحر الرئيسي فقط، ولا يعكس الحمل الكهربائي الكلي للمحطة. أما قيمة الاستهلاك النوعي للطاقة الكهربائية ($\text{SEC} \approx 14.5 \text{ kWh/m}^3$) الواردة في الملخص والنتائج فهي مستمدة من السجلات التشغيلية الرسمية لمحطة زوارة للفترة (2008-2025) كما هو مبين في منهجية البحث، وتشمل اجمالي الأحمال الكهربائية للمحطة (مضخات السحب والتغذية والتفريغ، والمعدات المساعدة، وأنظمة التحكم)، وليس فقط قدرة الضخ في خط السحب الرئيسي. وبذلك فإن الحمل الهيدروليكي المقدم في هذا القسم يعد توضيحاً هندسياً تكميلياً لأحد مكونات الحمل الكهربائي (فاقد الاحتكاك في السحب)، وليس اشتقاقاً مباشراً لقيمة SEC الكلية المبلغ عنها.

يوضح الجدول (4) التالي مقارنة بين محطة زوارة في ليبيا وأكبر محطات التحلية في دول الخليج من حيث القدرة التصميمية والتقنية المستخدمة كما وردت في التقارير الفنية الحديثة والدراسات العلمية وقد تختلف القيم التشغيلية الفعلية حسب ظروف التشغيل والصيانة.

جدول (4) مقارنة القدرة التصميمية لمحطة زوارة مع أكبر محطات تحلية في دول الخليج

العربي

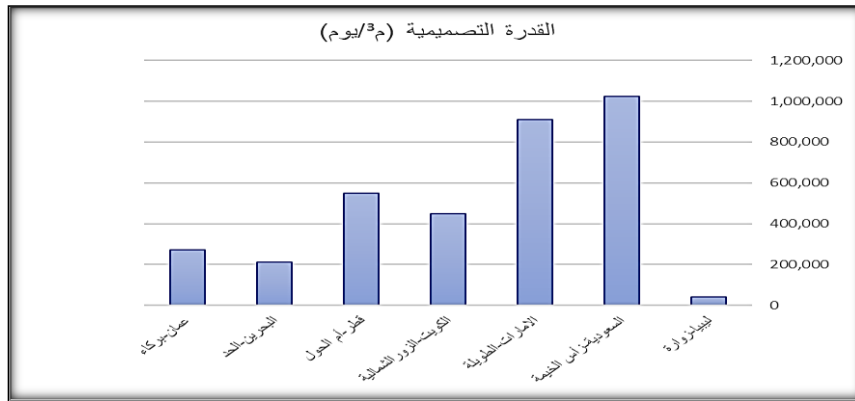
الدولة / المحطة	التقنية المستخدمة	القدرة التصميمية (م ³ /يوم)	أبرز الخصائص
ليبيا - زوارة	MED	80.000	محطة متوسطة القدرة تعمل بحرق الغاز الطبيعي (مرحلتان بطاقة 40.000m ³ /day)

دراسة مقارنة لتحلية مياه البحر في ليبيا ودول الخليج (دراسة محطة زوارة)

<http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-lo57>

الدولة / المحطة	التقنية المستخدمة	القدرة التصميمية (م ³ /يوم)	أبرز الخصائص
السعودية - رأس الخيمة	MSF+RO	~1,025,000 - 1,036,000	أكبر محطة هجينة في العالم
الإمارات - الطويلة	RO	~909.000	أكبر محطة في العالم
الكويت - الزور الشمالية	MSF+RO	~486.000	مجمع حديث متعدد المراحل لتوليد الكهرباء والمياه
قطر ام الحول	RO+MSF	~600.000 - 620.000	محطة متكاملة ضمن مجمع طاقة ضخمة جنوب الدوحة
البحرين - الحد	MSF+RO	~220.000	محطة رئيسية لتغطية الطلب محلياً
عمان - بركاء	RO	~281.000	أكبر المحطات وتعتمد التناضح العكسي

المصدر: إعداد الباحثين (القيم تمثل القدرة التصميمية لمحطات التحلية كما وردت في التقارير الفنية الحديثة)



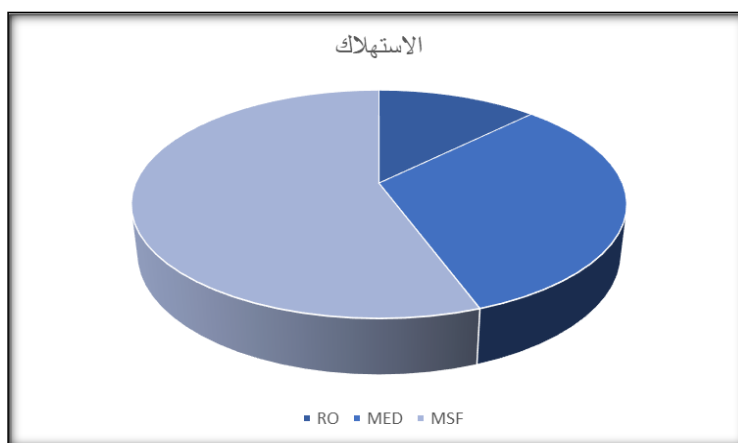
شكل (5): مقارنة القدرة التصميمية لمحطات التحلية المختارة

يوضح الجدول (5) والشكل (6) اختلاف متوسط استهلاك الطاقة بين تقنيات التحلية المختلفة، حيث تسجل تقنية التناضح العكسي (RO) اقل استهلاك للطاقة مقارنة بالأنظمة الحرارية، مثل MED و MSF.

جدول (5): استهلاك الطاقة حسب تقنيات التحلية

التقنية	متوسط استهلاك الطاقة (KWh/m ³)
RO	6 – 3
MED	15 – 8
MSF	25 – 15

المصدر: إعداد الباحثين اعتماداً على دراسات سابقة



شكل (6): مقارنة تقريبية لاستهلاك الطاقة حسب تقنيات التحلية

7- النتائج

إستناداً إلى التحليل النظري والبيانات التشغيلية ونتائج التحليل الهندسي والهيدروليكي لمحطة زوارة والمقارنة الإقليمية، يمكن استخلاص النتائج التالية:

أولاً: تظهر أنظمة التحلية في ليبيا اعتماداً واضحاً على التقنيات الحرارية، وبخاصة MSF وMED، نتيجة التراكم التاريخي في البنية التحتية وتوفر مصادر الطاقة التقليدية.

ثانياً: تبين أن إستهلاك الطاقة النوعي في المحطات الليبية لا يزال مرتفعاً مقارنة بالأنظمة الغشائية الحديثة، مما يؤثر بشكل مباشر على الكفاءة الاقتصادية لعمليات التحلية.

ثالثاً: تؤكد المقارنة مع دول الخليج أن هناك تحولاً استراتيجياً نحو استخدام تقنية التناضح العكسي (RO)، نظراً لقدرتها على تحقيق كفاءة أعلى في استهلاك الطاقة وانخفاض

التكاليف التشغيلية، إلى جانب فارق ضخ في القدرة الإنتاجية للمحطة الواحدة جدول (4).

رابعاً: أظهرت الدراسة أن محطة زوارة، كنموذج للأنظمة الحرارية، تعكس خصائص هذه التقنيات من حيث الاستقرار التشغيلي، لكنها في الوقت نفسه تعاني من نفس التحديات المرتبطة باستهلاك الطاقة.

خامساً: تبين أن إدماج التقنيات الحديثة، مثل الطاقة الشمسية وتقنيات النانو، لا يزال محدوداً في ليبيا، رغم دورها المحتمل في تحسين الكفاءة التشغيلية وتقليل التأثيرات البيئية. سادساً: من الناحية الاقتصادية، يمثل الاعتماد على الغاز الطبيعي من مجمع مليتة ميزة ملموسة، إلا أن دمج الطاقة الشمسية يمكن أن يقلل من استهلاك هذا المورد ويتيح إعادة توجيهه لدعم مشاريع أخرى أو للتصدير.

8- مناقشة النتائج:

تشير نتائج التحليل المقارن في جدول (4) إلى تباين واضح في أنماط تبني تقنيات تحلية المياه بين ليبيا ودول الخليج العربي، حيث لا يزال قطاع التحلية في ليبيا يعتمد بصورة رئيسية على الأنظمة الحرارية خاصة تقنيتي التقطير متعدد المراحل (MSF) والتقطير متعدد التأثير (MED)، في حين تتجه دول الخليج بشكل متسارع نحو اعتماد الأنظمة الغشائية، وعلى رأسها التناضح العكسي (RO). ويعكس هذا التباين اختلافات في البنية التحتية، ومستوى الاستثمار التكنولوجي، وسياسات الطاقة (الياسري، 2022: Tiwari et al., 2021).

ومن خلال البيانات التشغيلية المعروضة في جدول (1) و جدول (2)، يتضح أن الأنظمة الحرارية في ليبيا تتميز بدرجة عالية من الاستقرار التشغيلي وقدرتها على التعامل مع مياه ذات ملوحة مرتفعة، إلا أن ذلك يقابله ارتفاع ملحوظ في استهلاك الطاقة النوعي (SEC) $\approx 14.5 \text{ kWh/m}^3$ مقارنة بمحطات متقدمة في الخليج مثل الإمارات والسعودية، التي تعتمد أنظمة هجينة أو RO مدعومة بتقنيات النانو والطاقة الشمسية، مما يقلل استهلاك الطاقة بنسبة ملحوظة. ويغزى ذلك إلى الطبيعة الحرارية للعملية التي تعتمد على التسخين والتبخير المتكرر، كما هو موضح في شكل (5)، حيث يتم استهلاك كميات كبيرة من

الطاقة الحرارية لإنتاج البخار وإعادة تدويره عبر المراحل. في استهلاك الطاقة النوعي مقارنة بالأنظمة الغشائية الحديثة.

كما تكشف المقارنة أن الفجوة بين ليبيا ودول الخليج لا تقتصر على نوع التقنية المستخدمة فحسب، بل تمتد لتشمل مستوى التكامل مع التقنيات الحديثة، مثل الطاقة الشمسية وتقنيات النانو، والتي تُستخدم في تحسين كفاءة المعالجة المسبقة وتقليل استهلاك الطاقة (Tiwari et al., 2021). وفي هذا السياق، تشير الحسابات الهيدروليكية إلى أن الضغط البالغ 0.4bar يمثل "حملاً إضافياً" ثابتاً يجب على المضخات التغلب عليه، في محطة زوارة، ومع تقادم الأنابيب وزيادة الخشونة الداخلية (Roughness) بفعل التآكل أو الترسبات الحيوية، قد تتضاعف هذه القيمة، مما يفسر ارتفاع استهلاك الطاقة النوعي (SEC) وانخفاض الجدوى الاقتصادية مقارنة بالمحطات الحديثة التي تعتمد أنابيب ذات كفاءة هيدروليكية أعلى وأنظمة صيانة دورية كما تشير إلى أن القدرة الهيدروليكية تقارب 92.7kw فقط للتغلب على فواقد الاحتكاك في الأنابيب الرئيسية. وهذا الرقم يمثل "الحد الأدنى"؛ ومع تقادم الأنابيب في محطة زوارة وزيادة الخشونة أو الترسبات، تزداد هذه القدرة المطلوبة بشكل طردي، مما يرفع من استهلاك الكهرباء الكلي وبالمقارنة مع الخليج فإن المحطات الحديثة، يتم استخدام أنابيب بمواد متطورة مثل (GRP) ذات معامل احتكاك أقل (0.02)، مما يقلل من هذه الفواقد ويوفر في تكاليف التشغيل السنوية (الياسري، 2022). كما يظهر من النتائج أن التدفق مضطرب وهذا يسهم في خلط المياه وتحسين انتقال الحرارة، مما يجعل دمج الأغشية النانوية وطلاء الأسطح بثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) خطوة فعالة لتعظيم كفاءة التبادل الحراري وتقليل الترسبات الملحية (Scaling). هذا الدمج يرفع العمر الافتراضي للمبادلات الحرارية ويخفض فترات الصيانة الطارئة، ويقلل استهلاك الطاقة النوعية بشكل مباشر، وهو ما تدعمه التجارب الإقليمية في السعودية والإمارات.

وبناءً على ما سبق، يمكن القول إن استمرار الاعتماد على الأنظمة الحرارية في ليبيا يمثل خياراً تقنياً مستقرًا على المدى القصير، لكنه قد لا يكون الخيار الأمثل من حيث الكفاءة الاقتصادية والبيئية على المدى الطويل، خاصة في ظل التطور السريع في تقنيات RO.

9- التوصيات

- تبني سياسات وطنية لدعم التحلية المستدامة.
- اعتماد برامج صيانة وقائية دورية بدل الصيانة العلاجية، للحد من التوقفات المفاجئة.
- تقليل الاعتماد على المقاولين غير المتخصصين، وربط التشغيل والصيانة بمعايير أداء واضحة.
- تحسين آليات تحصيل رسوم المياه لضمان تمويل تشغيل وصيانة محطات التحلية.
- تشجيع الشراكات مع المؤسسات الدولية.
- إنشاء معاهد خاصة للعلوم المياه لتخريج كوادر متميزة قادرة على العمل في مجال تحلية المياه.
- فرض معايير فنية صارمة أو رقابة مؤسسية فعالة. لتجنب أي استخدام لمعدات وقطع غيار منخفضة الجودة لا تتوافق مع المواصفات التقنية المطلوبة.

10- الاستنتاجات

تخلص هذه الدراسة إلى أن هناك فجوة تقنية وتشغيلية جوهريّة بين محطة زوارة الليبية ونظيراتها في دول الخليج العربي، تتمثل بشكل أساسي في استمرار الاعتماد على التقنيات الحرارية (MED/MSF) بدلاً من تقنيات الأغشية عالية الكفاءة (RO)، وما يترتب على ذلك من ارتفاع الاستهلاك النوعي للطاقة إلى نحو ثلاثة إلى أربعة أضعاف المعدل المسجل في محطات الخليج المتقدمة.

وتؤكد الدراسة أن سد هذه الفجوة لا يتطلب بالضرورة استبدالاً فورياً للبنية التحتية القائمة، بل يمكن اتباع مسار تحديث ثنائي المراحل: تحسين تدريجي لأداء وحدات MED الحالية عبر دمج تقنيات النانو والتسخين الشمسي الأولي في المدى القصير، ثم انتقال تدريجي نحو أنظمة RO العاملة بالطاقة الشمسية في المدى المتوسط إلى الطويل. كما تخلص الدراسة إلى أن النجاح التقني لهذا التحول مشروط بإصلاحات مؤسسية موازية، أبرزها حوكمة الصيانة، وتطوير القوى العاملة المتخصصة، وتنويع آليات التمويل.

وتقر الدراسة بأن التحليل الهيدروليكي المقدم يمثل تقديراً أولياً مبنياً على مقطع واحد من خط السحب الرئيسي، وأنه لا يمثل اشتقاقاً كاملاً لقيمة الاستهلاك النوعي للطاقة

(SEC) المبلغ عنها للمحطة ككل، والتي استمدت من السجلات التشغيلية الرسمية، وأن توسيع نطاق التحليل ليشمل النظام الهيدروليكي الكامل للمحطة (بما في ذلك الارتفاع الأستاتيكي و فواقد التجهيزات وكفاءة المضخات الفعلية وبقية الاحمال الكهربائية المساعدة) يمثل مجالاً مهماً للدراسات المستقبلية لربط التحليل الهندسي التفصيلي بقيمة SEC الكلية بشكل كمي مباشر.

المراجع:

- الطوير، إسماعيل محمد. (2017). دراسة تطبيقية على منطقة الخمس: الآثار البيئية والاقتصادية لمحطات التحلية الصغيرة. في المؤتمر الاقتصادي الأول للاستثمار والتنمية، ليبيا.
- المريض، عبدالحفيظ . (2023). دراسة تجريبية لتصميم المبتكر لتحلية المياه باستخدام المقطر الشمسي، مجلة البحوث التكنولوجية، 1، 94-101.
- الياسري، حسين قاسم محمد. (2022). واقع تحلية المياه في دول الخليج العربي: دراسة في جغرافية الموارد المائية. مجلة القادسية للعلوم الإنسانية، 25(2)، 1-20.
- عمروسي، خالد، (2019). تحلية مياه البحر كخيار استراتيجي لسد الفجوة المائية في الدول العربية. مجلة العلوم الاقتصادية والإدارية، 91-109، 20(1)
- مفتاح، ع. خ . (2015). دراسة إمكانية استغلال الطاقة المتاحة بمحطة تحلية مياه زوارة. كلية الهندسة، جامعة صبراتة، ليبيا.
- Abujazyah, W. A. (2024). Performance test of an E-Zuetina seawater desalination plant International Science and Technology Journal. <https://doi.org/10.62341/wapt4534>
- Al-Juwayhel, F., El-Dessouky, H., & Ettouney, H. (1997). Analysis of single-effect evaporator desalination systems Desalination, 114(3), 253–263. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(98\)00014-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00014-4)
- Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable energy-powered desalination processes Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 343–356. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.064>

- Alnouri, S., Al-Saidi, M., Al-Said, M., & Mezher, T. (2023). countries: An overview. *Heliyon*, 9(10), e20543. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20543>
- Amy, G. L., Li, Z., Francis, L., & Ghaffour, N. (2021). Recent advances in SWRO and emerging membrane-based processes for seawater desalination. In S. Salinas, J. Schippers, G. Amy, I. Kim, & M. Kennedy (Eds.), *Seawater reverse osmosis desalination*. IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781780409863_0265
- Elarbi, et al. (2025). Techno-economic evaluation of desalination technologies (RO, MSF, MED) in Libya. *Journal of Technology Research*, 3, 799 –809.
- Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment *Science*, 333(6043), 712–717 <https://doi.org/10.1126/science.1200488>
- Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 309, 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.10.015>
- Moussa, B., Trivedi, P., Saleem, H., & Zaidi, S. J. (2022). Desalination in the GCC countries: A review *Journal of Cleaner Production*, 357, 131717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131717>
- Razig, M. A., Mohammed, A. E., & Khalifa, A. G (2024). Manufacturing of a solar desalination system *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, 2(4), 19–26.
- Tiwari, A., Rathod, M. K., & Kumar, A. (2021). A comprehensive review of solar-driven desalination systems and its advancements *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02040-5>
- Zaidi, S.J., & Zubair, M. M., Saleem, H. (2023). Recent progress in reverse osmosis modeling: An overview. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.1167705>