International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 39 العدد
Part 1 المجلد
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
International Science and Technology Journal
ISTJ

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

Received	2026/07/14	تم استلام الورقة العلمية في
Accepted	2026/08/04	تم قبول الورقة العلمية في
Published	2026/08/06	تم نشر الورقة العلمية في

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا):

دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته بمسارات الجريان

د. عبد الوهاب بوبطينة، *م. حمزة محمد سلطان[1]

جامعة بنغازي – ليبيا

*hamza.m.s.1989@gmail.com

1- https://orcid.org/0009-0009-9268-7084

الملخص

تتناول هذه الدراسة التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لجودة المياه الجوفية بمدينة المرج، شمال شرق ليبيا، للتحقق من مخاطر تلوث الخزان الكارستي الناجم عن بركة تجميع مياه الصرف الصحي الكبرى (216.58 هكتارًا) والآبار الامتصاصية العشوائية. جُمعت عينات مياه من خمسة آبار جوفية في يوم واحد بتاريخ 2 يونيو 2026 وأُخضعت لتحاليل فيزيائية وكيميائية وميكروبيولوجية قياسية، بالإضافة إلى استخدام تحليل ارتباط بيرسون (Pearson correlation) كأداة إحصائية. أظهرت النتائج تجاوز عدة مؤشرات للحدود المسموح بها محلياً وعالمياً (WHO) حيث صُنفت مياه جميع الآبار كمياه عسرة جداً بتجاوز قيم العسر الكلي لـ 500 mg/L .وسجلت جميع الآبار تلوثاً برازياً، وسجل البئر رقم (4) أعلى تركيز لبكتيريا الإشريكية القولونية (E. coli) بلغ 387.3MPN/100mL .إحصائياً، أظهرت النتائج ارتباطاً موجباً قوياً جداً بين بكتيريا E. coli والمكورات المعوية (r = 0.999) وارتباطاً موجباً بين المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS) والنترات (r = 0.606) وتُعد هذه المعاملات نتائج استكشافية أولية نظراً لمحدودية حجم العينات. تخلص الدراسة إلى أن مياه الآبار الخمسة غير صالحة للشرب وتكشف عن اختراق صريح للملوثات عبر مسارات التدفق الكارستي، مما يتطلب معالجة فورية للمياه الجوفية وتطوير منظومة الصرف الصحي بالمدينة لحماية الصحة العامة.

International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 39 العدد
Part 1 المجلد
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
International Science and Technology Journal
ISTJ

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

الكلمات المفتاحية: تسرب مياه الصرف الصحي، مؤشرات التلوث البرازي، الكيمياء المائية، عسر المياه، الصخور الكربوناتية.

Hydrochemical and Microbiological Assessment of Groundwater Contamination in the Karst Aquifer of Al Marj City, Libya: Impacts of Sewage and Its Relationship with Groundwater Flow Paths

Dr. Abdulwahab M Bubtaina, Eng. Hamzah M Sultan
University of Benghazi - Libya
hamza.m.s.1989.@gmail.com

Abstract

This study presents a hydrochemical and microbiological assessment of groundwater quality in Al Marj City, northeastern Libya, to evaluate the risk of contamination of the karst aquifer caused by the city's main sewage wastewater pond (216.58 ha) and uncontrolled cesspits. Groundwater samples were collected from five wells on a single day (2 June 2026) and analyzed for standard physicochemical and microbiological parameters. Pearson correlation analysis was also applied as a statistical tool to explore relationships among the measured variables. The results revealed that several water quality parameters exceeded the permissible limits established by Libyan drinking water standards and the World Health Organization (WHO). All groundwater samples were classified as very hard water, with total hardness exceeding 500 mg/L as $CaCO_3$. Microbiological analysis confirmed fecal contamination in all wells, with Well No. 4 exhibiting the highest Escherichia coli (E. coli) concentration of 387.3 MPN/100 mL. Statistically, a very strong positive correlation was observed between E. coli and Enterococci ($r = 0.999$), while a moderate positive correlation was found between total dissolved solids (TDS) and nitrate ($r = 0.606$). These correlations should be considered preliminary and exploratory because of the limited sample size. The findings indicate that groundwater from all five wells is unsuitable for drinking and provide strong evidence of contaminant migration

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

through karst groundwater flow pathways. The study highlights the urgent need for groundwater treatment and comprehensive improvement of the city's wastewater management system to protect public health.
Keywords: Wastewater infiltration, Faecal indicators, Hydrochemistry, Water hardness, Carbonate rocks.

المقدمة

تعد المياه الجوفية المصدر الرئيسي لمياه الشرب في العديد من المناطق الجافة وشبه الجافة، حيث يزداد الاعتماد عليها في ظل محدودية الموارد المائية السطحية وتذبذب معدلات هطول الأمطار. وفي ليبيا، تمثل المياه الجوفية المورد المائي الأساسي لمعظم المدن، مما يجعل المحافظة على جودتها عنصرًا رئيسيًا لضمان الأمن المائي وحماية الصحة العامة.[1] وتعتمد مدينة المرج، الواقعة في منطقة الجبل الأخضر شمال شرق ليبيا، بصورة كبيرة على المياه الجوفية لتلبية احتياجاتها من مياه الشرب والاستخدامات اليومية، نظرًا لمحدودية المصادر المائية البديلة. كما تتميز المنطقة بوجود خزان جوفي كارستي ذي نفاذية مرتفعة، وهي خاصية تسهم في تعزيز تغذية الخزان بالمياه، لكنها في الوقت نفسه تزيد من قابليته لاستقبال الملوثات وانتقالها بسرعة إلى المياه الجوفية. ويرد الوصف الجيولوجي والهيدروجيولوجي التفصيلي لمنطقة الدراسة في قسم المواد وطرائق البحث، [2–3] شهدت مدينة المرج خلال العقود الأخيرة توسعًا عمرانيًا ونموًا سكانيًا متزايدًا لم يواكبه تطوير مماثل في البنية التحتية لمنظومة الصرف الصحي. ونتيجة لذلك، يعتمد عدد من الأحياء السكنية على الآبار الامتصاصية للتخلص من مياه الصرف الصحي، في حين أن محطة معالجة مياه الصرف الصحي المركزية متوقفة عن العمل، مما أدى إلى تجميع مياه الصرف الخام في بركة سطحية مجاورة دون معالجة. وتمثل هذه الظروف مصادر محتملة لتلوث الخزان الجوفي، خاصة في البيئات الكارستية التي تتميز بسرعة انتقال المياه والملوثات عبر الشقوق والفواصل الصخرية [4–5] واختيرت مدينة المرج منطقةً للدراسة لعدة اعتبارات، أهمها الاعتماد شبه الكامل على المياه الجوفية كمصدر لمياه الشرب، والطبيعة الكارستية للخزان الجوفي، إضافة إلى تعطل محطة معالجة مياه الصرف الصحي وانتشار الآبار الامتصاصية، وهي عوامل قد تزيد من

احتمالية تأثر جودة المياه الجوفية بالتلوث. كما تمثل المدينة إحدى المناطق ذات الأهمية السكانية والزراعية في إقليم الجبل الأخضر، الأمر الذي يمنح نتائج الدراسة أهمية تطبيقية في دعم إدارة الموارد المائية وحماية الصحة العامة. وعلى الرغم من تناول عدد من الدراسات تقييم جودة المياه الجوفية في ليبيا وفي مناطق أخرى ذات ظروف هيدروجيولوجية مشابهة، فإن المعلومات المتعلقة بالتقييم المتكامل للجودة الهيدروكيميائية والميكروبيولوجية للمياه الجوفية في مدينة المرج ما تزال محدودة، خاصة في ظل المتغيرات المرتبطة بتعطل منظومة معالجة مياه الصرف الصحي والاعتماد على الآبار الامتصاصية. كما أن الربط بين الخصائص الهيدروكيميائية والمؤشرات الميكروبيولوجية لتفسير التأثير المحتمل لمصادر التلوث المحلية لم يحظ بالاهتمام الكافي، مما يبرز الحاجة إلى إجراء دراسة ميدانية متكاملة تسد هذه الفجوة البحثية. وبناءً على ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الجودة الهيدروكيميائية والميكروبيولوجية للمياه الجوفية في مدينة المرج، ومقارنة نتائج التحاليل بالمواصفات القياسية الليبية وإرشادات منظمة الصحة العالمية، واستقصاء التأثير المحتمل لمصادر التلوث المحلية على جودة المياه، بما يسهم في توفير بيانات علمية تدعم الإدارة المستدامة للموارد المائية واتخاذ القرارات المتعلقة بحماية الصحة العامة.

مشكلة البحث

تتحدد مشكلة البحث في التدهور النوعي لمياه الخزان الجوفي بمدينة المرج، الناتجة عن تسرب مياه الصرف الصحي غير المعالجة عبر التكوينات الصخرية الكارستية ذات النفاذية العالية[5]. وتتضاعف هذه المشكلة نظراً لأن القياسات الفيزيوكيميائية التقليدية قد تُظهر مؤشرات مقبولة ظاهرياً، في حين تتسرب الملوثات الميكروبيولوجية بسرعة عبر التشققات الكارستية المفتوحة دون المرور بعمليات ترشيح طبيعية كافية[3]. وتكمن المشكلة الميدانية والتحليلية في عدم تحديد الملوثات الميكروبية من مصدر الاستخراج المباشر (فوهة البئر – Wellhead) بشكل مستقل عن ملوثات وسائل النقل والتوزيع؛ مما يحول دون التقييم الدقيق لمدى تغلغل البكتيريا الدالة على التلوث البرازي مثل بكتيريا

القولون الكلية والقولونية الإشريكية (E. coli) داخل طبقات الخزان الجوفي نفسه، ويرفع من مستوى المخاطر الصحية المترتبة على استخدام هذه المياه للاستهلاك البشري.

أهداف البحث

يتمحور هذا البحث حول تحقيق الأهداف الأكاديمية والتطبيقية التالية:

1. التقييم الفيزيائي و الهيدروكيميائي الشامل: قياس وتحليل المؤشرات الفيزيائية والكيميائية الرئيسية مثلTDS ، الايصالية الكهربائية، الأس الهيدروجيني PH العسر الكلي TH، والكلوريد CL^- والكبريتات SO_4^{2-} والبوتاسيوم K والصوديوم Na والقلوية الكلية HCO_3 والنترات NO_3 لـ 5 آبار جوفية حيوية موزعة في مواقع مختلفة بمدينة المرج بئر رقم (1) بئر رقم (2) بئر رقم (3) بئر رقم(4) و بئر رقم (5).
2. التقييم والتشخيص الميكروبيولوجي: الكشف العلمي عن المؤشرات البكتيرية والفطرية الفضلية الحاضرة في الخزان العدد الكلي للبكتيريا، بكتيريا القولون الكليةTCF ، الستريبتوكوكس المعويةFS ، والإشريكية القولونية E. coli للتحقق من اختلاط المياه الجوفية بمياه الصرف الصحي السطحية.
3. مطابقة معايير السلامة والصلاحية: مقارنة كافة النتائج المختبرية المرصودة بالمواصفات القياسية الليبية لمياه الشرب ومعايير منظمة الصحة العالمية (WHO)لتحديد مدى ملاءمة الاستهلاك البشري الحالي.
4. تفسير آلية الانتقال وتقديم الحلول التكنولوجية: ربط النتائج الحقلية والمخبرية بالوضع الجيولوجي الكارستي والبيئي للمدينة (الآبار السوداء وبركة تجميع الصرف الصحي)، وتقديم توصيات هندسية وعملية عاجلة لأصحاب القرار لتعقيم المياه وحماية الأمن الصحي والبيئي بالمرج.

مراجعة الادبيات والدراسات السابقة

تناولت الدراسات السابقة موضوع جودة المياه الجوفية من جوانب متعددة، شملت التقييم الهيدروكيميائي، والتلوث الميكروبيولوجي، وتأثير مياه الصرف الصحي في الخزانات الجوفية، ولا سيما في البيئات الكارستية. ويعرض هذا القسم أبرز الدراسات ذات الصلة

مرتبةً ترتيبًا زمنيًا من الأقدم إلى الأحدث، مع تحليل نتائجها وبيان علاقتها بالدراسة الحالية

1. دراسة عبيدات وآخرون (2013)

تناول عبيدات وآخرون (2013) تأثير محطة معالجة مياه الصرف الصحي في منطقة الرمثا شمال الأردن على جودة المياه الجوفية من خلال تحليل مجموعة من المؤشرات الفيزيائية والكيميائية لعينات الآبار الواقعة بالقرب من محطة المعالجة. وأظهرت النتائج ارتفاع تراكيز النترات والكلوريدات والمواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS) وتجاوز عدد من العينات الحدود الموصى بها لمياه الشرب، مما أكد أن تسرب مياه الصرف الصحي يمثل أحد أهم مصادر تلوث الخزان الجوفي في المنطقة[6].

وتتفق هذه النتائج مع فرضية الدراسة الحالية التي تفترض أن تسرب مياه الصرف الصحي يعد من أهم العوامل المؤثرة في تدهور جودة المياه الجوفية بمدينة المرج. إلا أن الدراسة اقتصرت على تقييم الخصائص الفيزيائية والكيميائية، ولم تتناول المؤشرات الميكروبيولوجية أو العلاقة بين الخصائص الهيدروكيميائية والبيئة الكارستية، وهو ما تسعى الدراسة الحالية إلى معالجته من خلال تقييم متكامل يجمع بين الجانبين الكيميائي والميكروبيولوجي.

2. دراسة حماد وآخرون (2021)

أجرى حماد وآخرون (2021) تقييماً لجودة المياه الجوفية بمدينة المرج اعتمادًا على مجموعة من المؤشرات الفيزيائية والكيميائية والميكروبيولوجية. وأظهرت النتائج أن عدداً من الآبار سجل تراكيز مرتفعة لبعض المؤشرات الكيميائية والميكروبية مقارنة بالحدود المسموح بها لمياه الشرب، مما يشير إلى وجود مخاطر صحية محتملة، وأوصت الدراسة بضرورة المراقبة الدورية لجودة المياه وتطوير إجراءات المعالجة[7].

وتتوافق هذه النتائج مع الدراسة الحالية في التأكيد على أهمية المراقبة المستمرة لجودة المياه الجوفية في مدينة المرج، إلا أن دراسة حماد وآخرين ركزت على توصيف جودة المياه دون الربط بصورة متكاملة بين الخصائص الهيدروكيميائية والمؤشرات الميكروبيولوجية ومصادر التلوث المحلية، كما لم تناقش بصورة تفصيلية تأثير الطبيعة الكارستية للخزان الجوفي، وهو ما يمثل أحد المحاور الرئيسة في الدراسة الحالية

3. دراسة الأوجلي وآخرون (2022)

هدفت دراسة الأوجلي وآخرون (2022) إلى تقييم الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية في مدينة المرج شمال شرق ليبيا، من خلال تحليل مجموعة من مؤشرات جودة المياه ومقارنتها بالمواصفات القياسية الليبية وإرشادات منظمة الصحة العالمية. وأظهرت النتائج أن معظم العينات كانت ضمن الحدود المسموح بها، في حين سجلت بعض الآبار ارتفاعًا في تراكيز الكلوريد والأمونيا، مما يشير إلى احتمال تأثرها بتسرب مياه الصرف الصحي أو بالأنشطة الزراعية. كما أوضحت الدراسة وجود تباين مكاني في جودة المياه، حيث كانت بعض المواقع الواقعة شرق وغرب المدينة أكثر عرضة للتلوث من غيرها[8].

وتنسجم هذه النتائج مع الدراسة الحالية في أن جودة المياه الجوفية بمدينة المرج ليست متجانسة مكانيًا، وأن بعض الآبار أكثر عرضة للتلوث نتيجة الظروف البيئية المحيطة. إلا أن دراسة الأوجلي وآخرين اقتصرت على تقييم الخصائص الفيزيائية والكيميائية، ولم تتضمن تقييمًا ميكروبيولوجيًا أو تحليلًا للعلاقة بين المؤشرات الكيميائية والمؤشرات البكتيرية لتحديد مصدر التلوث. بينما تعتمد الدراسة الحالية على تقييم متكامل يجمع بين التحاليل الهيدروكيميائية والميكروبيولوجية، مع تفسير النتائج في ضوء مصادر التلوث المحلية والخصائص الكارستية للخزان الجوفي.

4. دراسة القراوي وآخرون (2023)

أجرى القراوي وآخرون (2023) دراسة لتقييم الخصائص الهيدروكيميائية للمياه الجوفية في حوض وادي فاطمة بالمملكة العربية السعودية باستخدام التحاليل الجيوكيميائية، والمؤشرات النوعية للمياه، والتحليل الإحصائي متعدد المتغيرات لتحديد العمليات المتحكمة في كيمياء المياه ومصادر التلوث. وأظهرت النتائج أن نسبة كبيرة من العينات تجاوزت الحدود الموصى بها لمياه الشرب فيما يتعلق بالنترات وبعض الأيونات الرئيسة، كما بينت الدراسة أن إعادة تغذية الخزان بمياه الصرف الصحي، إلى جانب التجوية والتبخر، تعد من أهم العوامل المؤثرة في تدهور جودة المياه الجوفية. وأوصى الباحثون بضرورة المعالجة المسبقة للمياه قبل استخدامها للشرب[9].

وتؤيد دراسة القروي وزملاؤه الدراسة الحالية في تأكيد الدور المهم لمياه الصرف الصحي في التأثير على جودة المياه الجوفية، وفي الاعتماد على التقييم الهيدروكيميائي لتحديد مصادر التلوث. إلا أنها ركزت على تفسير العمليات الجيوكيميائية باستخدام المؤشرات الكيميائية فقط، دون دمج المؤشرات الميكروبيولوجية للتحقق من وجود تلوث برازي. بينما تتميز الدراسة الحالية بدمج المؤشرات الهيدروكيميائية والميكروبيولوجية في إطار تقييم متكامل، بما يسمح بتفسير أكثر دقة للتأثير المحتمل لمصادر التلوث المحلية على جودة المياه الجو

5. دراسة Gyimah وآخرون (2024)

أجرى Gyimah وآخرون (2024) مراجعةً منهجية شملت 82 دراسة منشورة بين عامي 2012 و2023 لتقييم تأثير أنظمة الصرف الصحي اللامركزية والحفر الامتصاصية على جودة المياه الجوفية. وأظهرت المراجعة أن أكثر المؤشرات ارتباطًا بتلوث المياه الجوفية بمياه الصرف الصحي هي الإشريكية القولونية (E. coli) وبكتيريا القولون الكلية (Total Coliform) و Enterococcus spp.، بالإضافة إلى النترات، والأمونيوم، والكلوريدات. كما بينت الدراسة أن نوع التربة، والخصائص الهيدروجيولوجية، وكثافة الحفر الامتصاصية، وقرب الآبار من مصادر الصرف الصحي تعد من أهم العوامل التي تتحكم في انتقال الملوثات إلى الخزان الجوفي، وأكدت الحاجة إلى تحسين إدارة أنظمة الصرف الصحي لحماية موارد المياه الجوفية [10].

وتتفق هذه الدراسة مع الدراسة الحالية في اعتبار المؤشرات الميكروبيولوجية والكيميائية معًا أدوات رئيسية للكشف عن تأثير مياه الصرف الصحي على جودة المياه الجوفية. إلا أن دراسة Gyimah اعتمدت على مراجعة الأدبيات العالمية دون إجراء تقييم ميداني لمنطقة محددة، بينما تعتمد الدراسة الحالية على قياسات حقلية ومخبرية مباشرة لآبار مدينة المرج، مع تفسير النتائج في ضوء الظروف الجيولوجية والبيئية المحلية.

6. دراسة حول تطور الهيدروكيمياء وجودة المياه في الخزانات الكارستية (2024)

تناولت دراسة نُشرت في Journal of Environmental Management (2024) تطور الخصائص الهيدروكيميائية وجودة المياه الجوفية في أحد الخزانات الكارستية الخاضعة لضغوط بشرية مكثفة، باستخدام التحليل الهيدروكيميائي والإحصائي متعدد

المتغيرات. وأظهرت النتائج أن الأنشطة البشرية، ولا سيما التوسع العمراني واستغلال المياه الجوفية، أدت إلى زيادة تراكيز الأيونات الرئيسية، مثل الصوديوم والكلوريد والكبريتات والنترات والمواد الصلبة الذائبة، مع تدهور تدريجي في جودة المياه، خاصة في مناطق التصريف، وأوصت الدراسة بضرورة المراقبة طويلة الأمد لحماية الخزانات الكارستية من التلوث[11].

وتتوافق هذه الدراسة مع الدراسة الحالية في التأكيد على حساسية الخزانات الكارستية للتأثيرات البشرية، إلا أنها ركزت على التطور الهيدروكيميائي للمياه ولم تتضمن تقييمًا للمؤشرات الميكروبيولوجية. أما الدراسة الحالية فتجمع بين التحليل الهيدروكيميائي والتقييم الميكروبيولوجي، مما يوفر فهمًا أكثر شمولًا لمصادر التلوث والمخاطر الصحية المرتبطة به.

7. دراسة مقارنة بين أنواع الخزانات الجوفية (2025)

هدفت دراسة منشورة في مجلة Hydrology (2025) إلى مقارنة الخصائص الهيدروكيميائية للمياه الجوفية في الخزانات المسامية، والمتشققة، والكارستية باستخدام التحليل الإحصائي متعدد المتغيرات، بما في ذلك تحليل المكونات الرئيسية (PCA) والتحليل العنقودي (HCA) أظهرت الدراسة وجود اختلافات واضحة في الخصائص الهيدروكيميائية والعوامل المتحكمة في كيمياء المياه بين الخزانات المسامية والمتشققة والكارستية، كما أوضحت أن الأنشطة البشرية، ولا سيما تصريف مياه الصرف الصحي والتسميد الزراعي، تسهم في التأثير على كيمياء المياه الجوفية في الأنواع الثلاثة، مع بروز تأثير عمليات ذوبان الصخور الكربوناتية في الخزانات الكارستية، كما أن الخصائص الهيدروكيميائية فيها تتأثر بصورة واضحة بمصادر التلوث السطحية نتيجة سرعة انتقال المياه عبر الشقوق والفواصل الصخرية[12].

وتدعم هذه النتائج الدراسة الحالية، إذ تؤكد أن الطبيعة الكارستية للخزان الجوفي بمدينة المرج تمثل عاملًا رئيسيًا في زيادة قابلية انتقال الملوثات. إلا أن الدراسة المذكورة ركزت على تفسير التغيرات الكيميائية بين أنواع الخزانات المختلفة، ولم تتناول المؤشرات الميكروبيولوجية أو تقييم صلاحية المياه للشرب، وهو ما تعالجه الدراسة الحالية بصورة مباشرة.

8. دراسة الفلاح وآخرون (2025)

أجرى الفلاح وآخرون (2025) دراسة لتقييم الخصائص الهيدروكيميائية للمياه الجوفية جنوب شرق مدينة بنغازي، بهدف تحديد نوعية المياه والعوامل المتحكمة في تركيبها الكيميائي ومدى صلاحيتها لمختلف الاستخدامات. واعتمدت الدراسة على تحليل المؤشرات الفيزيائية والكيميائية، واستخدام مخططات Piper وGibbs وبرنامج PHREEQC لتفسير العمليات الهيدروجيولوجية المؤثرة في جودة المياه. وأظهرت النتائج أن ارتفاع الملوحة وتركيز المواد الصلبة الذائبة والأيونات الرئيسة يرتبط بتفاعلات الماء مع الصخور والتجوية، وأن نسبة من العينات غير مناسبة للشرب رغم إمكانية استخدام بعضها في الري[13].

وتنسحم هذه الدراسة مع الدراسة الحالية في الاعتماد على التقييم الهيدروكيميائي لتفسير جودة المياه الجوفية، إلا أنها ركزت على العمليات الجيوكيميائية الطبيعية ولم تتناول المؤشرات الميكروبيولوجية أو تأثير مصادر التلوث المرتبطة بمياه الصرف الصحي. بينما تتميز الدراسة الحالية بدمج التقييم الهيدروكيميائي مع التقييم الميكروبيولوجي للكشف عن التأثير المحتمل لمصادر التلوث المحلية على جودة المياه الجوفية.

9. دراسة Boukich وآخرون (2025)

هدفت دراسة Boukich وآخرون (2025) إلى تقييم تلوث المياه الجوفية في سهل أنجاد بالمغرب باستخدام مؤشر تلوث المياه الجوفية (PIG) إلى جانب المؤشرات الميكروبيولوجية. واعتمدت الدراسة على حملتين ميدانيتين خلال موسمي الرطوبة والجفاف، وأظهرت النتائج أن تراكيز بعض الأيونات تجاوزت الحدود الموصى بها من منظمة الصحة العالمية، كما كشفت التحاليل الميكروبيولوجية عن وجود بكتيريا القولون البرازية، وبكتيريا القولون الكلية، والمكورات المعوية، مع ازدياد مستويات التلوث خلال موسم الجفاف. وأكد الباحثون أهمية الدمج بين المؤشرات الكيميائية والميكروبيولوجية للحصول على تقييم أكثر دقة لجودة المياه الجوفية[14].

وتتوافق هذه الدراسة بصورة كبيرة مع الدراسة الحالية في تبني منهج يجمع بين المؤشرات الهيدروكيميائية والميكروبيولوجية لتقييم جودة المياه الجوفية. إلا أن الدراسة الحالية تختلف في تركيزها على تأثير تسرب مياه الصرف الصحي في بيئة كارستية بمدينة المرج، مع

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

مقارنة النتائج بالمواصفات القياسية الليبية وإرشادات منظمة الصحة العالمية، بما يعزز ارتباط النتائج بالواقع المحلي.

10. دراسة Debassi وآخرون (2025)

أجرى Debassi وآخرون (2025) دراسة متكاملة لتقييم جودة المياه الجوفية والمياه السطحية ومياه الصرف الصحي في شمال شرق الجزائر باستخدام المؤشرات الفيزيائية والكيميائية والميكروبيولوجية على مدار عام كامل. وأظهرت النتائج وجود ارتباط واضح بين تدهور الخصائص الفيزيائية والكيميائية وارتفاع مؤشرات التلوث الميكروبي، كما أكدت أن دمج المؤشرات الكيميائية والميكروبيولوجية يوفر تقييماً أكثر شمولاً للمخاطر البيئية والصحية المرتبطة باستخدام المياه[15].

وتؤيد هذه الدراسة الدراسة الحالية في اعتماد نهج متكامل يجمع بين التحليل الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي، إلا أنها شملت أنواعًا مختلفة من مصادر المياه، في حين تركز الدراسة الحالية بصورة خاصة على المياه الجوفية المستخدمة للشرب في مدينة المرج، مع ربط النتائج بالخصائص الكارستية ومصادر التلوث المحلي.

يوضح الجدول رقم (1) مقارنة بين الدراسات السابقة والدراسة الحالية.

جدول (1) مقارنة بين الدراسات السابقة والدراسة الحالية

الدراسة	منطقة الدراسة	منهجية الدراسة	أهم النتائج	حدود الدراسة	علاقتها بالدراسة الحالية
عبيدات وآخرون (2013)	الأردن	تحليل فيزيائي وكيميائي للمياه الجوفية بالقرب من محطة معالجة مياه الصرف الصحي	ارتفاع تراكيز النترات والكلوريدات والمواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS)نتيجة تسرب مياه الصرف الصحي	اقتصرت على المؤشرات الفيزيائية والكيميائية ولم تشمل المؤشرات الميكروبيولوجية	تدعم فرضية الدراسة الحالية بشأن تأثير تسرب مياه الصرف الصحي على جودة المياه الجوفية
حماد وآخرون (2021)	المرج ليبيا	تقييم فيزيائي وكيميائي وميكروبيولوجي للمياه الجوفية	تسجيل تجاوزات في بعض المؤشرات الكيميائية والميكروبيولوجية	لم تربط النتائج بمصادر التلوث المحلية أو	تمثل مرجعًا محليًا مهمًا للمقارنة

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

الدراسة	منطقة الدراسة	منهجية الدراسة	أهم النتائج	حدود الدراسة	علاقتها بالدراسة الحالية
			مقارنة بالحدود القياسية	بالخصائص الكارستية	
الأوجلي وآخرون (2022)	المرج ليبيا	تقييم الخصائص الفيزيائية والكيميائية	ارتفاع الكلوريد والأمونيا	لم تتضمن تقييمًا ميكروبيولوجيًا	تؤكد اختلاف جودة المياه
القراوي وآخرون (2023)	السعودية	تحليل هيدروكيميائي	ارتفاع النترات وتأثير مياه الصرف	كيميائي فقط	تدعم التحليل الهيدروكيميائي
Gyimah (2024)	عالمية	مراجعة منهجية	تحديد مؤشرات التلوث	ليست ميدانية	تدعم اختيار المؤشرات
الخزانات الكارستية (2024)	خزان كارستي	هيدروكيميائي	تدهور الجودة	لا ميكروبيولوجي	تؤكد حساسية الكارست
مقارنة الخزانات (2025)	دولية	PCA/HCA	حساسية الكارست	لا بكتيري	تدعم انتقال الملوثات
الفلاح (2025)	بنغازي	Piper/Gibbs /PHREEQC	ارتفاع الملوحة	كيميائي	تفسير العمليات الطبيعية
Boukich (2025)	المغرب	متكامل	تلوث كيميائي وميكروبي	غير كارستي	أهمية الدمج
Debassi (2025)	الجزائر	متكامل	ارتباط الكيميائي والميكروبي	مصادر متعددة	يدعم المنهج

التحليل المقارن للدراسات السابقة

يتضح من الدراسات السابقة وجود اتفاق واضح على أن الأنشطة البشرية، ولا سيما تسرب مياه الصرف الصحي، تُعد من أهم العوامل المؤثرة في تدهور جودة المياه الجوفية، حيث أكدت معظم الدراسات وجود ارتفاع في تراكيز النترات والكلوريدات والمواد الصلبة الذائبة الكلية في المناطق المتأثرة بمصادر الصرف الصحي، مع ظهور مؤشرات ميكروبيولوجية دالة على التلوث البرازي في عدد من الدراسات الحديثة.

كما أظهرت الدراسات تطورًا ملحوظًا في منهجيات تقييم جودة المياه الجوفية؛ إذ ركزت الدراسات الأقدم (2013–2022) بصورة رئيسية على التقييم الفيزيائي والكيميائي، في حين اتجهت الدراسات الحديثة (2023–2025) إلى استخدام التقييم المتكامل الذي يجمع بين المؤشرات الهيدروكيميائية والميكروبيولوجية، مع توظيف التحليل الإحصائي متعدد المتغيرات ومؤشرات جودة المياه لتحديد مصادر التلوث والعوامل المتحكمة في تطور كيمياء المياه.

وعلى الرغم من هذا التطور، فإن معظم الدراسات الليبية اقتصرت على توصيف الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية أو تقييمها ميكروبيولوجيًا بصورة منفصلة، بينما ركزت بعض الدراسات الدولية على تفسير العمليات الجيوكيميائية أو مقارنة أنواع الخزانات الجوفية دون الربط المباشر بين المؤشرات الكيميائية والميكروبيولوجية ومصادر التلوث المحلية.

كما يتبين أن الدراسات المتعلقة بالخزانات الكارستية أكدت ارتفاع قابليتها للتلوث نتيجة سرعة انتقال المياه عبر الشقوق والفواصل الصخرية، إلا أن عددًا محدودًا منها تناول التأثير المشترك للخصائص الكارستية مع تلوث مياه الصرف الصحي باستخدام تقييم ميداني متكامل، وهو ما يبرز الحاجة إلى مزيد من الدراسات التطبيقية في البيئات الكارستية.

الفجوة البحثية

على الرغم من تعدد الدراسات التي تناولت تقييم جودة المياه الجوفية محليًا وإقليميًا ودوليًا، فإن مراجعة الأدبيات تُظهر وجود عدد من الفجوات البحثية. فقد ركزت معظم الدراسات على التقييم الهيدروكيميائي أو التقييم الميكروبيولوجي بصورة منفصلة، بينما لا تزال الدراسات التي تدمج بين الجانبين في إطار تقييم متكامل محدودة، خاصة في البيئات الكارستية.

وعلى المستوى المحلي، تناولت بعض الدراسات جودة المياه الجوفية في مدينة المرج، إلا أنها لم تربط بصورة شاملة بين الخصائص الهيدروكيميائية والمؤشرات الميكروبيولوجية ومصادر التلوث المحلية، كما لم تُقيّم تأثير تعطل محطة معالجة مياه الصرف الصحي وانتشار الآبار الامتصاصية في انتقال الملوثات داخل الخزان الجوفي الكارستي.

إضافة إلى ذلك، لم تُعطِ الدراسات السابقة اهتمامًا كافيًا لأخذ العينات مباشرة من فوهة البئر (Wellhead) بما يحد من تأثير التلوث الناتج عن النقل أو التخزين، وهو ما يُعد ضروريًا لتقييم جودة المياه داخل الخزان الجوفي نفسه.

وبناءً على ذلك، تسعى الدراسة الحالية إلى سد هذه الفجوات من خلال إجراء تقييم متكامل يجمع بين المؤشرات الهيدروكيميائية والميكروبيولوجية لعينات مأخوذة مباشرة من فوهة الآبار الجوفية بمدينة المرج، مع ربط النتائج بالخصائص الكارستية للخزان الجوفي ومصادر التلوث المحلية، ومقارنتها بالمواصفات القياسية الليبية وإرشادات منظمة الصحة العالمية، بما يوفر أساسًا علميًا لدعم إدارة الموارد المائية وحماية الصحة العامة

المواد وطرائق العمل

❖ **منطقة الدراسة وتوزيع الآبار**

تقع مدينة المرج في شمال شرق ليبيا ضمن النطاق الهيدرولوجي لإقليم الجبل الأخضر، وتتميز بموقع جيواستراتيجي يجمع بين الكثافة السكانية والنشاط الزراعي المستمر. تقع المدينة جغرافياً ضمن حوض ترسيبي مغلق يُعرف بـ "سهل المرج"، وتحيط به المرتفعات الجبلية من عدة جهات، مما يمنحه طبيعة طبوغرافية وهيدرولوجية خاصة تؤثر بشكل

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

مباشر على حركة المياه السطحية والجوفية وتوزيعها [2]. يسود المنطقة مناخ شبه جاف يتميز بتذبذب معدلات هطول الأمطار السنوية وشح الموارد المائية السطحية الدائمة، مما جعل الخزان الجوفي التحت سطحي هو المصدر الوحيد والحيوي لتلبية كافة الاحتياجات المدنية والزراعية بالمنطقة[1].

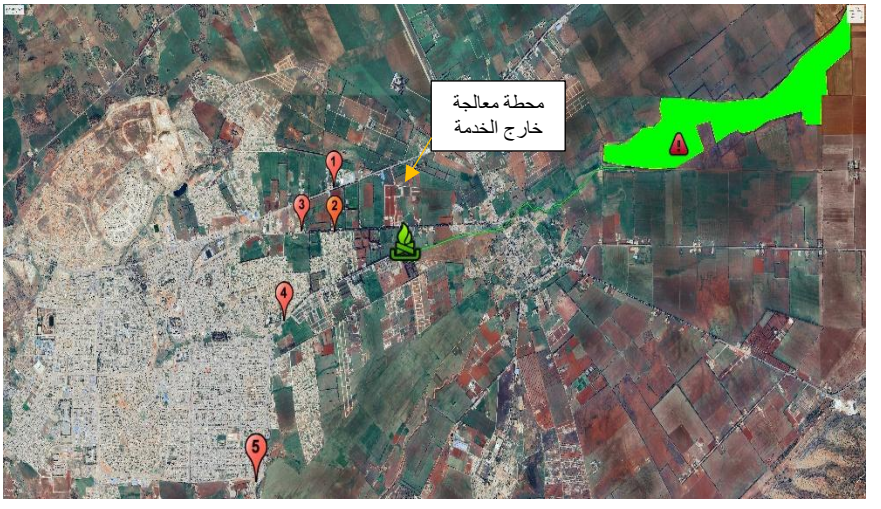
ومن الناحية الجيولوجية والهيدروجيولوجية، تترسب طبقات سهل المرج فوق تكوينات صخرية كارستية معقدة يعود تاريخها الجيولوجي إلى العصر الثلاثي(Tertiary) ، ولا سيما الحجر الجيري والدولوميت التابع لتكوينات الأبرق ودرنة [2] تتصف هذه الصخور الكربوناتية بانتشار واسع لقنوات الإذابة، والفجوات والتشققات التكتونية النشطة [4]. هذه الطبيعة الكارستية تمنح الخزان الجوفي نفاذية هيدروليكية عالية تسمح بالترشيح السريع لمياه الأمطار وتغذية الخزان، ولكنها في الوقت ذاته تجعله شديد الحساسية والضعف (High Vulnerability)أمام التسرب المباشر للملوثات السطحية؛ حيث تتحرك المياه الملوثة عبر هذه التشققات كممرات مفتوحة دون الخضوع لعمليات الترشيح والفلترة الطبيعية التي تميز عادة الخزانات الرملية أو المسامية[3].

تتفاقم الحساسية الهيدرولوجية لسهل المرج نتيجة للمشكلات البيئية والهيكلية القائمة في البنية التحتية للمدينة، والتي يرتبط فيها التوسع العمراني السريع بزيادة مخاطر التلوث [4].

تم تحديد المواقع الجغرافية الدقيقة للآبار الخمسة محل الدراسة وإسقاطها مساحياً، بالإضافة إلى رصد البؤر السطحية المسببة للتلوث والمتمثلة في برك تجميع مياه الصرف الصحي الخام بالمدينة (الشكل 1).

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28



الشكل 1: خريطة فضائية مأخوذة بواسطة (Google Earth Pro) توضح التوزيع الجغرافي لآبار الدراسة الخمسة في مدينة المرج (المعلمة بالدبوس الأحمر 📍)وعلاقتها المكانية ببرك تجميع الصرف الصحي المفتوحة(المعلمة بعلامة التحذير ⚠)

يوضح الجدول (2) التوزيع الجغرافي والمكاني للآبار الجوفية الخمسة (W1–W5) التي تم اختيارها كمحطات لأخذ عينات المياه الجوفية داخل مدينة المرج. وتم توثيق الإحداثيات الجغرافية (خطوط الطول والعرض) لكل بئر باستخدام جهاز تحديد المواقع العالمي (GPS) لضمان الدقة المكانية لمواقع الدراسة. وجميع الآبار المختارة هي آبار جوفية خاصة يعتمد عليها السكان كمصدر لمياه الشرب والاستخدامات المنزلية، وتستغل الخزان الجوفي الكارستي غير المحصور (Unconfined Karst Aquifer) الذي يتميز بارتفاع النفاذية وسرعة انتقال المياه والملوثات عبر الشقوق والفواصل الصخرية.

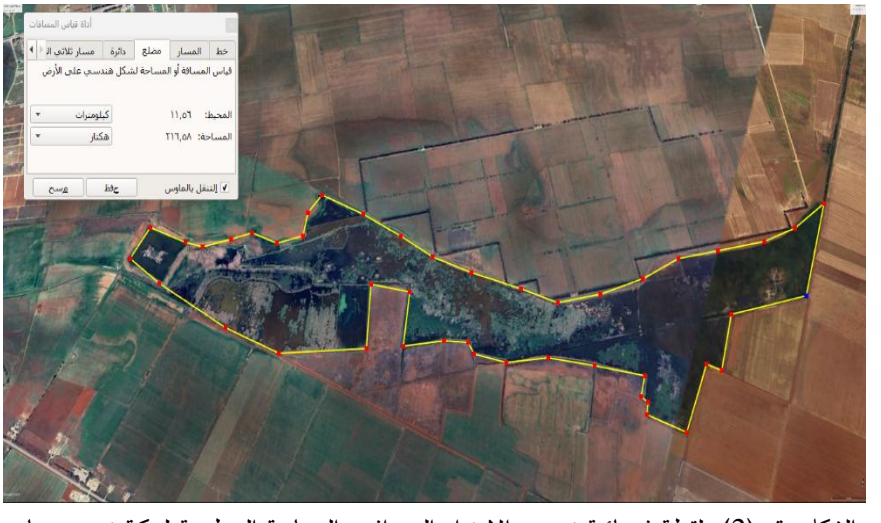
جدول رقم (2) يوضح التوزيع الجغرافي للأبار

اسم البئر	الرمز	الاحداثيات	
		خط العرض	خط الطول
بئر رقم 1	W1	32°30'34.30"شمال	20°51'41.36"شرق
بئر رقم 2	W2	32°30'11.32"شمال	20°51'41.98"شرق
بئر رقم 3	W3	32°30'11.73"شمال	20°51'22.00"شرق
بئر رقم 4	W4	32°29'33.72"شمال	20°51'12.05"شرق
بئر رقم 5	W5	32°28'26.87"شمال	20°50'56.42"شرق

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

. واستنادا للمعلومات التي قدمها مالكو الابار تتراوح أعماق الابار محل الدراسة بين 150الى 200 متر، وقد روعي في اختيار الآبار أن تغطي مناطق مختلفة داخل المدينة بما يضمن تمثيلًا مكانيًا مناسبًا لمنطقة الدراسة. وجُمعت عينات المياه بتاريخ 2 يونيو 2026 عينة واحدة من كل بئر.

وفي سياق تتبع مصادر التلوث البيئي وتحديد البؤر السطحية المؤثرة مباشرة على هيدرولوجية المنطقة، تم رصد وتوثيق الموقع الجغرافي لبركة تجميع مياه الصرف الصحي الخام بالمدينة ميدانياً. تكمن الخطورة الهيدروليكية القصوى لهذه البركة في خروج محطة المعالجة المركزية عن الخدمة بالكامل، مما ترتب عليه تحولها إلى حوض ترسيب مفتوح ومستمر لاستقبال كافة التدفقات السائلة غير المعالجة [5]، حيث تشغل حالياً مساحة شاسعة تُقدر بحوالي 216.58 هكتاراً. ونظراً للطبيعة الكارستية النفاذة لصخور المنطقة، فإن هذه المساحة الضخمة تمثل بيئة ترشيح وتغلغل مستمر للملوثات الكيميائية والميكروبية إلى باطن الأرض دون أي عوائق طبيعية[3]، وتوضح الصورة في الشكل رقم (2) الامتداد الميداني والواقع البيئي المعقد لهذه البركة الاستراتيجية بالمدينة.



الشكل رقم (2): لقطة فضائية توضح الامتداد الجغرافي والمساحة السطحية لبركة تجميع مياه الصرف الصحي الخام بمدينة المرج ومصدر الصورة: برنامج (Google Earth Pro)

❖ **بروتوكول جمع العينات وحفظها**

بهدف استبعاد أي تلوث عرضي (Contamination) قد ينتج عن صهاريج الشاحنات أو خطوط النقل والتوزيع، ولإثبات الحالة الحقيقية لجودة المياه داخل الخزان الجوفي الكارستي نفسه، اعتمد البحث آلية جمع العينات مباشرة من فوهة البئر الجوفي(Wellhead) وفقاً للمواصفات القياسية الدولية المعتمدة من منظمة الصحة العالمية والجمعية الامريكية للصحة العامة [16–17] وذلك باتباع الخطوات المنهجية التالية:

1. تطهير فوهة البئر: يتم تعقيم فوهة أنبوب الضخ باستخدام الكحول بتركيز 70% لقتل أي بكتيريا سطحية أو عارضة قد تتواجد على الأجزاء الخارجية للصمام وتؤثر على دقة الفحص الميكروبيولوجي [18].
2. تفريغ المياه الراكدة :(Flushing) يتم تشغيل البئر وضخ المياه لمدة تتراوح بين 10 إلى 15 دقيقة قبل أخذ العينات لضمان جلب المياه مباشرة من الطبقة الجوفية الحاملة للمياه (Aquifer)والتخلص من المياه الراكدة داخل الأنابيب [11]
3. أوعية جمع العينات:

للتشخيص الفيزيائي والكيميائي: استخدمت عبوات بلاستيكية من البولي إيثيلين (HDPE) سعة 500 مل غُسلت جيداً بمياه البئر نفسه ثلاث مرات قبل الملء النهائي[17].

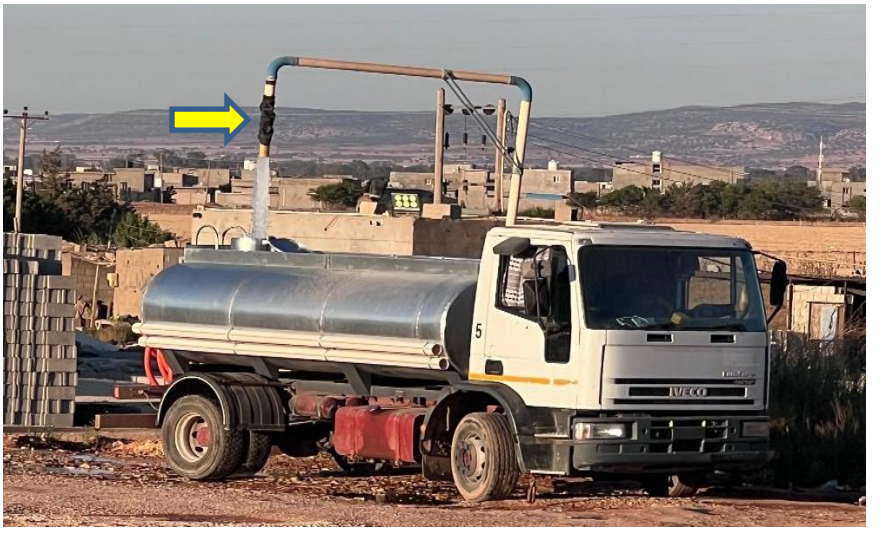
للتقييم الميكروبيولوجي: استخدمت زجاجات زجاجية معقمة ومحكمة الإغلاق (Sterile glass bottles) سعة 250 مل لمنع أي تلوث خارجي [18].

4. الحفظ والنقل: وضعت جميع العينات مباشرة بعد جمعها في صناديق مبردة عازلة للحرارة (Ice Boxes) عند درجة حرارة تقارب 4 درجات مئوية، ونُقلت على الفور إلى المختبر لإجراء التحاليل خلال مدة لا تتجاوز 6 ساعات من وقت الجمع لضمان حيوية العينات وعدم تغير خصائصها البيولوجية والكيميائية [18].

ولتوضيح طبيعة الآبار الجوفية المستهدفة بالدراسة، يوضح الشكل (3) نموذجًا لأحد الآبار التي جُمعت منها عينات المياه. ويبين الشكل الخصائص العامة للبئر عند موقع أخذ العينات، حيث تم جمع العينات مباشرة من فوهة البئر والتي يشار اليها بالسهم

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

الأصفر، وفق بروتوكول جمع العينات المعتمد، بما يضمن تمثيلًا دقيقًا لجودة المياه الجوفية وتقليل احتمالية التلوث أثناء عملية السحب والنقل



الشكل (3) أحد الآبار الجوفية المشمولة بالدراسة في مدينة المرج، يوضح موقع نقطة سحب العينة

❖ **التحاليل المخبرية**

نُقلت جميع عينات المياه الجوفية المحفوظة مباشرة بعد جمعها إلى المختبر المركزي لجهاز تنفيذ وإدارة مشروع النهر الصناعي، حيث خضعت كافة العينات لسلسلة من الفحوصات الفيزيائية، الكيميائية، والميكروبيولوجية الشاملة والموحدة، وضمن بيئة مخبرية خاضعة لمعايير ضبط الجودة القياسية، وفقاً للطرق والبروتوكولات التالية:

التقييم الفيزيائي والهيدروكيميائي الشامل

تم قياس وتحليل إحدى عشرة (11) مؤشراً فيزيائياً وكيميائياً رئيسياً لتحديد الخصائص الهيدروكيميائية لعينات المياه الجوفية، وذلك بالاعتماد كلياً على الأجهزة والتقنيات المختبرية المعتمدة والمعايرة لضمان دقة النتائج وموثوقيتها وفقا للطرق القياسية الدولية لفحص المياه [17].

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

الأس الهيدروجيني(pH) ، الإيصالية الكهربائية(EC) ، والمواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS). تم قياس هذه المؤشرات مخبرياً فور وصول العينات إلى المختبر باستخدام أجهزة رقمية متطورة جرت معايرتها بدقة باستخدام المحاليل القياسية، وفقاً للتالي:

1- جهاز (WTW Multi 3320) استُخدم هذا الجهاز حصرياً لقياس وتحديد تركيز المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS) الأملاح الذائبة في عينات المياه باتباع الطريقة القياسية 2510 [17].

2- جهاز (Fisher Scientific accument AR50) استُخدم لإجراء القياسات المخبرية الدقيقة لكل من الأس الهيدروجيني (pH) والإيصالية الكهربائية (EC) تحت ظروف بيئية وحرارية مضبوطة لضمان استقرار القراءات وأعلى درجات الدقة باتباع الطرق القياسية H^+-4500 & 2510-B [17].

العسر الكلي (TH) وعسر الكالسيوم ($CaCo_3$)

تم تعيينهما بواسطة طريقة المعايرة الحجمية باستخدام ملح إيثيلين ثنائي الأمين رباعي حمض الخليك الثنائي الصوديوم(EDTA Titrimetric Method) ، وذلك فوق جهاز المحرك المغناطيسي المعاير لضمان تجانس الخليط أثناء التسحيح وفقا للطريقة القياسية 2340-C [17].

الكلوريد:(Cl^-)

تم قياس تركيزه عبر المعايرة الحجمية بنترات الفضة ($AgNO_3$) باتباع طريقة موهر الأرجنتومترية (Argentometric Mohr Method) مع الاستعانة بالمحرك المغناطيسي لضبط نقطة نهاية التفاعل بدقة طبقا للطريقة القياسية 4500-Cl^--B [17].

القلوية الكلية:(HCO_3^-)

تم تحديدها عبر المعايرة الحجمية بالتسحيح ضد حمض الكبريتيك المخفف (H_2SO_4) والتقصي المخبري المتتابع للأدلة اللونية داخل خزانة طرد الغازات والأبخرة (Fume Hood)لضمان بيئة عمل آمنة ومراقبة تماشيا مع الطريقة القياسية 2320-B [17].

الصوديوم (Na^+) والبوتاسيوم:(K^+)

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

تم قياس تركيزهما بدقة بواسطة جهاز (Jenway PFP7 Flame Photometer) عند الأطوال الموجية الخاصة بكل عنصر باتباع الطريقة القياسية 3500–K–B & 3500–Na–B [17].

النترات (NO_3^-) والكبريتات:(SO_4^{-2})

تم قياس تركيزهما ضوئياً باستخدام جهاز

(Thermo Scientific GENESYS 180 UV–Vis Spectrophotometer) عالي الحساسية عند الأطوال الموجية المعتمدة لكل عنصر طبقا للطرق القياسية [17].

التقييم والتشخيص الميكروبيولوجي

للكشف عن التلوث البيولوجي وإثبات مدى اختلاط الخزان الكارستي بمياه الصرف الصحي، أُجريت التحاليل الميكروبية داخل وحدة الأحياء الدقيقة المعقمة بالمختبر المركزي باستخدام منظومة IDEXX الحديثة لتقدير العدد الأكثر احتمالاً (MPN) للميكروبات[17]، وذلك عبر جهاز (IDEXX Quanti–Tray™ Sealer PLUS) بعد دمج عينات المياه مع الكواشف المتخصصة في أطباق العد المقسمة ذات الـ 97 عيناً (Quanti– Tray™)تماشيا مع المعايير المنهجية التالية:

الفحوصات المحضونة عند درجة حرارة 36°:

تم استخدام (Gallenkamp Economy Incubator with fan, INC–3) وضبطها بدقة عند درجة حرارة 36° لحضن وتنمية الفحوصات التالية متزامنةً لمدة 24 ساعة:

1 .العدد الإجمالي للبكتيريا (Total Bacterial Count – TBC) ويُعرف بالعد الإجمالي للبكتيريا الهيتروتروفية(HPC) ، حيث تم تقديره لتقييم الجودة الحيوية العامة للمياه باستخدام الكاشف المتخصص (HPC for Quanti–Tray®) طبقا للطريقة القياسية رقم 9215 [17].

2 .بكتيريا القولون الكلية (Total Coliforms – TCF) والإشريكية القولونية (Escherichia coli – E. coli) تم الكشف عنهما وعدّهما بشكل متزامن وبدقة متناهية باستخدام الكاشف الكروموجيني والفلوروجيني المتخصص(Colilert®) ، طبقا للمواصفة الدولية (ISO 9308–2,2012) [19] والطريقة القياسية رقم 9223 [17] حيث تم الاعتماد على تغير لون العيون إلى الأصفر كدليل على وجود بكتيريا القولون الكلية

(TCF)، ورصد توهج العيون باللون الأزرق الفلوري تحت الأشعة فوق البنفسجية (UV) لتأكيد وعدّ بكتيريا E. coli وتفريقها ميكروبياً.

الفحوصات المحضونة عند درجة حرارة 45°

المكورات المعوية (Enterococci / Fecal Streptococci – FS) تم عزلها وعدّها كمؤشر قطعي على التلوث البرازي باستخدام الكاشف النوعي المتخصص (Enterolert®) تماشيا مع المواصفة الدولية لعد المكورات المعوية (ISO 7899-1,1998) [20] والطريقة القياسية رقم 9230 [17] حيث حُضنت عينات الاختبار داخل حاضنة (Gallenkamp, INC-1) التي تم ضبطها في ظروف حرارية صارمة عند درجة حرارة 45° لضمان أعلى مستويات الانتقائية الحيوية، وتثبيط الميكروبات غير المستهدفة، وضمان الدقة والسرعة في عزل هذا المؤشر الحيوي الهام.

❖ **مطابقة معايير السلامة وصلاحية الاستهلاك**

بهدف تقييم المخاطر الصحية وتحديد مدى صلاحية المياه الجوفية المستخرجة من الآبار الخمسة بمدينة المرج للاستهلاك البشري، تم إخضاع كافة البيانات والنتائج المخبرية (الفيزيائية، الكيميائية، والميكروبيولوجية) المتحصل عليها من المختبر المركزي لنظام مطابقة ومقارنة تقاطعية (Cross-matching) مع المحددات والحدود القصوى المسموح بها في المراجع التشريعية التالية:

1 .المواصفات القياسية الليبية لمياه الشرب المعتمدة الصادرة عن مركز المواصفات والمعايير القياسية الليبي (LNCSM) رقم المواصفة 82 [21].

2 .أدلة ومعايير منظمة الصحة العالمية (World Health Organization – WHO) الخاصة بجودة مياه الشرب[16].

بناءً على هذه المقارنة، تم تصنيف جودة مياه كل بئر بشكل نوعي وتحديد المؤشرات الخارجة عن حدود الأمان (Out of range) لتقييم حجم التهديد المباشر على الأمن الصحي للمستهلكين.

التحليل الإحصائي وتفسير البيانات

لضمان دقة تفسير النتائج وعزل المتغيرات، خضعت البيانات لتحليل إحصائي وهيدروجيولوجي متكامل وفق الآتي:

الإحصاء الوصفي :(Descriptive Statistics) تم حساب القيم الدنيا(Minimum) ، القصوى(Maximum) ، المتوسطات الحسابية(Means) ، والانحرافات المعيارية (Standard Deviations)لكافة المؤشرات المقاسة عبر الآبار المختلفة.

التحليل الارتباطي :(Correlation Analysis) تم دراسة قوة ونوع العلاقة الإحصائية بين المؤشرات الكيميائية (مثل النتراتNO_3) والمؤشرات الميكروبية (مثل بكتيريا E. coli) لربطها مكانياً بمدى القرب أو البعد من بؤرة التلوث الرئيسية (بركة الصرف الصحي ذات المساحة 216,58 هكتار).

التفسير الهيدروجيولوجي الكارستي: تم دمج المخرجات الإحصائية والمخبرية مع الخصائص الجيولوجية والتشققية لتكوينات المنطقة (الأبرق ودرنة)[2]، لبناء نموذج تفسيري يوضح آلية تغلغل الملوثات السطحية من البركة والآبار السوداء إلى فوهات الآبار الجوفية (Wellheads) دون المرور بفلترة طبيعية[3].

النتائج والمناقشة

يستعرض هذا القسم نتائج الفحوصات والتحاليل المخبرية (الفيزيائية، الكيميائية، والميكروبيولوجية) للعينات التي تم جمعها من خمسة آبار جوفية حيوية تقع في مناطق مختلفة بمدينة المرج .تم اختيار هذه الآبار لتمثيل التوزيع الجغرافي والمكاني لمصادر المياه الجوفية بالمدينة، ومقارنتها بالمحددات القياسية المعتمدة محلياً ودولياً لتقييم مدى صلاحيتها للاستهلاك البشري، فضلاً عن تقديم تفسير هيدروجيولوجي وإحصائي يعكس طبيعة التلوث الكارستي ومخاطره البيئية والصحية.

نتائج الفحوصات المخبرية والمطابقة مع المعايير القياسية

تم إخضاع كافة البيانات والنتائج المخبرية لمطابقة ومقارنة تقاطعية (Cross-matching) مع المحددات والحدود القصوى المسموح بها في المواصفات القياسية رقم 82 الليبية لمياه الشرب [21] وأدلة منظمة الصحة العالمية [16] (WHO)

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

الخاصة بجودة مياه الشرب. يوضح الجدول رقم (3) نتائج التحاليل المخبرية التفصيلية للآبار الخمسة ومدى مطابقتها للمعايير المعتمدة، حيث تشير القيم المضلله باللون البنفسجي بانها غير مطابقة للمواصفات.

المؤشر	الوحدة	المواصفات القياسية الليبية رقم(82)	W 1	W 2	W 3	W 4	W 5
الأس الهيدروجيني (pH)	-	6.5 - 8.5	7.07	7.31	7.07	7.06	7.27
درجة الحرارة (Temp)	°C	غير محدد	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5
الأملاح الكلية الذائبة(TDS)	mg/L	< 1000	1149.85	1051.70	1051.05	979.55	842.40
الإيصالية الكهربائية (EC)	µS/cm	< 1000	1769.00	1618.00	1617.00	1507.00	1296.00
عسر الكالسيوم (Calcium Hardness)	mg/L	< 200	200.18	480.43	480.43	360.32	520.47
العسر الكلي (Total Hardness)	mg/L	< 500	880.79	720.65	640.58	800.72	760.68
الكلوريد (Chloride)	mg/L	< 250	396.00	328.00	320.00	308.00	244.00
الكبريتات (Sulphate)	mg/L	< 250	30.32	43.175	53.67	45.12	40.015
البوتاسيوم (Potassium)	mg/L	< 12	5.38	10.77	11.60	9.23	4.60
الصوديوم (Sodium)	mg/L	200	183.00	186.00	188.00	156.00	102.00
القلوية الكلية (Total Alkalinity)	mg/L	50 - 250	244.24	284.28	316.31	292.29	256.25
النترات (Nitrate)	mg/L	< 50	33.22	10.82	5.38	17.072	8.14
الفطريات (Fungi)	CFU/mL	0	50.00	10.00	20.00	10.00	0.00

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

المؤشر	الوحدة	المواصفات القياسية الليبية رقم(82)	W 1	W 2	W 3	W 4	W 5
الستريبتوكوكس المعوية (FS)	MPN/100	0	0.00	2.00	0.00	37.80	0.00
العدد الكلي للبكتيريا (TBC)	MPN/100	< 200	435.20	2419.60	2419.60	686.70	727.00
الإشريكية القولونية (E. coli)	MPN/100	0	1.00	3.10	0.00	387.30	0.00
بكتيريا القولون الكلية(TCF)	MPN/100	0	30.10	816.40	86.10	387.30	14.80

جدول رقم (3) نتائج التحاليل المخبرية التفصيلية للآبار الخمسة ومدى مطابقتها للمعايير المعتمدة

نتائج التقييم الفيزيائي والهيدروكيميائي ومناقشتها:

1. الأس الهيدروجيني (pH) ودرجة الحرارة

أظهرت القياسات الحقلية لجميع الآبار استقراراً واضحاً في قيمة الأس الهيدروجيني (pH)، حيث تراوحت القيم بين 7.06 و 7.31 تقع هذه القيم بالكامل ضمن الحدود الآمنة والموصى بها من قبل المواصفات القياسية الليبية[21] ومنظمة الصحة العالمية [16]والتي تتراوح بين (6.5 – 8.5) تشير الطبيعة المتعادلة إلى ما يميل قليلاً للقلوي إلى التوازن الكيميائي الكربوني للخزان الجوفي الجيري، وهو أمر طبيعي هيدروجيولوجياً للمياه الجوفية المخزونة في صخور كربوناتية [2].كما سجلت درجة حرارة المياه في جميع الآبار قيمة ثابتة بلغت 21.5°C وقت القياس الحقلية.

وتتفق هذه النتيجة مع دراسة حماد وآخرون (2021) التي سجلت قيماً مماثلة للمياه الجوفية بمدينة المرج، كما تتوافق مع نتائج الفلاح وآخرون (2025) في بنغازي، حيث أرجعت استقرار قيم الأس الهيدروجيني إلى تأثير الاتزان الكيميائي بين المياه الجوفية وصخور الحجر الجيري والدولوميت. وقد يرجع هذا التشابه إلى التقارب في الطبيعة الجيولوجية للخزانات الجوفية الكربوناتية في شرق ليبيا. وفي المقابل، سجلت بعض

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

الدراسات الدولية تباينًا أكبر في قيم الأس الهيدروجيني نتيجة اختلاف التركيب الصخري وخصائص إعادة التغذية المائية، مما يشير إلى أن الخصائص الهيدروجيولوجية المحلية تؤدي دورًا رئيسًا في التحكم في هذا المؤشر.

2. الأملاح الكلية الذائبة (TDS) والإيصالية الكهربائية(EC)

تبين من نتائج التحاليل ارتفاعًا في تركيز المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS) حيث تجاوزت قيمها الحد الأقصى المسموح به وفق المواصفة القياسية الليبية [21] (1000 mg/L) في معظم الآبار، مما يشير إلى زيادة تمعدن المياه الجوفية وتراجع جودتها للاستخدام كمياه شرب. كما سجلت جميع العينات قيماً مرتفعة للإيصالية الكهربائية (EC) وهو ما يعكس ارتفاع تركيز الأيونات الذائبة ويتوافق مع العلاقة الطردية المعروفة بين TDS و EC

يعزى هذا الارتفاع المتلازم للملوحة والناقلية كيميائياً وجيولوجياً إلى تفاعل المياه الجوفية وتخللها لطبقات صخور الحجر الجيري والدولوميت التي تشكل التركيب الأساسي لتكوينات الأبرق ودرنة الكارستية بمدينة المرج [4] غير أن التفاوت المكاني والارتفاع الشديد في المناطق ذات الكثافة الحضرية قد يشير الى إسهام التلوث البشري، حيث تتدفق مياه الصرف الصحي الغنية بالأيونات والمواد العضوية المتسربة من الآبار السوداء ومن بركة الصرف الصحي الكبرى (216.58 هكتار) لتذوب وتتداخل مع المياه الجوفية عبر ممرات الاذابة الكارستية المفتوحة [3–5].

وتتوافق هذه النتائج مع دراسة عبيدات وآخرون (2013) التي أوضحت أن ارتفاع (TDS) والكلوريدات يرتبط بتسرب مياه الصرف الصحي، كما تتفق مع دراسة الخزانات الكارستية (2024) التي أشارت إلى أن ارتفاع تراكيز الأيونات الرئيسة في الخزانات الكارستية يرتبط بتأثير العمليات الطبيعية والأنشطة البشرية. وقد يرجع هذا التشابه إلى الطبيعة الكارستية للخزان الجوفي بمدينة المرج، التي تسهل انتقال المياه والمواد الذائبة عبر الشقوق والفجوات. كما تتوافق هذه النتائج مع الفلاح وآخرون (2025)، الذي أرجع ارتفاع الملوحة إلى العمليات الجيوكيميائية الطبيعية، مما يشير إلى أن جودة المياه في منطقة الدراسة تتأثر بتداخل العمليات الطبيعية مع التأثيرات البشرية.

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

3. العسر الكلي وعسر الكالسيوم

كشفت التحاليل المخبرية عن تصنيف مياه جميع الآبار الجوفية المدروسة كمياه عسرة جداً (Very Hard Water) حيث تخطى العسر الكلي (TH) السقف المحدد بالمواصفة القياسية [16–21] (500 mg/L as $CaCO_3$) في جميع الآبار الخمسة

أما بالنسبة لعسر الكالسيوم، فقد ارتفع بشكل غير مقبول في جميع الابار، متجاوزين الحد الأقصى للمواصفات القياسية الليبية[21] (200 mg/L) ترتبط هذه الظاهرة بالخصائص الجيولوجية للصخور الجيرية الكارستية التي يسود فيها الكالسيوم والمغنيسيوم .ذوبان الكربونات بفعل الأمطار الحمضية المحملة بـ CO_2 يزيد من تركيز هذه الأيونات في الخزان[1]. الاستهلاك المستمر لمياه بهذه الدرجة العالية من العسر يسبب أضراراً جسيمة للشبكات المنزلية والأنابيب نتيجة لترسب القشور الجيرية (Scaling)، ويرتبط طبياً بزيادة احتمالية الإصابة بحصى الكلى والمجاري البولية للسكان المستهلكين لها[16].

وتتسق هذه النتائج مع دراسة الفلاح وآخرون (2025)، التي أشارت إلى أن ارتفاع العسر في المياه الجوفية يرتبط بعمليات الذوبان الطبيعي للصخور الكربوناتية، كما تنسجم مع دراسة الخزانات الكارستية (2024) التي أوضحت أن الخزانات الكارستية تُظهر تراكيز مرتفعة من أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم نتيجة التفاعل المستمر بين المياه والصخور الحاملة للخزان. وقد يرجع هذا التشابه إلى الطبيعة الجيولوجية المتقاربة، إذ يتكون الخزان الجوفي في مدينة المرج من صخور الحجر الجيري والدولوميت[4]، مما يعزز ذوبان معادن الكربونات وزيادة العسر. وفي المقابل، قد تختلف قيم العسر بين الدراسات نتيجة اختلاف زمن مكوث المياه داخل الخزان، ودرجة التجوية، والخصائص الهيدروجيولوجية المحلية.

4. الكلوريدات والقلوية الكلية

سجلت تركيزات الكلوريد تجاوزاً ملحوظاً للحد الأقصى[16–21] (250 mg/L) في أربعة ابار من اصل خمسة، ويتطابق هذا الارتفاع كيميائياً مع تجاوز قيم القلوية الكلية (TotalAlkalinity) للحد الأعلى الموصى به [16] (250 mg/L) في كافة الآبار باستثناء بئر رقم (1) قد يشير هذا التلازم الى تلوث المياه بالمنظفات المنزلية ومياه

الصرف الصحي الحضرية، والتي تحتوي على نسب مرتفعة جداً من الكلوريدات ومجموعات البيكربونات القلوية المهاجرة هيدروليكياً عبر التشققات الجوفية المفتوحة[3]. وتتوافق هذه النتائج مع دراسة عبيدات وآخرون (2013) التي سجلت ارتفاعًا في تراكيز الكلوريدات بالمياه الجوفية المتأثرة بتسرب مياه الصرف الصحي، كما تتفق مع دراسة الأوجلي وآخرون (2022) التي رصدت تباينًا مكانيًا في جودة المياه الجوفية بمدينة المرج وارتفاعًا في بعض الأيونات الرئيسة. وقد يرجع هذا التشابه إلى تأثير الأنشطة البشرية، ولا سيما تسرب مياه الصرف الصحي، إضافة إلى مساهمة ذوبان المعادن الطبيعية في زيادة تراكيز الأيونات الذائبة. أما الاختلاف في مستويات الكلوريدات بين الدراسات، فقد يعود إلى اختلاف مواقع الآبار، وشدة مصادر التلوث، والظروف الهيدرولوجية السائدة في كل منطقة دراسة.

5. الصوديوم والبوتاسيوم والكبريتات:

تبين من نتائج التحاليل أن تراكيز الصوديوم والبوتاسيوم والكبريتات في جميع الآبار المدروسة كانت ضمن الحدود المسموح بها وفق المواصفة القياسية الليبية[21]، فقد بقيت تراكيز الصوديوم أقل من الحد الأقصى (200 mg/L) في حين سجلت الكبريتات قيماً منخفضة مقارنة بالحد المسموح به (250 mg/L) كما لم تُظهر تراكيز البوتاسيوم أي ارتفاع غير طبيعي. وتشير هذه النتائج إلى أن هذه الأيونات لا تمثل مصدر قلق فيما يتعلق بجودة المياه في منطقة الدراسة، كما توحي بأن عمليات ذوبان المعادن الطبيعية في الخزان الجوفي كانت المصدر الرئيس لها، دون وجود تأثير واضح لمصادر تلوث تؤدي إلى زيادة تراكيزها إلى مستويات تتجاوز الحدود القياسي.

وتتفق هذه النتائج مع دراسة الفلاح وآخرون (2025)، التي أوضحت أن تراكيز هذه الأيونات تخضع بصورة رئيسة لتأثير العمليات الجيوكيميائية الطبيعية، كما تتوافق مع دراسة القراوي وآخرون (2023) التي أشارت إلى أن اختلاف تراكيز الأيونات الرئيسة يرتبط بطبيعة الخزان الجوفي ودرجة تأثره بالأنشطة البشرية. وقد يرجع هذا التشابه إلى سيادة عمليات ذوبان المعادن الكربوناتية في الخزان الجوفي بمدينة المرج[4]، في حين قد تعزى الفروق البسيطة بين الدراسات إلى اختلاف التركيب الجيولوجي، ومعدلات التغذية، وشدة التأثيرات البشرية في مناطق الدراسة المختلفة.

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

6. النترات:

أظهرت نتائج التحاليل أن تراكيز النترات في جميع الآبار المدروسة كانت ضمن الحد المسموح به وفق المواصفة القياسية الليبية [21] وإرشادات منظمة الصحة العالمية[16] (50 mg/L) مما يشير إلى عدم وجود تلوث بالنترات عند مستويات تشكل خطرًا على جودة مياه الشرب. ورغم تسجيل أعلى تركيز في أحد الآبار، إلا أنه بقي أقل من الحد القياسي، وهو ما قد يدل على أن مصادر النترات المحتملة، مثل تسرب مياه الصرف الصحي أو الأنشطة الزراعية، لم تؤدِ إلى تراكمها بمستويات مرتفعة في المياه الجوفية خلال فترة الدراسة. ومع ذلك، فإن انخفاض تراكيز النترات لا يستبعد وجود تلوث ميكروبيولوجي، إذ أظهرت بعض العينات تلوثًا بكتيريًا، مما يشير إلى أن التلوث قد يكون حديثًا أو موضعيًا ولم ينعكس بعد على التركيب الكيميائي للمياه.

وتتفق هذه النتائج مع دراسة حماد وآخرون (2021) التي سجلت تراكيز ضمن الحدود القياسية في عدد من آبار مدينة المرج، بينما تختلف مع دراسة عبيدات وآخرون (2013) ودراسة القراوي وآخرون (2023)، اللتين سجلتا ارتفاعًا في تراكيز النترات في المناطق المتأثرة بمياه الصرف الصحي والأنشطة الزراعية. وقد يرجع هذا الاختلاف إلى تباين شدة مصادر التلوث، واختلاف الخصائص الهيدروجيولوجية، ومعدلات إعادة تغذية الخزان الجوفي، إضافة إلى أن انتقال النترات يعتمد على الظروف الجيوكيميائية وزمن بقاء المياه داخل الخزان. كما تشير النتائج إلى أن انخفاض تراكيز النترات لا يستبعد وجود تلوث ميكروبيولوجي، وهو ما تبينه نتائج المؤشرات البكتيرية في بعض الآبار، مما يرجح أن التلوث البرازي قد يكون موضعيًا أو حديثًا ولم ينعكس بعد على تراكيز النترات.

نتائج التقييم الميكروبيولوجي ومناقشتها:

كشـفت نتائج التحاليل الميكروبيولوجية وجود تلوث بكتيري بدرجات متفاوتة في عدد من الآبار المدروســـة، وهو ما يشـــير إلى تدهور الجودة الميكروبيولوجية للمياه الجوفية. وبمقارنة النتائج بالمواصفة القياسية الليبية [21] وإرشادات منظمة الصحة العالمية[16]، التي تشترط خلو مياه الشرب من مؤشرات التلوث البرازي، تبين أن عدداً من العينات لم

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

يحقق هذه المتطلبات، مما يدل على عدم مطابقتها للاستخدام كمياه شرب دون معالجة مناسبة.

1. الإشريكية القولونية (E. coli):

كشفت نتائج التحاليل وجود بكتيريا الإشريكية القولونية (E. coli) في ثلاثة من الآبار المدروسة، مع تسجيل أعلى تركيز في البئر رقم (4)، في حين لم تُكتشف في البئرين (3) و(5). وبمقارنة النتائج مع المواصفة القياسية الليبية [21] وإرشادات منظمة الصحة العالمية[16]، التي تشترط خلو مياه الشرب تمامًا من (0 MPN/100 mL) E. coli، يتضح أن الآبار التي سجلت وجود هذه البكتيريا غير مطابقة لمتطلبات مياه الشرب. ويُعد وجود E. coli مؤشرًا على التلوث البرازي الحديث[17]' ويرجح ارتباطه بتسرب مياه الصرف الصحي أو المخلفات البشرية إلى الخزان الجوفي[19]، وهو ما يتوافق مع طبيعة المنطقة التي تعتمد على الحفر الامتصاصية وتضم بركة لتجميع مياه الصرف الصحي، بالإضافة إلى النفاذية العالية للخزان الجوفي الكارستي التي تسهل انتقال الملوثات.

وتؤيد هذه النتائج مع دراسة حماد وآخرون (2021)، التي سجلت وجود تلوث ميكروبيولوجي في بعض آبار مدينة المرج، كما تنسجم مع Boukich وآخرون (2025) التي أشارت إلى أن وجود E. coli يُعد من أهم مؤشرات تدهور الجودة الميكروبيولوجية للمياه الجوفية. وقد يرجع هذا التشابه إلى تأثر المياه الجوفية بمصادر تلوث بشرية متشابهة، مثل تسرب مياه الصرف الصحي أو الحفر الامتصاصية، إضافة إلى ارتفاع نفاذية الخزانات الكارستية التي تسهل انتقال الملوثات. أما الاختلاف في مستويات التلوث بين الدراسات، فقد يعود إلى اختلاف مواقع الآبار، وكثافة الأنشطة البشرية، ووقت أخذ العينات.

2. العدد الكلي للبكتيريا (TBC):

تجاوزت أعداد البكتيريا الحدود المسموح بها وفقا للمواصفات القياسية الليبية[21] وارشادات منظمة الصحة العالمية [16] (< 200 MPN/100mL) في جميع الآبار، وسجلت قيماً مرتفعة بلغت ذروتها في (بئر رقم 3) و (بئر رقم 2)، ويعكس هذا الارتفاع زيادة الحمل الميكروبي في المياه الجوفية، مما يشير إلى تدهور جودتها الميكروبيولوجية واحتمال تأثرها بمصادر تلوث خارجية. ورغم أن العدد الكلي للبكتيريا لا يُعد مؤشرًا مباشرًا

على التلوث البرازي، إلا أن ارتفاعه يُشير إلى ضعف الجودة الصحية للمياه ويستدعي إجراء تقييم أكثر شمولًا لمصادر التلوث وإخضاع المياه للمعالجة قبل استخدامها للاستهلاك البشري

وتنسجم هذه النتائج مع دراسة حماد وآخرون (2021) التي سجلت ارتفاعًا في المؤشرات البكتيرية ببعض آبار مدينة المرج، كما تتوافق مع نتائج Debassi وآخرون (2025) التي أوضحت وجود ارتباط بين ارتفاع المؤشرات الكيميائية والميكروبيولوجية في المياه المتأثرة بمصادر التلوث. وقد يرجع هذا التشابه إلى تأثر المياه الجوفية بعوامل بيئية وبشرية متشابهة، في حين قد يعود الاختلاف في شدة التلوث إلى تباين خصائص الخزان الجوفي ومواقع الآبار ومستوى الأنشطة المحيطة بها.

3. بكتيريا القولون الكلية :(TCF)

أظهرت العينات تلوثاً كلياً ببكتيريا القولون، وتصدر (بئر رقم 2) الترتيب مسجلاً قيمة بلغت816.4 MPN/100mL وتشير هذه النتائج إلى عدم مطابقة المياه لمتطلبات المواصفة القياسية الليبية[21] وإرشادات منظمة الصحة العالمية[16] التي تشترط خلو مياه الشرب من هذه البكتيريا عند نقطة الاستهلاك. ويُعد وجود القولونيات الكلية مؤشرًا على احتمال تعرض المياه للتلوث البيئي أو تسرب المياه الملوثة إلى الخزان الجوفي [19–20]، الأمر الذي يستدعي تعزيز إجراءات المراقبة والمعالجة قبل الاستخدام

وتتسق هذه النتائج مع دراسة Boukich وآخرون (2025) التي سجلت وجود تلوث ميكروبيولوجي في المياه الجوفية، كما تتوافق مع Gyimah وآخرون (2024)، التي أوضحت أن بكتيريا القولون الكلية تُعد من أكثر المؤشرات استخدامًا في تقييم تأثير مياه الصرف الصحي على جودة المياه الجوفية. وقد يرجع هذا التشابه إلى تعرض الخزان الجوفي لمصادر تلوث بيئية أو بشرية متقاربة، في حين قد تعزى الفروق في مستويات التلوث إلى اختلاف الظروف الهيدروجيولوجية وكفاءة الحماية الطبيعية للخزانات الجوفية

4. المكورات المعوية :(FS)

اوضحت نتائج التحاليل وجود المكورات المعوية (FS) في بئرين فقط، مع تسجيل أعلى تركيز في البئر رقم (4)، بينما لم تُكتشف في بقية الآبار. وبمقارنة النتائج مع المواصفة القياسية الليبية[21] وإرشادات منظمة الصحة العالمية[16]، التي تشترط خلو مياه الشرب

من مؤشرات التلوث البرازي، يتضح أن المياه في الآبار التي سُجلت فيها هذه البكتيريا غير مطابقة لمتطلبات مياه الشرب. ويُعد وجود المكورات المعوية مؤشرًا على التلوث البرازي، نظرًا لقدرتها على البقاء في البيئة المائية لفترات أطول مقارنة ببعض المؤشرات البكتيرية الأخرى، مما يرجح تأثر هذه الآبار بتسرب مياه الصرف الصحي إلى الخزان الجوفي[20].

وتؤيد هذه النتائج مع دراسة Gyimah وآخرون (2024) التي أوضحت أهمية المكورات المعوية في تقييم تأثير مياه الصرف الصحي على المياه الجوفية، كما تتوافق مع Boukich وآخرون (2025) التي سجلت وجود مؤشرات ميكروبيولوجية مماثلة في المياه الجوفية المتأثرة بالأنشطة البشرية. وقد يرجع هذا التشابه إلى استمرار تأثير مصادر التلوث في المناطق الحضرية، بينما قد تعزى الاختلافات بين الدراسات إلى تباين الظروف البيئية والهيدروجيولوجية ودرجة تعرض الخزانات الجوفية للتلوث

5. الفطريات (Fungi):

بينت نتائج التحاليل وجود نمو فطري في عدد من الآبار المدروسة، مع تسجيل أعلى كثافة في البئر رقم (1)، في حين سُجلت قيم أقل في بقية الآبار. ويشير وجود الفطريات إلى احتمال تأثر المياه بالعوامل البيئية أو بتسرب المواد العضوية إلى الخزان الجوفي، إلا أنها لا تُعد مؤشرًا مباشرًا على التلوث البرازي. ورغم عدم وجود حدود معيارية محددة للفطريات في المواصفة القياسية الليبية رقم (82) أو إرشادات منظمة الصحة العالمية، فإن وجودها قد يؤثر في الخصائص الصحية والاستساغية للمياه، ويستدعي متابعة دورية واتخاذ الإجراءات المناسبة لضمان جودة مياه الشرب

وتتوافق هذه الملاحظة مع دراسة Boukich وآخرون (2025) التي سجلت وجود مؤشرات ميكروبيولوجية متعددة في المياه الجوفية، كما تتماشى مع ما خلصت إليه مراجعة Gyimah وآخرون (2024) بشأن أهمية دمج المؤشرات الكيميائية والميكروبيولوجية عند تقييم جودة المياه الجوفية. وقد يرجع هذا التشابه إلى تشابه الظروف البيئية المؤثرة في نمو الكائنات الدقيقة، في حين قد يعود الاختلاف في كثافة النمو الفطري إلى اختلاف الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه وطرق إدارة مصادر التلوث في مناطق الدراسة المختلفة

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

التحليل الإحصائي وربط المتغيرات بمصادر التلوث

لضمان فهم علمي وإحصائي متكامل، تم تحليل البيانات باستخدام برنامج Minitab(18) حيث أُجري التحليل الإحصائي الوصفي وتحليل ارتباط بيرسون (Pearson Correlation) لدراسة تشتت البيانات والعلاقات بين المؤشرات الفيزيائية والهيدروكيميائية والميكروبيولوجية. كما تم اختبار الدلالة الإحصائية لمعاملات الارتباط عند مستوى معنوية ($\alpha = 0.05$) واعتمدت قيمة ($p < 0.05$) للحكم على معنوية العلاقات الإحصائية، وذلك بهدف تفسير الأنماط المكانية لجودة المياه الجوفية وربطها بالخصائص البيئية لمنطقة الدراسة، ولا سيما تأثير بركة تجميع مياه الصرف الصحي البالغة مساحتها 216.58 هكتارًا والآبار السوداء.

1. جدول رقم (4) الإحصاء الوصفي وتفسير قيم التشتت

المتغير(Parameter)	الحد الأدنى (Min)	الحد الأقصى (Max)	المتوسط الحسابي (Mean)	الانحراف المعياري (Std. Dev)
الأس الهيدروجيني(−) (pH)	7.06	7.31	7.16	0.12
درجة الحرارة(°C) (Temp)	21.50	21.50	21.50	0.00
الأملاح الذائبة الكلية(mg/L) TDS	842.40	1149.85	1014.91	113.88
الإيصالية الكهربائية(µS/cm) EC	1296.00	1769.00	1561.40	175.21
عسر الكالسيوم Calcium Hardness (mg/L)	200.18	520.47	408.37	130.96
العسر الكلي(mg/L) Total Hardness	640.58	880.79	760.68	89.52
الكلوريد(mg/L) Chloride	244.00	396.00	319.20	54.21
الكبريتات(mg/L) Sulphate	30.32	53.67	42.46	8.46

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته

http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

المتغير(Parameter)	الحد الأدنى (Min)	الحد الأقصى (Max)	المتوسط الحسابي (Mean)	الانحراف المعياري (Std. Dev)
البوتاسيوم(mg/L) Potassium	4.60	11.60	8.32	3.17
الصوديوم(mg/L) Sodium	102.00	188.00	163.00	36.48
القلوية الكلية(mg/L) Total Alkalinity	244.24	316.31	278.67	28.82
النترات(mg/L) Nitrate	5.38	33.22	14.93	11.11
الفطريات(CFU/mL) Fungi	0.00	50.00	18.00	19.24
السترييتوكوكس المعوية FS (MPN/100mL)	0.00	37.80	7.96	16.70
العدد الكلي للبكتيريا TBC (MPN/100mL)	435.20	2419.60	1337.62	994.02
الإشريكية القولونية E. coli (MPN/100mL)	0.00	387.30	78.28	172.75
بكتيريا القولون الكلية TCF (MPN/100mL)	14.80	816.40	266.94	342.33

يلاحظ من قراءة الانحراف المعياري وجود تفاوت مكاني حاد جداً في المؤشرات البيولوجية مقارنة بالمتغيرات الكيميائية.فعلى سبيل المثال، بلغ الانحراف المعياري للإشريكية القولونية E. coli حوالي 172.75 في حين بلغ متوسطها العام78.28 ، وكذلك الأمر لبكتيريا القولون الكلية TCF (انحراف معياري 342.33 مقابل متوسط 266.94) رياضياً، هذا الارتفاع للانحراف المعياري يعني تشتت البيانات بشكل بؤري وتمركز للتلوث في نقط معينة؛ ويؤكد وجود بؤرة تلوث نشطة وقريبة للغاية جغرافياً من بئر رقم(4) وبئر رقم (2) مسببة هذا التفاوت البيولوجي مقارنة ببقية الآبار.

التقييم الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي لتلوث المياه الجوفية في الخزان الكارستي لمدينة المرج (ليبيا): دراسة أثر الصرف الصحي وعلاقته
http://www.doi.org/10.62341/istj-vol39-1-ta28

2. تحليل الارتباط لبيرسون

نظرًا لأن الدراسة اعتمدت على خمس عينات (خمسة آبار)، فقد استُخدم تحليل الارتباط لبيرسون بوصفه أداة استكشافية لدراسة العلاقات بين المتغيرات، مع تفسير النتائج بالاستناد إلى الأدلة الهيدروجيولوجية والنتائج المخبرية ذات الصلة.

جدول رقم (5) يوضح تحليل الارتباط لبيرسون

المتغير	TDS	EC	Nitrate	E. coli	TCF	TBC	FS
TDS	1.000	1.000	0.606	-0.171	0.134	0.189	-0.166
EC	1.000	1.000	0.606	-0.171	0.134	0.189	-0.166
Nitrate	0.606	0.606	1.000	0.109	-0.190	-0.646	0.098
E. coli	-0.171	-0.171	0.109	1.000	0.203	-0.363	0.999
TCF	0.134	0.134	-0.190	0.203	1.000	0.506	0.247
TBC	0.189	0.189	-0.646	-0.363	0.506	1.000	-0.338
FS	-0.166	-0.166	0.098	0.999	0.247	-0.338	1.000

2. الدلالة الإحصائية (p–value)

جدول رقم (6) يوضح قيم الدلالة الاحصائية

العلاقة	r	p-value	الدلالة
TDS – EC	1.000	<0.001	دال إحصائياً
TDS – Nitrate	0.606	0.279	غير دال
TDS – E. coli	-0.171	0.783	غير دال
TDS – TCF	0.134	0.830	غير دال
TDS – TBC	0.189	0.761	غير دال
TDS – FS	-0.166	0.790	غير دال
Nitrate – TBC	-0.646	0.239	غير دال
E. coli – FS	0.999	<0.001	دال إحصائياً
TCF – TBC	0.506	0.384	غير دال

أظهرت نتائج تحليل ارتباط بيرسون أن الارتباط بين (TDS) و(EC) كان ارتباطاً موجباً كاملاً ودالاً إحصائياً ($r = 1.000$، $P < 0.001$) مما يؤكد الاعتماد المباشر للتوصيل الكهربائي على تركيز الأملاح الذائبة الكلية. كما وُجد ارتباط موجب شبه كامل بين E. coli و FS($r = 0.999$، $P < 0.001$) مما يدل على أن كلا المؤشرين يعكسان

مصدراً واحداً للتلوث البرازي. وارتباطاً موجباً بين المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS) والنترات ($r = 0.606$) أما بقية معاملات الارتباط فلم تكن ذات دلالة إحصائية ($P > 0.05$) ويُعزى ذلك غالباً إلى صغر حجم العينة (خمسة آبار)، الأمر الذي يقلل القدرة الإحصائية على الكشف عن العلاقات الحقيقية.

تجدر الإشارة إلى أن نتائج التحليل الإحصائي، ولا سيما تحليل ارتباط بيرسون، ينبغي تفسيرها بحذر نظرًا لمحدودية حجم العينة، وهو ما قد يؤثر في القوة الإحصائية للاختبارات ودلالة معاملات الارتباط. ويعود ذلك إلى أن الآبار المدروسة مملوكة لأفراد، وقد واجه الباحث صعوبات في الحصول على موافقة بعض الملاك لسحب العينات، مما حدّ من عدد الآبار التي أمكن تضمينها في الدراسة. ومع ذلك، فقد جرى اختيار الآبار المتاحة بما يحقق تمثيلًا مكانيًا مناسبًا لمنطقة الدراسة، وتُعد النتائج مؤشرًا أوليًا مهمًا لتقييم جودة المياه الجوفية وتحديد الاتجاهات العامة للعلاقات بين المؤشرات المدروسة.

آلية انتقال الملوثات عبر النظام الهيدروجيولوجي الكارستي

لفهم الكيفية الهيدروليكية التي تغلغلت بها هذه الملوثات المخبرية والإحصائية إلى الخزان، يجب النظر إلى الخصائص الهيدروجيولوجية والتشققية لتكوينات المنطقة الجوفية .يتكون الخزان الحامل للمياه في منطقة المرج أساساً من صخور الحجر الجيري والمارل التشققي التابعة لتكوينات (الأبرق ودرنة)[25]

يمتاز هذا النظام الجيولوجي الكارستي بانتشار قنوات ذوبان، ممرات تفريغ، وتشققات دقيقة متسعة ومفتوحة تفتقر لوجود الحبيبات الطينية أو الرملية الدقيقة التي تعمل عادة في الخزانات الرسوبية الأخرى كفلتر طبيعي ميكانيكي وبيولوجي للملوثات[23]، مياه الصرف الصحي المتجمعة في البركة الكبرى التي تغطي مساحة شاسعة تبلغ 216.58 هكتاراً، أو المياه العادمة المتسربة من آلاف الآبار السوداء السطحية والعميقة التي يعتمد عليها سكان المدينة للتخلص العشوائي من المخلفات السائلة، تتغلغل هيدروليكياً وتتدفق بسرعة هيدروليكية عالية وعبر قنوات حرة ومباشرة إلى فوهات الآبار الجوفية (Wellheads) تصل هذه المياه الملوثة بيئياً وبيولوجياً محملة بكافة حمولتها البكتيرية والكيميائية والكلوريدات والنترات دون أن تخضع لأي عملية تصفية ذاتية طبيعية، مما تسبب في التلوث الواسع والمرصود في العينات المخبرية، حيث يُعرف الجريان التفضيلي

(Preferential\ Flow) في مثل هذه البيئات بقدرته على نقل الميكروبات لمسافات شاسعة دون حدوث أي اضمحلال حركي أو حيوي ملحوظ [27].

الخلاصة

خلصت الدراسة إلى أن جودة المياه الجوفية في الآبار الخمسة المدروسة بمدينة المرج تتأثر بتداخل عوامل هيدروكيميائية وميكروبيولوجية تؤثر في ملاءمتها للاستهلاك البشري المباشر، إذ أظهرت النتائج تجاوز بعض المؤشرات الكيميائية للحدود المسموح بها، إلى جانب رصد مؤشرات واضحة للتلوث الميكروبي في عدد من الآبار، بما في ذلك بكتيريا Escherichia coli (E. coli) والقولونيات الكلية والمكورات المعوية. وتؤكد هذه النتائج أهمية تطبيق برامج رصد دورية تجمع بين التقييمين الهيدروكيميائي والميكروبيولوجي للكشف المبكر عن تدهور جودة المياه الجوفية، كما توفر الدراسة أساسًا علميًا يدعم متخذي القرار في وضع إجراءات مناسبة لحماية الخزان الجوفي، والحد من مصادر التلوث، وتحسين إدارة الموارد المائية في مدينة المرج والمناطق ذات الخصائص الهيدروجيولوجية المشابهة

قيود الدراسة

على الرغم من أن نتائج هذه الدراسة قدمت تقييماً أولياً مهماً للحالة الهيدروكيميائية والميكروبيولوجية للمياه الجوفية بمدينة المرج، فإنها تخضع لعدد من القيود التي ينبغي أخذها في الاعتبار عند تفسير النتائج. فقد اقتصرت الدراسة على خمس آبار جوفية تمثل مواقع مختارة داخل منطقة الدراسة، ويعود ذلك جزئياً إلى صعوبة الحصول على موافقة بعض أصحاب الآبار الخاصة لسحب العينات، مما حدّ من إمكانية توسيع حجم العينة. كما اعتمدت الدراسة على عينات جُمعت خلال فترة زمنية واحدة، الأمر الذي قد لا يعكس التغيرات الموسمية في جودة المياه. لذلك، يُوصى بأن تشمل الدراسات المستقبلية عدداً أكبر من الآبار، مع تنفيذ برامج رصد دورية تغطي الفصول المختلفة، بما يتيح تقييماً أكثر شمولاً للتغيرات المكانية والزمانية في جودة المياه الجوفية

التوصيات المقترحة

استنادًا إلى النتائج التي توصلت إليها الدراسة، توصى بما يلي وفقًا لأولويات التدخل:

- النظر في الحد من استخدام مياه الآبار التي أظهرت مؤشرات على التلوث الميكروبي لأغراض الشرب دون معالجة مناسبة، مع دراسة إمكانية تطبيق إجراءات التعقيم، مثل الكلورة، في الآبار التي سجلت وجود مؤشرات تلوث ميكروبي.
- تعزيز برامج المراقبة الدورية لجودة المياه الجوفية، بحيث تشمل التحاليل الفيزيائية والكيميائية والميكروبيولوجية، بما يسهم في الكشف المبكر عن أي تغيرات في جودة المياه ومتابعة فعالية إجراءات الإدارة والمعالجة.
- دراسة إمكانية الحد من مصادر التلوث من خلال تطوير منظومة الصرف الصحي، بما في ذلك إنشاء أو إعادة تأهيل محطة معالجة مياه الصرف الصحي، وتقليل الاعتماد على الحفر الامتصاصية (الآبار السوداء)، لما قد تمثله من مصدر محتمل لتلوث الخزان الجوفي.
- تعزيز إجراءات حماية الخزان الجوفي الكارستي، من خلال إنشاء مناطق حماية حول آبار مياه الشرب وتنظيم الأنشطة البشرية في محيطها، نظرًا لارتفاع قابلية الخزان غير المحصور لتسرب وانتقال الملوثات.
- النظر في تنويع مصادر مياه الشرب أو توفير مصادر إضافية، بما يحد من الاعتماد على الآبار التي أشارت نتائج الدراسة إلى احتمال تأثرها بالتلوث، ويسهم في تعزيز الأمن المائي.
- إجراء دراسات مستقبلية تشمل عددًا أكبر من الآبار وعلى فترات زمنية مختلفة، مع توظيف تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والنمذجة الهيدروجيولوجية، بما يساعد على تحسين فهم مسارات انتقال الملوثات وتحديد مصادرها بدقة أكبر.

المراجع:

[1]. Salem, O. M. (1992). The groundwater resources of Libya. In: The Geology of Libya, Elsevier, Amsterdam, Vol. 7, pp. 2951-2977.

[2]. El Hawat, A. S., & Abdulsamad, E. O. (2004). The geology of Cyrenaica: A field guide to the stratigraphy, sedimentary

evolution, and karst of NE Libya. Benghazi: University of Benghazi.

[3]. Ruggieri, R., Elshaafi, A., Bilal, A., Salloum, F., & Elshari, S. (2025). The Cyrenaica Karst Project: Karst Geomorphology and Caves, Al-Jabal Al-Akhdar, NE Libya. Journal of Pure & Applied Sciences, 24(2), 44–51. https://doi.org/10.51984/jopas.v25i2.3787

[4]. Hamad, M. S., & Al-Sadooni, F. N. (2015). Microfacies and Sedimentary Environment of the Eocene-Oligocene Karstic Carbonate Rocks, Al-Jabal Al-Akhdar, NE Libya. Journal of African Earth Sciences, 105, 45-62.

[5]. Albbanqeeyah, S. A., Elshlmani, G., Mosbah, K., Masoud, J., & Fares, F. F. (2024). Evaluation of groundwater resources and their suitability for drinking and irrigation purposes in Al-Marj City, NE Libya. Humanities & Natural Sciences Journal, 5(12). https://doi.org/10.53796/hnsj512/22

[6]. Obeidat, M. M., Awawdeh, M., & Al-Mughaid, H. (2013). Impact of a domestic wastewater treatment plant on groundwater pollution, North Jordan. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 30(2).

[7]. Hamad, J. R. J., Yaacob, W. Z. W., & Omran, A. (2021). Quality assessment of groundwater resources in the city of Al-Marj, Libya. Processes, 9(1), 154. https://doi.org/10.3390/pr9010154

[8]. Lawgali, Y., Al-Gezawi, A., & Al-Barghathi, B. (2022). Some physico-chemical analyses of groundwater sources in Al-Marj region in the North-East of Libya. Scientific Journal for Faculty of Science, Sirte University, 2(1). https://doi.org/10.37375/sjfssu.v2i1.227

[9]. Alqarawy, A. M., Rajmohan, N., Masoud, M. H. Z., & Niyazi, B. A. M. (2023). Hydrochemical appraisal and sources of contamination in high nitrate aquifer, Saudi Arabia. Arabian Journal of Chemistry, 16, 105041. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105041

[10]. Gyimah, E., et al. (2024). Effluents from septic systems and impact on groundwater contamination: A systematic review. Environmental Science and Pollution Research. https://doi.org/10.1007/s11356-024-35385-1

[11]. Feng, Y., Kang, F., Guo, Y., Li, Z., Liu, B., Bu, H., Xia, C., & He, Q. (2024). Evolution of hydrochemistry and water quality of karst groundwater under the effects of intense anthropogenic activities. Journal of Environmental Management, 371, 123059. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123059

[12]. Li, C., Fang, J., Feng, F., Yao, T., Shan, Y., & Su, W. (2025). Differential Evolution in Hydrochemical Characteristics Amongst Porous, Fissured and Karst Aquifers in China. Hydrology, 12(7), 175. https://doi.org/10.3390/hydrology12070175.

[13]. El Fallah, O. A., Al Faitouri, M. S., & Muftah, A. M. (2025). Hydrogeochemical Assessment of Groundwater in the Southeast of Benghazi City, Libya. Journal of Pure & Applied Sciences, 24(2), 1–7. https://doi.org/10.51984/jopas.v25i2.3776.

[14]. Boukich, O., Ben-Tahar, R., Gharibi, E., Bourhia, M., Shazly, G. A., Dauelbait, M., Mahjoub, M., El Guerrouj, B., & Smiri, Y. (2025). Assessment of groundwater pollution using PIG index and microbiological indicators in the Angads plain, Morocco. Scientific Reports, 15, 26412. https://doi.org/10.1038/s41598-025-99956-z

[15]. Debassi, B., Allaoua, N., et al. (2025). Assessment of water quality of groundwater, surface water, and wastewater using physicochemical parameters and microbiological indicators. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H / SAGE. https://doi.org/10.1177/00368504251348544

[16]. WHO. (2017). Guidelines for drinking-water quality: first addendum to the fourth edition. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

[17]. APHA. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, D.C.

[18]. ISO 19458. (2006). Water quality — Sampling for microbiological analysis. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

[19]. ISO 9308-2. (2012). Water quality — Enumeration of Escherichia coli and coliform bacteria — Part 2: Most probable number method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

[20]. ISO 7899-1. (1998). Water quality — Detection and enumeration of intestinal enterococci — Part 1: Miniaturized method (Most Probable Number) for surface and waste water. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

[21]. Libyan National Center for Standardization and Metrology (LNCSM). (2008). Libyan Standard No. 82: Drinking Water Specifications. Tripoli, Libya.

[22]. Appelo, C.A.J. and Postma, D. (2005). Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd Edition, B.A. Balkema Publishers, Leiden, The Netherlands.

[23]. Ford, D. and Williams, P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.

[24].El-Alami, M. (2002). Hydrogeology of the Karst Aquifers in the Al-Marj Plain, Northeast Libya. Libyan Journal of Earth Sciences, 12(1), pp. 45-58.

[25]. Goldscheider, N. and Drew, D. (2007). Methods in Karst Hydrogeology. International Association of Hydrogeologists (IAH) BY, Taylor & Francis Group, London, UK.

[26]. Crittenden, J.C., Trussell, R.R., Hand, D.W., Howe, K.J. and Tchobanoglous, G. (2012). MWH's Water Treatment: Principles and Design. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.

[27]. Metcalf & Eddy, Inc. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th Edition, McGraw-Hill Education, New York, USA.