

دراسة مقارنة لفعالية فلتر الحصى والرمل وخزان الأكسدة في معالجة مياه الصرف الصحي بمدينة الخمس - ليبيا

عمر حامد الجحاوي^{1*}، محمد حسن الصغير²، إسماعيل عمر العريفي³، إبراهيم محمد هرام⁴، نادية حسين السباني⁵
^{1,4} قسم التقنيات الكيميائية، المعهد العالي للعلوم والتقنية الخمس، الخمس، ليبيا
^{2,3} قسم التقنيات الزراعية، المعهد العالي للعلوم والتقنية الخمس، الخمس، ليبيا
⁵ قسم الهندسة الكيميائية، كلية النفط والغاز، جامعة الزاوية، الزاوية، ليبيا

Comparative Study on the Effectiveness of Gravel-Sand Filter and Oxidation Tank in Treating Wastewater in Al-Khums City – Libya

Omar Hamed Jehawi^{1*}, Mohamed Hasan Alsqhair², Amhimd Omar Elarifi³, Ibrahim M. Haram⁴, Nadya Hussin AL Sbani⁵

^{1,4} Department of Chemical and Process Engineering, Higher Institute of Science and Technology, Al-khums, Libya.

^{2,3} Department of Agricultural Technologies, Higher Institute of Science and Technology, Al-khums, Libya.

⁵ Department of Chemical Engineering, Faculty of Oil and Gas Engineering, Al Zawiya University, Libya.

*Corresponding author

omerjehawi@yahoo.com

*المؤلف المراسل

تاريخ النشر: 2025-09-28

تاريخ القبول: 2025-09-20

تاريخ الاستلام: 2025-07-09

الملخص

تعد مياه الصرف الصحي غير المعالجة من أبرز مصادر التلوث البيئي في مدينة الخمس، حيث تُصرف مباشرة إلى الشاطئ مسببة تدهورًا في نوعية المياه البحرية وانتشار الميكروبات، والمستعمرات البكتيرية، والتعفن، إضافة إلى جذب بعض الحشرات الضارة مثل البعوض وغيرها. في هذه الدراسة، تم تصميم فلتر من الحصى والرمل واستخدام خزان الأكسدة كأنظمة حيوية لمعالجة مياه الصرف الصحي ومقارنة كفاءتهما. أظهرت النتائج أن متوسط درجة الحموضة (pH) بلغ 7.01 في نظام فلتر الحصى والرمل مقابل 8.04 في نظام خزان الأكسدة. أما العكارة فقد سُجلت بقيمة 3933 NTU في فلتر الحصى والرمل و 3826 NTU في خزان الأكسدة. كما بلغت الموصلية الكهربائية (EC) $6.64 \mu S/cm$ في فلتر الحصى والرمل و $6.02 \mu S/cm$ في خزان الأكسدة. وبالنسبة لكفاءة الإزالة (Removal Efficiency)، فقد حقق نظام فلتر الحصى والرمل نسبة 88.9% في إزالة BOD_5 مقابل 84.3% في خزان الأكسدة، بينما بلغت كفاءة إزالة $E. coli$ حوالي 85.1% في فلتر الحصى والرمل و 100% في خزان الأكسدة. تشير هذه النتائج إلى أن نظام فلتر الحصى والرمل يتميز بكفاءة أعلى في بعض المؤشرات مقارنة بخزان الأكسدة، غير أن فلتر الحصى والرمل أظهر فعالية كاملة في إزالة البكتيريا القولونية. وبناءً على ذلك، يتضح أن استمرار تصريف مياه الصرف الصحي غير المعالجة في شواطئ مدينة الخمس يُشكل تهديدًا مباشرًا للنظام البيئي البحري بما فيه الكائنات النباتية والحيوانية.

الكلمات المفتاحية: فلتر الحصى والرمل، معالجة مياه الصرف الصحي، خزان الأكسدة، وحدة المعالجة.

Abstract

Untreated wastewater is considered one of the main sources of environmental pollution in Al-Khums city, as it is discharged directly into the coastal area, causing deterioration in seawater quality, the proliferation of microbes and bacterial colonies, odor formation, and the attraction of harmful insects such as mosquitoes. In this study, a gravel and sand filter and an oxidation tank were designed as biological systems for wastewater treatment, and their efficiency was compared. The results showed that the average pH was 7.01 in the gravel and sand filter system compared to 8.04 in the oxidation

tank system. Turbidity was recorded at 3933 NTU in the gravel and sand filter and 3826 NTU in the oxidation tank. Electrical conductivity (EC) reached 6.64 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in the gravel and sand filter and 6.02 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in the oxidation tank. Regarding removal efficiency, the gravel and sand filter system achieved 88.9% BOD₅ removal compared to 84.3% in the oxidation tank, while E. coli removal efficiency was approximately 85.1% in the gravel and sand filter and 100% in the oxidation tank. These results indicate that the gravel and sand filter system perform better in certain indicators compared to the oxidation tank; however, it demonstrated complete effectiveness in removing coliform bacteria. Based on these findings, the continued discharge of untreated wastewater into the beaches of Al-Khoms poses a direct threat to the marine ecosystem, including both flora and fauna.

Keywords: Gravel-Sand Filter, Wastewater Treatment, Oxidation Tank, Treatment Unit.

المقدمة

تعدّ المياه أحد أهم الموارد الطبيعية التي يعتمد عليها الإنسان في حياته اليومية، فهي أساس الحياة ومصدر رئيسي للشرب، والزراعة، والصناعة، والطاقة، والتنمية الاقتصادية والاجتماعية. ومع تزايد الأنشطة البشرية والصناعية، أصبحت المياه عرضة للتلوث نتيجة دخول ملوثات عضوية وكيميائية وميكروبية إليها. ولا يقتصر أثر هذا التلوث على البيئة فحسب، بل يمتد ليشكل خطراً مباشراً على صحة الإنسان من خلال انتشار أمراض عدة مثل الإسهال، والتهاب الكبد، والأمراض التنفسية، إلى جانب تأثيره السلبي على الثروة الحيوانية والنباتية وما يسببه من اختلالات في النظم البيئية المائية. وتأتي معالجة مياه الصرف الصحي كخطوة أساسية لمواجهة هذه التحديات، إذ تهدف إلى إزالة الملوثات الضارة قبل تصريفها في البيئة أو إعادة استخدامها في مجالات متعددة. فهي تسهم في الوقاية من الأمراض، والحفاظ على الموارد المائية، وتقليل التلوث البيئي، ودعم التنمية المستدامة. كما تُعدّ من أهم الوسائل لحماية المجتمعات البشرية والأنظمة البيئية عبر الحد من تراكم الملوثات وتحسين نوعية المياه بشكل مستمر (kiliç et al.: 2020).

إن استمرار تصريف مياه الصرف الصحي غير المعالجة إلى شاطئ مدينة الخمس وضواحيها يُمثل تهديداً بيئياً وصحياً متزايداً، إذ يؤدي إلى تدهور الخصائص الجمالية للشاطئ، وانتقال الملوثات مباشرة إلى البيئة البحرية، مما يُحدث اختلالاً في التوازن الإيكولوجي للنظم الساحلية. كما يؤدي تراكم هذه الملوثات إلى خلق بيئة مناسبة لتكاثر الحشرات والكانائنات المسببة للأمراض، فضلاً عن انبعاث الروائح الكريهة وتغير الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه، بما في ذلك اللون والرائحة. كل ذلك يزيد من مخاطر إصابة رواد الشاطئ بالأمراض المعدية، خاصة الأطفال والعائلات والمنتزهين، إضافة إلى الصيادين الذين يمارسون نشاطهم قرب مصبات الصرف الصحي. وعلى الرغم من أن هذه الظاهرة لم تكن مقلقة في السابق بفضل قدرة المياه الساحلية على التنقية الذاتية مع محدودية كميات المياه العادمة المطروحة، إلا أن الوضع الراهن يشير إلى تفاقم التلوث نتيجة تزايد الكميات المصروفة مباشرة إلى البحر دون معالجة، مما أضعف قدرة النظام البحري على الاستيعاب والتنقية الطبيعية، وحول مياه الساحل في كثير من الأحيان إلى مصدر تهديد مباشر للبيئة البحرية وصحة الإنسان.

تتنوع طرق معالجة مياه الصرف الصحي بين المعالجة الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، حيث تُختار الطريقة المناسبة وفقاً لطبيعة الملوثات ومستوى التلوث والهدف من إعادة الاستخدام. فعلى سبيل المثال، تُستخدم المعالجة البيولوجية لإزالة الملوثات العضوية، بينما تُوظف العمليات الكيميائية لمعالجة المعادن الثقيلة والمواد السامة. ويسهم هذا التنوع في إيجاد توازن بين الاستخدام البشري للمياه والحفاظ على البيئة (Ismail et al.: 2017 ; Etsuyankpa et al.: 2024)، بما يعكس الأهمية البالغة لتطوير تقنيات المعالجة بما يتماشى مع المعايير الصحية والبيئية الحديثة. وعادةً ما تتكون مياه الصرف الصحي من نحو 99.9% ماء و0.1% مواد صلبة، إلا أن هذه النسبة الضئيلة من المواد الصلبة قد تحمل ملوثات بالغة التأثير في جودة المياه. وتحتوي مياه الصرف الصحي أيضاً على عناصر غذائية قد تؤدي إلى ظاهرة التخثث (Eutrophication) في المسطحات المائية، مسببة نمواً مفرطاً للطحالب واضطراباً في النظم البيئية (Sushil et al.: 2019). كما قد تحتوي على ملوثات ناتجة عن مستحضرات التجميل والعناية الشخصية والأدوية الصيدلانية، والتي تُحدث آثاراً بيئية وصحية طويلة المدى نظراً لدخولها المباشر إلى الأنهار والبحيرات، مسببة تلوثاً وانتشاراً للأمراض. ومن هنا تبرز الأهمية القصوى لمعالجة مياه الصرف الصحي في حماية صحة الإنسان والبيئة، والحد من التلوث المائي، وضمان الاستخدام الآمن للمياه في الزراعة والصناعة والاستهلاك المنزلي.

وفي هذا السياق، يأتي هذا البحث ليسلط الضوء على أساليب وتقنيات المعالجة المختلفة، وقيّم فعاليتها وجوداها البيئية والاقتصادية، إضافة إلى توضيح الدور الحيوي لهذه المعالجة في مواجهة تحديات التلوث المائي وضمان الاستخدام الأمثل للمياه المعالجة بما يعزز التنمية المستدامة ويرفع من جودة الحياة في المجتمعات البشرية.

خصائص مياه الصرف الصحي (Characteristics of Wastewater)

تعد الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية من أهم العوامل التي تحدد جودة مياه الصرف الصحي وتؤثر على كفاءة معالجتها (منى أحمد: 1997، ص11). ويمكن تصنيف هذه الخصائص على النحو التالي:

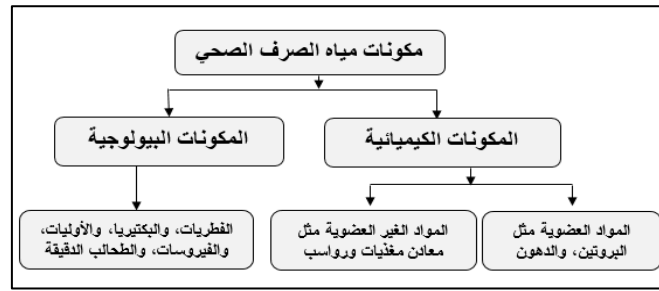
- **الخصائص الفيزيائية:** وتشمل العكارة، اللون، الرائحة، المواد الصلبة الكلية (TSS)، ودرجة الحرارة، حيث تُعطي هذه المؤشرات دلالة مباشرة على نوعية المياه ومظهرها الخارجي.

- **الخصائص الكيميائية:** وتشمل الرقم الهيدروجيني (pH)، تركيز الكلوريدات، مركبات النيتروجين والفوسفور، الطلب الكيميائي على الأكسجين (COD)، إجمالي الكربون العضوي (TOC)، إضافة إلى المعادن الثقيلة والعناصر النزرة والملوثات ذات الأولوية التي قد تشكل خطورة بيئية وصحية.
- **الخصائص البيولوجية:** وتشمل وجود الكائنات الحية الدقيقة، ومسببات الأمراض (Pathogens)، والمركبات العضوية القابلة للتحلل، إلى جانب العناصر الغذائية التي تُحفز نمو الكائنات الدقيقة، إضافة إلى الطلب الحيوي على الأكسجين (BOD₅)

مكونات مياه الصرف الصحي (Components of Wastewater)

تتكون مياه الصرف الصحي من خليط معقد من المياه المستعملة والمخلفات المختلفة كما في الشكل (1)، وتشمل المكونات التالية:

- **المكونات العضوية:** مثل البراز والبول، وبقايا الطعام، والمواد العضوية الأخرى الناتجة عن الأنشطة المنزلية والصناعية.
- **المكونات غير العضوية:** وتشمل الأملاح والمعادن الثقيلة والمواد الكيميائية المستعملة في التنظيف والصناعة والزراعة.
- **المواد الصلبة العالقة:** مثل الرمال والطين والمواد الدقيقة التي لا تتحلل بسهولة.
- **المركبات البيولوجية الدقيقة:** تشمل البكتيريا، والفيروسات، والفطريات، والطفيليات التي قد تسبب الأمراض.
- **المواد الكيميائية الاصطناعية:** مثل المستحضرات الصيدلانية، الهرمونات، الفثالات، المبيدات الحشرية ومبيدات الأعشاب، ومستحضرات التجميل ومنتجات التطهير.
- **العناصر الغذائية:** مثل النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم، التي يمكن أن تؤدي إلى ظاهرة التخثث في المسطحات المائية إذا لم تُعالج.



شكل (1): مكونات مياه الصرف الصحي

طرق معالجة مياه الصرف الصحي (Wastewater Treatment Methods)

تمر عملية معالجة مياه الصرف الصحي بالعديد من المراحل كالآتي:

المعالجة الأولية (المعالجة الفيزيائية)

تهدف المعالجة الأولية إلى إزالة الملوثات العضوية وغير العضوية الكبيرة، مثل بقايا الخضروات والفواكه، الكرتون، المنسوجات، وغيرها من المواد التي قد تعيق التشغيل أو تسبب تآكل المعدات الميكانيكية أو انسدادها (مادي: 2007). والمرحلة الأساسية للمعالجة الأولية تكون كالآتي:

• غرفة المدخل (التهذية):

وظيفة تقليل سرعة وضغط المياه وتحويل التدفق من أنابيب مغلقة إلى قنوات مفتوحة، مما يسمح بتعرض سطح المياه للهواء والضغط الجوي. تبقى المياه في الغرفة لفترة تتراوح بين 0.5 – 1 دقيقة وبسرعة 0.6 – 1.2 م/ث (مثنى عبد الرزاق: 2000، ص8).

• التصفية:

يتم حجز المواد الصلبة الكبيرة (مثل الورق، القماش، الخشب، وقطع المعادن) بواسطة مصافي معدنية يدوية أو أوتوماتيكية. ويتم التخلص من هذه المخلفات بالردم أو الحرق أو التجفيف. وتساعد الفتحات الصغيرة بين قضبان المصافي في منع مرور أي مواد صلبة قد تسبب أعطالاً بمعدات المعالجة (Mirmohammadi et al.: 2023).

• إزالة الصخور والرمال:

تتم هذه العملية في أحواض ترسيب أولية بسرعة بطيئة (30 سم/دقيقة) تسمح بترسيب الرمال والغبار والشظايا المعدنية مع بقاء غالبية المواد العضوية في الماء. تتجمع الرواسب فيما يعرف بالحماة الأولية. وأحياناً تُستخدم مواد كيميائية مثل أملاح الشب أو الحديد للمساعدة في الترسيب، رغم تكلفتها العالية. غالباً ما تُنقل الرمال والحصى إلى مكبات النفايات أو يُعاد استخدامها بعد جمعها عبر ناقلات خاصة (أغا محمد: 1988).

• إزالة الدهون والزيوت:

بعد مرحلة الترسيب، تبقى بعض المواد الطافية كالدهن والزيوت على سطح المياه، والتي يجب إزالتها لأنها تعيق فعالية المعالجة اللاحقة، حيث يُمنع دخول الزيوت المعدنية إلى شبكات الصرف لأنها قد تفسد العملية برمتها. وتُستخدم كاشطات سطحية لفصل الزيوت والدهون، وفي بعض المحطات تُستغل أحواض الرمال نفسها لإتمام هذه العملية (العابد إبراهيم: 2015، ص1; Ismail et al.: 2015 page 1111).

• الترسيب الأولي:

يتم ضخ المياه إلى خزانات كبيرة تسمى خزانات الترسيب الأولي، حيث تطفو الزيوت والشحوم إلى السطح ليتم كشطها، بينما تترسب المواد الثقيلة والصلبة في القاع. الهدف من هذه المرحلة إنتاج سائل متجانس يمكن معالجته بيولوجيًا لاحقًا، مع إزالة النفايات الصلبة لاستخدامها أو التخلص منها. وتعمل مكاشط آلية على جمع الرواسب من القاع ونقلها إلى مراحل المعالجة التالية (Al-Sbani et al.: 2015; Mirmohammadi et al.: 2023).

المعالجة الثانوية (المعالجة البيولوجية)

تأتي هذه المرحلة بعد استكمال المعالجة الأولية (الفيزيائية)، حيث يُعتمد فيها على النشاط الحيوي لمجموعات مختلفة من الكائنات الحية الدقيقة في تحليل وتفكيك المواد العضوية المتبقية في مياه الصرف الصحي. وتشمل هذه الكائنات البكتيريا والفطريات والطحالب وغيرها، إذ تُعد العنصر الرئيس في هذه العملية، خاصة في معالجة مياه الصرف الصحي المنزلية والزراعية (Al-Sbani et al.: 2016; Ismai et al.: 2020; فطيمة الشيباني: 2016).

ولكي تحقق هذه الكائنات كفاءة عالية في إزالة الملوثات، لا بد من توافر مجموعة من الظروف البيئية الملائمة، أهمها:

- درجة حرارة مناسبة تضمن استمرار نشاط الكائنات الدقيقة.
 - توافر العناصر الغذائية والأملاح المعدنية بكميات كافية لدعم النمو الميكروبي.
 - وجود نسبة مناسبة من الأكسجين المذاب لضمان عمليات التحلل الهوائي.
 - خلو الوسط من الملوثات السامة التي قد تُعيق أو تثبط نشاط الكائنات الحية.
 - وسط متعادل الحموضة (pH) يتراوح بين 6.5 - 8 لتهيئة بيئة مثالية للنشاط البيولوجي.
- وتختلف طرق المعالجة البيولوجية بحسب خصائص مياه الصرف وكثافة السكان والمناخ المحلي، ومن أبرز هذه الطرق ما يلي (فطيمة الشيباني: 2016):

أ- المعالجة بالتربة

تُعد المعالجة بالتربة من أبسط وأقل الطرق تكلفة، وتُستخدم على نطاق واسع في الدول النامية، خاصة في المناطق ذات المناخ الجاف أو شبه الجاف (عيدة مبر: 2011). وتعتمد هذه الطريقة على مجموعة من العمليات الطبيعية والبيولوجية، أهمها:

- الترشيح الطبيعي عبر طبقات التربة، حيث تُحتجز الكائنات الممرضة والمواد الصلبة العالقة والمواد العضوية.
 - امتصاص العناصر الغذائية مثل النترات والفوسفات والأمونيوم بواسطة النباتات النامية في منطقة المعالجة.
 - التحلل البيولوجي للمواد العضوية من خلال النشاط الميكروبي والكائنات الحية الدقيقة في التربة.
 - التبخر وإعادة المياه إلى الدورة الهيدرولوجية، مما يقلل من حجم المياه العادمة.
- ولضمان كفاءة هذه الطريقة، غالبًا ما تُسبق بمعالجة ميكانيكية أولية لإزالة المواد الصلبة كبيرة الحجم وبيض الطفيليات.

ب- أحواض الأكسدة

وهي برك سطحية يتراوح عمقها بين 50 إلى 150 سم، تعمل فيها أشعة الشمس وأكسجين الهواء على تنشيط البكتيريا الهوائية لتحليل المواد العضوية. وتعتمد كفاءتها على عدة عوامل مثل: مدة بقاء المياه، شدة الإشعاع الشمسي، سرعة الرياح، معدل التبخر، وكفاءة تصريف المياه (Selmi, Satin, & Bourrier: 1999). وتلعب الطحالب الخضراء دورًا مهمًا حيث تقوم بعملية التمثيل الضوئي منتجة الأكسجين اللازم للبكتيريا. إلا أن نموها المفرط قد يسبب زيادة الحمل العضوي عند موتها. لذا تُستخدم طرق إضافية مثل التهوية الميكانيكية للحفاظ على توازن الأكسجين (Conference, Rowe et al.: 1995; 2011).

ج- الفلاتر (المرشحات) الحيوية

وهي خزانات ذات جدران صلبة تُملأ بمواد مثل البلاستيك أو الصخور البركانية. بعد المعالجة الأولية، تُرش المياه عبر أنظمة لتوزيعها بالتساوي مع امتصاص الأكسجين، ثم تمر عبر وسط الفلتر حيث يحدث التحلل البيولوجي. وتمتاز بقلّة استهلاك الطاقة وانخفاض تكاليف البناء والصيانة وملاءمتها لمحطات المعالجة الصغيرة. عيوبها: الحاجة لمساحات واسعة وانبعثات الروائح الكريهة وضعف الكفاءة مع وجود الزيوت المعدنية وتأثرها بالبرودة الشديدة (Rowe et al.: 1995).

د- طريقة الحماة المنشطة

تُعتبر من أكثر الطرق شيوعًا وكفاءة. حيث تُخلط مياه الصرف بعد المعالجة الأولية مع "حماة منشطة" غنية بالكائنات الحية الدقيقة داخل أحواض التهوية، مع ضخ الأكسجين باستمرار. تتحلل المواد العضوية إلى مركبات مستقرة، ثم تُفصل الكتل الميكروبية في أحواض الترسيب، ويُعاد جزء من الحماة إلى الأحواض بينما يُزال الباقي (مادي: 2006 Rowe et al.: 1995; ومن مزاياها: كفاءة عالية تصل إلى (75-95%)، قلّة الروائح والحشرات، إمكانية استخدامها قرب

التجمعات السكانية، انخفاض الحاجة إلى المساحة الأرضية، وسهولة التشغيل. وعيوبها: استهلاك مرتفع للطاقة والحاجة إلى رقابة فنية دقيقة وحساسيتها تجاه النفايات الصناعية.

هـ الأقرص الحيوية الدوّارة (RBC)

وهي تقنية حديثة تمزج بين مبدأ الفلترة الحيوية والحماة المنشطة. تتكون من صفائح بلاستيكية دائرية مثبتة على محور وتدور ببطء داخل مياه الصرف. عند مرور المياه، يتكون غشاء حيوي من الكائنات الدقيقة على سطح الأقرص، مما يحقق عملية التحلل البيولوجي بكفاءة عالية (Hammer et al.: 1995; Rodrigues et al.: 2008)

المرحلة الثالثة (المعالجة الثالثة)

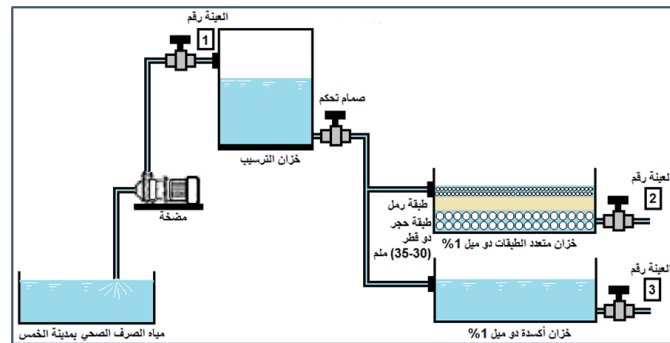
على الرغم من أن المرحلتين الأولى والثانية من معالجة مياه الصرف الصحي تزيلان نسبة كبيرة من الملوثات، إلا أن المياه قد تظل محتوية على بعض العناصر الضارة مثل النترات والأملاح الثقيلة والمركبات العضوية صعبة التحلل. لذلك، تُطبق في العديد من الدول مرحلة إضافية متقدمة تُعرف باسم المعالجة الثالثة، وتهدف بشكل أساسي إلى رفع جودة المياه وحماية المصادر المائية من الملوثات المتبقية. وتعتمد الطريقة المثلى لهذه المرحلة على نوع الملوثات المراد التخلص منها، ومن أبرزها الفوسفور والنيتروجين (الشاوي عماد: 1999; Lind et al.: 1979)

ومن بين أكثر الطرق شيوعاً في هذه المرحلة تقنية إزالة الفوسفور الحيوية المعززة (Enhanced Biological Phosphorus Removal). وتعتمد هذه التقنية على استخدام الخزانات اللاهوائية (التي تخلو من الأكسجين وأيونات النترات)، حيث تنشيط فئة خاصة من البكتيريا تُسمى الكائنات المتراكمة للفوسفات (PAOs)، والتي تتواجد بكثرة في الحماة الطينية. وتتميز هذه البكتيريا بقدرتها على تخزين كميات كبيرة من الفوسفور داخل خلاياها؛ إذ تحتوي عادةً على (1-2%) فوسفور في كتلتها الحيوية باعتباره عنصراً أساسياً في تركيب الأحماض النووية والدهون المكوّنة لأغشية الخلايا. وخلال العملية، تقوم هذه الكائنات بامتصاص الفوسفور بكميات متزايدة، حتى تصل نسبته في كتلتها الحيوية إلى (5-7%). وفي نهاية المعالجة، تُزال الحماة الحيوية المحملة بالفوسفور من النظام، مما يؤدي إلى خفض تركيز الفوسفور في المياه المعالجة والحد من مشكلة التخثث (Eutrophication) في المسطحات المائية.

المواد وطرق البحث (Materials and Methods)

تصميم وحدة المعالجة (فلتر الحصى والرمل)

نظراً لارتفاع تكاليف التشغيل والصيانة المرتبطة بأنظمة المعالجة المركزية لمياه الصرف الصحي، تم في هذه الدراسة اختيار تقنية الفلترة باستخدام الحصى والرمل كخيار بديل، لما تتميز به من بساطة وفعالية وصداقة للبيئة. وتعد هذه التقنية من طرق المعالجة الابتدائية لمياه الصرف، حيث تعمل على فصل المواد الصلبة عن السوائل وتثبيت الحماة داخل وحدة واحدة. وتعتمد هذه الطريقة على نفس آلية خزان التحليل التقليدي، لكنها مناسبة للتدفقات الأعلى من المياه العادمة، كما أنها قادرة على معالجة الأحمال العضوية العالية ومقاومة التغيرات المفاجئة في الحمل العضوي. إضافة إلى ذلك، تمتاز بانخفاض تكاليف تشغيلها وعدم حاجتها إلى معدات ميكانيكية معقدة أو عمالة فنية متخصصة (Ismail et al.: 2019). وهذا المخطط التخطيطي لوحدة المعالجة المستخدمة في هذا البحث (شكل 2)، والتي تتكون من جزأين رئيسيين:



الشكل (2): المخطط التخطيطي لوحدة المعالجة المستخدمة في هذا البحث

الجزء الأول: يتكون من خزان ترسيب أولي لمياه الصرف الصحي، يهدف إلى ترسيب المواد العالقة الكبيرة لتفادي انسداد فلتر الحصى والرمل، ويتصل هذا الخزان بخزان زجاجي يحتوي على فلتر حصى ورمل، بأبعاد 0.4 م طول × 0.2 م عرض × 0.5 م ارتفاع. يبلغ الارتفاع الكلي للفلتر داخل الخزان 0.4 م مع ميل قدره 1% لتمكين المياه من الانسياب بفعل الجاذبية دون الحاجة إلى مصادر طاقة إضافية [26-25]. وتم ترتيب طبقات الفلتر من أعلى إلى أسفل كالآتي: طبقة حصى بسمك 15 سم بحجم جسيمات (10-15 مم). طبقة رمل بسمك 10 سم بحجم جسيمات (3-5 مم). طبقة حصى بسمك 15 سم بحجم جسيمات (30-35 مم). والجزء الثاني: عبارة عن خزان ترسيب متصل بخزان زجاجي بنفس الأبعاد السابقة، لكنه لا يحتوي على فلتر الحصى والرمل، وذلك لاستخدامه كخزان مقارن لتقييم مدى فعالية الفلتر الحصى والرمل في تحسين جودة المياه المعالجة.

تحليل العينات (Sampling analysis)

في هذا البحث، تم أخذ العينات من مخرج تصريف مياه الصرف الصحي عند ساحل البحر لمدينة الخمس. حيث جُمعت العينات في حاويات معقمة بسعة (1 لتر)، وُضعت داخل أكياس بلاستيكية معقمة لمنع تلوثها. بعد ذلك، نُقلت العينات إلى حاوية عازلة للحرارة تحتوي على قطع من الثلج، وذلك بهدف الحفاظ على خصائصها لحين وصولها إلى المختبر لإجراء الاختبارات الميكروبيولوجية، وتم تسجيل جميع البيانات والمعلومات الخاصة بالعينات في النموذج المعد لهذا الغرض. وتحليل العينات كانت وفقاً للطرق القياسية المعتمدة لفحص المياه ومياه الصرف الصحي، باستخدام أجهزة HACH Spectrophotometer. وقد أُجريت التحاليل خلال الفترات الزمنية المحددة للتجارب (HRT) وهي: اليوم 0، اليوم 3، اليوم 7، واليوم 10، وذلك عند مدخل ومخرج كل وحدة معالجة. وشملت التحاليل المنفذة ما يلي: قياس درجة الحرارة وقياس الرقم الهيدروجيني (pH) وقياس الموصلية الكهربائية وتحديد تركيز بكتيريا *E. coli* وقياس العكارة (TDS) وقياس الطلب الحيوي على الأكسجين (BOD_5) والذي يُعد مؤشراً مهماً لمدى تلوث مياه الساحل بالمغذيات الناتجة عن مياه الصرف الصحي.

التحليل الإحصائي (Statistical Analysis)

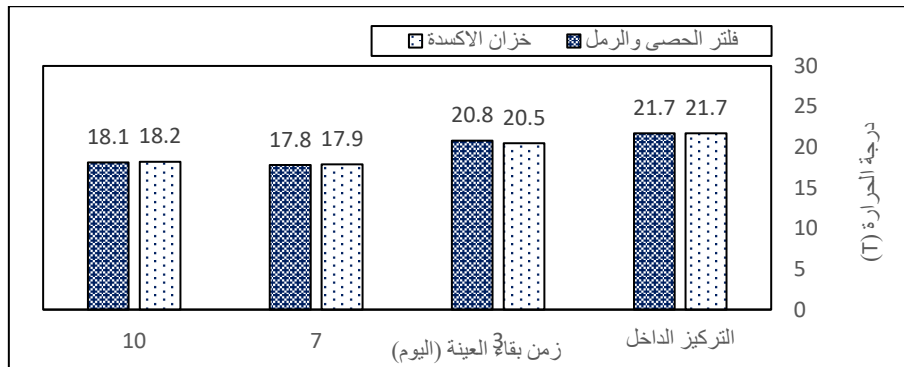
تم إجراء التحليل الإحصائي لأداء نظام فلتر الحصى والرمل وخزان الأكسدة من حيث إزالة المغذيات باستخدام برنامج SPSS الإصدار 21 عند مستوى ثقة 95%. تم تطبيق اختبار الفروق المعنوية للعينات المرتبطة (Paired t-test) لتقييم مدى دلالة الفروق في إزالة المغذيات بين فلتر الحصى والرمل وخزان الأكسدة (نظام المعالجة والنظام الضابط). وقد اعتُبر مستوى الدلالة $p < 0.05$ معياراً لتحديد الفروق الإحصائية ذات الدلالة المعنوية (Significant).

النتائج (Results)

إن مياه الصرف الصحي أحد أبرز مصادر التلوث في مدينة الخمس، حيث تقوم الشركة العامة للمياه والصرف الصحي عادةً بالتخلص من هذه المياه عبر تصريفها مباشرة إلى البحر دون أي معالجة تذكر، مما يزيد من مخاطر تكاثر الكائنات الحية الدقيقة والأحياء البحرية الضارة في المنطقة الساحلية. عليه، تم إجراء التحاليل الفيزيائية والكيميائية معملياً (بمركز الليبي المتقدم للتحاليل الكيميائية، فرع تاجوراء) لمياه الصرف الصحي الواردة والصادرة من أنابيب التفريغ بمدينة الخمس، تم جمع النتائج وتحليلها بهدف تقييم كفاءة تقنية وحدة معالجة المقترحة بالمدينة، ومن هذه النتائج:

درجة الحرارة (Temperature (T)

يُعدُّ قياس درجة الحرارة عاملاً جوهرياً للحكم على جودة المياه مُقارنةً بالعوامل الأخرى؛ وكما هو موضح بالشكل (3)، حيث تبين أن درجات الحرارة لمياه الصرف الصحي للملوثات الغير العضوية خلال فترة التشغيل تتراوح ما بين 21.7 °م الي 17.8 °م ومن 21.7 °م الي 17.9 °م لكلا النظامين (نظام فلتر الحصى والرمل ونظام خزان الأكسدة) على التوالي. وهذه القيم تتواجد ضمن المجال المسموح به للحد الأقصى للمياه الموجهة للري (أقل من 32 °م) وفق المعايير المحلية والدولية.

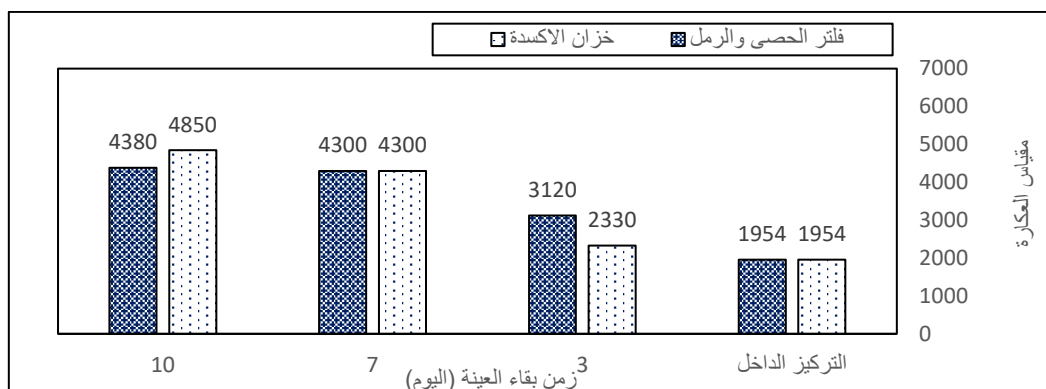


الشكل (3): يُوضح التغير في درجات الحرارة باختلاف زمن مكوث العينة.

وإحصائياً، تم إجراء اختبار الفروق المعنوية (Paired t-test) بين القيم المقاسة في النظامين، ولم تُظهر النتائج فروقاً معنوية ذات دلالة إحصائية (significant) ($p > 0.05$) عند جميع قيم HRT. وتشير هذه النتائج إلى أن التغير في درجة الحرارة مرتبط بزمن المكوث أكثر من ارتباطه بنوع النظام المستخدم، حيث إن كلا النظامين عملاً تحت ظروف حرارية متشابهة تقريباً.

الكشف عن العكارة (Turbidity)

تم قياس العكارة باستخدام جهاز النفلوميتر (Nephelometer) عند زاوية 90° من خلال تسجيل شدة الضوء المتشتت، حيث يتم التعبير عنها بوحدة NTU (Nephelometric Turbidity Unit)، وقد تم قياس العكارة لعينات مياه الصرف الصحي الخاصة بمدينة الخمس وفقاً للزمن المحدد لبقاء العينة (HRT)، وكانت النتائج كما هو موضح في الشكل (4).



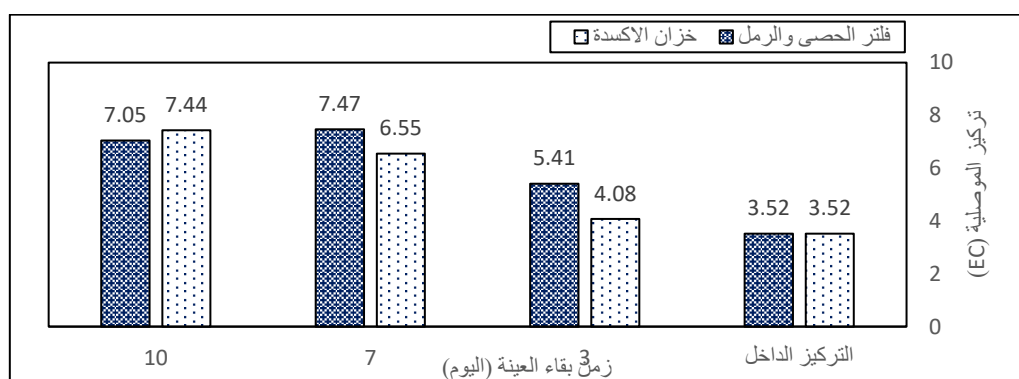
الشكل (4): يُوضح التغير في العكارة باختلاف زمن مكوث العينة.

ومن خلال الشكل (4) يُلاحظ أن قيم العكارة لمياه الصرف الصحي الناتجة عن الملوثات غير العضوية خلال فترة التشغيل قد ارتفعت من 1954 NTU إلى 4380 NTU في نظام فلتير الحصى والرمل، ومن 4850 NTU إلى 1954 NTU في نظام الأكسدة. أُجري اختبار الفروق المعنوية (Paired t-test) بين القيم المقاسة في النظامين، ولم تُظهر النتائج فروقاً معنوية ذات دلالة إحصائية ($p > 0.05$).

الموصلية الكهربائية (Electrical Conductivity (EC)

تُعد الموصلية الكهربائية للمساحات المائية مؤشراً مهماً على جودة المياه، إذ ترتبط ارتباطاً مباشراً بمستويات الملوحة (TDS: Total Dissolved Solids) التي تؤثر بدورها على محتوى الأكسجين المذاب. كما أن الظروف البيئية مثل درجة الحرارة والهطول المطري وزيادة الحمل العضوي والتلوث، تسهم في تغير قيم الموصلية سواء بالزيادة أو النقصان، الأمر الذي ينعكس بشكل مباشر على جودة المياه. يتم قياس الموصلية والملوحة وكذلك TDS من خلال تقدير الموصلية الكهربائية لمجموعة من الأيونات الذائبة في المياه. وعلى الرغم من أن هذه القياسات تتم بمعايير منفصلة، إلا أن نتائجها مترابطة وتشير مجتمعة إلى مستوى تلوث المياه.

وبحسب النتائج العملية، لوحظ ارتفاع واضح في قيمة الموصلية الكهربائية (EC) على شاطئ مدينة الخمس، ويُعزى ذلك إلى أن مياهها تكون محملة بكميات كبيرة من الأملاح، وهي المصدر الرئيسي للأيونات السالبة والموجبة (الشاوي عماد: 1999). وتزداد الموصلية بارتفاع تركيز الأملاح في الوسط المائي، كما أن لدرجة الحرارة دوراً مؤثراً، خصوصاً في البحيرات الطبيعية واسعة المساحة حيث يزداد معدل التبخر (Lind et al.: 1979).



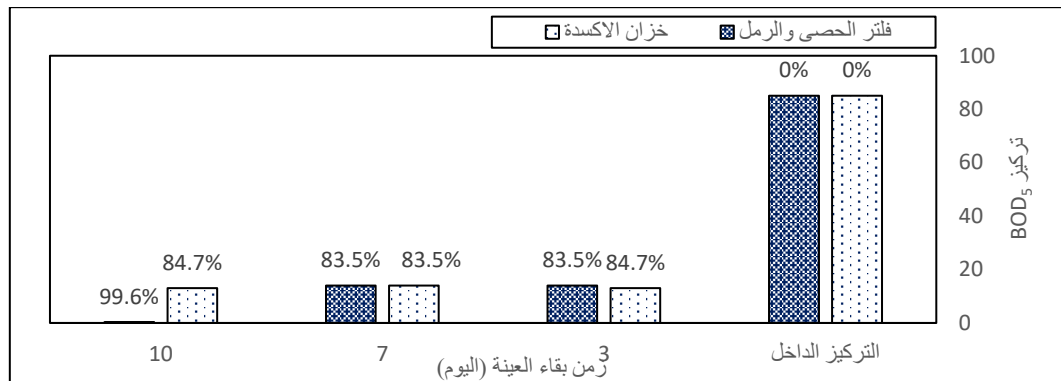
الشكل (5): يوضح الموصلية الكهربائية في وحدات المعالجة مع تغير في زمن بقاء العينة

تُظهر النتائج الموضحة في الشكل (5) أن قيم الموصلية الكهربائية المسجلة تتجاوز الحدود المسموح بها وفق المعايير الوطنية ومعايير منظمة الصحة العالمية (OMS) لسنة 1971. ويمكن تفسير هذا الارتفاع في قيم EC بكون المواد العضوية تتحول إلى مواد معدنية نتيجة عمليات التحلل البيولوجي، مما يسهم في زيادة تركيز الأملاح وبالتالي رفع الموصلية الكهربائية [9]. ومن الجدير بالذكر أن الموصلية الكهربائية تُعد انعكاساً لدرجة التمدن العامة للمياه، إذ توفر معلومات دقيقة عن نسبة الملوحة، وإحصائياً لا توجد فروقاً معنوية ذات دلالة إحصائية (significant) ($p > 0.05$) بين نظام فلتير الحصى والرمل وخزان الأكسدة في إزالة EC عند جميع قيم HRT.

الكشف عن مطلوبة الأكسجين البيوكيميائية

يمثل الطلب الحيوي للأكسجين (BOD_5) كمية الأكسجين المذاب في المياه المستهلكة خلال عملية التحلل التأكسدي الميكروبي للمواد العضوية خلال فترة حضانة مدتها 5 أيام عند درجة حرارة ثابتة (20°C) (Ismail et al.: 2019).

ويُستخدم قياس BOD_5 على نطاق واسع كمؤشر سريع على تركيز الملوثات العضوية في المياه الملوثة، وكذلك كمعيار لتقييم كفاءة عمليات المعالجة. ويتم تحديده لكل من المياه الداخلة والخارجة من وحدات المعالجة المستخدمة، ويُعبر عنه أيضًا كنسبة مئوية للمادة العضوية التي تمت إزالتها خلال فترة التشغيل (Jehawi et al.: 2019, 2016). وتظهر النتائج الموضحة في الشكل (6) متوسط تركيز BOD_5 ومعدل الإزالة في مياه الصرف الصحي ضمن أنظمة التشغيل المختلفة مع تغير زمن مكوث العينة (0 يوم، 3 أيام، 7 أيام، 10 أيام). كما يوضح الجدول المقارنة بين وحدات المعالجة المستخدمة في مدينة الخمس.

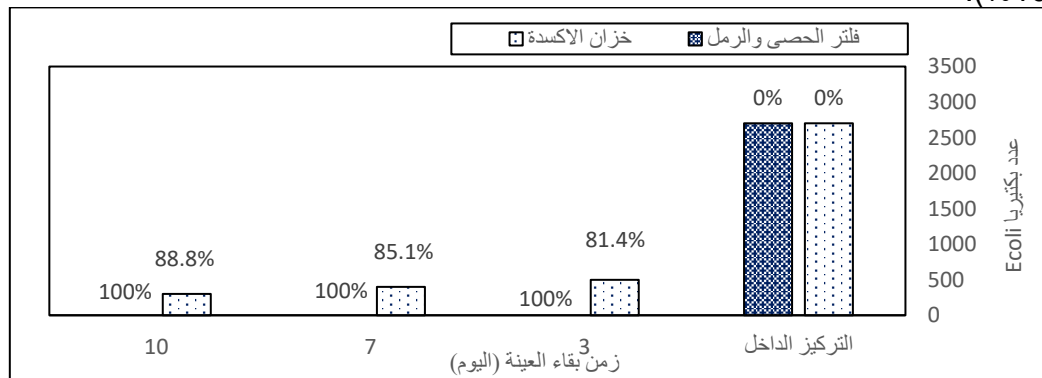


شكل (6): معدل إزالة BOD_5 مع التغير في زمن بقاء العينة

وكما هو موضح بالشكل (6)، انخفض التركيز اليومي لـ BOD_5 في مياه الصرف الصحي من 85 إلى 0.3 ملغم/لتر في نظام فلتر الحصى والرمل، ومن 85 إلى 13 ملغم/لتر في نظام خزان الأكسدة. وقد بلغ متوسط نسبة الإزالة 88.9% و 84.3% لكلا النظامين على التوالي. وكما أظهرت النتائج أن أعلى معدل إزالة تحقق في نظام فلتر الحصى والرمل حيث بلغ 99.6% عند زمن مكوث 10 أيام، بينما في نظام الأكسدة كان أعلى معدل إزالة 84.7% عند زمن مكوث 3 أيام خلال فترة الدراسة. ومن هنا يتضح أن نظام تعدد الطبقات (فلتر الحصى والرمل) كان أكثر كفاءة من نظام الأكسدة من حيث معدل الإزالة. وكذلك أظهرت النتائج أنه لا توجد فروقاً معنوية ذات دلالة إحصائية (significant) ($p > 0.05$) بين نظام فلتر الحصى والرمل وخزان الأكسدة في إزالة BOD_5 عند جميع قيم HRT.

الكشف عن بكتيريا E. coli

تشير النتائج الموضحة في الشكل (7) إلى أن مستوى الحد من التلوث ببكتيريا E. coli بلغ 85% من مجموع العينات في نظام خزان الأكسدة، بينما وصل إلى 100% في نظام فلتر الحصى والرمل. وقد سُجِّل أعلى معدل إزالة في نظام فلتر الحصى والرمل بنسبة 88.8%، في حين لم يُسجَل أي تواجد للبكتيريا في نظام خزان الأكسدة، أي بمعدل إزالة كامل (100%).



شكل (7): معدل إزالة E. coli مع التغير في زمن بقاء العينة

وكما هو موضح بالشكل (7)، توضح كفاءة أنظمة التشغيل (نظام فلتر الحصى والرمل ونظام الأكسدة) في معالجة مياه الصرف الصحي للملوثات غير العضوية خلال فترة التشغيل. حيث ساهمت في خفض عدد مستعمرات بكتيريا E. coli المسببة للأمراض من 2700 إلى 0 في نظام فلتر الحصى والرمل، ومن 2700 إلى 300 مستعمرة في الأكسدة عند زمن مكوث 10 أيام. وخلال فترة الدراسة أظهرت نتائج التحليل الإحصائي أن هناك فروقاً معنوية ذات دلالة إحصائية ($p < 0.05$) بين نظام فلتر الحصى والرمل وخزان الأكسدة من حيث كفاءة إزالة E. coli عند مختلف قيم زمن الاحتجاز الهيدروليكي (HRT)، وقد تبين أن فلتر الحصى والرمل تفوق بشكل واضح على نظام الأكسدة، حيث حقق إزالة شبه كاملة

للقولونيات البرازية في جميع الحالات، في حين أظهر نظام خزان الأكسدة انخفاضاً تدريجياً لكنه أقل كفاءة نسبياً. وبناءً على ذلك، يمكن القول إن فلتر الحصى والرمل يُمثل خياراً فعالاً وذا موثوقية عالية في إزالة الملوثات الميكروبية من مياه الصرف الصحي، بينما يُعد خزان الأكسدة خياراً أقل كفاءة ويحتاج إلى تطوير أو دمج مع تقنيات أخرى لتحقيق نتائج مماثلة.

الخاتمة

في هذه الدراسة تم التركيز على طرق المعالجة الفيزيائية لمياه الصرف الصحي المصروفة إلى شاطئ مدينة الخمس. وقد تبين أن كلاً من نظام فلتر الحصى والرمل ونظام خزان الأكسدة يُعدان فعالين كطرق معالجة ثانوية، حيث تمكنا من تقليل تركيز BOD_5 بكفاءة بلغت 99.6% في نظام فلتر الحصى والرمل، و84.7% في نظام خزان الأكسدة. كما ساهمت هذه الأنظمة في خفض بكتيريا *E. coli* بنسبة 88.8% في نظام خزان الأكسدة، و100% في نظام فلتر الحصى والرمل. إضافة إلى ذلك، تم قياس عدد من البارامترات الفيزيائية والكيميائية لمياه الصرف الصحي المصروفة إلى شاطئ البحر في مدينة الخمس. وأظهرت نتائج التحاليل أن بعض هذه البارامترات مثل درجة الحرارة (T)، ودرجة الحموضة (pH)، و BOD_5 ، و*E. coli* تقع ضمن الحدود المسموح بها وفق المعايير القياسية الدولية ومعايير منظمة الصحة العالمية (1971). في المقابل، بينت النتائج أن كلاً من العكارة (Turbidity) والموصلية الكهربائية (EC) تجاوزتا الحدود المسموح بها وفقاً لنفس المعايير. وعليه نستنتج أن تصريف مياه الصرف الصحي غير المعالجة على طول ساحل مدينة الخمس يُمثل مصدراً خطيراً للتلوث، ما قد يلحق أضراراً جسيمة بالكائنات البحرية النباتية والحيوانية، ويؤدي إلى انتشار الروائح الكريهة، خاصة في مواقع مصبات شبكة الصرف الصحي بالمدينة، وهو ما انعكس سلباً على النشاط السياحي البحري. وتوصي هذه الدراسة بضرورة الحد من هذا التلوث عبر إدخال تحسينات على أنظمة المعالجة، مع الاستفادة من بعض النباتات ذات القدرة الطبيعية على تنقية مياه الصرف الصحي، وزراعتها في مجاري الأودية التي تُصرف فيها هذه المخلفات بما يساهم في تقليل التلوث وحماية البيئة الساحلية لمدينة الخمس على المدى الطويل.

الشكر والتقدير

يتقدم المؤلفون بخالص الشكر والامتنان إلى المركز الليبي المتقدم للتحاليل الكيميائية التابع لوزارة البحث العلمي على دعمهم القيم لهذا البحث، وذلك من خلال توفير خدمات تحليل العينات مجاناً، مما أسهم بشكل فاعل في إنجاز هذا العمل البحثي.

قائمة المراجع:

- [1] Kılıç, Z. (2020). The importance of water and conscious use of water. International Journal of Hydrobiology, <https://doi.org/10.15406/ijh.2020.04.00250>.
- [2] Ismail, N.I., Abdullah, S.R.S., Idris, M., Abu Hasan, H., Halmi, M.I.E., AL Sbani, N.H., Jehawi, O.H., Sanusi, S.N.A., Hashim, M.H., 2017. Accumulation of Fe-Al by *Scirpus grossus* grown in synthetic bauxite mining wastewater and identification of its resistant rhizobacteria. Environ. Eng. Sci. 34(5), 367375.
- [3] Etsuyankpa, M. B., Augustine, A. U., Tanko, M. S., Mathew, J. T., Ismail, H., Salihu, A. M., & Mamman, A. (2024). An overview of wastewater characteristics, treatment and disposal: A review. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 28(5), 1553–1572. <https://doi.org/10.4314/jasem.v28i5.28>
- [4] Sushil, R. S., Garhwal, D., & Dinesh. (2019). Composition of sewage and non-sewage water of different district regions of Haryana, India. International J. of Current Microbio. and Applied Sciences, 8(9), 2771.2782.
- [5] منى أحمد قويدر، تأثير مياه الصرف الصحي بالبحر على حياة الأسماك، رسالة ماجستير غير منشورة قسم الجغرافيا، جامعة قاريونس 1997م ص 11.
- [6] مادي، ن. س؛ الشريف، ع؛ المرغني، ع. م؛ الزويكي، م. ا والشويهي، م. ا؛ القذافي، م. ح (2007). مستوى التلوث البكتيري الناجم عن تصريف مياه الصرف الصحي غير المعالجة إلى البحر بمدينتي مصراته والخمس مركز بحوث الأحياء البحرية تاجوراء.
- [7] د. مثنى عبد الرزاق العمر، التلوث في بلاد الرافدين ... المسببات والأخطار، متاحة على شبكة المعلومات الدولية الإنترنت. 2000م ص 8.
- [8] Mirmohammadi, A., Zarei, A., Ghasemi, F., et al. (2023). Human health risks due to exposure to water pollution: A review. Water, 15(14), 2532. <https://doi.org/10.3390/w15142532>
- [9] آغا محمد أحمد مراد. الهندسة البيئية. منشورات جامعة حلب كلية الهندسة المدنية: سوريا، 1988
- [10] العابد ابراهيم. معالجة مياه الصرف الصحي لمنطقة تقرت بواسطة نباتات منقية محلية رسالة دكتوراه. جامعة ورقلة، 2015. صفحة 152.1، 80.
- [11] Ismail, N. I., Sheikh Abdullah, S. R. S., Idris, M., Abu Hasan, H., Al Sbani, N. H., & Jehawi,

- O. H. (2015). Preliminary test of mining wastewater containing iron (III) and aluminium (III) on *Scirpus grossus* in phytoremediation process. *Applied Mechanics and Materials*, 773–774, 1111–1115.
- [12] Al-Sbani, N. H., Sheikh Abdullah, S. R. S., Idris, M., Hasan, H. A., Jehawi, O. H., & Ismail, N. I. (2015). Preliminary Test of Hydrocarbon Exposure on *Lepironia articulata* in Phytoremediation Process. *Applied Mechanics and Materials*, 773–774, 1121–1126. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.1121>
- [13] Al-Sbani, N. H., Sheikh Abdullah, S. R. S., Idris, M., Abu Hasan, H., Jehawi, O. H., & Ismail, N. I. (2016). Sub-surface flow system for PAHs removal in water using *Lepironia articulata* under greenhouse conditions. *Ecological Engineering*, 87, 1–8.
- [14] Ismail, N.I., Abdullah, S.R.S., Idris, M., Kurniawan, S.B., Halmi, M.I.E., Al Sbani, N.H., Jehawi, O.H., Hasan, H.A., 2020. Applying rhizobacteria consortium for the enhancement of *scirpus grossus* growth and phytoaccumulation of Fe and Al in pilot constructed. wetlands. *J. Environ. Ma.* 267(2020), 110643.
- [15] أ. فطيمة الشيباني مسعود، أ. حسن محمد خليفة سليمان. (2016). التلوث البيولوجي لمصادر مياه الشرب وعلاقته بانتشار بعض الأمراض في مدينة الزاوية. *مجلة كليات التربية، جامعة الزاوية، العدد الخامس*.
- [16] عيدة مئير وغمام نواس حمزة. دراسة مساهمة محطة معالجة مياه الصرف بالبحيرات المهوات في حماية البيئة - واد سوف. *جامعة العربي بالمهيدى: أم البواقي، 2011*.
- [17] SELMI Bachir.SATIN Marc,. *Guide technique de l'assainissement*. [éd.] 2ème édition. 1999. p. 680.
- [18] Conference, Anon (2011) Bonn 2011. The water, energy and food security nexus – solutions for a green economy. 16-18 /11/2011. p. 27.
- [19] Rowe D R, Abdel magid I H. *Handbook of wastewater reclamation and reuse*. Boca Raton lewis 1995.
- [20] مادي، ن. س: الشريف، ع؛ المرغني، ع. م؛ الزويكي، م. الشويهدى، م. بالخير، ص. ا (2006). تأثير تصريف مياه الصرف الصحي غير المعالجة على الخواص الميكروبيولوجية لمياه البحر؛ *المجلة الليبية العلوم البحار، العدد 41:11-61*.
- [21] Hammer, M. J., & Hammer, M. J. Jr. (1995). *Water and wastewater technology* (3rd ed.). nPrentice Hall.
- [22] Rodrigues, A.C., Boroski, M., Shimada, N.S., Garcia, J.C., Nozaki, J., Hioka, N. Treatment of paper pulp and paper mill wastewater by coagulation-flocculation followed by heterogeneous photocatalysis. *s.l.: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 194: 1-10, 2008.
- [23] الشاوي عماد جاسم محمود. تأثير التندفقات الحارة للمحيطات توليد الطاقة الحرارية على كثافة الأحياء المائية في محافظة البصرة. *رسالة ماجستير. جامعة البصرة/ كلية الزراعة، 1999*
- [24] Lind, O.T. *Hand Book of Common methods in Limnology*. s.l.: St. Louis, 1979. p. 199.
- [25] Ismail, N.I., Abdullah, S.R.S., Idris, M., Hasan, H.A., Halmi, M.I.E., AL Sbani, N.H., Jehawi, O.H., 2019. Simultaneous bioaccumulation and translocation of iron and aluminium from mining wastewater by *scirpus grossus*. *Desal. Water Treat* 163, 133 142.
- [26] Jehawi, O.M., Abdullah, S.R.S., Idris, M., Anuar, N., Abu Hasan, H., AL Sbani, N.H., Ismail, N.I., 2014. A reed bed system for the treatment of domestic wastewater and micropollutants. *Aust. J. Basic App. Sci.* 8 (19), 280–283.
- [27] Jehawi, O. H., Sheikh Abdullah, S.R.S., Abu Hasan, H., AISbani, N. H., Ismail, N.I., & Idris, M. (2019). Kinetic of nutrient removal in low-strength domestic wastewater under continuous operation of pilot scale hybrid reed bed system (SF-VF-HF). *ARPN Journal of Engineering, and Applied Sciences*.
- [28] Jehawi, O. H., Sheikh Abdullah, S. R., Idris, M., Hasan, H. A., Al-Sbani, N. H., & Ismail, N. I. (2015). Removal of Chemical Oxygen Demand (COD) from Domestic Wastewater Using Hybrid Reed Bed System. *Applied Mechanics and Materials*, 773–774, 1226–123.