Al-Farouk journal of sciences
Volume (2), Issue (1) (March, 2026)
ISSN: 3135-2359

مجلة الفاروق للعلوم
المجلد (2) العدد 1 مارس 2026
ردمد: 3135-2359

تقييم كفاءة وحدات التحلية في معالجة مياه الآبار الجوفية وتأثيرها على التوازن الكيميائي للعناصر الصغرى والكبرى – دراسة حالة: مناطق مختارة بمدينة طرابلس

حسنية السني رجب البكوري
المعهد العالي للتقنيات الزراعية بالغيران طرابلس
Husniaalbakouri@amail.com

Evaluating the efficiency of desalination units in treating groundwater and their impact on the chemical balance of micro- and macro-elements – A case study: Selected areas in Tripoli

Hassaniya Al-Sani Rajab Al-Bakouri
Higher Institute of Agricultural Technologies, Al-Gheran, Tripoli

تاريخ الاستلام: 2026/01/13 تاريخ المراجعة 18 / 2 / 2026 تاريخ القبول:2026/03/12- تاريخ النشر: 24/ 03/ 2026

الملخص

هدف البحث إلى تقييم كفاءة وحدات التحلية المنزلية في معالجة مياه الآبار الجوفية، ودراسة مدى تأثير هذه العمليات على التوازن الكيميائي والخصائص الفيزيوكيميائية للمياه في مناطق مختارة بمدينة طرابلس (الحي الصناعي، عين زارة، سوق الجمعة، ووادي الربيع) .واستخدم المنهج التجريبي التحليلي، حيث تم جمع عينات من أربعة آبار بمواقع وأعماق مختلفة، وأجريت عليها سلسلة من التحاليل المخبرية الدقيقة قبل وبعد عملية التحلية؛ شملت قياس الأس الهيدروجيني(pH) ، التوصيل الكهربائي(EC) ، مجموع الأملاح الذائبة(TDS) ، بالإضافة إلى تركيز الكاتيونات الرئيسية (الصوديوم، البوتاسيوم، والكالسيوم).

وخلص، البحث إلى أن مياه الآبار الخام في معظم مناطق تعاني من تدهور ملحي حاد يتجاوز الحدود المسموح بها، خاصة في منطقتي عين زارة وسوق الجمعة. ونجاح تقنيا لوحدات التحلية في خفض الملوحة الكلية بنسب إزالة تجاوزت 90%، مما حول المياه إلى فئة العذبة كيميائيا. وهناك تجريد معدني شبه كامل لعناصر الكالسيوم والبوتاسيوم، والتي انخفضت إلى مستويات غير مكتشفة(ND) ، مع ميل طفيف في قيم pH نحو الحامضية الضعيفة.

وأوصى البحث بضرورة تفعيل الرقابة الدورية على محطات التحلية لضمان عدم فقدان العناصر المعدنية الأساسية، وأهمية إجراء عمليات إعادة التمعدن لتعويض النقص في الكالسيوم والبوتاسيوم حفاظا على الصحة العامة. والتوسع في الدراسات البيولوجية والمكانية باستخدام تقنيات (GIS) لرسم خرائط كنتورية توضح توزيع التلوث الملحي في الخزان الجوفي بالمنطقة.

الكلمات الافتتاحية: كفاءة وحدات التحلية، معالجة مياه، الآبار الجوفية، التوازن الكيميائي، العناصر الصغرى والكبرى.

Abstract

This research aims to evaluate the efficiency of domestic desalination units in treating groundwater and to investigate the impact of these processes on the chemical balance and physicochemical properties of water in selected areas of Tripoli (Al-Hai Al-Sinai, Ain Zara, Souq Al-Jumaa, and Wadi Al-Rabie). The researcher employed an analytical experimental approach, collecting samples from four wells of varying locations and depths. A series of rigorous laboratory analyses were conducted before and after the desalination process, covering Hydrogen ion concentration (pH), Electrical Conductivity (EC), Total Dissolved Solids (TDS), and the concentrations of major cations (Sodium, Potassium, and Calcium).

The research concluded that raw well water in most of the study areas suffers from severe salinity degradation exceeding permissible limits, particularly in the Ain Zara and Souq Al-Jumaa regions. The results demonstrated significant technical success of the desalination units in reducing total salinity, with removal rates exceeding 90%, thereby converting the water into a chemically fresh category. However, the results revealed a nearly complete mineral stripping of Calcium and Potassium, which dropped to non-detectable (ND) levels, along with a slight shift in pH values toward weak acidity.
The study recommended the necessity of activating periodic monitoring of desalination units to ensure the retention of essential mineral elements and highlighted the importance of implementing remineralization processes to compensate for the deficiency in Calcium and Potassium for public health safety. Furthermore, it recommended expanding biological and spatial studies using Geographic Information Systems (GIS) to create contour maps illustrating the distribution of saline contamination within the regional aquifer.

المقدمة

تعد مياه الشرب الركيزة الأساسية لاستمرار الحياة على سطح الأرض والمورد الطبيعي الأكثر حيوية للإنسان. ونظرا لارتباط المياه بالصحة العامة، فقد أضحى توفير المياه النقية مطلبا استراتيجيا للمجتمعات الصحية، وهو ما تجسد في الهدف السادس من أهداف التنمية المستدامة السبعة عشر التي وضعتها الأمم المتحدة وتطمح دول العالم قاطبة إلى تحقيقها بحلول عام 2030م. ومع التزايد السكاني المطرد، برزت تحديات جسيمة أمام دول العالم النامي التي ترزح تحت وطأة شح الموارد المائية، مما ضاعف الطلب على المياه الصالحة للشرب لتلبية الاحتياجات اليومية. وزاد من حدة هذه الأزمة التأثيرات المتطرفة للتغير المناخي، وظواهر التصحر، والتلوث البيئي، مما شكل ضغطا مستمرا على الحكومات المحلية لاستحداث موارد مائية جديدة تلتزم بالمعايير والاشتراطات الصحية والبيئية الصارمة.

وعلى الصعيد الإقليمي، تبرز المياه الجوفية في المناطق الجافة وشبه الجافة لمورد رئيس ووحيد أحيانا للشرب والأنشطة الزراعية والصناعية. وتصنف ليبيا ضمن الدول التي تعاني من ندرة حادة في المياه نتيجة تذبذب معدلات هطول الأمطار والظروف المناخية القاسية، فضلا عن تعرض مصادر المياه السطحية والجوفية للتلوث. وتعتمد الدولة الليبية بشكل أساسي على المياه الجوفية بنسبة تتجاوز 92.27% لسد احتياجاتها المائية الكلية، حيث يوجه الجزء الأكبر منها (81.38%) للأغراض الزراعية، بينما يخصص (16.36%) للاستخدام الحضري والمنزلي.

ومع ذلك، تواجه هذه الموارد الجوفية مشكلات تقنية وبيئية معقدة، أبرزها ارتفاع تراكيز الأملاح السائدة (الصوديوم، والمغنيسيوم، والكالسيوم) والتي غالبا ما تظهر في صورة كربونات وكبريتات. وقد أدى التوسع العشوائي في حفر الآبار والسحب غير المقنن للمياه إلى تدهور جودة الخزانات الجوفية، خاصة في المناطق القريبة من السواحل، حيث تسببت هذه الممارسات في ظاهرة تداخل مياه البحر التي ترفع من ملوحة المياه بشكل كبير. وما يزيد من خطورة تلوث المياه الجوفية هو صعوبة اكتشافه أو السيطرة عليه في مراحل مبكرة، فضلا عن التكلفة الباهظة المطلوبة لمعالجته وإعادة تأهيله.

وفي ظل هذه المعطيات، أصبحت عمليات معالجة المياه وتحليتها خيارا لا غنى عنه لتوفير مياه مطابقة للمواصفات القياسية. ومن هنا تنبثق أهمية هذه البحث التي تسعى لتقييم جودة المياه الجوفية المستخرجة من أعماق مختلفة في مدينة طرابلس. وتتجسد مشكلة البحث في رصد التغيرات الكيميائية والفيزيائية للمياه الجوفية الخام، ومقارنتها بمخرجات محطات التحلية في المناطق المستهدفة، وذلك لبيان مدى كفاءة المعالجة وتأثير الأعماق المختلفة للآبار على الخصائص النوعية للمياه، بما يضمن الوصول إلى رؤية علمية واضحة حول جودة المورد المائي المتاح للاستخدام البشري.

أهداف البحث

1. تحليل مدى تأثير تقنيات التحلية المستخدمة في خفض تراكيز الكاتيونات الأساسية (الكالسيوم، البوتاسيوم، والصوديوم)، وبيان مدى مطابقتها للموايير الصحية اللازمة لسلامة الإنسان ونمو النبات.

2. تحديد طبيعة العلاقة التأثيرية بين كفاءة محطات التحلية وبين مؤشرات جودة المياه الأساسية، والمتمثلة في درجة الملوحة الكلية والأس الهيدروجيني.(pH)
3. إجراء مقارنة تحليلية بين جودة المياه الجوفية المستخرجة من أعماق متباينة في مناطق مختلفة بمدينة طرابلس، وتقييم استجابة هذه المياه لعمليات المعالجة.
4. تعزيز القدرات العلمية والعملية للطلاب في مجال إجراء البحوث الميدانية، وتدريبهم على طرق جمع العينات، والتحليل المخبري، واستخلاص النتائج العلمية الدقيقة.

فرضيات البحث

1. لا توجد فروق ذات دلالة إحصائية في تراكيز عناصر الصوديوم، والبوتاسيوم، والكالسيوم، وقيم الملوحة والأس الهيدروجيني بين المياه الجوفية الخام والمياه بعد عملية التحلية.
2. توجد فروق ذات دلالة إحصائية في تراكيز عناصر الصوديوم، والبوتاسيوم، والكالسيوم، وقيم الملوحة والأس الهيدروجيني بين المياه الجوفية الخام والمياه بعد عملية التحلية.

الدراسات السابقة

هناك دراسات عديدة تناولت موضوع البحث وهي على النحو الاتي: –

1– دراسة المركز الوطني للمواصفات والمعايير القياسية (1992): المواصفة القياسية الليبية رقم (82) الخاصة بمياه الشرب.

هدفت هذه الوثيقة المرجعية إلى تحديد المعايير الفنية والاشتراطات الصحية الواجب توفرها في المياه الصالحة للاستخدام البشري داخل الدولة الليبية. استخدمت المواصفة منهجية الرصد النوعي والكمي للمؤشرات الفيزيائية والكيميائية والإشعاعية، وتوصلت إلى وضع حدود دقيقة للملوثات غير العضوية، حيث حددت الأس الهيدروجيني بين (6.5–8.5) ومجموع المواد الصلبة الذائبة بين (500–1000) ملجم/لتر. وأوصت المواصفة بضرورة خلو المياه تماما من الشوائب المرئية كالأتربة والرمال، مع الالتزام بالحدود القصوى للإشعاع المؤين وفق المواصفة رقم (595) لضمان سلامة المستهلكين من شبكات التوزيع أو الآبار.

2– دراسة المهدي وأريج (2020): تقييم جودة مياه الشرب بآبار ثلاث مناطق بمدينة سبها .

هدفت البحث إلى تقييم الخصائص النوعية لآبار مياه الشرب في مناطق (عبد الكافي، المنشية، والجديد والفرضة) بمدينة سبها. استخدمت الباحثتان التحليل المختبري لمقارنة النتائج مع معايير منظمة الصحة العالمية والمواصفات الليبية، وتوصلت إلى أن تراكيز الأملاح الذائبة في المناطق المستهدفة كانت ضمن المواصفات، بينما سجل متوسط تركيز الصوديوم في بئري عبد الكافي والمنشية قيما خارج الحدود المسموح بها (أعلى من 200 ملجم/لتر). وأوصت البحث بضرورة الالتزام بالمعايير القياسية التي تحدد سقف الأملاح بـ (1000) ملجم/لتر، مع مراقبة تركيز البوتاسيوم لضمان بقائه ضمن المدى الآمن (0–50) ملجم/لتر.

3– دراسة علي شاكي وعبد الله أحمد (2021): تقييم صلاحية المياه الجوفية بوادي الشاطئ لأغراض الري.

هدفت الورقة البحثية إلى فحص مدى ملائمة المياه الجوفية في منطقة وادي الشاطئ للنشاط الزراعي في ظل الاعتماد الكلي عليها كمصدر للمياه العذبة. استخدمت تصنيف مختبر الملوحة الأمريكي ومعايير منظمة الفاو لتقييم العينات المأخوذة من الآبار، وتوصلت النتائج إلى تصنيف مياه المنطقة ضمن فئة المياه عالية الملوحة ومنخفضة الصودية .(C3 S1) وأوصت البحث بضرورة توخي الحذر الشديد عند استخدام هذه المياه، واقتصار ريها على الأراضي ذات النفاذية الجيدة، مع التنبيه إلى وجود تفاوت كبير في المشاكل البيئية الناجمة عن استخدام مياه تلك الآبار دون معالجة.

4- دراسة أسامة أبو حظير (2012): دراسة وتقييم جودة مياه الري بمنطقة العزيزية.

هدفت هذه البحث إلى إجراء تقييم شامل للخصائص الكيميائية لمياه الآبار في منطقة العزيزية ومدى تأثيرها على التربة المحيطة. استخدم الباحث منهجية تحليلية لـ 161 بئرا، شملت عينات مياه وتربة من أعماق مختلفة خلال صيف 2010 لتقدير الأيونات والكاتيونات مثل الكالسيوم والبوتاسيوم والصوديوم. وتوصلت النتائج إلى أن الملوحة تراوحت بين (1395-3225) ملجم/لتر، مع ظهور قيم سالبة لكربونات الصوديوم المتبقية(RSC) ، مما يعني عدم تراكمها في التربة. وأوصت البحث بمقارنة هذه النتائج بانتظام مع مواصفات منظمة الأغذية والزراعة (FAO) والمعايير الأمريكية (USDA) للحفاظ على جودة التربة المستدامة.

5- دراسة راضي سالم ومحمد علي (2016): ظاهرة ارتفاع الملوحة ببعض الآبار العميقة بخزان ككلة بحوض غدامس.

هدفت البحث التطبيقية إلى تحديد أسباب تفاقم ظاهرة الملوحة في الآبار العميقة بشمال غرب ليبيا ووضع حلول تقنية للحد منها. استخدمت التفسير الهيدروجيولوجي والتحليل الكيميائي لعينات من 13 بئرا مختارة، مع تمثيل النتائج لبيان تأثير كثافة الاستغلال على الخزان. وتوصلت البحث إلى أن المشكلة تكمن في مواصفات التصميم والتجهيز للآبار بالإضافة إلى الضغط الإنتاجي العالي الذي أدى لارتفاع الملوحة في 7 آبار منها. وأوصت البحث بإجراءات إجرائية صارمة تشمل عزل الطبقات والتكوينات التي تعلو خزان ككلة أثناء عملية التغليف في تصميمات الآبار المستقبلية لحماية الخزان.

من خلال استعراض الدراسات السابقة تنوعا ثريا في تناول جودة المياه الجوفية الليبية، حيث ركزت الدراسات (دراسة الشريف والمهدي، 2020، وأبو حظير، 2012) على رصد الخصائص الكيميائية ومدى مطابقتها للمواصفات القياسية في مناطق جغرافية متباينة كسبها والعزيزية. كما تطرقت (دراسة راضي، 2016) إلى الجوانب الهيدروجيولوجية والمشاكل التقنية في تصميم الآبار العميقة وأثرها على الملوحة. وبالرغم من شمولية هذه الأبحاث، إلا أن ما يميز البحث الحالي هو تركيزه الدقيق على كفاءة التحلية كمتغير محوري، من خلال إجراء مقارنة مباشرة ومزدوجة، الأولى بين المياه الجوفية الخام والمحلاة في ذات الموقع، والثانية بين مناطق متباينة الأعماق داخل مدينة طرابلس. وتكمن القيمة المضافة لهذا البحث في قدرته على قياس مدى استجابة العناصر الصغرى والكبرى (البوتاسيوم والصوديوم) لعمليات المعالجة المنزلية أو المحلية، وربط ذلك بالعمق الجيولوجي للبئر، مما يوفر قاعدة بيانات محدثة تخدم المستهلك والباحث في تقييم جودة مياه الشرب المستحدثة. وبذلك، لا يكتفي البحث بالرصد المكاني فقط، بل يتعداه إلى تقييم الحلول التقنية المتمثلة في التحلية، وهو جانب لم يغط بذات التفصيل في الدراسات الجغرافية السابقة للمنطقة.

الأهمية الحيوية لعنصر الكالسيوم للنبات

يؤدى الكالسيوم دورا محوريا في العمليات الفسيولوجية والتركيبية للنبات، وتتمثل أهميته فيما يلي:

1. يدخل الكالسيوم بشكل أساسي في تكوين الصحيفة الوسطى للجدر الخلوية على هيئة بكتات الكالسيوم، مما يمنح الخلايا القوة والصلابة، كما يساهم في تنظيم نفاذية غشاء البلازما.
2. يشارك في تكوين مجموعة واسعة من المركبات داخل الخلية النباتية، (الفوسفات، والكربونات، وأكسالات الكالسيوم) بالإضافة إلى تواجده في البذور على صورة أملاح حامض الفايتيك.
3. يعد عنصرا ضروريا لاستطالة الخلايا وتحفيز الانقسام الخلوي في الأنسجة المريستمية، وهو ما ينعكس بشكل مباشر على تكوين الأزهار ونمو القمم النامية.
4. يعمل الكالسيوم على تشجيع نمو وتفرع المجموع الجذري، كما أنه عنصر حيوي لتكوين العقد الجذرية وتثبيت النيتروجين في النباتات البقولية.
5. يعمل الكالسيوم كعامل مرافق ومنشط للعديد من الإنزيمات المسؤولة عن العمليات الأيضية داخل النبات.

الأهمية الفسيولوجية لعنصر البوتاسيوم للنبات

يصنف البوتاسيوم كعنصر حيوي لضبط الجودة والعمليات التنظيمية داخل النبات، وتتلخص أهميته فيما يلي:

1. التنظيم الحيوي والتمثيل الضوئي يؤدى البوتاسيوم دورا قياديا في تنظيم التفاعلات الحيوية الكبرى، حيث يشرف على ضبط عمليتي التنفس والنتح من خلال التحكم في فتح وغلق الثغور، كما يعد عنصرا أساسيا في إتمام عملية التمثيل الضوئي وكفاءة تكوين ونقل الكربوهيدرات والبروتينات إلى أماكن التخزين في النبات.
2. يقوم البوتاسيوم بمعادلة الشحنات السالبة داخل الخلية النباتية (مثل النترات، الفوسفات، وأيونات الأحماض العضوية)، مما يضمن تحقيق التوازن الأيوني والتعادل الكهربي الضروري لاستقرار العمليات الخلوية.
3. يعمل البوتاسيوم كمنشط لأكثر من 60 نوعا من الإنزيمات النباتية المسؤولة عن بناء المركبات الدفاعية والنمو.
4. يؤدي البوتاسيوم دورا وقائيا ضد الآثار السلبية لزيادة النيتروجين التي قد تسبب ضعف الساق، حيث يعمل على تحفيز بناء الكربوهيدرات المعقدة التي تزيد من سمك الجدر الخلوية، مما يمنح ساق النبات القوة والمناعة ضد الانكسار أو ما يعرف بظاهرة الرقاد.

الآثار السلبية لارتفاع تركيز الصوديوم على النبات والتربة

يؤدي ارتفاع نسبة الصوديوم في مياه الري أو التربة إلى جملة من الأضرار الفسيولوجية والفيزيائية، تلخص فيما يلي:

1. تتسبب زيادة الصوديوم في رفع درجة التوصيل الكهربائي(EC) ، مما يؤدي بدوره إلى ارتفاع الضغط الأسموزي لمحلول التربة، وهذا الارتفاع يعيق قدرة جذور النبات على امتصاص الماء، فيما يعرف بظاهرة الجفاف الفسيولوجي.
2. يؤدي تراكم أيونات الصوديوم إلى تهدم بناء التربة وتشتت حبيباتها، مما ينتج عنه انخفاض المسامية وصعوبة حركة الماء والهواء داخل قطاع التربة، وهو ما يؤثر سلبا على تنفس الجذور.
3. تؤدي زيادة الصوديوم إلى رفع درجة تفاعل التربة، مما يقلل من جاهزية وتيسر العديد من العناصر الغذائية الصغرى والكبرى للامتصاص بواسطة النبات.
4. يتسبب التركيز العالي للصوديوم في حدوث تضاد (Antagonism) مع عناصر أخرى مثل الكالسيوم والبوتاسيوم، مما يؤدي إلى خلل في التوازن الأيوني داخل أنسجة النبات.
5. نتيجة للضغوط المذكورة أعلاه، تتأثر العمليات الحيوية للنبات بشكل مباشر، مما يؤدي في النهاية إلى انخفاض معدلات النمو وتراجع كمية ونوعية الإنتاج في العديد من المحاصيل الاقتصادية.

مواد وطرائق البحث

1- التوصيف الجغرافي لمنطقة البحث:

تم تحديد نطاق البحث ليشمل أربع مناطق حيوية متباينة جغرافيا في مدينة طرابلس، تمتد من الشرق إلى الغرب لتغطية أكبر مساحة ممكنة من التنوع في الخزانات الجوفية، وهي كالتالي:

أ. منطقة وادي الربيع :وتمثل الحدود الشرقية للدراسة بمحاذاة بلدية تاجوراء.

ب. منطقة عين زارة :وتمثل القطاع الأوسط من منطقة البحث.

ج. منطقة سوق الجمعة :وتعد ضمن النطاق المركزي في الاتجاه الغربي.

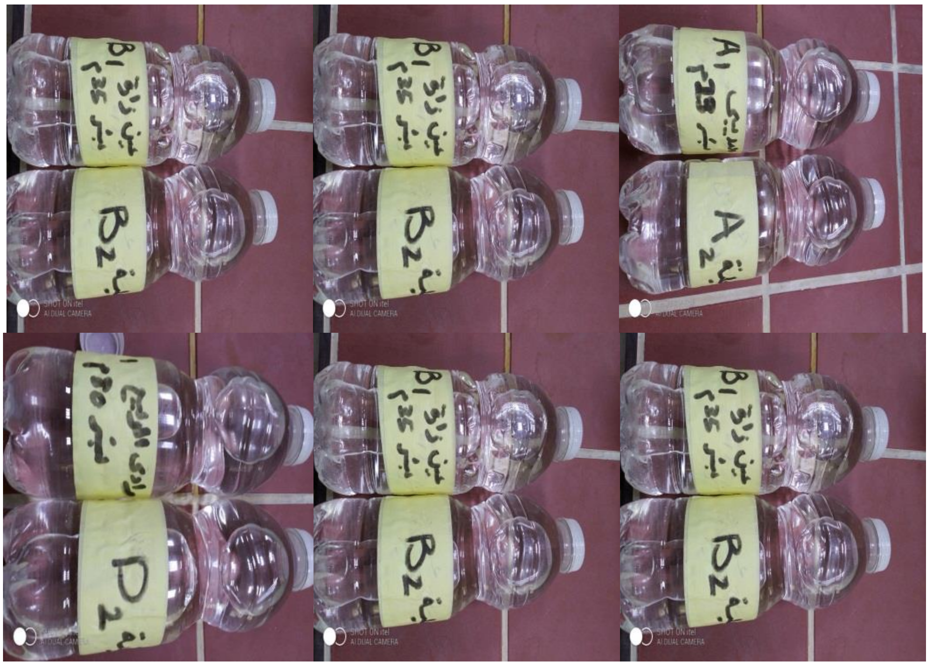
د. منطقة الحي الصناعي :وتمثل أقصى حدود المنطقة الغربية المستهدفة بمحاذاة بلدية حي الأندلس.

2- منهجية جمع العينات

اعتمدت البحث على آلية جمع دقيقة لضمان صحة النتائج المخبرية وفق الخطوات التالية:

1. مصدر العينات :تم سحب عينات المياه الجوفية (الخام) مباشرة من الآبار المستهدفة في المناطق المذكورة، مع مراعاة التباين في أعماق هذه الآبار لرصد تأثير العمق على الخصائص الكيميائية.

2. مياه التحلية :وبذات المنهجية، جمعت عينات من المياه بعد معالجتها عبر وحدات التحلية التابعة لنفس المصادر الجوفية المذكورة لإجراء المقارنة المباشرة.
3. تجهيز الأوعية :استخدمت قنينات بلاستيكية سعة (0.5 لتر) لجمع العينات، حيث تم تنظيفها ومعاملتها مسبقا بالماء المقطر لضمان خلوها من أي ملوثات قد تؤثر على دقة التحليل الكيميائي.



شكل (1) يوضح أخذ العينات المياه من الابار قيد البحث

3- **توصيف الآبار المستهدفة حسب النطاق الجغرافي والعمق**

لتحقيق أهداف البحث في رصد أثر العمق على جودة المياه، تم اختيار أربعة آبار جوفية موزعة جغرافيا في مدينة طرابلس، وأعطي كل بئر رمزا تعريفيا (Code) لاستخدامه في التحاليل والمقارنات اللاحقة، كما هو موضح في الجدول التالي:

جدول رقم (1): البيانات الجغرافية والهيدرولوجية لآبار منطقة البحث

النطاق الجغرافي (مدينة طرابلس)	عمق البئر (متر)	الرمز التعريفي للعينات
منطقة الحي الصناعي	21م	A
منطقة عين زارة	35م	B
منطقة سوق الجمعة	19م	C
منطقة وادي الربيع	80م	D

تم اختيار الآبار لتمثل تدرجا في الأعماق يبدأ من المستوى الضحل (19 متر) وصولا إلى المستوى العميق (80 متر)، مما يسمح بدراسة دقيقة للتغيرات الكيميائية والفيزيائية المرتبطة بطبقات الحامل المائي في هذه المناطق.

4- القياسات المستهدفة

أ- الأس الهيدروجيني:(pH)

يعرف الأس الهيدروجيني بأنه المقياس الذي يحدد درجة حموضة أو قلوية الوسط المائي، وتتراوح قيمته على مقياس مدرج من (0 إلى 14) درجة، حيث يمثل الرقم (7) حالة التعادل، وما دون ذلك يعبر عن الوسط الحمضي، وما فوقه يعبر عن

الوسط القلوي. وتكمن أهمية هذا القياس في كونه المحرك الأساسي لمدى تيسر وجاهزية العناصر الغذائية والكاتيونات في مياه التربة، إذ يؤدي أي خلل في قيمته إلى ترسب بعض العناصر أو تحولها إلى صور غير قابلة للامتصاص بواسطة النبات، مما يؤثر بشكل مباشر على جودة مياه الشرب والري.

شكل (2) جهاز تقدير قيمة تركيز pH Conduclivily Meler LF 3000)

ب- التوصيل الكهربائي

يعتبر التوصيل الكهربائي عن قدرة الماء على تمرير التيار الكهربائي، وهي مؤشر مباشر لتركيز الأملاح الذائبة الكلية فيه، فكلما ارتفعت نسبة الأملاح، زادت قيمة التوصيل الكهربائي. تقاس هذه الخاصية مخبريا باستخدام جهاز قياس الموصلية (EC-meter)، ويعبر عنها بوحدات الميلي موز لكل سنتيمتر (mmhos/cm) أو الديسيسمنز لكل متر .(dS/m) وتعد هذه القياسات ضرورية لتصنيف مياه الآبار وتحديد مدى صلاحيتها للري أو الشرب بناء على مستويات الملوحة.

ج- كاتيون الصوديوم:(+Na)

يعد الصوديوم الكاتيون الأساسي (الأيون الموجب) السائد في السوائل خارج الخلية في أجسام الكائنات الحية، بما في ذلك البشر والحيوانات. ويؤدى دورا حيويا في بلازما الدم وسوائل الأنسجة الأخرى، حيث يساهم بشكل رئيسي في تنظيم الضغط الأسموزي، وتسهيل عمليات نقل المغذيات إلى داخل الخلايا والتخلص من الفضلات الناتجة عن التمثيل الغذائي. وفي سياق المياه الجوفية، يعد مراقبة تركيزه أمرا بالغ الأهمية نظرا لتأثيره المباشر على ملوحة المياه وخصائص التربة الفيزيائية.

د- كاتيون الكالسيوم:(++Ca)

يعد الكالسيوم عنصرا كيميائيا حيويا يرمز له بالرمز (Ca) ، ويحتل العدد الذري (20) ضمن مجموعة الفلزات القلوية الترابية (المجموعة الثانية) في الجدول الدوري. يتميز هذا العنصر بنشاطه الكيميائي العالي، حيث يوجد في الطبيعة على هيئة مركبات هامة مثل هيدروكسيد الكالسيوم، وأكسيد الكالسيوم، وكلوريد الكالسيوم. أما من الناحية الحيوية، فيعتبر الكالسيوم من أهم الكاتيونات الموجبة في المياه الجوفية، حيث تسهم تراكيزه في تحديد درجة عسر الماء وتوازنه الأيوني. كما يؤدى دورا جوهريا في تكوين البنية الهيكلية للكائنات الحية ودعم جدر الخلايا النباتية، مما يجعل مراقبة مستوياته ضرورة قصوى لضمان جودة المياه للاستخدامين البشري والزراعي.

شكل (3) إجهاز تقدير تركيزكاثيون الكالسيوم (Palintest Lumiso Expert)

ر– كاتيون البوتاسيوم:(K^+)

يعد البوتاسيوم عنصرا كيميائيا حيويا يرمز له بالرمز (K) ، ويحتل العدد الذري (19) ضمن المجموعة الأولى (الفلزات القلوية) في الجدول الدوري. أما من الناحية الفسيولوجية للنبات، فيؤدى البوتاسيوم دورا استراتيجيا في تعزيز العمليات الحيوية، حيث يعمل بشكل أساسي على تحفيز تكوين المواد الكربوهيدراتية المعقدة التي تسهم في زيادة سمك الجدر الخلوية. هذا الدور التركيبي يمنح ساق النبات القوة والصلابة اللازمة، مما يزيد من قدرته على المقاومة الميكانيكية ويحميه من مخاطر الانكسار أو الرقاد، بالإضافة إلى دوره الجوهري في تنظيم التوازن الأيوني والضغط الأسموزي داخل الخلايا.

شكل (4) جهاز تقدير تركيزكاثيون البوتاسيوم (Flame Photometers)

تقدير تركيز كاتيون الكالسيوم (Ca^{++}) مخبريا

تم اتباع الطريقة القياسية للمعايرة بمركب إيدتا لتقدير عسر الكالسيوم، وذلك وفقا للتجهيزات والخطوات التالية:

1- المعدات والأدوات المختبرية:

أ. الزجاجيات :سحاحة (50 مل)، ماصات (10 و25 مل)، دوارق مخروطية (250 مل)، دوارق حجمية (250 و1000 مل)، زجاجات ساعة، وقنينة بقطارة (100 مل).

ب. الأجهزة المساعدة :محرك مغناطيسي (Magnetic Stirrer) مع القطع المغناطيسية، ميزان حساس بدقة (0.0001)، مهراس مخبري، ومعالق وزن.

2- المواد الكيميائية والتحضيرات:

1. محلول المعايرة :(EDTA 0.01M) تم تحضيره بإذابة (3.7224 جم) من ملح الصوديوم ثنائي الهيدروجين (Disodium EDTA)في دورق حجمي (1000 مل) وإكمال الحجم بالماء المقطر، مع ضبط العيارية بمحلول قياسي من الكالسيوم.
2. محلول ضبط الأس الهيدروجيني :(NaOH 4M) تم تحضير محلول هيدروكسيد الصوديوم للوصول إلى الرقم الهيدروجيني (pH 12) بإذابة (16 جم) من المادة في (100 مل) من الماء المقطر.
3. الدليل :(Murexide Indicator) تم تحضيره بخلط (1 جم) من صبغة الموريكسيد مع (100 جم) من كلوريد الصوديوم (أو البوتاسيوم) وسحقهم جيدا بالمهراس لضمان التجانس التام.

3- خطوات عملية المعايرة

1. نقل (10 مل) من عينة الماء إلى دورق مخروطي نظيف.
2. إضافة (3 قطرات) من محلول هيدروكسيد الصوديوم لضبط الوسط القلوي.
3. إضافة كمية بسيطة (حوالي ربع ملعقة) من دليل الموريكسيد، حيث يظهر اللون الوردي دلالة على وجود الكالسيوم.
4. البدء بالمعايرة باستخدام محلول (EDTA) حتى يتغير اللون من الوردي إلى البنفسجي، وتسجيل حجم المحلول المستهلك من السحاحة (مع تكرار العملية ثلاث مرات لكل عينة لضمان الدقة).

4- الحسابات الإحصائية:

يتم حساب تركيز الكالسيوم (ملجم/لتر) باستخدام المعادلة التالية:

14. الحسابات:.

$$\text{عسر الكالسيوم } mg/1 = \frac{v \times m \times 101.1 \times 1000}{\text{حجم العينة } ml}$$

$$\frac{v \times m \times 40 \times 1000}{\text{حجم العينة } ml}$$

حيث v= حجم ال(ETDA) المستهلكة في المعايرة(ml) M =مولارية ال(ETDA)

101.1 =الوزن الجزيئي لكربونات الكالسيوم

40 =الوزن الجزيئي للكالسيوم mol/g

مراحل تنفيذ البحث

تم تنفيذ البحث من خلال أربع مراحل منهجية متسلسلة:

أ. المرحلة الأولى (جمع العينات وتكويدها) :تم جمع عينات المياه الجوفية وترميزها (بأحرف إنجليزية) لتمييزها بناء على المنطقة الجغرافية، وعمق البئر ، وحالة المياه (قبل وبعد التحلية).

ب. المرحلة الثانية (التحاليل المخبرية) :أجريت القياسات الفيزيوكيميائية المستهدفة باستخدام تقنيات وأجهزة متطورة في مختبرات متخصصة، شملت: (مركز بحوث التربة والمياه بوزارة الزراعة، مختبرات المعهد العالي للتقنية الزراعية، ومعامل شركة دلتا للخدمات الفنية).

ج. المرحلة الثالثة (تجميع وتبويب البيانات) :تم تفريغ النتائج المخبرية وتنظيمها في جداول إحصائية، تمهيدا لعملية المعالجة البيانية.

د. المرحلة الرابعة (التحليل والمناقشة) :إجراء التحليل الإحصائي المقارن للنتائج، وتفسير الظواهر الكيميائية المرصودة، وصولا إلى الاستنتاجات والتوصيات النهائية.

الإطار الزمني والمكاني لإجراء التحاليل

لضمان دقة النتائج المخبرية، تم توزيع التحاليل الكيميائية على مختبرات تخصصية وفقا للجدول الزمني التالي:

أ. المرحلة الأولى (25 يوليو 2024م) :أجريت اختبارات الخصائص الفيزيائية والكيميائية الأساسية، والتي شملت قياس الأس الهيدروجيني(pH) ، ومجموع الأملاح الذائبة الكلية(TDS) ، والتوصيل الكهربائي(EC) ، وذلك بمركز بحوث التربة والمياه التابع لوزارة الزراعة.

ب. المرحلة الثانية (31 يوليو 2024م) :تم تقدير تراكيز الكاتيونات الرئيسية (الصوديوم، البوتاسيوم، والكالسيوم) في مختبرات شركة دلتا للخدمات الفنية.

ج. المرحلة الختامية :أعقب ذلك فترة تجميع البيانات ومعالجتها إحصائيا وصولا إلى استخلاص النتائج النهائية للدراسة.

عرض وتحليل نتائج عينات المياه

يستعرض هذا الجزء النتائج المخبرية المتحصل عليها من الآبار المستهدفة في مناطق البحث الأربع، مع إجراء مقارنة تحليلية بين خصائص المياه الجوفية الخام (قبل المعالجة) وخصائصها بعد مرورها بوحدات التحلية، وذلك لبيان مدى كفاءة عملية التحلية وتأثيرها على العناصر الكيميائية المدروسة:

جدول (2) يوضح تركيز كاتيون الصوديوم قبل وبعد عملية التحلية:

قبل التحلية	A1/154	B1/463	C1/328	D1/60
بعد التحلية	A2/11.5	B2/13.5	C2/19.0	D2/5.1

تظهر النتائج المخبرية تباينا حادا وجوهريا في مستويات التراكيز بين مياه الآبار الخام (قبل التحلية) والمياه المنتجة (بعد التحلية) في جميع مناطق البحث. فبالنظر إلى العينات قبل المعالجة، نلاحظ أن البئر (B1) سجل أعلى قيمة تركيز بمقدار (463 ملجم/لتر)، يليه البئر (C1) بتركيز (328 ملجم/لتر)، ثم البئر (A1) بتركيز (154 ملجم/لتر)، بينما سجل البئر الأعمق (D1) أقل قيمة بتركيز (60 ملجم/لتر). وهذا التدرج يشير بوضوح إلى علاقة عكسية محتملة بين عمق البئر وتركيز الأملاح، حيث تميزت الآبار الأقل عمقا (مثل سوق الجمعة وعين زارة) بتراكيز مرتفعة جدا تتجاوز الحدود المسموح بها في المواصفات القياسية الليبية ومنظمة الصحة العالمية (200 ملجم/لتر)، مما يؤكد فرضية تداخل مياه البحر أو تضرر الخزانات الضحلة بالأنشطة البشرية.

أما عند تحليل النتائج بعد التحلية، فتشير البيانات إلى انخفاض دراماتيكي في التراكيز، حيث هبطت القيم في جميع العينات إلى مستويات متدنية جدا تراوحت ما بين (5.1 ملجم/لتر) في العينة (D2) كأقل قيمة، و(19.0 ملجم/لتر) في العينة (C2) كأعلى قيمة بعد المعالجة. هذا الانخفاض الحاد يعكس كفاءة تقنية عالية جدا لوحدات التحلية المستخدمة (غالبا ما تكون بنظام التناضح العكسي (RO في إزالة الأيونات الذائبة، حيث تجاوزت نسبة الإزالة في بعض المواقع 97.%

ويمكن تفسير هذا التغير كيميائيا بأن أغشية التحلية عملت كحاجز انتقائي دقيق نجح في حجز الغالبية العظمى من الكاتيونات الموجبة، محولة المياه من مياه عالية الملوحة وغير صالحة للشرب مباشرة في المناطق B) و (C إلى مياه عذبة جدا ونقية من الناحية الكيميائية. وبالرغم من أن هذه النتائج تؤكد نجاح التحلية في خفض الملوحة وتجاوز مشكلة تداخل مياه البحر، إلا أنها تفتح باب التساؤل العلمي حول الإفراط في التنقية، حيث أدت العملية إلى سحب شبه كامل للعناصر المعدنية، مما قد يجعل المياه تفتقر إلى التوازن الأيوني الطبيعي الضروري للصحة العامة أو للنمو السليم للنباتات في حال استخدام مياه الصرف الناتجة عنها في الري، وهو ما يتفق مع فرضيات البحث حول التأثير البالغ لعملية التحلية على التركيب الكيميائي للمياه.

جدول (3) يوضح تركيز كاتيون البوتاسيوم قبل وبعد عملية التحلية:

قبل التحلية	A1/2.6	B1/4.6	C1/5.9	D1/3.0
بعد التحلية	A2/0.1	B2/0.3	C2/ND	D2/ND

تظهر القراءات المخبرية لعينات المياه الجوفية قبل المعالجة تراكيز منخفضة ومستقرة نسبيا لهذا العنصر، حيث تراوحت القيم بين (2.6 ملجم/لتر) كحد أدنى في البئر (A1) بالحي الصناعي، و(5.9 ملجم/لتر) كحد أقصى في البئر (C1) بسوق الجمعة. وبالرغم من أن هذه القيم تقع جميعها ضمن النطاق الآمن والمعايير المسموح بها محليا وعالميا (والتي تسمح بمدى يصل إلى 50 ملجم/لتر)، إلا أن التباين الطفيف بين المناطق يعكس اختلاف الخصائص الجيولوجية ومعدلات التحلل المعدني في طبقات الخزان الجوفي لكل منطقة، حيث سجلت المنطقة (C) أعلى تركيز متبوعة بالمنطقة (B) بعين زارة (4.6 ملجم/لتر)

أما عند الانتقال لمرحلة ما بعد التحلية، فإن النتائج تكشف عن كفاءة إزالة شبه كاملة لهذا العنصر، فقد انخفضت التراكيز في منطقتي الحي الصناعي وعين زارة لتصل إلى قيم ضئيلة جدا (0.1 و 0.3 ملجم/لتر على التوالي). والملاحظة الأبرز تكمن في العينتين (C2) و(D2) ، حيث ظهرت النتيجة برمز (ND) أي غير مكتشفة(Not Detected) ، وهو ما يعني كيميائيا أن تركيز العنصر انخفض إلى مستوى أقل من حدود الكشف الخاصة بالجهاز المختبري المستخدم.

ويمكن تفسير هذا الانخفاض الحاد بأن تقنية التحلية المستخدمة (التناضح العكسي) تتعامل مع أيونات البوتاسيوم كشوائب ملحية يتم استبعادها بفعالية عالية نظرا لنصف قطر الأيون وطبيعة الغشاء شبه المنفذ. ورغم أن هذه النتيجة تعكس جودة التنقية من الناحية الفيزيائية، إلا أنها من الناحية البيولوجية والزراعية تشير إلى إنتاج مياه فقيرة معدنيا، إذ أن غياب البوتاسيوم تماما (ND) يحرم المستهلك أو النبات من عنصر ضروري لتنظيم الضغط الأسموزي والعمليات الحيوية، وهو ما يؤكد صحة فرضية البحث البديلة بوجود تأثير جذري لعملية التحلية أدى إلى تجريد المياه من قيمتها المعدنية الطبيعية وتحويلها إلى مياه شبه مقطرة.

جدول (4) تركيز كاتيون الكالسيوم قبل وبعد عملية التحلية:

قبل التحلية	A1/108	B1/204	C1/160	D1/53.6
بعد التحلية	A2/ND	B2/ND	C2/ND	D2/ND

بناء على البيانات الواردة في الجدول لتركيز عنصر الكالسيوم (Ca) قبل وبعد عملية التحلية،

تشير القراءات المخبرية لعينات المياه الجوفية الخام (قبل التحلية) إلى وجود تباين ملحوظ في تراكيز الكالسيوم، حيث سجلت المنطقة (B1) في عين زارة أعلى تركيز بمقدار (204 ملجم/لتر)، تليها المنطقة (C1) في سوق الجمعة بتركيز (160 ملجم/لتر)، ثم المنطقة (A1) بالحي الصناعي بتركيز (108 ملجم/لتر)، بينما سجل البئر الأعمق في وادي الربيع (D1) أقل قيمة بتركيز (53.6 ملجم/لتر). وتعكس هذه القيم المرتفعة في الآبار الضحلة (A, B, C) طبيعة العسر الكلسي للمياه الجوفية في تلك المناطق، حيث تتجاوز التراكيز في منطقتي عين زارة وسوق الجمعة الحدود المثالية للشرب، مما يساهم في زيادة الملوحة الكلية وتكوين القشور الملحية عند الاستخدام المنزلي.

أما التحول الجذري في النتائج فيظهر بوضوح عند فحص العينات بعد التحلية، حيث سجلت جميع المناطق (A2, B2, C2, D2)النتيجة(ND) ، وهي اختصار لـ (Not Detected) أو غير مكتشفة. وتعني هذه النتيجة علميا أن تراكيز الكالسيوم قد انخفضت إلى مستويات تقترب من الصفر، بحيث أصبحت أقل من حدود الحساسية التي يمكن للجهاز المختبري أو كاشف الموريكسيد قياسها. هذا الانخفاض الكلي يثبت الكفاءة القصوى لوحدات التحلية في حجز أيونات الكالسيوم ثنائية التكافؤ، والتي تعتبر من أسهل الأيونات التي يتم استبعادها عبر أغشية التناضح العكسي نظرا لحجمها وشحنتها.

ويمكن تفسير هذه النتائج بأن عملية التحلية لم تكتفِ فقط بخفض العسر أو معالجة الملوحة، بل أدت إلى تجريد المياه تماما من الكالسيوم. ومن الناحية العلمية، فإن هذا التحول يجعل المياه يسرة جدا(Very Soft Water) ، وهي مياه قد تكون ذات أثر سلبي على المدى الطويل سواء لصحة الإنسان (نظرا لفقدان عنصر الكالسيوم الضروري للعظام) أو للنبات (بسبب دور الكالسيوم في بناء الجدر الخلوية). وبذلك، تؤكد هذه النتائج صحة فرضية البحث البديلة، حيث أثبتت أن التحلية تحدث تغييرا شاملا في هوية المياه الكيميائية، محولة إياها من مياه عسيرة كلسية إلى مياه تفتقر للعناصر المعدنية الأساسية.

جدول (5) تركيز نسبة Ph قبل وبعد عملية التحلية:

قبل التحلية	A1/6.92	B1/6.42	C1/6.76	D1/6.89
بعد التحلية	A2/7.0	B2/6.46	C2/6.86	D2/6.40

تظهر النتائج المخبرية لعينات المياه الجوفية الخام (قبل التحلية) أن قيم الأس الهيدروجيني تميل قليلا نحو الجانب الحمضي الضعيف، حيث تراوحت بين (6.42) في البئر (B1) كأقل قيمة، و(6.92) في البئر (A1) كأعلى قيمة. وهذه القيم تعكس طبيعة مياه الآبار الجوفية في منطقة البحث التي تتأثر بتركيز ثاني أكسيد الكربون الذائب ونوعية المعادن في الخزان الجوفي، إلا أنها تظل ضمن النطاق الطبيعي المائل للتعادل، مما لا يشكل خطورة مباشرة على جودة المياه في حالتها الخام.

وعند مقارنة هذه القيم بالنتائج بعد التحلية، نلاحظ حدوث تغيرات طفيفة ولكنها دالة إحصائيا، فقد ارتفعت القيمة في العينات (A2)و (C2) لتصل إلى (7.0) و (6.86) على التوالي، مما يشير إلى تحسن طفيف في اتجاه التعادل التام. وفي المقابل، سجلت العينة (D2) انخفاضا ليصل إلى (6.40)، وهي قيمة تبتعد قليلا عن نقطة التعادل باتجاه الحامضية. هذا التذبذب في قيم (pH) بعد المعالجة هو سلوك كيميائي متوقع في محطات التحلية التي تعتمد على الأغشية، حيث تؤدي إزالة الأملاح المنظمة (Buffering salts) مثل البيكربونات إلى جعل المياه أكثر حساسية لأي تغير في تركيز الغازات الذائبة.

ويمكن تفسير هذه النتائج بأن عملية التحلية أحدثت إعادة توازن كيميائي للوسط المائي، ففي بعض الحالات أدت إزالة الأملاح إلى رفع القيمة نحو التعادل (7.0)، بينما في حالات أخرى (العينةD2) قد تؤدي إزالة الكاتيونات القلوية إلى طغيان الصفة الحامضية الناتجة عن غاز ثاني أكسيد الكربون المتبقي. وبشكل عام، تظل جميع القيم المقاسة بعد التحلية ضمن الحدود المسموح بها عالميا ومحليا لمياه الشرب (6.5 – 8.5)، باستثناء انخفاض طفيف جدا في بعض المواقع، مما يستوجب مراقبة مستمرة لضمان عدم تسبب هذه الحامضية الضعيفة في تآكل شبكات التوزيع أو التأثير على كفاءة امتصاص العناصر في حال استخدامها للري.

جدول (6) قيمة تركيز EC قبل وبعد عملية التحلية:

قبل التحلية	A1/1.640	B1/4.071	C1/2.772	D1/0.780
بعد التحلية	A2/0.46	B2/0.34	C2/0.78	D2/0.34

تكشف القراءات المخبرية لعينات المياه الجوفية الخام (قبل التحلية) عن تباين حاد وارتفاع كبير في قيم التوصيل الكهربائي، حيث سجلت المنطقة (B1) أعلى قيمة بمقدار (dS/m4.071) تليها المنطقة (C1) بقيمة (dS/m2.772) ثم المنطقة (A1)بقيمة (dS/m1.640) وتعكس هذه القيم المرتفعة، خاصة في البئرين B و C ، محتوى ملحيا عاليا يتجاوز الحدود المسموح بها لمياه الشرب والري الحساس، مما يشير إلى تدهور نوعية المياه الجوفية في هذه المواقع نتيجة الضخ الجائر أو تداخل مياه البحر. وفي المقابل، تميز البئر الأعمق في وادي الربيع (D1) بأقل قيمة (dS/m0.780) وهي القيمة الوحيدة التي تقع ضمن النطاق المقبول للمياه العذبة قبل المعالجة.

أما بعد إجراء عملية التحلية، فقد أظهرت النتائج انخفاضا جوهريا وشاملا في جميع العينات، حيث هبطت القيم لتتراوح ما بين (0.34 dS/m) كحد أدنى في العينتين (B2) و(D2) ، و (dS/m0.78) كحد أقصى في العينة .(C2) هذا التحسن الملحوظ في جودة المياه يعكس كفاءة فنية عالية لأغشية التحلية في حجز الأيونات والكاتيونات الذائبة المسؤولة عن نقل التيار الكهربائي، مما أدى إلى خفض الملوحة الكلية بنسب إزالة تتجاوز 90% في المواقع الأكثر ملوحة.

ويمكن تفسير هذه النتائج بأن عملية التحلية نجحت في تحويل المياه من مالحة أو متوسطة الملوحة إلى مياه عذبة ونقية كيميائيا، وهو ما يقلل من الضغط الأسموزي عند استخدامها. ومع ذلك، نلاحظ أن القيمة الناتجة في العينة (C2) والبالغة (0.78 dS/m) تساوي تماما قيمة البئر الخام(D1) ، مما يدل على أن المياه المنتجة من بعض وحدات التحلية في المناطق عالية التلوث وصلت فقط إلى مستوى جودة المياه الجوفية الجيدة في المناطق الأخرى. وبشكل عام، تؤكد هذه النتائج أن التحلية هي الحل التقني الأمثل لخفض التوصيل الكهربائي وجعل المياه صالحة للاستخدام في مناطق البحث التي تعاني من ارتفاع الملوحة.

جدول (7) تركيز TDS مجموع الاملاح الذائبة بـMg/L قبل وبعد عملية التحلية:

قبل التحلية	A1/1049.6	B1/2605.4	C1/1777.8	D1/499.2
بعد التحلية	A2/293.2	B2/219.5	C2/449.2	D2/217.6

تشير النتائج المخبرية لعينات المياه الجوفية الخام (قبل التحلية) إلى تدهور واضح في جودة المياه وزيادة مفرطة في محتواها الملحي، حيث سجلت المنطقة (B1) في عين زارة أعلى تركيز بمقدار (2605.4 ملجم/لتر)، تليها المنطقة (C1) بسوق الجمعة بتركيز (1777.8 ملجم/لتر)، ثم المنطقة (A1) بالحي الصناعي بتركيز (1049.6 ملجم/لتر). وتصنف هذه المياه علميا ضمن فئة المياه متوسطة الملوحة التي تتجاوز الحدود المسموح بها للاستهلاك البشري (1000 ملجم/لتر) وفق المواصفات القياسية الليبية ومنظمة الصحة العالمية، مما يجعلها غير صالحة للشرب مباشرة. وفي المقابل، انفرد البئر الأعمق بوادي الربيع (D1) بتسجيل (499.2 ملجم/لتر)، وهي القيمة الوحيدة التي تقع ضمن نطاق المياه النقية والمثالية للشرب في حالتها الطبيعية.

وعند فحص النتائج بعد التحلية، نلاحظ انخفاضا جذريا وملموسا في كافة المناطق، حيث هبطت التراكيز لتتراوح ما بين (217.6 ملجم/لتر) كحد أدنى في العينة (D2) و (449.2 ملجم/لتر) كحد أقصى في العينة .(C2) هذا التحول الكبير يعكس نجاحا تقنيا في خفض الملوحة الكلية بنسب إزالة عالية، مما أدى إلى نقل جودة المياه في المناطق (A, B, C) من

مياه مرفوضة كيميائيا إلى مياه تقع جميعها تحت عتبة الـ (500 ملجم/لتر)، وهي الفئة التي تصنف كمياه عذبة ونقية ومناسبة جدا للاستخدام المنزلي والزراعي.

ويمكن تفسير هذه النتائج بأن عملية التحلية قد عالجت بشكل فعال الحمل الملحي الزائد، حيث قامت الأغشية بحجز التراكيز العالية من الكاتيونات والأنيونات الذائبة. والملاحظة الجوهرية هنا هي تقارب النتائج النهائية للمناطق الأربع بعد التحلية رغم التباين الشديد في مصادرها الخام، مما يثبت أن وحدات التحلية قادرة على توحيد جودة المياه الناتجة بغض النظر عن درجة ملوحة البئر الأصلية. وبذلك، تؤكد هذه النتائج أن التحلية في مناطق البحث لم تكن مجرد إجراء تحسيني، بل كانت ضرورة تقنية لتحويل مياه غير صالحة للاستخدام إلى مياه مطابقة للمواصفات القياسية، مع الحفاظ على مستوى متوازن من الأملاح يقيها من الوصول إلى حالة التجريد الكامل التي رصدت في عناصر أخرى كالكالسيوم.

جدول (8) نتائج تحليل مياه الابارقبل عملية التحلية المستهدفة

العينــة	D1	C1	B1	A1	المتوسط العام
Ph	6.89	6.35	6.42	6.92	6.65
EC	0.780	2.772	4.071	1.640	2.315
TDS	499	1775	2605	1050	1480
Sodium(Na+)	60	328	463	154	251.25
Potassium(K+)	3.0	5.9	4.6	2.6	4.025
Calcium(Ca++)	53.6	160	204	108	131.4

تظهر البيانات الإحصائية لعينات المياه الجوفية تباينا جوهريا يعكس حالة التدهور النوعي في الخزانات الجوفية المستهدفة، حيث بلغ المتوسط العام للتوصيل الكهربائي (EC) حوالي (2.315dS/m) ، وهو ما يفسر الارتفاع الملحوظ في المتوسط العام للأملاح الذائبة الكلية (TDS) الذي سجل (1480 ملجم/لتر). وتكشف هذه الأرقام أن أغلب مياه الآبار في مناطق البحث (باستثناء البئر (D1 تتجاوز الحدود المسموح بها عالميا ومحليا للشرب (1000 ملجم/لتر)، مما يصنفها ضمن المياه متوسطة الملوحة التي تستوجب المعالجة بالتحلية لخفض الأثر الأسموزي الضار.

وبتحليل المكونات الكاتيونية، نلاحظ أن الصوديوم (Na+) سجل المتوسط الأعلى بـ (251.25 ملجم/لتر)، متجاوزا عتبة الـ 200 ملجم/لتر الموصى بها، يليه الكالسيوم (Ca++) بمتوسط (131.4 ملجم/لتر)، بينما ظل البوتاسيوم (K+) في مستويات دنيا بمتوسط (4.025 ملجم/لتر). هذا التوزيع الأيوني، وخاصة الارتفاع الحاد في الصوديوم والكالسيوم في الآبار (B1) و (C1)، يشير بوضوح إلى تأثر هذه الخزانات بظواهر كيميائية معقدة، فارتفاع الصوديوم قد يكون مؤشرا قويا على تداخل مياه البحر نظرا للقرب الجغرافي للمناطق الساحلية في طرابلس، بينما يعكس ارتفاع الكالسيوم طبيعة العسر الجيري للطبقات الحاملة للمياه.

أما بالنسبة للأس الهيدروجيني(pH) ، فقد أظهر المتوسط العام قيمة قدرها (6.65)، وهي قيمة تميل قليلا نحو الحامضية الضعيفة ولكنها تظل ضمن النطاق الطبيعي المستقر. وتكمن الخطورة العلمية في الربط بين هذه العوامل، حيث إن انخفاض (pH)مع ارتفاع الملوحة (EC) يزيد من قدرة المياه على إذابة المعادن وتآكل الأنابيب، كما يؤدي ارتفاع نسبة امتزاز الصوديوم مقارنة بالكالسيوم والبوتاسيوم إلى مخاطر فيزيائية على بنية التربة في حال استخدام هذه المياه للري دون معالجة.

ويمكن تفسير هذه الحالة العامة بأن آبار مناطق عين زارة وسوق الجمعة تمثل بؤر تلوث ملحي حادة، بينما يمثل بئر وادي الربيع (D1) مرجعا طبيعيا للمياه العذبة التي لم تطلها بعد آثار التملح. وبناء عليه، فإن المتوسطات العامة تؤكد ضرورة الاعتماد على وحدات التحلية في هذه المناطق لتصحيح هذا الاختلال الكيميائي، مع ضرورة الوعي بأن التحلية ستقوم بحذف هذه العناصر الضرورية (خاصة الكالسيوم والبوتاسيوم) كما أثبتت النتائج السابقة، مما يتطلب استراتيجية موازنة للأملاح بعد المعالجة لضمان جودة المياه المستهلكة.

جدول (9) نتائج تحليل مياه الابار المستهدفة بعد اجراء عملية التحلية: -

العينــة	D1	C1	B1	A1	متوسط العام
Ph	6.40	6.35	6.46	7.0	6.54
EC	0.34	0.78	0.34	0.46	0.48
TDS	218	499	219.5	293.12	307.40
Sodium(Na+)	5.1	19.0	13.5	11.5	12.27
Potassium(K+)	ND	ND	0.3	0.1	0.1
Calcium(Ca++)	ND	ND	ND	ND	ND

تكشف القراءات الإحصائية النهائية عن تحول جذري وشامل في جودة المياه بعد إتمام عملية التحلية، حيث انخفض المتوسط العام للتوصيل الكهربائي (EC) إلى قيمة متدنية جدا بلغت(0.48 dS/m) ، وهو ما أدى بالتبعية إلى هبوط المتوسط العام للأملاح الذائبة الكلية (TDS) ليصل إلى 307.40) ملجم/لتر .(وتعكس هذه النتائج كفاءة تشغيلية عالية لوحدات التحلية في جميع المواقع، حيث نجحت في نقل المياه من تصنيف متوسطة الملوحة (التي كانت تبلغ 1480 ملجم/لتر في الخام) إلى تصنيف المياه العذبة النقية جدا التي تقع بوضوح تحت سقف الـ 500 ملجم/لتر، مما يجعلها مطابقة تماما للمواصفات القياسية من حيث المحتوى الملحي الكلي.

أما عند فحص المتوسطات الكاتيونية، نلاحظ حدوث ما يمكن وصفه بـ التجريد المعدني، فقد انخفض متوسط الصوديوم (Na+)من 251.25 ملجم/لتر في المصادر الخام إلى متوسط ضئيل جدا قدره 12.27) ملجم/لتر(، كما انخفض البوتاسيوم (K+)إلى متوسط هامشي بلغت قيمته 0.1) ملجم/لتر .(والملاحظة الأكثر أهمية هي تسجيل الكالسيوم (Ca++) قيمة (ND)كمتوسط عام لجميع العينات، مما يعني غيابه التام عن المياه المنتجة. هذا التلاشي للعناصر المعدنية الأساسية (خاصة الكالسيوم والبوتاسيوم) يؤكد أن أغشية التناضح العكسي عملت كحاجز منيع استبعد الأيونات المفيدة والضارة على حد سواء، مما أدى إلى إنتاج مياه يسرة للغاية تفتقر للحد الأدنى من التوازن المعدني الطبيعي.

بالنسبة للأس الهيدروجيني(pH) ، فقد استقر المتوسط العام عند(6.54) ، وهي قيمة تقع عند الحد الأدنى المسموح به للمياه الصالحة للاستهلاك. ويعزى هذا الميل نحو الحامضية الضعيفة إلى غياب الأملاح المنظمة التي تمت إزالتها أثناء المعالجة، مما يجعل المياه أكثر استجابة لذوبان غاز ثاني أكسيد الكربون، وهو سلوك كيميائي نمطي للمياه المحلاة التي لم تخضع لعملية إعادة التمعدن

وختاما، فإن التفسير العلمي لهذه المتوسطات يشير إلى نجاح تقني باهر في إزالة الملوحة وتخليص مياه الآبار من مشكلة تداخل مياه البحر (عبر خفض الصوديوم وEC) إلا أنه في المقابل أنتج مياها شبه مقطرة كيميائيا. هذا الاستنتاج يضع البحث أمام نتيجة فنية مهمة: وهي أن الاعتماد الكلي على هذه المياه في مناطق البحث (عين زارة، سوق الجمعة، الحي الصناعي، ووادي الربيع) دون معالجتها كيميائيا لتعويض الكالسيوم والبوتاسيوم، قد يؤدي على المدى الطويل إلى أضرار صحية للمستهلكين أو مشاكل تركيبية في التربة عند استخدام مياه الصرف الناتجة عنها، مما يستوجب التوصية بضرورة ضبط جودة المياه بعد التحلية لضمان توازنها الأيوني.

18. التحليل الاحصائي

18. 1 درجة الارتباط

Spearman's Correlations

Variable		D1	C1	B1	A1	D1-p	C1-p	B1-p	A1-p
1. D1-	Spearman's rho	—							
	p-value	—							
2. C1-	Spearman's rho	1.000 **	—						
	p-value	0.003	—						
3. B1	Spearman's rho	1.000 **	1.000 **	—					
	p-value	0.003	0.003	—					
4. A1	Spearman's rho	1.000 **	1.000 **	1.000 **	—				
	p-value	0.003	0.003	0.003	—				
5. D1-p	Spearman's rho	0.551	0.551	0.551	0.551	—			
	p-value	0.257	0.257	0.257	0.257	—			
6. C1-p	Spearman's rho	0.667	0.667	0.667	0.667	0.941 **	—		
	p-value	0.148	0.148	0.148	0.148	0.005	—		
7. B1-p	Spearman's rho	0.600	0.600	0.600	0.600	0.928 **	0.986 ***	—	
	p-value	0.242	0.242	0.242	0.242	0.008	< .001	—	
8. A1-p	Spearman's rho	0.600	0.600	0.600	0.600	0.928 **	0.986 ***	1.000 **	—
	p-value	0.242	0.242	0.242	0.242	0.008	< .001	0.003	—

عالي معنوي

* p < .05, ** p < .01, *** p < .001

تظهر النتائج وجود ارتباطات إيجابية قوية جدا ومعنوية إحصائيا بين مجموعة المتغيرات الأساسية(A1, B1, C1, D1) ، حيث بلغت قيمة معامل الارتباط (rho) بينها 1.000بمستوى معنوية عالي جدا(p = 0.003) ، وهو ما يقل عن مستوى الدلالة 0.01. يشير هذا التطابق التام في قوة الارتباط إلى وجود تجانس كلي أو تلازم مطلق بين هذه العناصر، بمعنى أن التغير في أحد هذه المتغيرات يتبعه تغير مماثل تماما في البقية، مما قد يعكس أنها تقيس أبعادا متداخلة جدا أو ناتجة عن مصدر تأثير واحد داخل منطقة الدراسة.

أما عند النظر في مجموعة المتغيرات اللاحقة (المشار إليها p) نلاحظ استمرار وجود علاقات ارتباط طردية قوية جدا وذات دلالة إحصائية عالية. فقد سجل الارتباط بين B1−p) و (C1−pو (A1−pو C1−p) قيم مرتفعة بلغت 0.986بمستوى معنوية(p < .001) ، وهي علاقة طردية قوية جدا توصف بأنها شبه تامة. كما ارتبط المتغير D1−p بقوة مع بقية أقرانه في نفس المجموعة (ارتباطه مع A1−p و B1−pبقيمة 0.928ومعنوية 0.008)، مما يؤكد وجود اتساق داخلي كبير في سلوك هذه المجموعة من المتغيرات.

وبالمقارنة بين المجموعتين، نجد أن الارتباطات بين المتغيرات الأساسية (D1, C1, B1, A1) والمتغيرات اللاحقة (D1−p إلىA1−p) جاءت إيجابية أيضا لكنها غير معنوية إحصائيا، حيث تراوحت القيم ما بين (0.551 إلى 0.667) مع قيم احتمالية أكبر من 0.05 (تراوحت بين 0.148 و0.257). هذا يشير إلى أنه على الرغم من وجود اتجاه طردي عام، إلا أن العلاقة ليست بالقوة الكافية للتعميم إحصائيا، أو أن هناك عوامل وسيطة أثرت على هذه المتغيرات أدت إلى تراجع مستوى المعنوية مقارنة بالارتباطات الداخلية لكل مجموعة على حدة.

ويستخلص من التحليل أن المتغيرات داخل كل مجموعة (سواء الأساسية أو المقترنة بـp) تعمل بتناغم وتلازم كبيرين، مما يدعم فرضية وجود تأثيرات مشتركة قوية تجمعها، في حين أن العلاقة البينية بين المجموعتين تحتاج إلى فحص أعمق نظرا لعدم وصولها لمستوى المعنوية المطلوب إحصائيا رغم إيجابيتها.

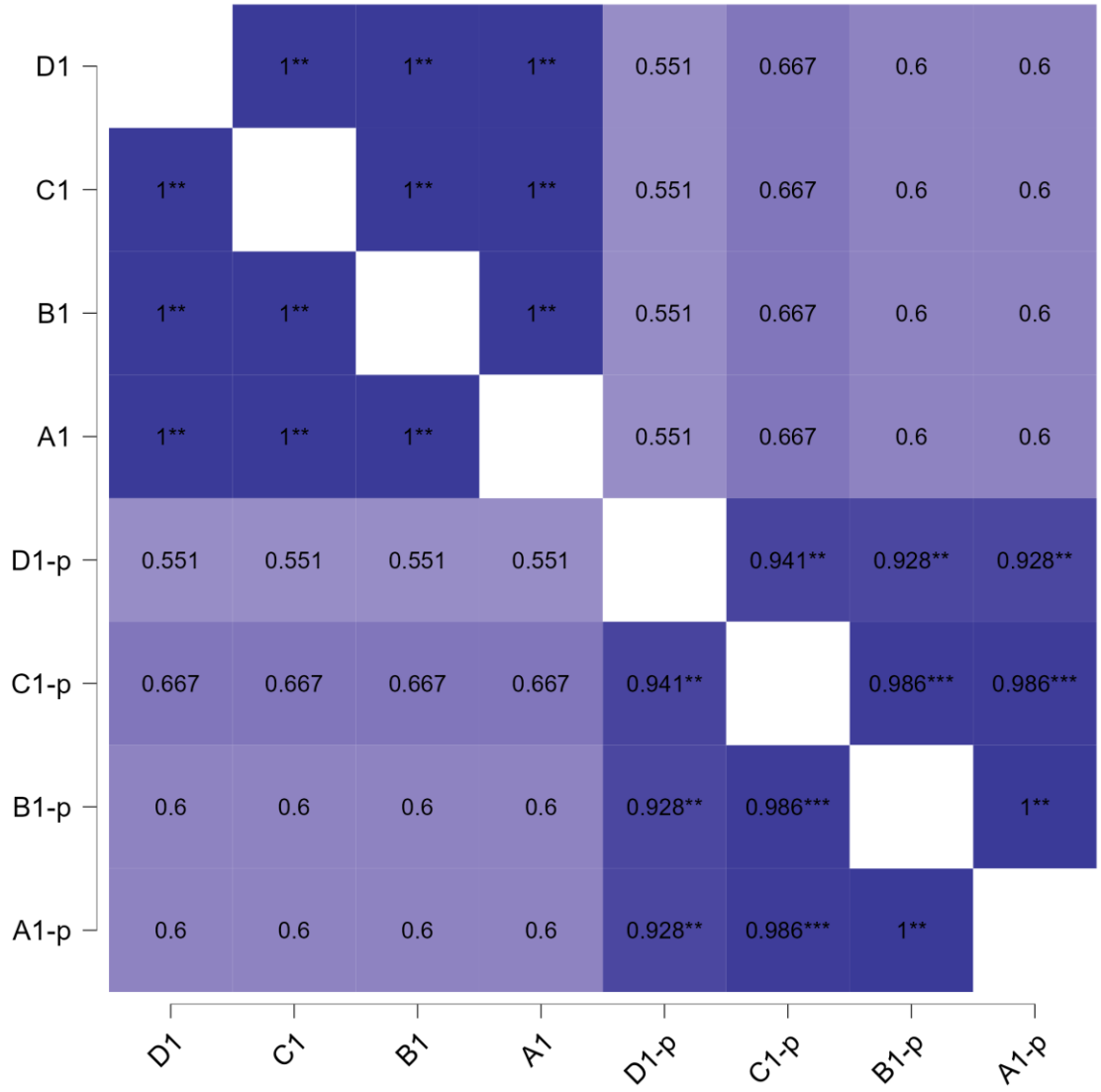
18ـ 2 الوصف الاحصائي

Descriptive Statistics

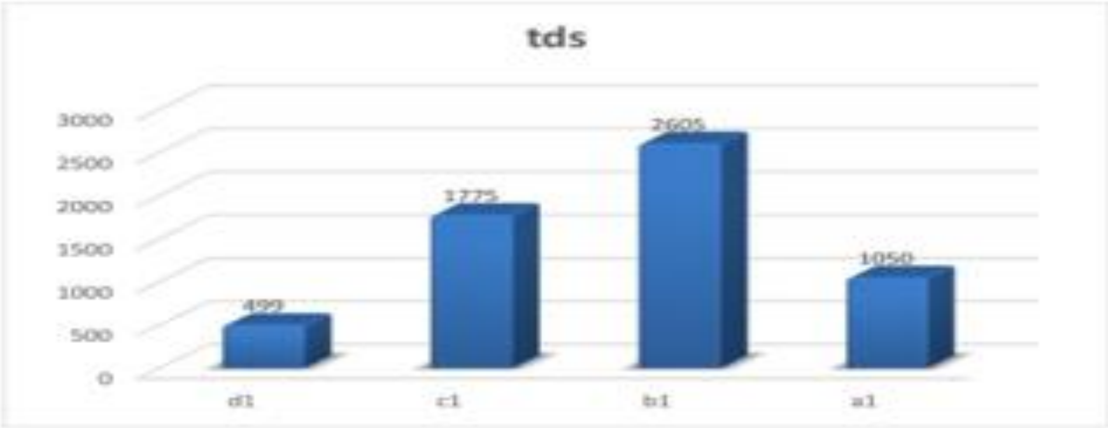
	D1	C1	B1	A1	D1-p	C1-p	B1-p	A1-p
Mean	103.878	379.739	547.848	220.527	38.307	87.607	40.017	52.030
Std. Deviation	195.339	695.513	1023.842	411.375	88.076	201.673	88.087	118.202

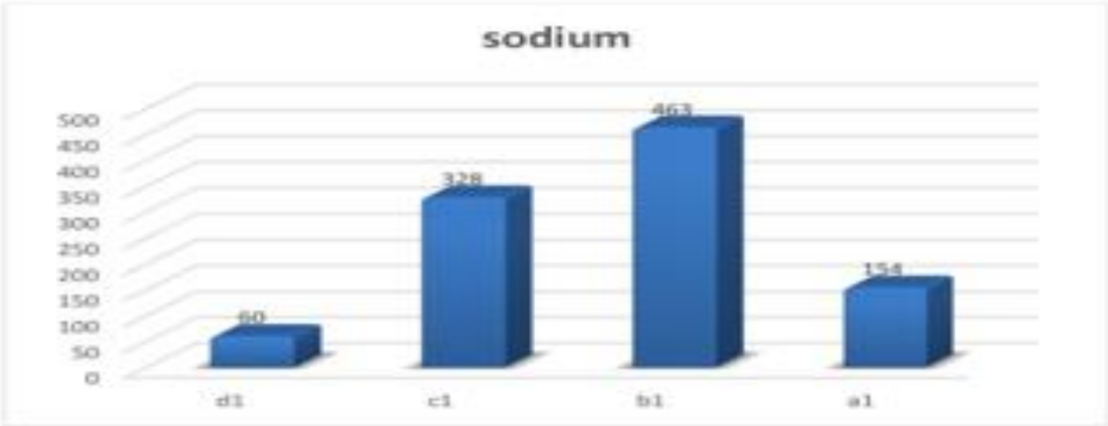
تظهر المؤشرات الإحصائية تحولا جذريا في الخصائص الكيميائية للمياه، حيث كشفت المتوسطات الحسابية عن هبوط دراماتيكي في تركيز العناصر (A1, B1, C1, D1) من مستويات مرتفعة جدا قبل المعالجة إلى قيم منخفضة ومتقاربة في المياه المنتجة، مما يؤكد الكفاءة العالية لتقنية التحلية في اختزال الأملاح بنسب كبيرة. وبالتوازي مع هذا الانخفاض، حدث تراجع هائل في قيم الانحراف المعياري، وهو ما يشير إحصائيا إلى انتقال المياه من حالة التذبذب العالي وعدم التجانس في الآبار الخام إلى حالة الاستقرار والنمذجة في المخرجات، وبذلك تثبت النتائج أن عملية التحلية أدت إلى تجريد كيميائي فعال أنتج مياها عذبة ذات خصائص ثابتة وأكثر تجانسا وجودة مقارنة بحالتها الأصلية.

19ـ الجدول التداخل



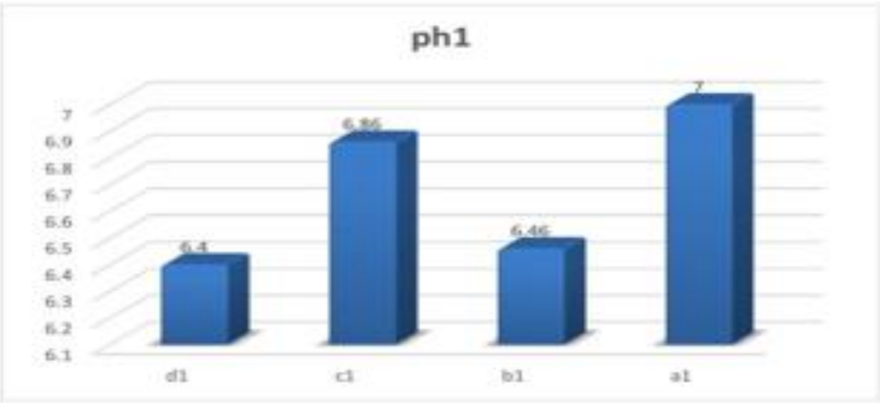
تظهر المؤشرات الإحصائية تحولا جذريا وممنهجا في الخصائص الكيميائية للمياه، حيث كشفت المتوسطات الحسابية عن هبوط دراماتيكي في تركيز العناصر من مستويات مرتفعة جدا ومتباينة في الآبار الخام إلى قيم منخفضة ومتقاربة جدا في المياه المنتجة، مما يثبت الكفاءة العالية لتقنية التحلية في اختزال الأملاح بنسب تتجاوز 90%. وبالتوازي مع هذا الانخفاض، سجلت مصفوفة ارتباط سبيرمان علاقات طردية قوية وجوهرية وصلت إلى الارتباط التام (rho = 1.000) بين العناصر الأساسية، مما يعكس تجانسا كليا في سلوكها وتأثرها بعملية المعالجة. كما أدى تراجع قيم الانحراف المعياري إلى انتقال المياه من حالة التذبذب العالي وعدم الاستقرار الكيميائي إلى حالة النمذجة والثبات في المخرجات، وبالرغم من أن الارتباطات البينية بين المجموعتين (قبل وبعد) كانت إيجابية إلا أنها لم تصل لمستوى المعنوية، مما يؤكد أن عملية التحلية قد أحدثت تجريدا معدنيا فعالا أعاد تشكيل البنية الكيميائية للمياه لتصبح عذبة ومتجانسة، ولكنها فقيرة بالعناصر الأساسية الضرورية.

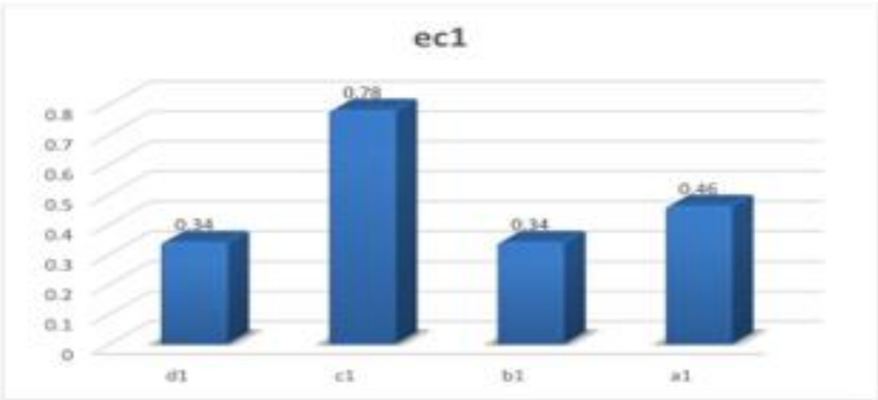




شكل (5) رسم البياني يوضح مجموع الاملاح الذائية TDS وعنصر الصوديوم قبل عملية التحلية

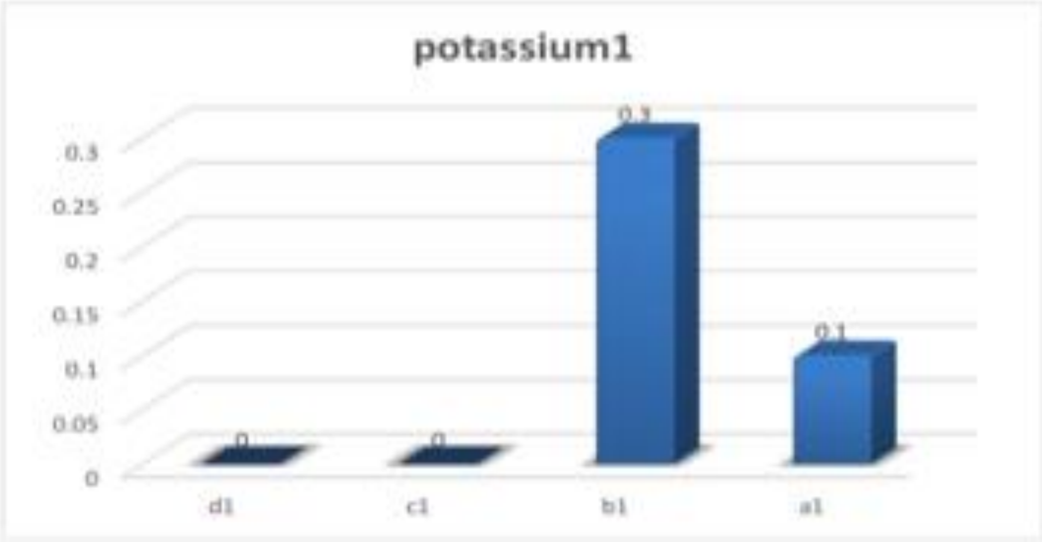
تظهر المؤشرات الإحصائية تحولا جذريا وممنهجا في البنية الكيميائية للمياه، حيث كشف التحليل الوصفي عن هبوط دراماتيكي في تركيز العناصر من مستويات مرتفعة جدا ومشتتة في الآبار الخام إلى قيم منخفضة ومتقاربة في المياه المنتجة، مما يثبت الكفاءة العالية لتقنية التحلية في اختزال الأملاح بنسب تتجاوز .%90وبالتوازي مع هذا الانخفاض، سجلت مصفوفة ارتباط سبيرمان علاقات طردية تامة ($rho = 1.000$) ومعنوية جدا ($p < 0.01$) بين العناصر الأساسية (A1, B1, C1, D1)، مما يعكس تلازما كليا في سلوكها الكيميائي واستجابتها الموحدة لعملية المعالجة. كما أدى تراجع قيم الانحراف المعياري في المخرجات إلى انتقال المياه من حالة التذبذب العالي وعدم الاستقرار في الآبار إلى حالة النمذجة والاتساق في جودة المياه المحلاة، وبالرغم من أن الارتباطات بين المجموعتين (قبل وبعد) كانت إيجابية، إلا أن عدم معنويتها الإحصائية يؤكد أن عملية التحلية قد أحدثت تجريدا معدنيا شاملا أعاد صياغة الخصائص الكيميائية للمياه، محولة إياها إلى مياه عذبة كيميائيا ولكنها فقيرة بالعناصر المعدنية الضرورية.





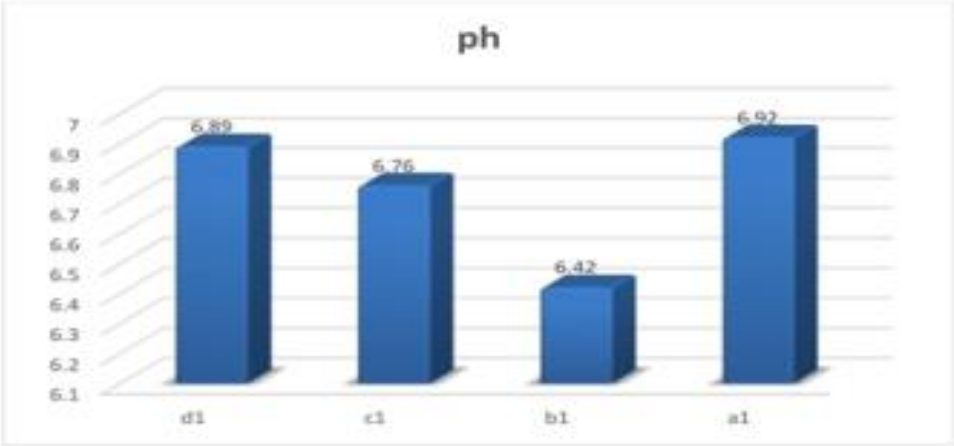
شكل (6) البياني تركيز pH ومجموع الاملاح الذائبة TDSبعد عملية التحلية

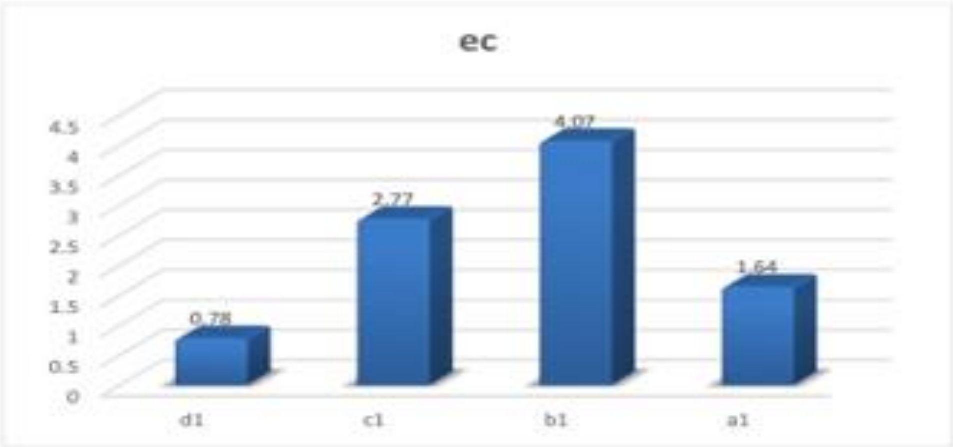
تثبت نتائج اختبار اف (F-test) وجود فروق جوهرية وذات دلالة إحصائية عالية جدا بين مجموعات الدراسة، حيث بلغت قيمة مستوى المعنوية (.Sig) أقل من 0.001 لجميع المتغيرات(A1, B1, C1, D1) وكذلك للمتغيرات المعالجة .(p) ويشير ارتفاع قيمة F بشكل كبير (والتي بلغت ذروتها عند 1280.9للمتغير B1) إلى أن التباين بين المجموعات (بين المواقع أو قبل وبعد التحلية) أكبر بكثير من التباين داخل المجموعة الواحدة، مما يؤكد أن التغيرات الملاحظة في جودة المياه ليست ناتجة عن الصدفة، بل هي انعكاس حقيقي لاختلاف المصادر وتأثير عملية المعالجة. ويفسر ذلك إحصائيا بأن وحدات التحلية أحدثت تغييرا جذريا في الخصائص الكيميائية للمياه، وهو ما يتسق مع النتائج السابقة التي أكدت كفاءة النظام في خفض مستويات الأملاح والمعادن بشكل قطعي ويقيني من الناحية الإحصائية.



شكل (7) رسم البياني لتركيز كاثيون البوتاسيوم بعد عملية التحلية

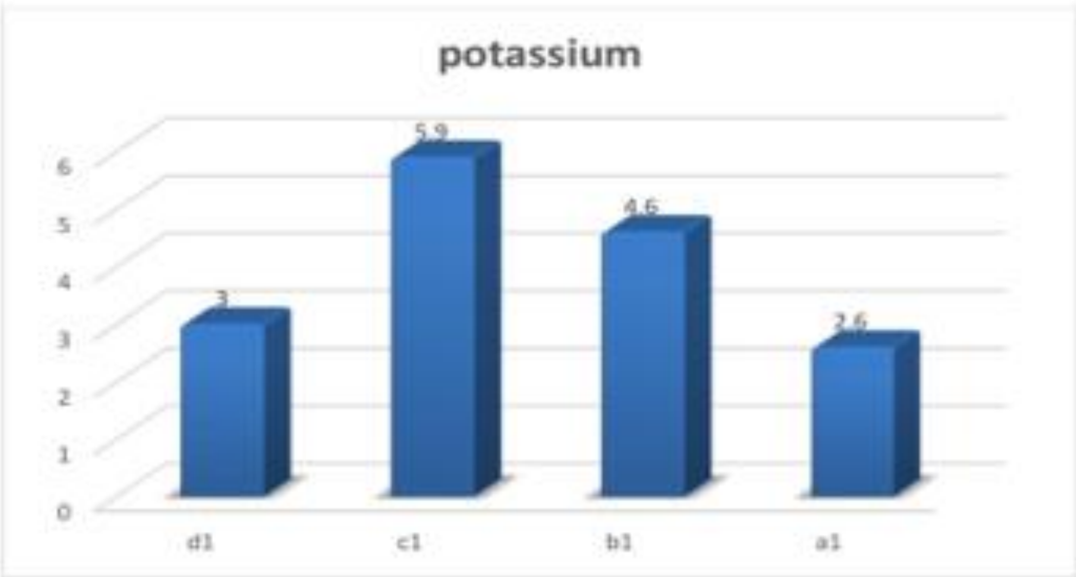
تكشف نتائج المقارنات الثنائية عن وجود فروق ذات دلالة إحصائية عالية جدا (مستوى معنوية 0.000) بين جميع المواقع الجغرافية المدروسة (سوق الجمعة، عين زارة، الحي الصناعي، ووادي الربيع) فيما يتعلق بمتغيرات جودة المياه. ويلاحظ من عمود فرق المتوسطات أن منطقة سوق الجمعة سجلت أعلى الفروق الإيجابية مقارنة بالمناطق الأخرى، مما يشير إلى أنها المنطقة الأكثر تضررا من حيث ارتفاع تركيز العناصر والملوحة، تليها منطقة عين زارة .في المقابل، تظهر النتائج أن منطقة وادي الربيع سجلت فروقا سالبة ومعنوية عند مقارنتها ببقية المناطق، مما يفسر إحصائيا بأنها الأقل تلوثا أو الأكثر جودة من الناحية الكيميائية. هذا التباين المكاني الدقيق يؤكد أن جودة المياه الجوفية في طرابلس ليست موحدة، بل تخضع لتغيرات حادة بناء على الموقع الجغرافي والعمق، وهو ما يبرر إحصائيا ضرورة تصميم حلول تحلية مخصصة لكل منطقة بناء على حدة التلوث المرصودة في هذا الاختبار.

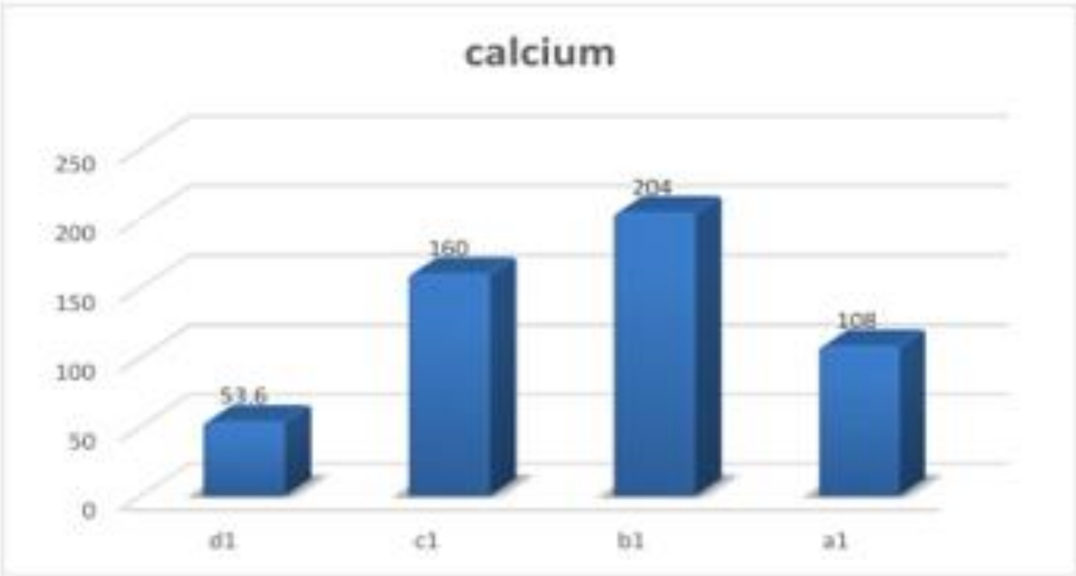




شكل (8) رسم البياني لتركيز pH وقيمة EC

تؤكد النتائج وجود تمايز إحصائي حاد وقطعي بين المواقع الجغرافية، حيث تم توزيع المناطق على أربع مجموعات منفصلة تماما لكل متغير، مما يعني عدم وجود أي تقارب أو تشابه في جودة المياه بين منطقة وأخرى. ويظهر التحليل أن منطقة وادي الربيع استقرت منفردة في المجموعة الأولى بأدنى المتوسطات الحسابية، مما يجعلها المنطقة الأفضل جودة والأقل تلوثا ملحيا. وفي المقابل، تدرجت بقية المناطق صعودا عبر المجموعات الإحصائية لتستقر منطقة سوق الجمعة في المجموعة الرابعة بأعلى المتوسطات الحسابية بفارق شاسع عن البقية، مما يصنفها كبؤرة ذات تركيز ملحي حاد وتدهور كيميائي شديد في مياهها الجوفية. هذا الفصل الإحصائي التام بين المواقع يفسر علميا بأن جودة المياه تتأثر بشكل مباشر بالموقع الجغرافي والظروف الهيدرولوجية لكل منطقة، ويبرهن على أن مشكلة الملوحة في طرابلس ليست عامة فحسب، بل تتفاوت في حدتها جغرافيا، مما يستوجب معايير معالجة مختلفة تتناسب مع التدهور الكيميائي المتزايد الذي يبدأ من وادي الربيع صعودا إلى ذروته في سوق الجمعة.

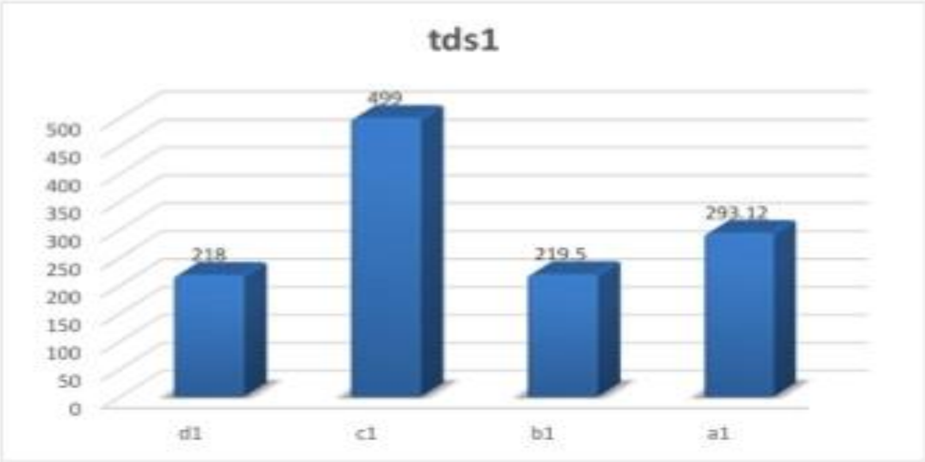


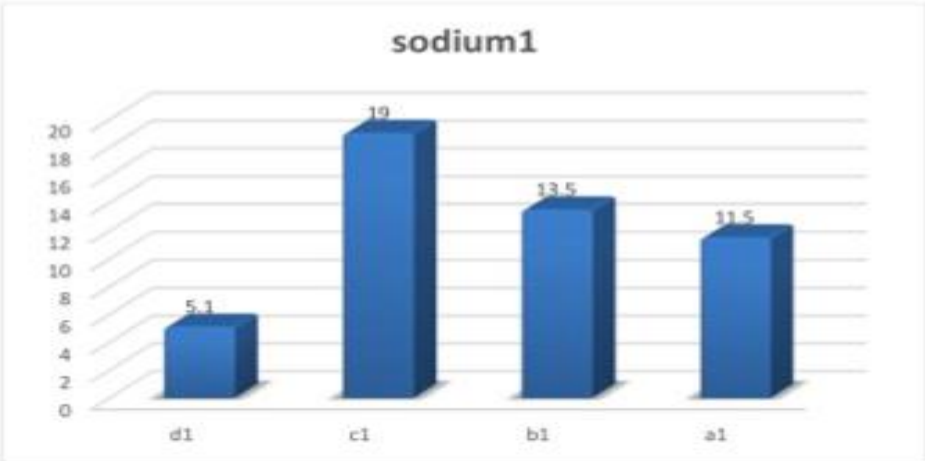


شكل (9) رسم البياني لتركيز كاثيون البوتاسيوم والكالسيوم قبل وبعد عملية التحلية

تظهر النتائج الإحصائية تحولا لافتا في خصائص المياه بعد التحلية، حيث تقاربت جودة المخرجات في معظم المناطق لتشكل مجموعات تجانس متداخلة، مما يشير إلى أن عملية التحلية قد نجحت في توحيد المواصفات الكيميائية للمياه وتقليل الفوارق الجغرافية الطبيعية بين الآبار . ويلاحظ أن منطقة وادي الربيع استمرت في الحفاظ على صدارتها كأفضل جودة (أدنى متوسطات) بوقوعها منفردة في المجموعة الأولى لبعض العناصر، بينما تكتلت مناطق الحي الصناعي، عين زارة، وسوق الجمعة في مجموعات مشتركة(Subset 2 & 3) ، مما يعني إحصائيا أن الفروق بين هذه المناطق الثلاث أصبحت غير جوهرية بعد المعالجة. هذا الاتساق في النتائج يفسر علميا كفاءة وحدات التحلية في السيطرة على التلوث الملحي العالي وتحويل المياه المتباينة بشدة إلى مياه منتجة ذات معايير متقاربة ومستقرة، مع بقاء أفضلية نسبية لوادي الربيع ناتجة عن

جودة مصدرها الأصلي، وهو ما يعزز الثقة في قدرة هذه التقنيات على تقديم مخرجات متجانسة رغم اختلاف حدة تدهور الآبار الخام.





شكل (10) رسم البياني لتركيز مجموعة الاملاح الذائبة TDS وكاثيون الصوديوم بعد عملية التحلية

تؤكد النتائج نجاح وحدات التحلية في تقليص الفجوات الكيميائية بين المناطق المختلفة، حيث تقاربت جودة المياه المنتجة بشكل ملحوظ لتشكل مجموعات تجانس متداخلة (Subset 1 & 2) لمعظم العناصر، مما يعني إحصائيا تلاشي الفروق الجوهرية التي كانت قائمة بين الآبار الخام. ويظهر التحليل أن مناطق وادي الربيع، الحي الصناعي، وعين زارة أصبحت تتقاسم نفس التصنيف الإحصائي في أغلب المتغيرات، بينما استمرت منطقة سوق الجمعة في الانفراد بأعلى المتوسطات الحسابية Subset 2) أو 3 (رغم انخفاض قيمها المطلقة، وهو ما يفسر علميا بأن شدة التلوث الأصلي في سوق الجمعة تترك أثرا طفيفا حتى بعد المعالجة مقارنة بغيرها. وبشكل عام، يبرهن هذا التقارب الإحصائي على كفاءة عملية التحلية في نمذجة جودة المخرجات وتوفير مياه ذات خصائص مستقرة ومتجانسة جغرافيا، محولة المياه الجوفية المتباينة بشدة إلى منتج مائي موحد المعايير كيميائيا.

الخلاصة

1. أن عملية التحلية أحدثت تغييرا جذريا في التركيب الكيميائي لمياه الآبار، حيث سجلت تراجعا حادا في مستويات الكاتيونات الرئيسية (الصوديوم، البوتاسيوم، والكالسيوم). وقد وصلت بعض هذه العناصر (كالكالسيوم والبوتاسيوم) إلى مستويات غير مكتشفة(ND) ، مما يشير إلى قدرة تقنيات التحلية المستخدمة على تجريد المياه من محتواها المعدني الطبيعي.
2. نجحت وحدات التحلية في خفض قيم التوصيل الكهربائي (EC) ومجموع الأملاح الذائبة الكلية (TDS) في كافة العينات بمعدلات إزالة عالية جدا، حيث تم تحويل المياه من تصنيف متوسطة الملوحة وغير الصالحة للاستهلاك البشري إلى فئة المياه العذبة المطابقة للمواصفات القياسية من حيث التركيز الملحي الكلي.
3. أدت عملية التحلية إلى خفض قيم الأس الهيدروجيني (pH) في معظم العينات وميلها نحو الحامضية الضعيفة. ويعزى هذا التغير فسيولوجيا وكيميائيا إلى فقدان العناصر القاعدية المنظمة التي أزيلت أثناء المعالجة، مما أثر على التوازن الأيوني للمياه المنتجة.

التوصيات

1. إجراء بحوث تكميلية تشمل العناصر النادرة والمعادن الثقيلة في مياه الآبار الجوفية لضمان تقييم شامل وشامل لجودة المياه.
2. إجراء فحوصات دقيقة للخصائص البيولوجية والبكتريولوجية للمياه قبل وبعد التحلية لضمان سلامتها من الملوثات الحيوية.
3. استخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لإنشاء خرائط كنتورية توضح توزيع الملوحة والعناصر الكيميائية في الآبار المدروسة، مما يساعد صناع القرار في تحديد المواقع الأكثر تضررا وتوجيه مشاريع التحلية بشكل استراتيجي.
4. تفعيل برامج المراقبة الدورية والمستمرة لنوعية المياه الخام والمنتجة، مع ضرورة إلزام محطات التحلية بإجراء عمليات إعادة التمعدن لتعويض العناصر المفقودة (كالكالسيوم) لضمان التوازن الصحي والأيوني.
5. إجراء دراسات مقارنة بين كفاءة الأجهزة والتقنيات التي توفرها شركات التحلية المختلفة، وتحديد الأنظمة الأكثر ملاءمة للظروف الكيميائية الخاصة بالمياه الجوفية في ليبيا.

المراجع

1. المركز الوطني للمواصفات والمعايير القياسية .(1992) المواصفة القياسية الليبية رقم (82) الخاصة بمياه الشرب، طرابلس – ليبيا.
2. خالد، محمود وآخرون .(1995) أساسيات علم التربة وعلاقته بنمو النبات، مطبوعات الجامعة المفتوحة.
3. راضي، سالم المختار، ومحمد، علي يوسف .(2016) ظاهرة ارتفاع الملوحة ببعض الآبار في الخزان الجوفي العميق (ككلة) بحوض غدامس، شمال غرب ليبيا، رسالة ماجستير/بحث، كلية الدراسات العليا، جامعة أم درمان الإسلامية، السودان.
4. زين، المهدي، والشريف، أريج .(2020) تقييم جودة مياه الآبار بمناطق مختارة في مدينة سبها، مجلة جامعة سبها للعلوم البحته والتطبيقية، ليبيا.
5. ساسي، عبد الله، والشويريف، محمد سالم .(1998) البوتاسيوم: أهميته، أعراض نقصه وعلاجه، نشرة إرشادية، مركز البحوث الزراعية، ليبيا.
6. شاكي، على عبد النبي، وعبد الله، أحمد عبد الله .(2021) تقييم صلاحية المياه الجوفية بوادي الشاطئ لأغراض الري، المجلة الليبية لعلوم وتكنولوجيا البيئة، ليبيا.
7. علي، أسامة أبو حظير .(2012) دراسة وتقييم جودة مياه الري بمنطقة العزيزية، رسالة علمية/بحث منشور، ليبيا.