

دراسة بعض الخصائص الفيزيوكيميائية والبكتيرية لمياه حوض وادي حجر - حضرموت - اليمن

A Study on the Physiochemical and Microbial Properties of Wadi Hajar Reservoir – Hadhramout - Yemen

د. صلاح عبدالله بن فريجان^{1,2}، د. خالد صالح باواحدي^{2,3}¹أستاذ مساعد، قسم العلوم البيئية، كلية العلوم البيئية والأحياء البحرية، جامعة حضرموت²مركز الدراسات البيئية والموارد المائية، جامعة حضرموت³أستاذ، قسم العلوم البيئية، كلية العلوم البيئية والأحياء البحرية، جامعة حضرموتkbawahidi@hu.edu.ye

تاريخ القبول: 2025/10/5

تاريخ الاستلام: 2025/7/20

الملخص:

الكلمات المفتاحية:

- البكتيريا
- العيون المائية
- الأملاح الذائبة
- تصنيف المياه

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الخصائص الفيزيوكيميائية والبكتيرية لعينات مائية مأخوذة من مواقع متنوعة في حوض وادي حجر، تشمل الأودية، العيون المائية، والقنوات، لأجل تحديد مدى ملاءمتها للشرب طبقاً للمواصفات القياسية اليمنية ومواصفات منظمة الصحة العالمية (WHO). شملت التحاليل قياس مؤشرات الفيزيوكيميائية (درجة الحرارة، الأملاح الذائبة الكلية (TDS)، العكارة، الأس الهيدروجيني (pH)، التوصيل الكهربائي (EC)، إضافة إلى مؤشرات بكتيرية شملت العد الكلي للبكتيريا (TBC).

أظهرت النتائج الفيزيوكيميائية أن درجة الحرارة تراوحت بين 22.5°C و 31.9°C ، مع تسجيل أعلى العكارات في العينة (2) (8.13 NTU) وأدناها بالقرب في العينة رقم (4) (0.51 NTU). تراوحت قيم الأس الهيدروجيني بين ($7.26 - 8.54$)، وكانت جميعها ضمن النطاق المسموح به ($6.5 - 8.5$). كما دلت قيم التوصيل الكهربائي ($290 - 600\ \mu\text{S/cm}$) على وجود أملاح ذائبة بتركيز معتدل ويتشابه جيولوجي في المصدر.

أما التحليل البكتيرية، فقد بين وجود تركيزات مرتفعة للبكتيريا الكلية، حيث سجلت العينة (2) أعلى قيمة ($2.60 \times 10^5\text{ CFU/100ml}$)، في حين كانت الأدنى في العينة (1) ($1.06 \times 10^2\text{ CFU/100ml}$). وأثبتت نتيجة تصنيف جودة المياه وجود مياه جيدة إلى ممتازة. بالإمكان شربها بأمان بعد التعقيم بمادة الكلور.

ABSTRACT:

Key Words:

- Microbes
- Springs
- Dissolved Salts
- Water Classification

This study aims to assess the physiochemical and microbial properties of water samples collected from diverse locations within the Wadi Hajr reservoir, including valleys, springs, and canals in order to determine their suitability for drinking according to Yemeni standard specifications and World Health Organization (WHO) specifications. The physiochemical results showed that temperatures

ranged between 22.5°C and 31.9°C. The highest turbidity was recorded in Sample 2 (8.13 NTU), while the lowest was in Sample 4 (0.51 NTU). pH values ranged from 7.26 to 8.54, all falling within the permissible range (6.5–8.5). Electrical conductivity values (290–600 µS/cm) indicated moderately concentrated dissolved salts and geological similarity in the source.

As for the microbial analysis, the results revealed high concentrations of total bacteria, where sample 2 registered the highest value (2.60×10^5 CFU/100ml), while the lowest was in Sample 1 (1.06×10^2 CFU/100ml). Water quality classification results confirmed the presence of good to excellent water, which can be safely consumed after sterilization with chlorine.

مقدمة

يُعد تلوث الماء من أهم الموضوعات التي اهتم بها العلماء والمختصون في مجال التلوث؛ ذلك لأن الماء يشغل أكبر حيز من الغلاف الحيوي، وهو أكبر مادة منفردة موجودة به؛ إذ تبلغ مساحة المسطح المائي حوالي 71% من مساحة الكرة الأرضية (أبوناصرية، 2009; زياد والحبوبي، 2010).

يعد تقييم جودة المياه أمراً أساسياً للإدارة المستدامة للموارد المائية، خاصة في المناطق القاحلة، مثل حوض وادي حجر، حيث تشكل ندرة المياه والتلوث تحديات كبيرة للنظم البيئية والمجتمعات البشرية (Vörösmarty *et al.*, 2010) وقد أدت الزيادة السريعة في التحضر والتوسع الزراعي والتغيرات المناخية إلى تفاقم الضغوط على الموارد المائية في هذا الحوض، مما يستدعي إجراء تقييمات شاملة لضمان الاستدامة في المدى الطويل (Al-Saidi *et al.*, 2021)، ولا يقتصر رصد جودة المياه على حماية الصحة العامة فحسب، بل يدعم أيضاً الإنتاجية الزراعية والحفاظ على البيئة (WHO, 2017). تعتمد التقييمات التقليدية لجودة المياه في الغالب على أخذ العينات الميدانية، والتي وإن كانت دقيقة، غير أنها محدودة في التغطية المكانية والدقة الزمنية. (Jawak *et al.*, 2015) وقد أحدثت التطورات الحديثة في تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية ثورة في مجال رصد جودة المياه، من خلال تمكين جمع البيانات في نطاق واسع، وبكلفة فعّالة، وفي الوقت الفعلي (Elbeltagi *et al.*, 2022). وتسمح هذه التقنيات بتتبع المعايير الرئيسية، مثل العكارة والملوحة من خلال المؤشرات الطيفية المستخلصة من صور الأقمار الصناعية، مثل (Landsat و Sentinel-2). (Milewski *et al.*, 2019). ومع ذلك، يظل دمج هذه الأدوات مع البيانات الميدانية أمراً بالغ الأهمية؛ للتحقق من النتائج، وتحسين دقة النماذج. (Ahmad *et al.*, 2020).

- مشكلة البحث وتساؤلاته:

تعاني موارد المياه في حوض وادي حجر - أحد أهم الأحواض المائية في حضرموت - من تهديدات متعددة، تشمل:

- التلوث بمخلفات الأنشطة البشرية (الزراعية، المنزلية، والصناعية المحدودة).

- التغيرات المناخية، المتمثلة في شح الأمطار، والجفاف المتكرر.

- عدم وجود دراسات حديثة تقيّم جودة المياه بكتيريًا وفيزيائيًا وكيميائيًا وفق المعايير القياسية.

- ارتفاع مخاطر الأمراض المنقولة بالماء، (مثل الكوليرا)؛ بسبب استخدام المياه غير المعالجة.

أما التساؤلات فهي:

- ما مدى مطابقة الخصائص الفيزيوكيميائية والبكتيريا لمياه الحوض للمواصفات اليمنية ومعايير منظمة الصحة العالمية (WHO)؟

- كيف تختلف تركيزات البكتيريا الكلية (TBC)؟

- هل توجد علاقة بين ارتفاع العكارة وتركيز عدد البكتيريا؟

- ما تصنيف جودة مياه الحوض بناءً على المؤشرات البيولوجية والفيزيائية؟

- هل تشير قيم التوصيل الكهربائي (EC) والأملاح الذائبة (TDS) إلى تشابه جيولوجي لمصادر المياه؟

- أسباب اختيار الموضوع:

- الندرة البحثية: ندرة الدراسات لتقييم جودة المياه في وادي حجر، رغم أهميته كمصدر رئيس لمياه الشرب والري.

- الكارثة الإنسانية: تفشي الأوبئة المنقولة بالمياه (مثل الكوليرا).

- التدهور البيئي: تعرض الحوض لضغوط بشرية (الاستخدام الجائر، التلوث بالصرف، والتغير المناخي) (التصحّر).

- الحاجة للبيانات: عدم وجود قاعدة بيانات حديثة تدعم خطط إدارة الموارد المائية في حضرموت.

- أهداف البحث:

- الهدف العام

○ تقييم جودة المياه في حوض وادي حجر العلوي.

- الأهداف الخاصة
- تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبكتيرية لمياه الوادي، ومقارنتها بخصائص المياه القياسية اليمنية ومنظمة الصحة العالمية.
- تطوير مؤشر جودة المياه (WQI) خاص بوادي حجر.
- أهمية الموضوع:
- تحديد كمية التلوث البكتيري؛ لاتخاذ إجراءات وقائية، مثل التعقيم لحماية السكان.
- حماية القطاع الزراعي أهم قطاعات حضرموت من تلوث مياه الري.
- تقديم بيانات أولية شاملة للمؤشرات الفيزيوكيميائية والبكتيرية؛ لتكون مرجعاً للدراسات المستقبلية.
- دعم صانعي القرار في تحديث المواصفات القياسية اليمنية، مثل المواصفة اليمنية (2009/1997).
- رصد تأثير التغيرات المناخية في خصائص المياه في الأحواض الجافة.
- الدراسات السابقة:
- 1- الشميري وآخرون (2020) تحدثوا في دراستهم عن ارتفاع البكتيريا الكلية إلى ١٠ CFU/ml في آبار حضرموت بسبب الصرف الصحي (ص 52)، في تقييم جودة المياه الجوفية في حضرموت.
- 2- باسلامة (2018) النتيجة الرئيسة التي تحصل عليها هي تشابه قيم التوصيل الكهربائي (200-800 $\mu\text{S/cm}$) بسبب البنية الجيولوجية البازلتية (ص 22)، في رسالته الخصائص الهيدروكيميائية لمياه الوديان في شرق اليمن.
- 3- العطاس (2022) بين في دراسته تأثير الأنشطة الزراعية في تلوث مياه الوديان في حضرموت، وجود أن المبيدات الزراعية تزيد العكارة إلى 15 NTU وتُعزز نمو البكتيريا (ص 34).
- 4- الخوالدة (2021) في دراسته عن تقييم جودة مياه الينابيع في المناطق الجافة بالأردن، تحصل على أن pH بين (1.7-3.8) مع التحذير من ارتفاع البكتيريا قرب المناطق السكنية (ص 41).
- 5- أبو زيد (2019) تحدث عن علاقة العكارة بالتلوث البكتيري في قنوات الري في دراسة حالة قنوات دلتا النيل بمصر، وتحصل على وجود ارتباط قوي بين العكارة ($\text{NTU} > 5$) وزيادة البكتيريا ($R^2 = 0.82$) (ص 27).

6- Rajendran et al. (2023). "Climate Change Impact on Microbial Load in Arid River Basins". توصل في دراسته والتي بعنوان "Climate Change Impact on Microbial Load in Arid River Basins". في الهند إلى أن درجة الحرارة $> 30^{\circ}\text{C}$ تزيد

البكتيريا بنسبة 40٪ (ص 12).

7- García-López and Martínez-Sánchez (2020). إسبانيا، تحصل على أن مدى EC مثل ("Geological Homogeneity Indicators in Water Conductivity" يدل على تشابه المصدر الصخري (ص 18) في بحثه $600-290 \mu\text{S}/\text{cm}$)

- مواد البحث وطرقه:

1- منهج البحث

اعتمدت منهجية البحث على الدراسة التحليلية للمياه السطحية لحوض وادي حجر العلوي؛ لمعرفة مدى تلوثها البكتيري، ودراسة خواصها الفيزيوكيميائية.

2-منطقة الدراسة Study area:

يقع وادي حجر في محافظة حضرموت اليمنية بين خطي عرض $(14^{\circ}00-15^{\circ}10)$ شمالاً وخطي طول $(47^{\circ}-48^{\circ})$ شرقاً، وتبلغ مساحته نحو 9,460 كم²، ويضم 125 قرية، يقطنها حوالي 42,280 نسمة (كتاب الإحصاء السنوي 2019)، تُعد مديرية حجر جزءاً من نظام بيئي فريد، حيث تبعد عن عاصمة المحافظة المكلا قرابة 146 كم، وتحدها من الشمال مديرية دوعن، ومن الشرق بروم ميفع، ومن الغرب يبعث وميفعة، ومن الجنوب رضوم. يسودها المناخ شبه الصحراوي، مع ارتفاع درجات الحرارة التي تتراوح بين 11° م في فبراير و 42° م في يونيو، وقلة هطول الأمطار 80 ملم/سنوياً، وتبخر إلى مرتفع يصل إلى 22 ملم/يوليو. تشهد المنطقة رياحاً موسمية قوية وعواصف رملية (يونيو-سبتمبر) تؤثر سلباً في النشاط الزراعي. يُنتج معدل الأمطار السنوي حوالي 470 مليون م³ من المياه، تتوزع على: 40% سيولاً سطحية، 30% مياه قاعدية، 30% تدفقات تحت سطحية. (بازار وآخرون، 2001). يتباين التصريف المائي بشكل كبير بين مواسم الجفاف (0.4-0.8 م³/ثانية (والأمطار) فوق 3م³/ثانية، مع سيول موسمية في فترتين قصيرتين (أبريل-مايو وسبتمبر-أكتوبر). تُقسّم المنطقة زراعياً على:

1- حجر السفلى (الدلتا): مساحة 2,500 هكتار، تشتهر بالسّهول الفيضية، وتُعد مركزاً للنخيل؛ ففيه (2) مليون نخلة.

2- حجر العليا: مساحة 2,450 هكتار، تضم قرى، مثل الجول والصدارة، وتعاني مع الدلتا من (التعرية المائية والهوائية) بسبب العواصف الرملية والسيول.

- أنظمة الري قديمة: يعود تاريخها إلى ما قبل الإسلام، لكن جزءاً كبيراً منها تدهور بسبب السيول، مما أدى إلى هدر المياه في البحر.

- الصرف الصحي: يُسهم غياب شبكات الصرف في تكوّن المياه الراكدة، التي تُشكل بيئة خصبة لانتشار الأمراض، كالمalaria والبلهارسيا. (باكويري، 1999) و(Extension Authority, 1996).

3- طريقة جمع العينات:

تم اختيار 10 مواقع تمثل العيون المائية الرئيسة وتفرعات الوادي. ومنها جمعت عينات المياه السطحية من العيون والوادي لمنطقة وادي حجر استناداً للطريقة المتبعة من قبل (سعاد ومحمد، 1990). وباستخدام قنينات بلاستيكية خاصة، سعة 1.5 لتر بعد تنظيفها بالماء جيداً، ثم بالماء الخالي من الأيونات، ثم أخذ العينة المراد فحصها ونقلها في ظروف مناسبة لإجراء التحاليل عليها؛ إذ جُمعت العينات السطحية من العيون والوادي 1، 2، 3، 4، 5، 6، 7، 8، 9، 10. لغرض بعض التحاليل الفيزيائية. أمّا في حالة العينات الخاصة بالاختبارات البكتيرية فقد تم جمع العينات في قوارير زجاجية معقّمة محكمة الإغلاق، ذات سعة (1 لتر)؛ إذ تم جمعها في ظروف التعقيم اللازمة لجمع عينات لمثل هذه الاختبارات، ثم نقلها إلى المعمل في الظروف المطلوبة وإجراء الاختبارات عليها في مختبر الميكروبيولوجي أغذية بكلية العلوم البيئية والأحياء البحرية بجامعة حضرموت.

4- إحداثيات مواقع عينات الدراسة:

تم تحديد 10 مواقع باستخدام جهاز النظام الموقعي الجغرافي (GPS) Global Positioning System والجدول (1) يوضح ذلك

5- قياس الخصائص الفيزيائية والكيميائية:

قياس قيمة الرقم الهيدروجيني (pH):

تم قياس درجة الأس الهيدروجيني pH لعينات المياه المدروسة حسب الخطوات المذكورة في دليل جمعية الصحة العامة الأمريكية American public health association (APHA, 2005) باستخدام جهاز pH-meter، موديل Cond 720، الشركة المصنعة WTW (الماني)، بعد معايرته بالمحاليل القياسية (Buffer Solution). بالقياس المباشر على الجهاز لعينات المياه.

جدول (1): يوضح إحداثيات مواقع العينات

الأحداثيات		رقم العينة
شمالاً	شرقاً	
14.4835017	48.218285	1
14.496713	48.098696	2
14.5114505	48.087501	3
14.47362	48.095438	4
14.472986	48.095682	5
14.4751033	48.240900	6
14.4830475	48.216044	7
14.432025	48.298995	8
14.4551300	48.278339	9
14.2707088	48.598187	10

قياس قيم الأملاح الكلية الذائبة والناقلية الكهربائية ودرجة الحرارة:

أخذت القياسات لكل من الأملاح الكلية الذائبة (TDS) والناقلية الكهربائية (EC) ودرجة الحرارة بواسطة جهاز القياس الميداني متعدد المعلمات (cond 720) من شركة WTW بالقياس المباشر لعينات المياه وحسب الخطوات المذكورة في دليل جمعية الصحة العامة الأمريكية American public health association (APHA, 2005).

قياس العكارة (Turbidity):

تم معايرة جهاز قياس العكارة قبل الاستخدام بمحاليل مرفقة مع الجهاز ذات قيم ثابتة، وتم معايرة الجهاز بمحلول قيمة العكارة فيه 0.02 ntu و 1000 ntu وبعد التأكد من ان الجهاز Turbidity Meter موديل TL2360 شركة HACH (الولايات المتحدة الأمريكية) أعطى قراءات المحاليل نفسها المستخدمة في المعايرة، تم البدء بقياس العينات.

6-الفحص البكتيري:

العدد الكلي للبكتيريا (TBC):

تم حقن 1 مل من كل عينة ماء في أطباق بتري دش (3) تخفيفات لكل عينة، وفي كل تخفيف طبقان في وسط pleat Count Agar ووضعت في الحاضنة عند درجة حرارة 37م لمدة 24 ساعة، بعد انتهاء مدة التحضين تم العد الكلي للبكتيريا بجهاز Colony Counter (حسون وآخرون، 2014).

7- تطوير مؤشر جودة المياه (WQI):

اختيار المعايير:

○ تضمين المعايير الفيزيائية، الكيميائية والميكروبيولوجية، (العكارة، TDS، EC، Ph، T.C، *E. coli*).

حساب WQI:

○ تطبيق طريقة الوزن الحسابي (Weighted Arithmetic Index) حسب دليل APHA.

○ تصنيف المياه إلى: ممتازة / جيدة / متوسطة / ضعيفة / خطيرة.

- النتائج:

1- الخصائص الفيزيائية والكيميائية

جدول (2): يوضح المواصفات القياسية اليمنية والمنظمة الصحة العالمية

منظمة الصحة العالمية WHO (القيم الإرشادية)	المواصفات اليمنية (الحد الأقصى المسموح به)	الوحدة	المعلمة
8.5 - 6.5	8.5 - 6.5	-	الأس الهيدروجيني (pH)
5 > (ويفضل > 1 للتعقيم)	5 (1 للنقاوة)	NTU	العكارة (Turbidity)
1500 (مقدرة من TDS)	1500	μS/cm	التوصيلية الكهربائية (EC)
1000 (مقبولية المستهلك)	1000 (500 مستحب)	ملغم/لتر	إجمالي المواد الصلبة الدائبة الكلية (TDS)

✓ الأس الهيدروجيني (pH):

يوضح لنا الجدول (1) قيم الأس الهيدروجيني حيث بلغ المتوسط الحسابي للرقم الهيدروجيني (8.00)، وهذا يدل

على أن المتوسط الحسابي للرقم الهيدروجيني واقع ضمن المواصفات العالمية واليمنية، وبانحراف معياري (0.45)

في حين أن جميع العينات كانت ضمن المدى المقبول للمياه (6.5-8.5) حسب WHO، باستثناء:

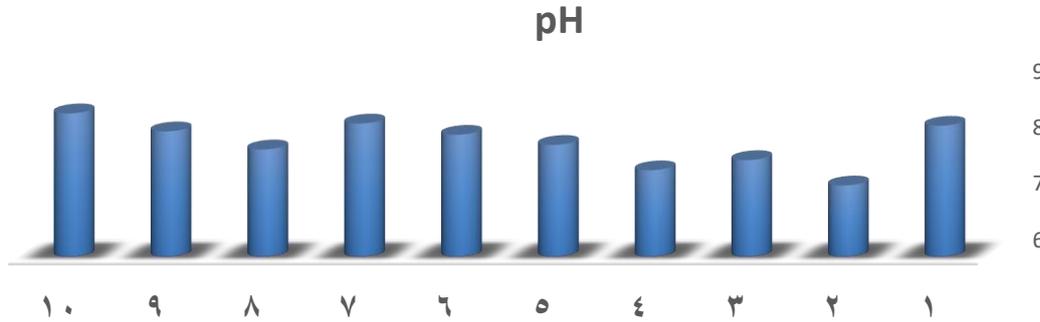
العينة رقم (2) (pH = 7.26) قريبة من الحموضة، ربما بسبب تحلل مواد عضوية.

العينة رقم (10) (pH = 8.54) قلوية قليلاً، قد تكون بسبب وجود معادن مذابة. ومن التحليل الإحصائي

يؤكد لنا وجود دلالة إحصائية، معنوية، من خلال وجود معنوية واضحة في النموذج Sig (0.009) وهي

قيمة أقل من مستوى المعنوية المعروفة (0.05)، وهذا يدل على وجود فروق معنوية.

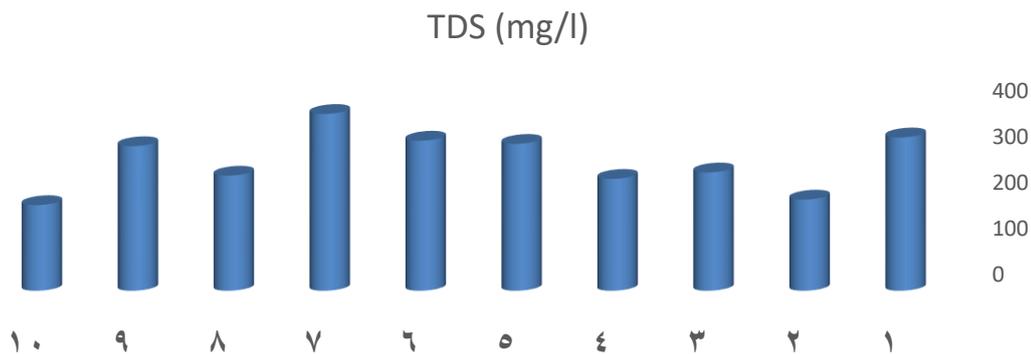
شكل رقم (1) نسب pH لعينات المياه في منطقة الدراسة



✓ الأملاح الذائبة الكلية (TDS):

يوضح الشكل رقم (2) المتوسط الحسابي لكمية الأملاح الذائبة الكلية هو (281.0 mg/l)، وكانت أصغر قيمة للأملاح الذائبة هي (186 mg/l) وأكبر قيمة (384 mg/l) في حين كان الحد المسموح به وفقاً للمواصفات ($600 > \text{mg/l}$)، وبانحراف معياري (75.2 mg/l) وهذا يدل على أن متوسط الأملاح واقع ضمن الحدود المسموح بها ويعد تبايناً طبيعياً بسبب الأملاح المعدنية حيث أكد التحليل الإحصائي عدم وجود دلالة إحصائية من خلال النموذج Sig (0.225) وهي قيمة أكبر من مستوى المعنوية (0.05)، وهذا يدل على عدم وجود فروق معنوية.

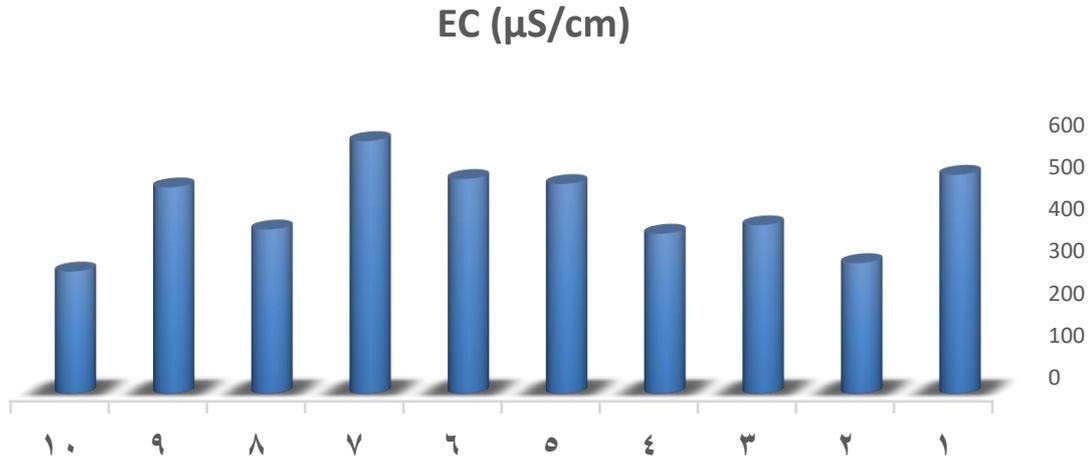
شكل رقم (2) قيم TDS (mg/l) لعينات المياه في منطقة الدراسة



بلغ المتوسط الحسابي للموصلية الكهربائية بلغ (438.8 $\mu\text{S/cm}$) كما هو موضح في الشكل رقم (3) يوضح القيم، حيث تراوحت أصغر قيمة للموصلية الكهربائية (290 $\mu\text{S/cm}$) فيما كانت أكبر قيمة (600 $\mu\text{S/cm}$) وهذا دليل على أن المتوسط الحسابي للموصلية الكهربائية واقع ضمن الحدود المسموح بها يميناً

وعالمياً، وبانحراف معياري بلغ $(104.1 \mu\text{S/cm})$ ، وكانت النتائج في مدى $(310 \mu\text{S/cm})$ مما يشير إلى وجود أملاح ذائبة طبيعية. ولا توجد فروق كبيرة بين المواقع، مما قد يدل على تشابه المصدر الجيولوجي.

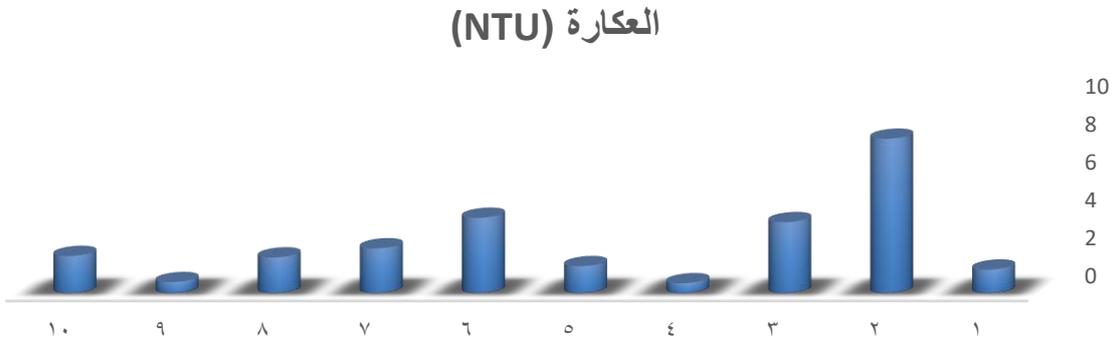
شكل رقم (3) قيم EC ($\mu\text{S/cm}$) لعينات المياه في منطقة الدراسة



✓ العكارة (NTU):

يوضح الشكل رقم (4) قيم العكارة في العينات المدروسة حيث إن أعلى عكارة سُجلت في العينة رقم (2) (8.13 NTU) في حين كان الأقل في العين رقم (4) (0.51 NTU) . وبلغ المتوسط الحسابي (2.57 NTU) ، فيما كان الحد المسموح به عالمياً و يمنياً هو (5 NTU) ، وهذا يدل على أن متوسط العكارة يقع في ضمن الحدود المسموح بها حسب المواصفات اليمنية والعالمية، وبانحراف معياري (2.34 NTU) ، أما نسب الزيادة في العكارة فكانت في العينة رقم (2) إذ بلغت (8.13 NTU) ويعزى ذلك إلى أنها ناتجة عن تدفق مياه الأمطار المحملة بالرواسب أو تلوث من مصادر بشرية (مثل أنشطة زراعية قريبة). حيث إن التحليل الإحصائي يؤكد أن العكارة ليس لها دلالة إحصائية، وغير معنوية، وتم معرفة هذه النتيجة من خلال النموذج Sig (0.183) وهي قيمة أكبر من مستوى المعنوية المعروفة (0.05) ، وهذا يدل على عدم وجود فروق معنوية.

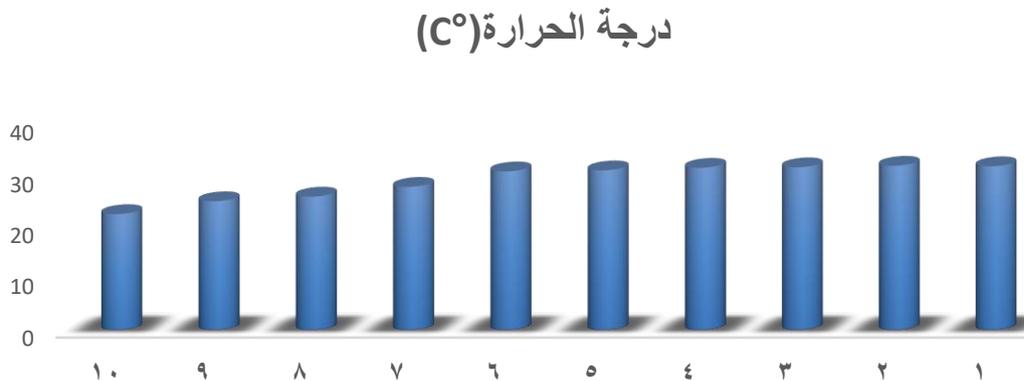
شكل رقم (4) قيم العكارة (NTU) لعينات المياه في منطقة الدراسة



✓ درجة الحرارة (C°):

بلغ المتوسط الحسابي لدرجة الحرارة لـ 28.98 C° والشكل رقم (5) يوضح قيم درجة الحرارة، حيث إن القيمة الصغرى بلغت 22.5 C° والكبرى 31.9 C° في حين أن الحد المسموح به وفقاً للمواصفات العالمية واليمنية هو 25 م، وهذا يدل على أن متوسط درجة الحرارة تجاوز الحدود المسموح بها من قبل المواصفات العالمية واليمنية وبانحراف معياري 3.34 C° وهو انحراف يشير إلى وجود تأثيرات بيئية، مثل التعرض لأشعة الشمس المباشرة، أو تدفق المياه الجوفية الدافئة، أو قد تعكس تغيرات موسمية أو تلوث حراري. ويؤكد ارتفاع درجة الحرارة في تعزيز نمو البكتيريا، خاصة في العينات ذات التلوث الميكروبي العالي. ويوضح لنا التحليل الإحصائي أن درجة الحرارة ليس لها دلالة إحصائية، وغير معنوية، وتم معرفة هذه النتيجة من خلال عدم وجود معنوية النموذج Sig (0.157) وهي قيمة أكبر من مستوى المعنوية المعروفة (0.05)، وهذا يدل على عدم وجود فروق معنوية.

شكل رقم (5) النسب لدرجة الحرارة (C°) لعينات المياه في منطقة الدراسة



2. التحليل البكتيري:

✓ العدد الكلي للبكتيريا TBC: (CFU/100ml)

يوضح الجدول رقم (3) أن أعلى تركيز للعدد الكلي للبكتيريا جاء في العينة رقم (2) 2.60×10^5 في حين كان أدنى تركيز في العينة رقم (1) حيث بلغ 1.06×10^2 . وتشير القيم المرتفعة للعدد الكلي للبكتيريا في العينات (9, 7, 6, 5, 3, 2) إلى احتمال وجود تلوث وخاصةً في المناطق القريبة من الأنشطة البشرية، مثال: العينة رقم (6). فيما كانت الحدود المسموح بها في المواصفة اليمنية هي (100 - 500 مستعمرة / مل) حيث تشير التجاوزات إلى وجود خلل محتمل في حين أنّ مواصفات الصحة العالمية تشير إلى أن لو كانت الأرقام ضمن الحدود المسموح بها، فإن أي ارتفاع مفاجئ في الأعداد يعد إشارة تحذيرية تستدعي التحقيق الفوري في مصدرها، ولم تحدد رقمًا صارمًا للخطر الصحي، بل تركز على دور هذا المؤشر كجرس إنذار مبكر.

جدول (3) نسبة العدد الكلي البكتيري

رقم العينة	TBC (CFU/100ml)
1	1.06×10^2
2	2.60×10^5
3	2.08×10^5
4	6×10^4
5	1.64×10^5
6	2.12×10^5
7	2.25×10^5
8	2.16×10^2
9	1.6×10^5
10	1.80×10^4

- المناقشة:

أوضحت الدراسة أن علاقة الارتباط لجميع العناصر مجتمعة جميعها على البكتيريا علاقة طردية جيدة، أي إنه كلما زادت قيمة المتغيرات (الأملاح الذائبة الكلية، الناقلية الكهربائية، الحرارة، الرقم الهيدروجيني والعكارة) زادت أعداد البكتيريا في المياه، وأشار العمر (2000) إلى أن نشاط البكتيريا وتكاثرها يتناسب طرديًا مع تركيز العوالق في المياه.

ومن التحليل الإحصائي يتضح الآتي: TDS، الموصلية، العكارة ودرجة الحرارة غير معنوية إحصائياً، لكن عينة واحدة من العكارة تجاوزت الحد المسموح (8.13 NTU)، في حين أن PH معنوي إحصائياً؛ بسبب قلوية المياه الطبيعية، في حين درجة الحرارة مرتفعة بسبب التعرض لأشعة الشمس. كل قيم نوعية المياه المستخدمة لحساب دليل جودة المياه (WQI) حسب APHA موجود في جدول رقم 4.

ويُعد ارتفاع درجة الحرارة في العينات (بمتوسط 28.98°م) أحد أهم النتائج. حيث يتجاوز هذا المتوسط الحدود الإرشادية (25°م). هذا الارتفاع، كما أثبت (Rajendran et al. (2023)، يعد محفزاً رئيساً للنمو البكتيري السريع، مما يفسر بشكل كبير الأعداد المرتفعة للبكتيريا التي سجّلتها في غالب العينات. والرقم الهيدروجيني يميل إلى القلوية (7.26–8.54)، بمتوسط 8.16، مما يشير إلى ماء قاعدي قليلاً. تأتي هذه النتائج متوافقة مع نطاق الأس الهيدروجيني الطبيعي للمياه. فالنتيجة المتوسطة (8.00) والقريبة من القلوية تتماشى مع ما وجدته الخوالدة (2021) في الينابيع (7.1 – 8.3)، مما يعزى غالباً إلى الذوبان الطبيعي للصخور والمعادن في البيئة الجيولوجية للمنطقة.

يظهر التوصيل الكهربائي (EC) والمواد الصلبة الذائبة (TDS) تبايناً معتدلاً، مما يشير إلى اختلاف في الأملاح الذائبة. وتؤكد النتائج (290 – 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) بشكل لافت ما خلصت إليه دراسة باسلامة (2018) والتي أرجعتها إلى الطبيعة الجيولوجية البازلتية. هذا التشابه الكبير في المدى، والذي أشارت إليه أيضاً (García-López and Martinez-Sanchez (2020)، يدعم فرضية أن مصدر المياه في منطقة الدراسة متجانس ومتشابه من الناحية الصخرية.

على الرغم من أن متوسط العكارة في العينات (2.57 NTU) كان مقبولاً، تشير القيمة المرتفعة في العينة رقم 2 (8.13 NTU) إلى وجود تلوث محلي. هذا يتطابق مع تحذيرات العطاس (2022) وأبو زيد (2019) من أن الأنشطة البشرية (كالزراعة) هي مصدر رئيس للعكارة، والتي ترتبط بدورها بالتلوث البكتيري، وهو ما يفسر الارتفاع الشديد في البكتيريا في العينة نفسها.

أما الارتفاع الصادم للعدد الكلي للبكتيريا (TBC) في معظم العينات مثل (2.60×10^5 CFU/100ml) فهو مؤشر خطر واضح. هذا يتوافق مع نتائج الشميري وآخرون (2020) التي ربطت التلوث البكتيري في آبار حضرموت بالتسرب من الصرف الصحي، أيضاً تفسير أبو زيد (2019) للعلاقة بين ارتفاع العكارة وازدياد

الأحمال البكتيرية، والتحذير الذي أطلقته الخوادة (2021) من خطورة القرب من المناطق السكنية والأنشطة البشرية على جودة المياه يمكن أن تشير إلى أن نظام جودة المياه في منطقة الدراسة يتأثر بعاملين رئيسيين، هما:

1- عوامل طبيعية: تتمثل في الخصائص الجيولوجية التي تحدد مستويات الأملاح والرقم الهيدروجيني.

2- عوامل بشرية ملوثة: هي العامل الأكثر خطورة، وتتجلى في الأنشطة البشرية (زراعية وسكنية) التي تسبب تلوثاً عضوياً وعكارة، ويتفاقم أثرها بسبب ارتفاع درجة حرارة الماء، الذي يعمل كحاضنة مثالية للتكاثر البكتيري.

جدول (4) ملخص إحصائي لمعايير جودة المياه

المواصفات القياسية اليمينية WHO	المواصفات القياسية اليمينية	المتوسط	الوسيط	الانحراف المعياري	الحد الأدنى	الحد الأقصى	النسبة المئوية %25	النسبة المئوية %75	المعيار
غير محدد	غير محدد	28.89	31.0	3.52	22.5	31.9	25.9	31.6	درجة الحرارة (°C)
8.5- 6.5	8.5- 6.5	7.998	8.16	0.44	7.26	8.54	7.71	8.32	الرقم الهيدروجيني (pH)
غير محدد (مقدرة من TDS)	1500	438.8	400	104.4	290	600	380	510	التوصيل الكهربائي (µS/cm)
1000 >	1000	281.0	257	66.8	186	384	243	326	المواد الصلبة الذائبة (ملغم/لتر)
5 >	5	2.37	1.87	2.45	0.51	8.13	1.23	3.73	العكارة (NTU)

3- حساب مؤشر جودة المياه: (WQI)

$$WQI = \frac{\sum (Q_i \times w_i)}{\sum w_i} \quad WQI = \sum w_i \sum (Q_i \times w_i)$$

تم حساب مؤشر جودة المياه باستخدام طريقة المؤشر الحسابي الموزون (BIS 2012)

لكل معيار بناء على أهميته (مثال: الرقم الهيدروجيني = 0.11، المواد الصلبة الذائبة = 0.12 إلخ)

1- (Wi) تعيين أوزان.

2- (Qi) تقييم القيم الطبيعية باستخدام:

$$Q_i = \frac{(V_i - V_{\text{المثالي}})}{(S_i - V_{\text{المثالي}})} \times 100$$

حيث أن:

V_i = القيمة الملاحظة.

S_i = القيمة القياسية المسموح بها (WHO/BIS).

V = القيمة المثالية (مثال: الرقم الهيدروجيني = 7 . المواد الصلبة الذائبة = 0)

3- حساب مؤشر جودة المياه (WQI):

$$WQI = \frac{\sum(Q_i \times w_i)}{\sum w_i}$$

جدول رقم (5) نتائج مؤشر جودة المياه (WQI)

النقطة	WQI	فئة الجودة
1	45.2	جيدة
2	68.3	مقبولة
3	52.1	جيدة
4	42.0	ممتازة
5	47.8	جيدة
6	49.5	جيدة
7	55.6	مقبولة
8	43.7	جيدة
9	41.2	ممتازة
10	38.9	ممتازة

معايير التفسير:

- (50 < ممتازة) : نظيفة، صالحة للشرب.
- (50 - 70 جيدة) : تتطلب معالجة بسيطة.
- (70 - 90 مقبولة) : تحتاج إلى ترشيح.
- (>90 ضعيفة) : غير آمنة للاستهلاك.

الرؤى الرئيسة والتوصيات

الأنماط والشذوذ:

- النقطة 2 لديها أسوأ مؤشر جودة مياه (68.3) بسبب العكارة العالية (8.13 NTU).
- النقاط 4، 9، 10 تُظهر جودة ممتازة ($WQI < 50$) بسبب العكارة المنخفضة واستقرار الرقم الهيدروجيني.
- انخفاض درجة الحرارة في النقاط 7-10 قد يشير إلى تأثير المياه الجوفية أو التغير الموسمي.

الخلاصة:

إنَّ غالب نقاط العينة تُظهر جودة مياه جيدة إلى ممتازة، مع وجود مشكلات محلية عند النقطتين 2، 7. يُنصح بالمراقبة المنتظمة والتدخلات المستهدفة للحالات الشاذة.

الاستنتاجات Conclusions:

- 1- إن متوسط درجة الحرارة لجميع العينات لمياه العيون والوادي المأخوذة تجاوز الحدود المسموح بها من قبل المواصفات القياسية العالمية واليمنية لمياه الشرب.
- 2- متوسط الأملاح الذائبة الكلية ومتوسط الناقلية الكهربائية ومتوسطات الرقم الهيدروجيني والعكارة لجميع العينات واقع ضمن الحدود المسموح بها حسب المواصفات اليمنية والعالمية، مع وجود زيادة متفاوتة في نسبة العكارة عن المواصفات العالمية واليمنية في العينة رقم 2، ومع وجود زيادة أيضاً متفاوتة في الرقم الهيدروجيني في العينة رقم 10، متجاوزاً للحدود المسموح بها عالمياً فقط.
- 3- كلما زادت قيمة كلٍ من الأملاح الذائبة الكلية، الناقلية الكهربائية، الحرارة، الرقم الهيدروجيني والعكارة زادت أعداد البكتيريا في المياه.
- 4- تقاربت نتائج نمو البكتيريا في العينات المأخوذة من العيون مع العينات المأخوذة من الوادي وجميعها مياه مكشوفة واختلفت نتائجها بين الحدود المسموح بها والحدود الغير مسموح بها.

التوصيات Recommendations:

- 1- نوصي بتكرار عمليات الفحص لنوعية المياه ومدى الحاجة إلى استخدام المطهرات كلما لزم الحاجة لذلك.

- 2- نوصي بعمل شبكة صرف صحي لتفادي التلوث ومنعه.
- 3- عمل ندوات لرفع مستوى الوعي البيئي لدى كافة أطراف المجتمع، والتنبيه بأخطار التلوث ومعالجتها.
- 4- يجب السيطرة على موارد المياه وحمايتها من التلوث البكتيري باستخدام الكلورة أو الأشعة فوق البنفسجية.
- 5- نوصي الباحثين بإجراء مزيد من الدراسات لمعرفة أنواع الميكروبات الممرضة المسببة لتلوث المياه في حوض وادي حجر.

قائمة المراجع:

المراجع باللغة العربية

- 1- أبو زيد، محمد. (2019) "تقييم كفاءة العكارة كمياري تنبؤي للتلوث البكتيري في مياه نهر النيل" المجلة المصرية لعلوم المياه والبيئة، (4) (22) ص. 112-130.
- 2- أبو ناصرية، وليد. (2009): دراسة التلوث الميكروبي لنهر الحلة من مواقع قبل وبعد محطتين لتصفية مياه الشرب. مجلة جامعة الكوفة لعلوم الحياة. العدد (1)، المجلد (1). ص: 149-156.
- 3- بازار، سالم، مجيسن عطالله، المشجري محمد (2001): بيئة وأحياء مجرى وادي حجر- حضرموت. الصفات الهيدروكيميائية والهيدروبيولوجية، مجلة حضرموت للدراسات والبحوث، المجلد (1)، العدد (1).
- 4- باسلامة، محمد (2018). الخصائص الهيدروكيميائية لمياه الوديان في شرق اليمن. رسالة ماجستير غير منشورة، جامعة حضرموت، اليمن.
- 5- باكويري، أحمد (1999): تدهور الموارد الطبيعية في وادي حجر والحد منها. الندوة العلمية حول الجفاف وانخفاض منسوب الماء الأرضي في ساحل حضرموت، غيل باوزير.
- 6- الجهاز المركزي للإحصاء (2019): كتاب الإحصاء السنوي بساحل حضرموت.
- 7- حسون، إلهام عبدالملك؛ الربيعي، مهدي صالح؛ وعمران، نذير جمال. (2014). تقييم كفاءة المعالجة باستخدام التقنية المغناطيسية في خفض التلوث البكتيري في خزانات مياه الشرب، جامعة كربلاء - المؤتمر العلمي الثاني لكلية العلوم. ص: 23-30.
- 8- الخوالدة، خالد. (2021). تقييم جودة مياه الينابيع في المناطق الجافة بالأردن باستخدام المؤشرات الفيزيائية والبيولوجية. مجلة المياه العربية، (2) 14.. 33-52.
- 9- زياد، أثير كاظم والحبوبي، زينب عبد محسن. (2010). تقييم مياه الشرب من الناحية البكتريولوجية في محافظة النجف. مجلة جامعة كربلاء. العدد (1)، المجلد (8). ص: 600-609.
- 10- سعاد عبد عباوي، محمد سليمان حسن. (1990). فحوصات المياه، الهندسة العملية للبيئة.
- 11- الشميري، عبدالكريم؛ الجفري، محمد؛ بامطرف، عبدالملك. (2020). تقييم جودة المياه الجوفية في حضرموت: دراسة فيزيائية وميكروبيولوجية. مجلة العلوم البيئية اليمنية العدد (2) المجلد (5)، 60-45.
- 12- العطاس، علي. (2022). تأثير الممارسات الزراعية على تلوث موارد المياه السطحية في حضرموت. المؤتمر العربي لعلوم البيئة، صنعاء، 120-135.
- 13- العمر، مثنى عبدالرزاق. (2000). التلوث البيئي. دار وائل للنشر، عمان، الطبعة الأولى. ص: 131-146.

المراجع الاجنبية

- 1- Ahmad, S., Kaleem, M., & Ahmad, B. (2020). Monitoring Water Quality Parameters of the Himalayan Lakes using Remote Sensing and Ground Observations. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 24(6), 1-13.

- 2- Al-Saidi, M., Hussein, H., & Sewilam, H. (2021). The Nile Delta's water and salt balances and implications for managing the salinity stress of groundwater reuse. *Journal of Environmental Management*, 288, 112368.
- 3- APHA-American public Health Association. (2005). Standard method for the examination of water and waste water. *Washington, D.C*, 24th edition.
- 4- Elbeltagi, A., Pande, C.B., Kouadri, S. & Islam, A.R.M.T. (2021). Applications of Various Data-Driven Models for the Prediction of Groundwater Quality Index in the Akot Basin, Maharashtra, *India. Environmental Science and Pollution Research*, 29, 17591-17605. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17064-7>.
- 5- García-López, E., & Martínez-Sánchez, J. (2020). Electrical conductivity as an indicator of geological homogeneity in water sources. *Environmental Geology*, 79(4), 1-12.
- 6- Jawak, S. D., Luis, A. J., & Fretwell, P. T. (2015). A high-resolution satellite-derived pan-sharpened glacier surface feature classification map of Antarctica. *Remote Sensing Letters*, 6(11), 852-861.
- 7- Milewski, A. M., Chabrilat, S., & Eisele, A. (2019). Earth Observation for Monitoring Water Quality in the Al Holar Lagoon, *United Arab Emirates. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 1255-1262.
- 8- Rajendran, S., Kumar, A., & Singh, V. (2023). Impact of rising temperatures on microbial contamination in arid river basins of Rajasthan. *Journal of Arid Environments*, 208, 1-15.
- 9- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555-561.
- 10- WHO, World Health Organization. (2017). Guidelines for Drinking-Water Quality Fourth Edition Incorporating the First Addendum.