Afro-Asian Journal of Scientific Research (AAJSR)
المجلة الأفروآسيوية للبحث العلمي
E-ISSN: 2959-6505
Volume 4, Issue 3, 2026
Page No: 73-86
Website: https://aajsr.com/index.php/aajsr/index
SJIFactor 2024: 5.028 ISI 2025: 0.915 معامل التأثير العربي (AIF) 2025: 0.76

Assessment of the Efficiency of Commercial Reverse Osmosis Plants in Reducing Salts and Dissolved Constituents and Classifying Treated Water Quality Using the Water Quality Index in Bir al-Ashhab, Libya

Mohammed Al-Haen[1], Issa Al-Haen[2*], Ahmed Mohamed[3], Mahmoud Al-Mabrouk[4]
[1,3]Department of Forestry and Rangelands, Faculty of Natural Resources and Environmental Sciences, University of Tobruk, Tobruk, Libya
[2]Higher Institute of Science and Technology, Bir Al-Ashhab, Libya
[4]Department of Natural Resources, Faculty of Natural Resources and Environmental Sciences, University of Tobruk, Tobruk, Libya

تقييم كفاءة محطات التناضح العكسي التجارية في خفض الأملاح والعناصر الذائبة وتصنيف المياه المنتجة باستخدام مؤشر جودة المياه في منطقة بئر الأشهب، ليبيا

محمد الهين[1]، عيسى الهين[2*]، احمد محمد[3]، محمود المبروك[4]
[1،3]قسم الغابات والمراعي، كلية الموارد الطبيعية وعلوم البيئة، جامعة طبرق، ليبيا
[2]المعهد العالي للعلوم والتقنية، بئر الاشهب، ليبيا.
[4]قسم الموارد الطبيعية، كلية الموارد الطبيعية وعلوم البيئة، جامعة طبرق، ليبيا

*Corresponding author: Ysyb5219@gmail.com

Received: April 26, 2026	Accepted: July 05, 2026	Published: July 20, 2026

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Abstract:
This study aimed to evaluate selected physicochemical characteristics of drinking water produced by commercial reverse osmosis (RO) plants in the Bir Al-Ashhab area, Libya; assess the efficiency of these plants in reducing salinity and dissolved constituents; and classify the quality of the treated water using the Water Quality Index (WQI). Six commercial plants were included in the study. Samples of raw groundwater and treated water were collected, with three replicates obtained for each sample. Twelve physicochemical parameters were measured: pH, total dissolved solids (TDS), electrical conductivity (EC), total hardness (TH), sodium, calcium, magnesium, potassium, chloride, sulfate, nitrate, and bicarbonate. Removal efficiency and WQI values were also calculated. The data were analyzed using the paired-samples t-test and one-way analysis of variance at a significance level of 0.05. The results showed significant reductions in all physicochemical parameters after treatment compared with the raw groundwater ($p < 0.001$). The plants demonstrated high efficiency in reducing salinity and removing dissolved constituents, with overall removal efficiencies ranging from 64% to 99%, although performance varied among the plants. The pH values remained within the acceptable range for drinking water. WQI values ranged from 10 to 26; the water produced by four plants, representing 66.7% of the studied plants, was classified as excellent, whereas the water produced by two plants, representing 33.3%, was classified as good. These findings confirm the effectiveness of the investigated reverse osmosis plants in reducing salinity and improving water quality. However, periodic monitoring of the mineral content of the treated water is necessary, and remineralization should be considered when required. The study was limited to a single sampling period and to physicochemical parameters.

Keywords: Reverse osmosis; drinking water quality; Water Quality Index (WQI); salinity removal; groundwater.

الملخص:

هدفت الدراسة إلى تقييم بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لمياه الشرب المنتجة من محطات التناضح العكسي التجارية في منطقة بئر الأشهب، ليبيا، وتقدير كفاءة هذه المحطات في خفض الملوحة والعناصر الذائبة، وتصنيف جودة المياه المنتجة باستخدام مؤشر جودة المياه (WQI). شملت الدراسة ست محطات تجارية، وجُمعت عينات من المياه الجوفية الخام والمياه المنتجة بعد المعالجة، بواقع ثلاث مكررات لكل عينة بمجموع 36 عينة. قِيست اثنتا عشرة خاصية فيزيائية وكيميائية، هي الأس الهيدروجيني، والأملاح الذائبة الكلية، والموصلية الكهربائية، والعسرة الكلية، والصوديوم، والكالسيوم، والمغنيسيوم، والبوتاسيوم، والكلوريد، والكبريتات، والنترات، والبيكربونات. كما حُسبت كفاءة الإزالة ومؤشر جودة المياه، وحُللت البيانات باستخدام اختبار t للعينات المترابطة وتحليل التباين الأحادي عند مستوى دلالة 0.05. أظهرت النتائج انخفاضًا معنويًا في جميع الخصائص الفيزيائية والكيميائية بعد المعالجة مقارنة بالمياه الخام ($p<0.001$)، وحققت المحطات كفاءة مرتفعة في خفض الملوحة وإزالة العناصر الذائبة، إذ تراوحت كفاءة الإزالة إجمالًا بين 64 و99%، مع تفاوت في الأداء بين المحطات. كما بقيت قيم الأس الهيدروجيني ضمن المجال المقبول لمياه الشرب، وتراوحت قيم مؤشر جودة المياه بين 10 و26، وصُنفت مياه أربع محطات، بنسبة 66.7%، ضمن فئة المياه الممتازة، ومياه محطتين، بنسبة 33.3%، ضمن فئة المياه الجيدة. وتشير النتائج إلى كفاءة محطات التناضح العكسي المدروسة في خفض الملوحة وتحسين جودة المياه، مع ضرورة المراقبة الدورية للمحتوى المعدني للمياه المنتجة والنظر في إعادة تمعدنها عند الحاجة. اقتصرت الدراسة على فترة أخذ عينات واحدة وعلى المؤشرات الفيزيائية والكيميائية.

الكلمات المفتاحية: التناضح العكسي، جودة مياه الشرب، مؤشر جودة المياه(WQI) ، إزالة الملوحة، المياه الجوفية.

المقدمة:

تُعد ندرة المياه من أهم القضايا التي تعاني منها معظم المناطق الجافة وشبه الجافة، ونتيجة للنمو السكاني، وزيادة الأنشطة البشرية المتنوعة ازداد الطلب على المياه، ومن ثم تفاقمت مشكلة نقص المياه، فضلاً عن تدهور نوعيتها، حيث وصلت المياه في بعض المناطق إلى مرحلة الاستنزاف وارتفاع نسبة الملوحة (أحمد، Kandeal et al., &2017 2024). نظراً لقلة الموارد المائية على المستوى العالمي فإن العديد من الدول تلجأ إلى تحلية المياه المالحة (المياه الجوفية أو مياه البحر)، حيث تعتبر اختياراً اساسياً لسد العجز في توفير المياه العذبة (Kadhim et al., 2023)، تُصنَّف ليبيا ضمن البلدان التي تواجه مشكلة نقص المياه، نظرا لموقعها الجغرافي وطبيعتها المناخية، لا سيما في ظل انخفاض مناسيب المياه وتعرّضها لمصادر متعددة من التلوث، الأمر الذي أسهم في تراجع كميات المياه الصالحة للشرب (المعموري، 2017). مما ادى للاعتماد على مياه محطات التحلية لأغراض الشرب والاستخدامات المختلفة، وهو ما شجّع بعض المستثمرين المحليين على التوسع في الاستثمار في صناعة المياه، الأمر الذي يتضح من خلال انتشار أنواع متعددة من هذه المحطات في مختلف المدن والمناطق الليبية (الشافعي والمهندي، 2005).

تعتبر تحلية المياه باستخدام تقنية التناضح العكسي Reverse Osmosis (RO) في الوقت الحاضر من أكثر الوسائل استخدامًا على نطاق واسع لتوفير المياه الصالحة للشرب، خصوصا في المناطق الجافة وشبه الجافة. وتعتمد هذه التقنية على عملية فصل غشائي يتدفق خلالها الماء الخام بمحاذاة سطح الغشاء تحت تأثير الضغط، فتسمح الأغشية بمرور المياه النقية وتجميعها، في حين تُصرف المياه المركزة. أثبتت محطات التناضح العكسي كفاءة كبيرة مقارنة بعمليات معالجة المياه التقليدية الأخرى في إزالة الأملاح والملوثات الكيميائية والمعادن الثقيلة من مياه الشرب، وتزويد الناس بمياه شرب نظيفة (Mounmi and El Aoud., 2022; Ilyas and Vankelecom., 2023).

تشير نتائج بعض الدراسات كدراسة شحادة (2012) إلى أن محطات التناضح العكسي تؤدي إلى خفضٍ كبير في تراكيز الأملاح والمعادن في مياه الشرب المنتجة، وهو ما قد ينعكس سلبًا على الصحة العامة، ولا سيما لدى كبار السن والأطفال. كما وجد آبوظهير وآخرون (2023) عند تقدير كمية الاملاح الذائبة الكلية والموصلية الكهربائية في المياه المنتجة من محطات تحلية مياه الابار ببلدية تاجوراء، ان المتوسط العام لكمية الاملاح الذائبة الكلية في جميع العينات 49.6 ppm والموصلية الكهربائية 91.71 µS/cm، واعتبرت الدراسة ان هذه الكمية تعتبر منخفضة جدا وذات تأثير سلبي على صحة المواطنين. ايضا وجد الشريف وإمريمي (2025) عند تقييم جودة مياه الشرب المعالجة بأجهزة التناضح العكسي في مدينتي سبها ووادي الشاطئ، ان لمحطات التناضح العكسي قدرة كبيرة على تنقية الماء من الملوثات الذائبة، لكنها تثير الكثير من التساؤلات بشأن النقص الكبير في المعادن الاساسية في المياه المعالجة والاثار الصحية المترتبة على ذلك.

استخدم Irhema and Arhouma (2024) مؤشر جودة المياه لتقييم جودة المياه الناتجة من وحدات التنقية التجارية ودراسة كفاءتها في بلدية الأصابعة، حيث تم تحليل عدد من الخصائص الفيزيائية والكيميائية قبل وبعد تنقية المياه. وقد أوضحت نتائج الدراسة أن عملية التنقية أدت إلى خفض واضح في معظم القيم المقاسة وأن قيم مؤشر جودة المياه تراوحت بين 5.97و11.85 وهي تعتبر ضمن فئة المياه الممتازة حسب تصنيف WQI ومع ذلك أكدت الدراسة ضرورة

المتابعة المستمرة للمياه، لأن الانخفاض الكبير في تركيز بعض العناصر المعدنية الأساسية قد يؤثر في القيمة الصحية للمياه عند استخدامها لفترات طويلة.

على الرغم من وجود دراسات ليبية تناولت جودة المياه المنتجة من محطات التناضح العكسي في بعض المدن، فإن البيانات المنشورة حول كفاءة هذه المحطات في منطقة بئر الأشهب لا تزال محدودة، ولم يدرس بصورة كافية التغير المتزامن في الخصائص الفيزيائية والكيميائية بين المياه الجوفية الداخلة والمياه المنتجة من المحطة نفسها، ولا كفاءة إزالة كل عنصر، أو التصنيف الكلي للمياه المنتجة باستخدام مؤشر جودة المياه. لذلك تستهدف الدراسة الحالية توفير تقييم ميداني مقارن لهذه الجوانب في المحطات التجارية العاملة بالمنطقة.

تنبع أهمية هذه الدراسة من توفير بيانات ميدانية عن جودة مياه الشرب المنتجة من محطات التناضح العكسي، كمصدر وحيد للمياه غير التقليدية في منطقة الدراسة، كما تسهم الدراسة في توضيح كفاءة هذه المحطات في خفض الملوحة والعناصر الذائبة، وتوفر النتائج المتوقعة قاعدة بيانات يمكن أن تدعم الجهات الرقابية في متابعة أداء محطات التحلية التجارية.

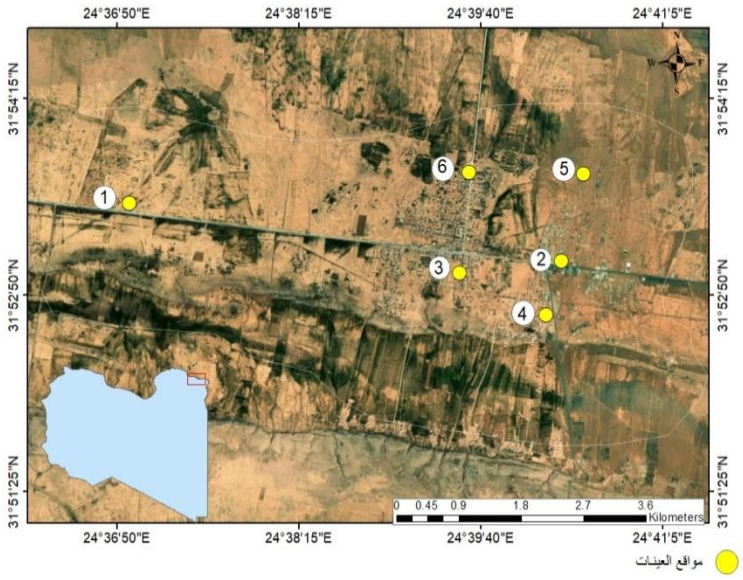
تتمثل مشكلة الدراسة في ارتفاع المحتوى الملحي للمياه الجوفية في منطقة بئر الأشهب، وما ترتب عليه من اعتماد متزايد على محطات التناضح العكسي التجارية. ومع انتشار هذه المحطات، لا تتوافر بيانات ميدانية كافية عن مدى كفاءتها في خفض الأملاح والعناصر الذائبة، أو عن التباين بين المحطات في الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه المنتجة، مما يحد من القدرة على تقييم أدائها ومتابعتها رقابيًا.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم جودة مياه الشرب المنتجة من محطات التناضح العكسي التجارية في منطقة بئر الأشهب، من خلال قياس عدد من الخصائص الفيزيائية والكيميائية، وحساب كفاءة إزالة الأملاح والعناصر الذائبة، ومقارنة النتائج بالمواصفات القياسية الليبية ومعايير منظمة الصحة العالمية، إضافة إلى تقدير مؤشر جودة المياه WQI لتحديد مدى صلاحية المياه المنتجة للشرب.

المواد وطرق العمل:

1. منطقة الدراسة:

تتمثل منطقة الدراسة في منطقة بئر الأشهب، الواقعة في أقصى شمال شرق ليبيا، وهي جزء كبير من شمال وسط هضبة الدفنة، ويتميز مناخ منطقة الدراسة بانه شبه صحراوي وهو في الاصل مناخ صحراوي مصاحب لمناخ البحر المتوسط المجاور للمنطقة، ويبلغ متوسط درجة الحرارة 25.2 درجة مئوية خلال فصل الصيف وتمتد جغرافيا من وادي (مرسى لك) شرقاً، حتى وادي (السهل الشرقي) غرباً، بمسافة تقدر بـ 24 كلم تقريباً، ومن البحر المتوسط شمالاً حتى خط تقسيم المياه عند محلة (الغرابات) جنوباً، بمسافة تقدر بحوالي 22 كلم تقريباً (الجالي وسليمان، 2023)، وبذلك فهي تمتد منطقة الدراسة فلكيًا بين دائرتي عرض 31°51′25″ و31°54′15″ شمالًا، وبين خطي طول 24°36′50″ و24°41′15″ شرقًا، شكل(1).



شكل رقم (1): منطقة الدراسة ومواقع العينات

2. جمع العينات:

جُمعت عينات المياه خلال شهر مارس 2026 من ست محطات تجارية للتناضح العكسي في منطقة الدراسة شكل (1). أُخذت ثلاث مكررات من كل محطة قبل المعالجة (مياه جوفية)، وبعد عملية المعالجة من المخرج النهائي للمياه، في

عبوات بلاستيكية نظيفة ومعقمة سعة 250 مل، بعد شطفها بماء العينة. وُضعت البيانات التعريفية على كل عبوة، ثم حُفظت العينات جيدًا في حافظة مبردة بعيدًا عن أشعة الشمس، ونُقلت إلى المختبر لإجراء التحاليل الفيزيائية والكيميائية.

3. طرق التحاليل الفيزيائية والكيميائية:

- **الأس الهيدروجيني (pH):** تم قياس الأس الهيدروجيني لعينات المياه مباشرة بعد جمعها وذلك باستخدام جهاز pH plastuly 4 AR-50-HACH (meter Model).
- **الإيصالية الكهربائية (EC):** تم قياس الايصالية الكهربائية (Electrical conductivity) للعينات باستخدام جهاز الايصالية الكهربائية (Conductivity meter) (Richards, 1954).
- **الأملاح الذائبة الكلية: (Total Dissolved salts):** تم قياس الأملاح الذائبة الكلية بواسطة جهاز: (T.D.S meter Model AR-50-HACH) وحسبت بوحدة: (mg/l).
- **الكالسيوم والماغنيسيوم (Ca^{2+} and Mg^{2+}):** تم تقدير الايونات والكالسيوم والماغنيسيوم في عينات المياه بطريقة التصحيح (Titrimetic) وذلك بالمعايرة مع EDTA باستخدام الكواشف (E.B.T) ودليل (Murexid) وفقا لما ورد في طريقة (APHA, 1995).
- **الصوديوم والبوتاسيوم (Na^+ and K^+):** تم قياس الصوديوم والبوتاسيوم باستخدام جهاز مطياف اللهب Flame photometer Models PFP7 and PFP7/ JENWAY) وفقاً لما ذكر في (APHA, 1995).
- **الكلوريد (Cl^-):** تم التقدير بالمعايرة (موهر) بواسطة محلول نترات الفضة باستخدام دليل كرومات البوتاسيوم وحسب الطريقة الموصوفة من قبل (Black, 1965).
- **البيكربونات (HCO_3^-):** تم تقديرها بالمعايرة مع حامض الكبريتيك بتركيز (0.01) عياري باستعمال محلول الميثيل البرتقالي وحسب الطريقة الموصوفة من (Black, 1965).
- **العسرة الكلية (Total Hardness):** تم حساب العسرة الكلية وفقا للمعادلة التي ذكرها (Raghunath, 1987). **TH=2.49 Ca + 4.11 Mg**
- **الكبريتات:(SO_4^{2-})** تم استخدام طريقة التعكيرTurbidity لقياس تركيز الكبريتات بعينات المياه كما هو موضح في (APHA, 1995) باستخدام جهاز مطياف الأشعة فوق البنفسجية (uv–vis. Spectrophotometer) حيث قيس الامتصاص للعينة والمنحني القياسي عند طول موجي (ƛ = 540 nm).
- النترات **(NO3-)**: قدرت النترات في عينات المياه حسب ما ورد في (APHA, 1995) باستخدام جهاز مطياف اللون PHILIPS (Spectrophotometer PU8625 Series UV/Visible) عند طول موجي (ƛ - 220 nm).

4. حساب نسبة الازالة:

تم حساب نسبة الإزالة لكل عنصر أو مؤشر جودة مياه باستخدام الفرق بين تركيزه في المياه الجوفية قبل المعالجة وتركيزه في المياه المنتجة بعد عملية المعالجة، وذلك وفق المعادلة التالية:

$$\text{Removal Efficiency (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

حيث يشير C_i إلى تركيز المياه قبل المعالجة، بينما يشير C_f إلى تركيز المياه بعد المعالجة .وتُستخدم هذه المعادلة لتقييم كفاءة محطة التحلية في إزالة الأملاح أو الملوثات من المياه.

5. حساب مؤشر جودة المياه WQI:

تم تقييم جودة المياه في هذه الدراسة باستخدام مؤشر جودة المياه Water Quality Index (WQI)بالاعتماد على المعادلة التي اقترحها Horton((1965 وطوّرها لاحقًا Brown et al.(1970) ويعتمد هذا المؤشر على دمج القيم المقاسة للخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه مع الأوزان النسبية والمعايير القياسية للحصول على قيمة رقمية تعبّر عن مستوى جودة المياه.

تم إعداد مؤشر جودة المياه لغرض الشرب باستخدام 12 قيمة من القيم الفيزيائية والكيميائية لكل محطة بعد تنقية المياه حيث شملت هذه المتغيرات: pH، EC، TDS، TH، Ca^{2+}، Mg^{2+}، Na^+، K^+، Cl^-، NO_3^-، SO_4^{2-}، HCO_3

استُخدمت الخطوات الآتية في حساب مؤشر جودة المياه WQI :

- **أولاً: تم حساب وزن كل متغير باستخدام المعادلة الآتية:**

$$W_i = \frac{1}{S_i}$$

- **ثانياً: تم حساب ثابت التناسب باستخدام المعادلة الآتية:**

$$k_c = \frac{1}{\sum_{i=0}^{n} W_i}$$

- **ثالثاً: تم حساب الوزن النسبي لكل متغير باستخدام المعادلة الآتية:**

$$Rw_i = k_c \times W_i$$

- **رابعاً: تم حساب مقياس تصنيف الجودة Q_i لكل متغير**، وذلك بقسمة تركيزه في كل عينة مياه على معياره القياسي المقابل، وفقاً لإرشادات المركز الوطني للمواصفات والمعايير القياسية (1992)، **ثم ضرب الناتج في 100 باستخدام المعادلة الآتية:**

$$Q_i = \frac{C_i - C_o}{S_i - C_o} \times 100$$

حيث إن C_i تمثل قيمة متغير جودة المياه التي تم الحصول عليها من التحليل، أما S_i فتمثل القيمة القياسية لمتغير جودة المياه المعتمدة من قبل المواصفات الليبية.

وتكون قيمة C_o مساوية للصفر لجميع المتغيرات، باستثناء الرقم الهيدروجيني pH حيث تساوي 7.0، ثم تم حساب المؤشر الفرعي لجودة المياه لكل متغير SI_i **كما يأتي:**

$$SI_i = Rw_i \times Q_i$$

- **ثم تم حساب مؤشر جودة المياه الكلي WQI وفقاً للمعادلة الآتية:**

$$WQI = \sum_{i=0}^{n} S\,I_i$$

وقد صُنِّفت حالة المياه باستخدام قيم مؤشر جودة المياه WQI المحسوبة وفقاً للجدول (1) وتم حساب حالة المياه بالاعتماد على فئات قيم مؤشر جودة المياه المقابلة في الجدول (2) ، وذلك استناداً إلى قيم مؤشر جودة المياه المحسوبة كما هو موضح في الدراسات (Kumar et al., 2019; Yadav et al., 2010)

جدول رقم (1): القيم المعيارية لمؤشر جودة المياه (WQI)

Rw_i	W_i	SI_i	العناصر المدروسة
0.5162	0.125	8	pH
0.0041	0.001	1000	TDS
0.0018	0.000435	2300	EC
0.0083	0.002	500	TH
0.0206	0.005	200	Na^+
0.0206	0.005	200	Ca^{2+}
0.0826	0.02	50	Mg^{2+}
0.2065	0.05	20	K^+
0.0165	0.004	250	Cl^-
0.0103	0.0025	400	SO_4^{2-}
0.0918	0.022222	45	NO_3^-
0.0206	0.005	200	HCO_3^-
1.00	0.242157		

$$k_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^{12} W_i} = 4.1$$

$$R_w = \sum_{i=1}^{17} k_c \times W_i = 1$$

جدول رقم (2): تصنيف حالة المياه اعتمادًا على قيم مؤشر جودة المياه(WQI)

قيم مؤشر جودة المياه(WQI)	0–25	26–50	51–75	76–100	100–150	أكثر من 150
حالة المياه	ممتازة	جيدة	رديئة	رديئة جدًا	غير ملائمة	غير صالحة لجميع الاستخدامات
الاستخدامات الموصى بها	الشرب، والري، والاستخدامات الصناعية	الاستخدامات المنزلية، والري، والاستخدامات الصناعية	الري والاستخدامات الصناعية	الري	استخدام مقيّد لأغراض الري	تتطلب معالجة مناسبة قبل الاستخدام

المصدر: (Kumar et al., 2019)

التحليل الاحصائي:

أُجري التحليل الإحصائي باستخدام برنامج (SPSS.27) اختُبرت طبيعية توزيع الفروق بين القياسات قبل المعالجة وبعدها باستخدام اختبار Shapiro–Wilk. ونظرًا لعدم وجود انحراف معنوي عن التوزيع الطبيعي ($p > 0.05$)، استُخدم اختبار T للعينات المترابطة للمقارنة بين المياه الخام (الجوفية) والمنتجة، وتحليل التباين الأحادي One-way ANOVA للمقارنة بين المحطات، عند مستوى دلالة $p < 0.05$.

النتائج والمناقشة:

- **الاس الهيدروجيني pH:**

أظهرت نتائج جدول (3) لقياس الاس الهيدروجيني (pH) أن قيم المياه قبل المعالجة تراوحت بين 7.6و7.9 في المحطات 4 و2و5 على التوالي، مما يشير إلى أن المياه قبل المعالجة تميل إلى التعادل مع قلوية خفيفة، هذه القيم قريبة للنتائج التي وجدها (الجالي وسليمان، 2023) عند تقييم نوعية المياه الجوفية لنفس المنطقة. أما بعد المعالجة، فقد انخفضت قيم الاس الهيدروجيني حيث تراوحت بين 7 و7.3.

أظهر اختبار T-test جدول (4) وجود فرق معنوي بين (pH) قبل المعالجة وبعدها داخل كل محطة، وكانت الفروق ذات دلالة إحصائية ($p < 0.001$). في المقابل، لم يُظهر تحليل التباين الأحادي وجود فروق معنوية بين المحطات في قيم الأس الهيدروجيني، سواء قبل المعالجة ($p = 0.218$) أو بعدها ($p = 0.589$). ويشير هذا الانخفاض إلى أن عملية المعالجة أدت إلى تعديل في خاصية الحموضة والقلوية للمياه، دون إحداث تغيرات كبير في طبيعة المياه، بقيت قيم الاس الهيدروجيني pH بعد المعالجة ضمن المجال المقبول لمياه الشرب حسب المواصفات القياسية الليبية والمواصفات الارشادية لمنظمة الصحة العالمية وهي 6.5-8.5، تتفق نتائج هذه الدراسة مع (غربي وآخرون، 2024) حيث وجد ان جميع عينات محطات التحلية كانت ضمن متطلبات المواصفات الليبية ومنظمة الصحة العالمية لمياه الشرب.

جدول رقم (3): نتائج تركيز العناصر الفيزيائية والكيميائية وكفاءة الازالة في محطات التناضح العكسي

العنصر	الحالة	المحطة 1	المحطة 2	المحطة 3	المحطة 4	المحطة 5	المحطة 6
pH	قبل	7.8 ± 0.1	7.9 ± 0.1	7.7 ± 0.2	7.6 ± 0.3	7.9 ± 0.1	7.8 ± 0.1
	بعد	7.3 ± 0.3	7.1 ± 0.1	7.3 ± 0.3	7 ±0.4	7.1 ± 0.2	7.2 ± 0.2
TDS mg/l	قبل	3176^{a} ± 95.9	4166^{b} ± 142.6	3203^{b} ± 124.0	5084^{d} ± 165.1	5119^{c} ± 101.7	6030^{d} ± 111.1
	بعد	521^{a} ± 15.8	128^{e} ± 13.1	421^{b} ± 13.3	525^{a} ± 14.5	333^{c} ± 11.3	213^{d} ± 13.4
	كفاءة الازالة	%84	%97	%87	%90	%93	%96
EC µS/cm²	قبل	5009^{e} ± 113.1	6996^{d} ± 81.4	5067^{e} ± 91.7	8663^{c} ± 80.3	8936^{b} ± 121.2	9727^{a} ± 96.3
	بعد	873^{a} ± 17.4	232^{e} ± 13.4	696^{b} ± 12.3	859^{a} ± 44.8	538^{c} ± 27.4	329^{d} ± 23.0
	كفاءة الازالة	%83	%97	%86	%90	%94	%97
Na^{+} mg/l	قبل	749^{c} ± 20.0	894^{ab} ± 14.4	632^{d} ± 10.1	856^{b} ± 18.9	920^{a} ± 15.6	886^{ab} ± 21.1
	بعد	76^{a} ± 4.6	33^{b} ± 4.2	63^{a} ± 7.5	66^{a} ± 6.3	67^{a} ± 6.2	62^{a} ± 3.7
	كفاءة الازالة	%90	%96	%90	%92	%93	%93
Ca^{2+} mg/l	قبل	876^{cd} ± 34.4	1058^{a} ± 44.7	733^{e} ± 23.9	840^{d} ± 21.3	971^{b} ± 26.6	928^{bc} ± 29.0
	بعد	54^{a} ± 5.6	16^{c} ± 2.4	46^{ab} ± 5.5	54^{a} ± 3.1	36^{b} ± 4.7	21^{c} ± 1.9
	كفاءة الازالة	%94	%99	%94	%94	%96	%98
Mg^{2+} mg/l	قبل	40^{bc} ± 3.2	36^{c} ± 1.9	32^{c} ± 3.1	46^{ab} ± 4.7	38^{bc} ± 1.5	53^{a} ± 4.6
	بعد	5^{c} ± 0.8	6^{bc} ± 0.6	9^{a} ± 0.7	5^{bc} ± 1.4	9^{a} ± 0.3	7^{ab} ± 0.6
	كفاءة الازالة	%89	%84	%72	%89	%77	%86
K^{+} mg/l	قبل	16^{c} ± 3.2	25^{b} ± 2.5	24^{bc} ± 2.9	27^{ab} ± 1.3	29^{ab} ± 2.1	35^{a} ± 4.3
	بعد	3^{c} ± 0.6	2^{d} ± 0.3	5^{b} ± 0.2	6^{a} ± 0.1	5^{b} ± 0.2	3^{cd} ± 0.4
	كفاءة الازالة	%67	%91	%79	%78	%83	%92
Cl^{-} mg/l	قبل	514^{c} ± 9.0	598^{b} ± 10.8	469^{d} ± 11.5	595^{b} ± 12.7	611^{b} ± 9.1	732^{a} ± 15.8
	بعد	54^{a} ± 2.7	19^{d} ± 1.9	33^{b} ± 1.7	36^{d} ± 0.9	28^{c} ± 1.5	26^{c} ± 0.7
	كفاءة الازالة	%90	%97	%93	%94	%95	%96
SO_4^{2-} mg/l	قبل	628^{d} ± 24.0	727^{c} ± 17.6	590^{d} ± 10.0	842^{b} ± 15.9	862^{b} ± 7.8	920^{a} ± 21.2
	بعد	80^{b} ± 4.0	42^{c} ± 3.5	67^{b} ± 7.6	154^{a} ± 6.7	42^{c} ± 4.5	30^{c} ± 3
	كفاءة الازالة	%73	%94	%89	%82	%95	%97
NO_3^{-} mg/l	قبل	22^{b} ± 1.5	10^{d} ± 1.0	18^{bc} ± 1.5	34^{a} ± 1.3	18^{c} ± 1.8	11^{d} ± 1.5
	بعد	8^{a} ± 0.3	3^{c} ± 0.4	6^{ab} ± 0.6	7^{a} ± 0.3	6^{b} ± 0.5	3^{c} ± 0.8
	كفاءة الازالة	%64	%74	%64	%78	%69	%77
HCO_3^{-} mg/l	قبل	344^{c} ± 14.5	416^{b} ± 15.7	288^{d} ± 12.3	479^{a} ± 16.4	463^{a} ± 13.3	374^{c} ± 15.3
	بعد	60^{b} ± 2.5	55^{b} ± 4.6	34^{cd} ± 1.5	30^{d} ± 2.1	85^{a} ± 4.4	42^{c} ± 1.5
	كفاءة الازالة	%82	%87	%88	%94	%82	%89
TH mg/l	قبل	2243^{bc} ± 117.0	2693^{a} ± 74.1	1847^{d} ± 132.4	2172^{c} ± 63.5	2494^{ab} ± 79.5	2422^{abc} ± 123.3
	بعد	160^{a} ± 8.9	64^{c} ± 7.9	152^{ab} ± 10.7	152^{ab} ± 9.1	131^{b} ± 10.1	85^{c} ± 6.1
	كفاءة الازالة	%93	%98	%92	%93	%95	%96

القيم داخل خلايا المحطات معروضة كمتوسط ± انحراف معياري لثلاث عينات مكررة .n=3 المتوسطات التي تحمل حروفًا مختلفة ضمن الصف نفسه تختلف معنويًا عند مستوى $P < 0.05$ حسب اختبار Tukey HSD.

جدول رقم (4): نتائج الإحصاءات الوصفية وتحليل التباين الأحادي واختبار (t) للخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه الخام والمياه المنتجة من محطات التناضح العكسي التجارية.

العنصر	الحالة	Max	Min	Mean	ANOVA F	ANOVA Sig.	T-test Sig.
pH	قبل	7.9	7.6	7.8	1.662	0.218	p<0.001
	بعد	7.3	7	7.2	0.769	0.589	
TDS mg/l	قبل	6030	3176	4626	250.646	p<0.001	p<0.001
	بعد	525	128	378	426.310	p<0.001	
EC µS/cm²	قبل	9727	5009	7830	1278.855	p<0.001	p<0.001
	بعد	873	232	618	333.121	p<0.001	
Na^+ mg/l	قبل	920	632	871	126.569	p<0.001	p<0.001
	بعد	76	33	65	20.988	p<0.001	
Ca^{2+} mg/l	قبل	1058	733	902	39.510	p<0.001	p<0.001
	بعد	54	16	41	44.981	p<0.001	
Mg^{2+} mg/l	قبل	53	32	39	15.109	p<0.001	p<0.001
	بعد	9	5	7	14.992	p<0.001	
K^+ mg/l	قبل	35	16	26	14.120	p<0.001	p<0.001
	بعد	6	2	5	67.684	p<0.001	
Cl^- mg/l	قبل	732	469	596	178.820	p<0.001	p<0.001
	بعد	54	19	31	153.120	p<0.001	
SO_4^{2-} mg/l	قبل	920	590	784	186.306	p<0.001	p<0.001
	بعد	170	30	54	233.889	p<0.001	
NO_3^- mg/l	قبل	34	10	18	99.764	p<0.001	p<0.001
	بعد	8	3	6	59.066	p<0.001	
HCO_3^- mg/l	قبل	479	288	395	74.192	p<0.001	p<0.001
	بعد	85	30	48	134.920	p<0.001	
TH mg/l	قبل	2693	1847	2333	24.947	p<0.001	p<0.001
	بعد	160	64	142	60.713	p<0.001	

تم حساب Min Max و Meanمن متوسطات المحطات الستة6=n

- **الاملاح الذائبة الكلية TDS والموصلية الكهربائية EC:**

سجلت نتائج جدول (3) تركيزا مرتفعا TDS وEC قبل المعالجة حيث تراوحت قيم TDS بين 3176 و6030 mg/l، في المحطات 1 و 6 على التوالي، اما EC فتراوحت بين 5009 و9727 µS/cm² في المحطة 1 و6 على توالي، بعد المعالجة انخفضت قيم TDS وEC بوضوح في جميع المحطات، حيث تراوحت قيم TDS بين 128 و525 mg/l. في المحطات 2 و4 على التوالي، اما EC فتراوحت بين 232 و873 µS/cm2 في المحطات 2 و1، كما أوضحت نتائج كفاءة الإزالة أن نسبة خفض TDS تراوحت بين 84% و97%، اما EC فتراوحت بين 83% و97%.اكد اختبار T-test جدول (4) وجود فروق معنوية بين قيم المياه قبل المعالجة وبعدها داخل كل محطة لتركيزي (TDS) و (EC) ($p < 0.001$). كما بيّن تحليل التباين الأحادي وجود فروق معنوية بين المحطات في تراكيز العنصرين قبل المعالجة، و بعد ها، عند مستوى الدلالة ($p < 0.001$) .

وتشير هذه النتائج إلى أن وحدات المعالجة كانت فعّالة في تقليل تركيز TDS وEC، إلا أن درجة الكفاءة اختلفت من محطة إلى أخرى، وهو ما قد يرتبط بنوع تقنية المعالجة المستخدمة، وحالة المرشحات أو الأغشية، وتركيز الأملاح في المياه الداخلة (الحسن والصمعاني، 2015) تتفق هذه الدراسة مع ما وجده (محمد وأخرون، 2025) من انخفاض في قيم TDS بسبب عملية التنقية، كذلك مع ما وجده (غربي وأخرون، 2024) حيث وصلت كفاءة الازالة إلي 90% ، كما اشارت دراسات (Ali et al., 2024؛ حسين، 2024) إلي انخفاض كبير في EC نتيجة إزالة الايونات الذائبة بعد عملية التحلية بالتناضح العكسي.

لم تتجاوز جميع قيم TDS من المحطات بعد المعالجة المواصفات القياسية الليبية والمواصفات الارشادية لمنظمة الصحة العالمية وهي 1000 mg/l، لم تحدد المواصفات الليبية ومواصفات منظمة الصحة العالمية قيمة إرشادية صحية EC في مياه الشرب، لذلك استُخدمت EC كمؤشر عام على محتوى الأملاح الذائبة، ومن المهم الإشارة إلى أن ارتفاع نسبة الملوحة ليس العامل الوحيد الذي قد يؤثر سلباً على صحة الإنسان، إذ أن انخفاض نسبة الأملاح أيضاً قد يكون غير ملائم، قد يسهم الاستهلاك الطويل للمياه منخفضة التمعدن في تقليل المدخول المائي من بعض المعادن، إلا أن الأثر الصحي الكلي يعتمد كذلك على المدخول الغذائي وعوامل فردية أخرى.

اما قبل المعالجة فقد تجاوزت جميع قيم TDS الحد الاعلى المسموح به، حيث تعكس هذه القيم ارتفاعاً واضحاً في المحتوى الملحي والمواد الذائبة في المياه الجوفية. ويُعزى هذا الارتفاع غالباً إلى زيادة الأملاح الذائبة الناتجة عن طبيعة المصدر المائي، والتركيب الجيولوجي أو الخزان الجوفي لمنطقة الدراسة، إن الارتفاع في مستويات الاملاح الذائبة الكلية في المياه قد يؤثر في الأشخاص الذين يعانون من أمراض الكلى (Memon et al., 2011)

- **الكالسيوم Ca^{2+} والمغنيسيوم Mg^{2+} العسرة الكلية TH:**

بينت نتائج جدول (3) ارتفاعًا واضحًا في تراكيز Ca^{2+} و Mg^{2+} و TH في المياه قبل المعالجة، حيث تراوحت قيم Ca^{2+} بين 733-1058 mg/l في المحطات 3 و2، وMg بين 32-55 mg/l، في المحطات 3 و6 بينما تراوحت قيم TH بين 1857-2494 mg/l، في المحطات 3و5 مما يدل على أن المياه الجوفية كانت ذات عسر مرتفع جدًا، حيث يرتبط ذلك بارتفاع تركيز الأيونات ثنائية التكافؤ، خصوصًا Ca^{2+} وMg^{2+} وبعد المعالجة بالتناضح العكسي انخفضت القيم بشكل كبيرة، إذ تراوحت تراكيز Ca^{2+} بين 16-54 mg/l في المحطات 1 و4 وMg^{2+} بين 5-9 mg/l في المحطات 1 و5، TH بين 64-160 mg/l في المحطات 2 و1.

قد تراوحت كفاءة إزالة Ca^{2+} بين 93% و98%، وكفاءة إزالة Mg^{2+} بين 72% و89%، وكفاءة خفض TH بين 92% و98% .أظهرت نتائج جدول (4) اختبار T-test وجود فروق معنوية بين قيم المياه قبل المعالجة وبعدها داخل كل محطة لكلٍ من Ca، وMg، وTH، وكانت جميع الفروق ذات دلالة إحصائية ($p < 0.001$). كما أظهر تحليل التباين الأحادي وجود فروق معنوية بين المحطات في قيم هذه المتغيرات، سواء قبل المعالجة أو بعدها، عند مستوى الدلالة نفسه ($p < 0.001$).

يعكس هذا الانخفاض فعالية وحدات التناضح العكسي في إزالة الأيونات المسؤولة عن العسر، خاصة أن أغشية RO تمتاز بقدرتها العالية على حجز الأيونات ثنائية التكافؤ نظرا لحجمها وشحنتها (البكوري، 2026)، تتفق هذه الدراسة مع (الشريف وإمريمي، 2025) حيث كانت اعلى نسبة إزالة للكالسيوم والمغنيسيوم 95% و96% ووصل تركيزهما بعد الازالة إلي 1.6 و0.4 mg/l بعد المعالجة، وتعتبر هذه التراكيز قليلة جدا مقارنة بالمواصفات الارشادية لمنظمة الصحة العالمية لمياه الشرب 200 و50 mg/l على التوالي، اما عسرة المياه فتصنف بين مياه متوسطة العسرة إلي مياه عسرة.

هذه الدراسة تتفق مع دراسة (Sarhat et al., 2023) حيث وجد ان كل العينات من محطات التحلية كان محتواها من الكالسيوم والماغنسيوم اقل من الحدود المسموح بها لمنظمة الصحة العالمية. ويُعد هذا الانخفاض الشديد في تركيز الكالسيوم والمغنيسيوم قضية صحية مهمة، خاصةً لدى الأطفال، نظراً لدور الكالسيوم في نمو العظام والأسنان (Huang et al., 2018)، ورغم أن الغذاء هو المصدر الأساسي للمعادن، فإن الاعتماد الطويل على مياه منخفضة جداً في المعادن قد يقلل المدخول اليومي منها، مما يؤدي بالجسم إلي سحب النقص من مخزون العظام (WHO, 2009). وقد وجدت دراسة (Huang et al., 2019) أن استهلاك المياه المعالجة قليلة المعادن ارتبط بانخفاض محتوى العظام المعدني، لكن العلاقة لا تثبت سبباً مباشراً لهشاشة العظام. لذلك يُنصح بإعادة تمعدن مياه RO أو ضمان كفاية المعادن من الغذاء.

اما قبل المعالجة فقد جاءت جميع القيم وللكالسيوم والعسرة أكبر من الحد الاعلى المسموح به بالمواصفات الارشادية لمنظمة الصحة العالمية 200 و500 mg/l، اما للماغنيسيوم فقد تجاوزت محطة واحدة الحد الاعلى المسموح 50 mg/l، بالتالي تعتبر المياه الجوفية غير صالحة للشرب قبل المعالجة من حيث العسرة والكالسيوم، حيث اشار (عون، 2002) إلى أن وجود الكالسيوم بتركيز عالية يسبب رائحة رديئة في المياه، كما أن ترسبه بشكل كربونات الكالسيوم يؤدي إلى حدوث مشاكل فنية في منظومات توزيع المياه

- **الكلوريد Cl^- والكبريتات SO_4^{2-}:**

تشير نتائج جدول (3) إلي انخفاضًا واضحًا في تراكيز أيونات Cl^-و SO_4^{2-} بعد المعالجة بمحطات التناضح العكسي، مما يدل على كفاءة جيدة لهذه المحطات في تحسين جودة مياه الشرب وخفض الأملاح الذائبة. تراوحت تراكيز Cl^- قبل المعالجة بين 469-732 mg/l في المحطات 3 و6 على التوالي، وانخفضت بعد المعالجة حيث تراوحت بين 19-54 mg/l في المحطات 2 و1 على التوالي، كما تراوحت تراكيز SO_4^{2-} قبل المعالجة بين 590-920 mg/l في المحطات 3 و6 على التوالي، ثم انخفضت بعد المعالجة لتتراوح بين 30-154 mg/lفي المحطات 6 و4 على التوالي، بنسبة كفاءة إزالة بين 73% و97%. اما Cl^-بلغت نسبة إزالة بين 90% و97%. أظهرت نتائج جدول (4) اختبار T-test وجود فروق معنوية بين قيم المياه قبل المعالجة وبعدها داخل كل محطة لكلٍ من Cl^- وSO_4^{2-} عند مستوى دلالة ($p < 0.001$) . كما أظهر تحليل التباين الأحادي وجود فروق معنوية بين المحطات قبل المعالجة وبعدها ($p < 0.001$).

يعكس هذا الانخفاض الكبير فعالية أغشية التناضح العكسي في حجز الأيونات الذائبة، خصوصًا الأملاح ثنائية الشحنة مثل الكبريتات، مع وجود اختلاف نسبي في كفاءة الإزالة بين المحطات، وقد يرجع ذلك إلى اختلاف حالة الأغشية، ضغط التشغيل وزمن الاستخدام وجودة المياه الجوفية، أو كفاءة الصيانة الدورية، تشير النتائج إلى أن محطات التناضح العكسي المدروسة أسهمت بوضوح في تحسين الخصائص الكيميائية للمياه.

عند مقارنة النتائج بمواصفات منظمة الصحة العالمية والمواصفات القياسية الليبية، والتي حددت التركيز الاعلى المسموح به SO_4^{2-} في مياه الشرب 250 و400 mg/l على التوالي، بينما كان الحدّ المسموح به Cl^- 250 mg/l في كلتا المواصفتين، بالتالي فان جميع المحطات بعد المعالجة سجلت نتائج اقل بكثير من المواصفات الليبية ومواصفات منظمة الصحة العالمية.

على الرغم من أن الكلوريد والكبريتات من الأيونات ذات الأهمية الفسيولوجية، فإن انخفاض تركيزهما في مياه الشرب لا يُعد بحد ذاته دليلًا مباشرًا على وجود خطر صحي، نظرًا لأن المدخول الأساسي من هذه الأيونات يُستمد غالبًا من الغذاء. وترتبط القيم الإرشادية لهذين الأيونين في مياه الشرب غالبًا بجوانب الطعم والقبول والتأثيرات المرتبطة بارتفاع التركيز، أكثر من ارتباطها بمخاطر ناتجة عن انخفاض التركيز. لذلك يمكن اعتبار الانخفاض مؤشرًا على انخفاض المحتوى المعدني للمياه.(Gabbasa et al., 2020)

اما قبل المعالجة فقد كانت نتائج المياه الجوفية للمحطات اعلى بكثير من المواصفات الليبية ومواصفات منظمة الصحة العالمية، يرجع الارتفاع الطبيعي في تركيز الكلوريد والكبريتات في المياه الجوفية غالبًا إلى التفاعل الجيوكيميائي بين المياه والصخور الحاوية للأملاح الذائبة، خصوصًا في البيئات الجافة وشبه الجافة. إذ يؤدي ذوبان معادن مثل الهاليت إلى زيادة تركيز الكلوريد، بينما يسهم ذوبان الجبس والأنهيدريت في رفع تركيز الكبريتات (Hamma et al., 2025)

ارتفاع تركيز الكلوريد في مياه الشرب لا يرتبط عادةً بخطر صحي مباشر عند المستويات الشائعة، إلا أنه قد يؤثر في قبول الماء بسبب الطعم المالح عند تراكيز تتجاوز نحو 250 mg/l، كما قد يسهم في تآكل المعادن في شبكات التوزيع (WHO, 2003). أما الكبريتات، فإن ارتفاعها قد يسبب طعمًا غير مقبول وقد يرتبط بتأثيرات هضمية عند التراكيز العالية جدًا، لذلك توصي منظمة الصحة العالمية بإبلاغ السلطات الصحية عند تجاوز تركيز الكبريتات 500 mg/lفي مصادر مياه الشرب (WHO, 2004؛ خنفر، 2010).

- **الصوديوم Na^+ والبوتاسيوم K^+:**

توضح نتائج جدول (3) ارتفاعًا واضحًا في تراكيز الصوديوم Na في مياه المحطات قبل المعالجة، حيث تراوحت قيم الصوديوم بين 632-920 mg/lفي المحطات 3 و5 على التوالي، والبوتاسيوم K تراوح بين 16-35 mg/l، في المحطات 1 و6 على التوالي، اما بعد المعالجة فقد انخفضت قيم الصوديوم فتراوحت بين 33-76 mg/l في المحطات 2 و1 على التوالي، اما البوتاسيوم فقد تراوح بين 2-6 mg/l في المحطات 2 و4 mg/l على التوالي. تراوحت كفاءة إزالة الصوديوم بين 90% في المحطات 1 و3، و96% في المحطة 2، اما كفاءة إزالة البوتاسيوم بين 78% في المحطة 1 و2 و3، و92% في المحطات 2 و6، أظهر نتائج جدول (4) اختبار T-test وجود فروق معنوية بين قيم المياه قبل المعالجة وبعدها داخل كل محطة لكلٍ من (Na) و(K) ($p < 0.001$). كما أظهر تحليل التباين الأحادي وجود فروق معنوية بين المحطات لكلٍ من الصوديوم والبوتاسيوم، سواء قبل المعالجة أو بعدها ($p < 0.001$).تعكس هذه القيم قدرة أنظمة التناضح العكسي على خفض تركيز الأملاح الذائبة، نتيجة اعتمادها على أغشية شبه منفذة تحد من مرور الأيونات المعدنية إلى المياه المعالجة.

بمقارنة نتائج المحطات بعد المعالجة بالمواصفات الليبية ومواصفات منظمة الصحة العالمية والتي حددت التركيز الاعلى المسموح به للصوديوم 200 mg/l في كلا المواصفتين، يتضح ان نتائج جميع المحطات كانت اقل بكثير من المواصفات، ايضا سجل البوتاسيوم قيم اقل بكثير من المواصفات الليبية التي حددت تركيز 20 mg/l كحد أعلى ومواصفات منظمة الصحة العالمية التي حددت 40 mg/l كحد اعلى، مع أن انخفاض تراكيز الصوديوم والبوتاسيوم يدل على كفاءة عالية في إزالة الأملاح، إلا أن الانخفاض الشديد في المحتوى المعدني للمياه قد يؤثر في خصائص مياه الشرب من حيث الطعم والتوازن الأيوني. لذلك ينبغي عدم تفسير الانخفاض الكبير في العناصر المعدنية بوصفه مؤشرًا إيجابيًا لجودة المياه، بل يجب تقييمه ضمن حدود الجودة المطلوبة لمياه الشرب. وتشير منظمة الصحة العالمية إلى أن المياه الناتجة عن عمليات نزع الأملاح أو التحلية قد تحتاج إلى دراسة من حيث آثارها الصحية والتغذية المحتملة عند الاستهلاك طويل الأمد (WHO, 2005)

نتائج هذه الدراسة تتفق مع ما وجده (Mohamed et al., 2025) من انخفاض شديد في تركيز الصوديوم والبوتاسيوم، كذلك مع ما ذكرته دراسة البكوري (2026) التي أوضحت أن عمليات تحلية المياه قد تؤدي إلى انخفاض كبير في العناصر المعدنية، بما في ذلك الصوديوم والبوتاسيوم، مما قد يجعل المياه أقل توازنًا من الناحية الأيونية. كما أشارت الدراسة إلى إمكانية حدوث إزالة شبه كاملة للبوتاسيوم في بعض العينات، وهو ما يستدعي تقييم جودة المياه المعالجة ليس فقط من جانب خفض الملوحة، بل أيضًا من جانب الحفاظ على الحد المناسب من المكونات المعدنية الضرورية.

اما قبل المعالجة فقد سجلت جميع المحطات تركيزا للصوديوم اعلى من الحد المسموح به للمواصفات الليبية ومواصفات منظمة الصحة العالمية وهي 200 mg/l، اما البوتاسيوم فقد سجلت جميع المحطات تركيزا اعلى من الحد الاعلى للمواصفات الليبية وهي 20 mg/l ما عدا المحطة 1، كذلك كانت التراكيز اعلى من الحد المسموح في مواصفات منظمة الصحة العالمية 40 mg/l. يرجع ارتفاع تركيز الصوديوم والبوتاسيوم في المياه الجوفية إلى عدة عوامل جيولوجية وبشرية، أهمها تفاعل المياه مع الصخور والمعادن الحاملة للأملاح أثناء حركة المياه. إذ تؤدي تجوية معادن السيليكات وذوبان أملاح التربة إلى تحرير أيونات الصوديوم والبوتاسيوم، كما تسهم عمليات التبادل الأيوني بين المياه الجوفية ومعادن الطين في زيادة تركيز الصوديوم (Senthilkumar et al., 2017; Krishan et al., 2021).

- **البيكربونات HCO_3^-:**

تشير نتائج جدول (3) إلى انخفاض واضح في تراكيز البيكربونات بعد المعالجة بمحطات التناضح العكسي، تراوحت تراكيز البيكربونات قبل المعالجة بين 288-479 mg/l في المحطات 3 و4 على التوالي، وانخفضت بعد المعالجة حيث تراوحت بين 30-85 mg/lفي المحطات 4 و5 على التوالي بنسبة كفاءة إزالة تراوحت بين 82% في المحطة 5 و94%

في المحطة 4. يبين جدول (4) اختبار T-test وجود فرق معنوي بين قيم (HCO_3) قبل المعالجة وبعدها داخل كل محطة ($p < 0.001$). كما أظهر تحليل التباين الأحادي وجود فروق معنوية بين المحطات في قيم (HCO_3)، سواء قبل المعالجة أو بعدها ($p < 0.001$).

عند مقارنة نتائج المحطات بعد المعالجة بمواصفات منظمة الصحة العالمية والمواصفات الليبية، يتضح ان جميع المحطات كانت اقل بكثير من الحد المسموح بع وهو 200 mg/l لمياه الشرب، وجدت دراسة (المهدي وأخرون، 2025) ان 80% من محطات التحلية المدروسة قد خفضت البيكربونات إلي اقل من الحد الادنى لمواصفات منظمة الصحة العالمية, كذلك تتفق هذه الدراسة مع دراسة (المرغني وأخرون 2026) حيث وجد ان متوسط تركيز البيوكربونات 17.99 ملجرام/لتر وهو اقل من الحد الاقصى المسموح به في المواصفات المحلية والدولية، انخفاض البيكربونات يُعد مؤشراً مهماً على انخفاض القدرة التنظيمية للمياه، خاصة إذا ترافق مع انخفاض القلوية الكلية.

قبل المعالجة كانت نتائج جميع المحطات اعلى من مواصفات منظمة الصحة العالمية، تشير الدراسات إلى أن ارتفاع تركيز البيكربونات HCO_3^- في المياه الجوفية يرتبط غالبًا بتفاعل المياه مع الصخور والمعادن الكربوناتية، خصوصًا الحجر الجيري والدولوميت، حيث يذوب ثاني أكسيد الكربون الموجود في التربة أو المياه الجوفية مكوّنًا حمض الكربونيك، الذي يعمل على إذابة معادن الكربونات وإطلاق أيونات البيكربونات إلى الماء. (Mahaqi et al., 2018; Karunanidhi et al., 2020)

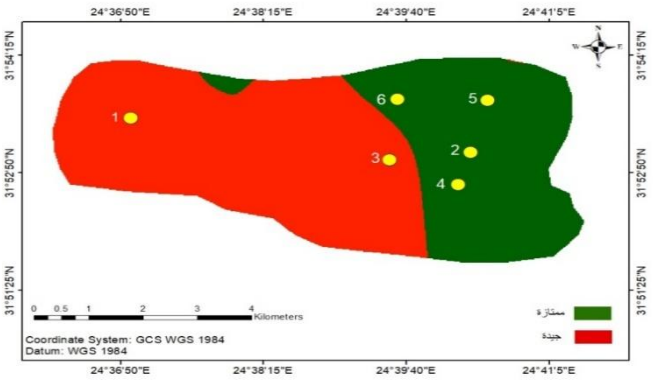
- **النترات NO_3^-:**

تشير نتائج الجدول (3) إلى انخفاض واضح في تراكيز النترات NO^-_3 بعد المعالجة، إذ تراوحت تراكيزها قبل المعالجة بين 10-34 mg/l، وسجلت أدنى قيمة في المحطة 2 وأعلى قيمة في المحطة 4. وبعد المعالجة انخفضت التراكيز ليتراوح بين 3-8 mg/l، وسجلت أدنى قيمة في المحطة 2 و6 وأعلى قيمة في المحطة 1، وبكفاءة إزالة تراوحت بين 64% و78%. أظهر اختبار T-test جدول (4) وجود فرق معنوي بين قيم NO_3^- قبل المعالجة وبعدها داخل كل محطة ($p < 0.001$). كما أظهر تحليل التباين الأحادي وجود فروق معنوية بين المحطات في قيم النترات NO_3^-، سواء قبل المعالجة أو بعدها ($p < 0.001$). ويعكس هذا الانخفاض قدرة وحدات التناضح العكسي على خفض تركيز النترات. وتتفق هذه النتائج مع ما ذكره (Gomelya et al., 2022) من أن أنظمة التناضح العكسي قادرة على تقليل النترات في المياه، مع اختلاف كفاءة الإزالة تبعًا لنوع الغشاء وتركيز النترات في المياه الخام وظروف التشغيل. تعتبر هذه النتائج قريبة من دراسة Al-Haen et al.,(2026). كما أن القيم المسجلة قبل وبعد المعالجة كانت أقل من القيمة الإرشادية لمنظمة الصحة العالمية البالغة 50 mg/l للنترات في مياه الشرب، مما يشير إلى ملاءمة المياه المعالجة من حيث تركيز النترات.

- **مؤشر جودة المياه WQI:**

يعبر مؤشر جودة المياه عن البيانات بطريقة بسيطة وذلك بالتقليل من العدد الكبير من العناصر، حيث يقوم بتقييم جودة المياه في المصدر بعدد وحيد، متغيرات هذه المعادلة هي قياس العناصر الاكثر تأثيرا في نوعية المياه، بعد الحصول على هذا العدد يتم مقارنته بمعايير تصنيفية نظامية، مقسمة إلي مستويات من السيئ جدا إلي الممتاز (Tirkey et al., 2013) لدراسة جودة مياه محطات التناضح العكسي بعد المعالجة في منطقة الدراسة، أُخذت مجموعة من الخصائص الفيزيائية والكيميائية في الاعتبار عند حساب مؤشر جودة المياه، وهي: pH، TDS، EC، TH، Ca^{+2}، Mg^{+2}، Na^+، K^+، Cl^-، NO_3^-، SO_4^{-2}، HCO^-_3. وقد استُخدمت هذه المعايير في حساب مؤشر جودة المياه (WQI). وقد أظهرت قيم مؤشر جودة المياه المحسوبة لعدد 6 محطات تحلية جدول (5)، توافقًا مع مؤشر جودة المياه المستخدم في تصنيف صلاحية المياه للشرب، حيث تراوحت قيم مؤشر جودة المياه لمياه المحطات المعالجة بين 10-26. وبناءً على ذلك، صُنّفت المياه المعالجة بمحطات التناضح العكسي على أنها ممتازة بنسبة 66.7%، وجيدة بنسبة 33.3%.

كما أظهر التوزيع المكاني لمؤشر جودة المياه شكل (2) وجود تباين واضح بين مواقع محطات التحلية؛ إذ تركزت المياه ذات الجودة الأعلى في الجزء الشرقي من منطقة الدراسة، والممثلة باللون الأخضر، بينما سادت الجودة المتوسطة في الجزء الغربي بالون الاحمر. يعكس هذا التباين اختلاف كفاءة وحدات التناضح العكسي ونوعية المياه الخام ومستوى صيانة وتشغيل المحطات.



شكل رقم (2): خريطة التوزيع المكاني لمؤشر جودة المياه في منطقة الدراسة

جدول رقم (5): قيم مؤشر جودة المياه (WQI) للمحطات المدروسة.

رقم المحطة	WQI
1	26
2	10
3	26
4	11
5	16
6	17

الخلاصة:

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم الخصائص الفيزيائية والكيميائية لمياه الشرب المنتجة من محطات التناضح العكسي في منطقة بئر الأشهب، وتحديد كفاءة هذه المحطات في خفض الملوحة والعناصر الذائبة، كذلك تصنيف المياه المنتجة باستخدام مؤشر جودة المياه. أظهرت النتائج أن المياه الجوفية الخام ذات مستوى مرتفع من الأملاح والعناصر الذائبة، في حين أدت المعالجة بالتناضح العكسي إلى انخفاض معنوي في جميع الخصائص والعناصر المدروسة مقارنة بالمياه قبل المعالجة، مع بقاء قيم الأس الهيدروجيني للمياه المنتجة ضمن المجال المقبول لمياه الشرب. كما بينت قيم مؤشر جودة المياه أن المياه المنتجة من أربع محطات صُنفت ضمن فئة المياه الممتازة، بينما صُنفت مياه محطتين ضمن فئة المياه الجيدة، كذلك أظهر التوزيع المكاني تفاوتًا في جودة المياه بين مواقع المحطات، مع تركز الجودة الأعلى في الجزء الشرقي وانخفاضها نسبيًا باتجاه الجزء الغربي من منطقة الدراسة.

تظل قابلية تعميم هذه النتائج مقيدة باقتصار الدراسة على ست محطات تجارية، إضافة إلى اقتصار التقييم على الخصائص الفيزيائية والكيميائية المختارة؛ ومن ثم فإن النتائج تمثل حالة المحطات المدروسة خلال فترة الدراسة ولا تعكس بالضرورة التغيرات الزمنية أو الموسمية المحتملة. قدمت الدراسة دليلًا ميدانيًا على فعالية محطات التناضح العكسي في تحويل المياه الجوفية مرتفعة الملوحة إلى مياه ذات جودة مقبولة للشرب، وأسهمت في سد النقص في البيانات المحلية المتعلقة بمحطات التحلية التجارية في منطقة بئر الأشهب. كما توفر نتائجها خط أساس علميًا يمكن الاستناد إليه في متابعة أداء هذه المحطات وتقييم التوازن بين كفاءة إزالة الأملاح والمحافظة على المحتوى المعدني الملائم للمياه المنتجة

قائمة المراجع:

1. أبوظهير، عبد الله علي، والعزيبي، نادر عبد الحميد، والرياني، عبد الرحمن أحمد. (2023). تقدير كمية الأملاح الذائبة الكلية والموصلية الكهربائية في المياه المنتجة من محطات تحلية مياه الآبار الواقعة ببلدية تاجوراء. مجلة علوم البحار والتقنيات البيئية، 9(1)، A63–A74. https://doi.org/10.59743/jmset.v9i1.143
2. أحمد، سلوى هادي. (2017). تقييم المخاطر الصحية ومؤشرات التلوث للمياه الجوفية في منطقة العلم بمحافظة صلاح الدين، العراق. مجلة المثنى للهندسة والتكنولوجيا، 5(2)، 62–69. https://doi.org/10.18081/mjet/2017-5/62-69
3. البكوري، حسنية السني رجب. (2026). تقييم كفاءة وحدات التحلية في معالجة مياه الآبار الجوفية وتأثيرها على التوازن الكيميائي للعناصر الصغرى والكبرى: دراسة حالة مناطق مختارة بمدينة طرابلس. مجلة الفاروق للعلوم، 2(1)، 879–903.
4. الجالي، جمعة أرحومة جمعة، وسليمان، محمود محمد محمود. (2023). التحليل المكاني لجودة المياه الجوفية في بلدية بئر الأشهب. مجلة جامعة سرت للعلوم الإنسانية، 13(1)، 1–7. https://doi.org/10.37375/sujh.v13i1.1317

5. الحسن، شكري إبراهيم، والصمعاني، جاسم جبار. (2015). تقييم جودة مياه الشرب المزالة الأملاح بتقنية(R.O.) في مدينة البصرة باعتماد مؤشر الملوحة. مجلة دراسات البصرة، 10(19)، 152–164 .
6. حسين، محمد حسين صالح. (2024). تقييم جودة مياه محطات التحلية التجارية والمياه المعبأة في مدينة بنغازي وضواحيها [رسالة ماجستير غير منشورة]. جامعة بنغازي، كلية الهندسة، قسم الهندسة المدنية.
7. خنفر، عايد راضي. (2010). التلوث البيئي: الهواء، الماء، الغذاء (ط. 1). دار اليازوري العلمية للنشر والتوزيع .
8. الشافعي، نظام عبد الكريم، والمهندي، حسن إبراهيم. (2005). المياه المعبأة في دولة قطر مع دراسة سلوك مستهلكيها. مجلة جامعة قطر للآداب، 1(27)، 129–134.
9. شحادة، مازن يونس. (2012). دراسة فعالية أجهزة الفلترة المنزلية العاملة بتقنية التناضح العكسي (R.O.) على جودة مياه الشرب [رسالة ماجستير غير منشورة]. جامعة تشرين.
10. الشريف، عمر أحمد، وإمريمي، علي محمد. (2025). تقييم جودة مياه الشرب المعالجة بأجهزة التناضح العكسي المنزلية (RO) في مدينتي سبها ووادي الشاطئ، جنوب ليبيا. المجلة الليبية لعلوم وتكنولوجيا البيئة، 7(3)، A41–A47. https://doi.org/10.63359/jexxah79
11. عون، أحمد أمحمد محمد. (2002). الماء: من المصدر إلى المكب (ط. 1). الهيئة العامة للبيئة .
12. غربي، خليفة حامد سليمان، وبوحليقة، علي عبد الرازق عمر، وآدم، حيدر محمد سليمان. (2024). تقييم جودة مياه الشرب لمحطات التحلية التجارية في مدينة الكفرة، ليبيا. مجلة العلوم الإنسانية العربية، 5(1)، 1–11 .
13. محمد، أحمد عبد السلام عوض، وعبد الله، عبد الله أبوبكر طيب، والهين، محمد عبد الهادي السنوسي، ومصباح، رزق الله عبد الله يونس، ومحمود، سالم محمد عبد العالي. (2025). تأثير المياه السوداء على جودة إنتاج محطات التناضح العكسي في مدينة طبرق. في عبد السلام الصالحين محمد، وحسين مسعود بومدينة، وأشرف مصطفى أبوسنينة، وفتحية عبد الجواد موسى (محررون)، بحوث المؤتمر العلمي الأول لكلية العلوم، جامعة سرت: التلوث البيئي وتحديات الاستدامة البيئية) الجزء الثاني، ص ص. 382–395). مركز البحوث والاستشارات، جامعة سرت .
14. المرغني، الهادي مفتاح عبد السلام، وبالنور، ماجدة محمد عيسى، وكريم، عبد الستار صالح مولود. (2026). التقييم الكيميائي والفيزيائي لجودة مياه الشرب بوحدات التنقية في المحلات التجارية: دراسة حالة بلدية العزيزية، ليبيا. مجلة العلوم الشاملة، 10(39)، 878–891 https://doi.org/10.65405/0fxv0r52 .
15. المركز الوطني للمواصفات والمعايير القياسية. (1992). المواصفة القياسية الليبية رقم 82: مياه الشرب.
16. المعموري، شيماء عبيس حسين. (2017). تقييم كفاءة محطة تصفية مياه الشرب في مجمع حي الحسين، قضاء الحمزة الغربي. مجلة جامعة بابل للعلوم الصرفة والتطبيقية، 25(6)، 1906–1918 .
17. المهدي، محمد ونيس امجيحيد، والبنقية، صالح عبد الرحيم أحمد، والقداري، خليفة فرج. (2025). تقييم جودة المياه في أنظمة معالجة المياه بمحطات التحلية التجارية (المرشحات) بمدينة بن جواد، ليبيا. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، 6(2)، 381–396 https://doi.org/10.53796/hnsj62/29 .
18. Al-Haen, M., Al-Haen, I., Abdullah, A., Abdulqadir, H., Mohamed, A., & Alabed, A. (2026). Spatial and seasonal distribution of nitrate and phosphate contamination in groundwater in Wadi Al-Tarfawi, northeastern Libya. Alqalam Journal of Medical and Applied Sciences, 9(1), 288–294. https://doi.org/10.54361/ajmas.269145
19. Ali, S., Ali, A., Khaleefah, R., Salih, S., Emran, R., Al-Diab, A., & Othman, K. (2024). Chemical and microbial analysis of commercial bottled drinking water available in Surman City markets. Libyan Medical Journal, 16(2), 111–118. https://lmj.ly/index.php/ojs/article/view/50
20. American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater (19th ed.). American Public Health Association .
21. Black, C. A. (Ed.). (1965). Methods of soil analysis (Parts 1–2, Agronomy Monograph No. 9). American Society of Agronomy .
22. Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A water quality index—Do we dare? Water & Sewage Works, 117(10), 339–343 .
23. Gabbasa, M. A., Asbany, N. H., & Sultan, O. M. (2020). Analysing the chemical and biological properties to evaluate the quality of bottled drinking water in the city of Tripoli, Libya. The University Bulletin, 22(3), 1–19.
24. Gomelya, M., Shabliy, T., Makarenko, I., & Vakulenko, A. (2022). Efficiency of reverse osmosis and ion exchange in water purification from nitrates. Journal of Ecological Engineering, 23(10), 172–180. https://doi.org/10.12911/22998993/152457
25. Hamma, B., Bekkouche, M. F., Bouaicha, F., Elnagdy, K. A., Alzaed, A., Barkat, A., Randazzo, A., Andualem, M. S., & Hussein, E. E. (2025). Hydrogeochemical assessment of groundwater for agricultural suitability in the Ksour Mountains, Algeria. Scientific Reports, 15, Article 36441. https://doi.org/10.1038/s41598-025-20352-8

26. Horton, R. K. (1965). An index number system for rating water quality. Journal of the Water Pollution Control Federation, 37(3), 300–306.
27. Huang, Y., Wang, J., Tan, Y., Wang, L., Lin, H., Lan, L., Xiong, Y., Huang, W., & Shu, W. (2018). Low-mineral direct drinking water in school may retard height growth and increase dental caries in schoolchildren in China. Environment International, 115, 104–109. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.02.021
28. Huang, Y., Ma, X., Tan, Y., Wang, L., Wang, J., Lan, L., Qiu, Z., Luo, J., Zeng, H., & Shu, W. (2019). Consumption of very low mineral water is associated with lower bone mineral content in children. The Journal of Nutrition, 149(11), 1994–2000. https://doi.org/10.1093/jn/nxz161
29. Ilyas, A., & Vankelecom, I. F. J. (2023). Designing sustainable membrane-based water treatment via fouling control through membrane interface engineering and process developments. Advances in Colloid and Interface Science, 312, Article 102834. https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.102834
30. Irhema, S. I. S., & Arhouma, A. A. S. (2024). Assessing the drinking water quality and its commercial purification units efficiency distributed in Alassaba Municipality, Libya. Scientific Journal for the Faculty of Science–Sirte University, 4(1), 50–58. https://doi.org/10.37375/sjfssu.v4i1.2523
31. Kadhim, R. A., Khudhair, B. H., & Jaafar, M. S. (2023). Comparative study of water desalination using reverse osmosis (RO) and electrodialysis systems (ED): Review. Journal of Engineering, 29(4), 61–77. https://doi.org/10.31026/j.eng.2023.04.04
32. Kandeal, A. W., El-Naggar, A. A., Sharaby, M. R., Sharshir, S. W., Swidan, A., Abdelaziz, G. B., Abdullah, A. S., Elsaid, A. M., Ghazaly, N. M., & El-Samadony, M. O. A. (2024). Augmentation of the tubular distiller performance via hot air injection from a parabolic trough collector, nanocoating, and nanofluid. Solar Energy, 277, Article 112743. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112743
33. Karunanidhi, D., Aravinthasamy, P., Deepali, M., Subramani, T., & Roy, P. D. (2020). The effects of geochemical processes on groundwater chemistry and the health risks associated with fluoride intake in a semi-arid region of South India. RSC Advances, 10, 4840–4859. https://doi.org/10.1039/C9RA10332E
34. Krishan, G., Sejwal, P., Bhagwat, A., Prasad, G., Yadav, B. K., Kumar, C. P., Kansal, M. L., Singh, S., Sudarsan, N., Bradley, A., Sharma, L. M., & Muste, M. (2021). Role of ion chemistry and hydro-geochemical processes in aquifer salinization—A case study from a semi-arid region of Haryana, India. Water, 13(5), Article 617. https://doi.org/10.3390/w13050617
35. Kumar, J. S., Manoharan, N., & Udayakumar, R. (2019). Application of Water Quality Index (WQI) for groundwater quality interpretation. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 8(12), 1862–1866. https://doi.org/10.35940/ijitee.L2866.1081219
36. Mahaqi, A., Moheghi, M. M., Mehiqi, M., & Moheghy, M. A. (2018). Hydrogeochemical characteristics and groundwater quality assessment for drinking and irrigation purposes in Mazar-i-Sharif City, North Afghanistan. Applied Water Science, 8, Article 133. https://doi.org/10.1007/s13201-018-0768-9
37. Memon, M., Soomro, M. S., Akhtar, M. S., & Memon, K. S. (2011). Drinking water quality assessment in southern Sindh, Pakistan. Environmental Monitoring and Assessment, 177, 39–50. https://doi.org/10.1007/s10661-010-1616-z
38. Mohamed, A. A. A., Bouzeed, M. A., Al-Haen, M. A., Alabd, A. M., Abdulqadir, H. F. Y., & Alhendawi, R. A. M. (2025). Hydro chemical study to assess the quality of water produced by reverse osmosis plants in residential complexes in Tobruk City. American-Eurasian Journal of Scientific Research, 20(1), 1–10. https://doi.org/10.5829/idosi.aejsr.2025.01.10
39. Moumni, M., & El Aoud, M. M. (2022). Fuzzy logic control of a brackish water reverse osmosis desalination process. Computers & Chemical Engineering, 167, Article 108026. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.108026
40. Raghunath, H. M. (1987). Ground water (2nd ed.). Wiley Eastern.
41. Richards, L. A. (Ed.). (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils (Agriculture Handbook No. 60). U.S. Department of Agriculture.
42. Sarhat, A. R., Mohsin, M., & Khalil, M. I. (2023). Evaluation of water quality in household water treatment systems (filters) used in Kalar City, Sulaimaniyah, Iraq. Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research Series A: Physical Sciences, 66(1), 95–102. https://doi.org/10.52763/PJSIR.PHYS.SCI.66.1.2023.95.102
43. Senthilkumar, S., Balasubramanian, N., Gowtham, B., & Lawrence, J. F. (2017). Geochemical signatures of groundwater in the coastal aquifers of Thiruvallur District, South India. Applied Water Science, 7, 263–274. https://doi.org/10.1007/s13201-014-0242-2
44.

45. Tirkey, P., Bhattacharya, T., & Chakraborty, S. (2013). Water quality indices—Important tools for water quality assessment: A review. International Journal of Advances in Chemistry, 1(1), 15–28. https://doi.org/10.5121/ijac.2015.1102
46. World Health Organization. (2003). Chloride in drinking-water: Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality (WHO/SDE/WSH/03.04/3.(
47. World Health Organization. (2004). Sulfate in drinking-water: Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality (WHO/SDE/WSH/03.04/114.(
48. World Health Organization. (2005). Nutrients in drinking-water. https://www.who.int/publications/i/item/9241593989
49. World Health Organization. (2009). Calcium and magnesium in drinking-water: Public health significance. https://www.who.int/publications/i/item/9789241563550
50. World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum. World Health Organization.
51. Yadav, A. K., Khan, P., & Sharma, S. K. (2010). Water Quality Index assessment of groundwater in Todaraisingh Tehsil of Rajasthan State, India: A greener approach. E-Journal of Chemistry, 7(S1), S428–S432. https://doi.org/10.1155/2010/419432