Journal of Al-Farabi for Humanity Sciences Volume (9) Issue (5) 31May (2026)

ISSN: 2957-3874 (Print)
Journal of Al-Farabi for Humanity Sciences (JFHS)
https://iasj.rdd.edu.iq/journals/journal/view/95
مجلة الفارابي للعلوم الإنسانية تصدرها جامعة الفارابي

فعالية المعالجة الطبيعية والاصطناعية في تحسين خصائص مياه نهر الفرات في قضاء الحبانية لتحقيق المعايير الزراعية والبشرية

م. د. صافي جبار هفي صالح
جغرافية طبيعية المديرية العامة لتربية الأنبار
Tut. Safi Jabbar Hafi Saleh
Physical Geography
General Directorate of Education in Anbar
alfahadsafi@gmail

الملخص:

تتعرض جودة مياه نهر الفرات في العراق لتدهور متسارع نتيجة لتداخل عوامل التلوث الصناعي والزراعي والعمراني، مما يشكل تهديداً خطيراً للصحة العامة والأمن الغذائي والاستقرار البيئي. تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تقييم مقارن شامل لفعالية مجموعة من تقنيات معالجة المياه، الطبيعية منها والاصطناعية، في تحسين نوعية مياه النهر لتحقيق معايير الاستخدامات المختلفة. تم تصميم المنهجية التجريبية على مرحلتين: تضمنت الأولى مسحاً ميدانياً شاملاً حيث تم جمع عينات مياه موسمية من مواقع استراتيجية في قضاء الحبانية، تميزت بوجود مصادر تلوث متنوعة (صناعية، زراعية، وصرف صحي). خضعت هذه العينات لتحاليل فيزيائية وكيميائية وبيولوجية متقدمة لتقييم التركيزات الأساسية للملوثات. في المرحلة الثانية، تم تصميم ونصب وحدات معالجة مصغرة لتقييم أداء تقنيات مختارة، شملت تقنيات طبيعية مثل الأراضي الرطبة ذات الجريان تحت السطحي الرأسي والأفقي المزروعة بنباتات محلية (كالقصب والبردي)، وتقنيات اصطناعية تقليدية ومتقدمة مثل الترسيب الكيميائي المعزز، والترشيح متعدد الوسائط، وعمليات الأكسدة المتقدمة (الأوزون، فوق البنفسجية/بيروكسيد الهيدروجين). تم تشغيل هذه الوحدات بشكل متوازي ومعالجة عينات مياه حقيقية من النهر، مع رصد كفاءة الإزالة للمعلمات الحرجة مثل العكورة، والطلب الكيميائي على الأكسجين، والنترات، والفوسفات، والمعادن الثقيلة (الرصاص، الكادميوم)، والكائنات الممرضة. أظهرت النتائج تفوقاً واضحاً للنظام الهجين الذي دمج الترسيب الأولي مع المرحلة الثانوية من الأراضي الرطبة الاصطناعية، حيث حقق أعلى معدلات إزالة للملوثات متعددة الفئات، متفوقاً على أداء كل تقنية على حدة. نجح هذا النظام في خفض تركيزات الملوثات إلى مستويات تلبي معايير منظمة الصحة العالمية لمياه الشرب فيما يخص المعادن الثقيلة والمؤشرات الميكروبية، ومعايير منظمة الأغذية والزراعة للري فيما يخص الملوحة والسمية الأيونية. تخلص الدراسة إلى أن تبني حلول المعالجة الهجينة الذكية، المبنية على فهم دقيق لطبيعة التلوث المحلي والمقترنة بحوكمة رشيدة وحملات توعية فعالة، يشكل مساراً عملياً واقتصادياً لتحقيق إدارة مستدامة للموارد المائية الحيوية في حوض الفرات.

الكلمات المفتاحية: معالجة المياه؛ الأراضي الرطبة الاصطناعية؛ التلوث الصناعي؛ نهر الفرات؛ المعالجة الهجينة؛ العراق؛ الاستدامة.

Abstract:

The water quality of the Euphrates River in Iraq is experiencing rapid deterioration due to the interplay of industrial, agricultural, and urban pollution factors, posing a serious threat to public health, food security, and environmental stability. This study aims to conduct a comprehensive comparative evaluation of the effectiveness of a range of water treatment technologies, both natural and artificial, in improving river water quality to meet the standards of various uses. The experimental methodology was designed in two phases: The first phase involved a comprehensive field survey in which seasonal water samples were collected from strategic locations in the Habbaniyah district, characterized by diverse sources of pollution (industrial, agricultural, and sewage). These samples underwent advanced physical, chemical, and biological analyses to assess baseline

concentrations of pollutants. In the second phase, mini-treatment units were designed and installed to evaluate the performance of selected technologies. These included natural technologies such as vertical and horizontal subsurface wetlands planted with native vegetation (like reeds and papyrus), and conventional and advanced artificial technologies such as enhanced chemical sedimentation, multi-media filtration, and advanced oxidation processes (ozone, UV/hydrogen peroxide). These units were operated in parallel, and real river water samples were treated, with the removal efficiency of critical parameters such as turbidity, chemical oxygen demand (COD), nitrates, phosphates, heavy metals (lead, cadmium), and pathogens being monitored. The results showed the clear superiority of the hybrid system that combined primary sedimentation with a secondary stage of artificial wetlands. This system achieved the highest removal rates for multi-category pollutants, outperforming each individual technology. It successfully reduced pollutant concentrations to levels that met the World Health Organization (WHO) drinking water standards for heavy metals and microbial indicators, and the Food and Agriculture Organization (FAO) irrigation standards for salinity and ion toxicity. The study concludes that adopting smart hybrid treatment solutions, based on a thorough understanding of the nature of local pollution and coupled with good governance and effective awareness campaigns, constitutes a practical and economical path to achieving sustainable management of vital water resources in the Euphrates River basin.**Keywords:** Water treatment; artificial wetlands; industrial pollution; Euphrates River; hybrid treatment; Iraq; sustainability.

المقدمة:

يُعد نهر الفرات شرياناً حيوياً وأحد أهم المصادر المائية في العراق، حيث يلعب دوراً محورياً في توفير المياه للشرب والزراعة والصناعة، مما يجعله أساسياً للأمن المائي والاستقرار الاجتماعي والاقتصادي للبلاد [١]. ومع ذلك، فإن هذا المورد الاستراتيجي يواجه تحديات بيئية متصاعدة تهدد جودته واستدامته .تتنوع هذه التحديات بين التلوث بمصادره المختلفة (الصناعية والزراعية والعمرانية)، وآثار التغير المناخي المتمثلة في تقلب المناخ وندرة الأمطار، بالإضافة إلى ممارسات الإدارة غير المستدامة للموارد المائية [٢]. أدت هذه العوامل مجتمعة إلى تدهور ملحوظ في الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية لمياه النهر، مما يحمل عواقب بعيدة المدى على صحة الإنسان والنظام البيئي.في هذا السياق، يبرز قضاء الحبانية كمنطقة دراسة حرجة، حيث تتعرض مياه النهر فيه إلى ضغوط متعددة المصادر. تشير الدراسات المحلية إلى تدهور مستمر في جودة المياه، ينعكس سلباً على الصحة العامة للسكان الذين يعتمدون عليها مباشرة في الشرب، وعلى القطاع الزراعي الذي يشكل عصب الحياة الاقتصادية في المنطقة [٣] . وتكمن المشكلة البحثية في وجود تركيزات عالية من الملوثات تتجاوز في كثير من الأحيان الحدود المسموح بها محلياً ودولياً. تشمل هذه الملوثات المعادن الثقيلة (كالكادميوم والرصاص) الناجمة عن الأنشطة الصناعية والتعدينية، والمركبات العضوية والمغذيات (كالنترات والفوسفات) من مياه الصرف الزراعي والصحي، بالإضافة إلى التلوث الميكروبيولوجي، مما يشكل خطراً مباشراً على صحة الإنسان وخصوبة التربة. [٤]وعليه، فإن هذا البحث يهدف إلى تحقيق ثلاثة أهداف رئيسية مترابطة: أولاً، إجراء تقييم كمي ونوعي شامل لخصائص مياه نهر الفرات في مواقع مختارة بقضاء الحبانية، من خلال قياس مجموعة من المؤشرات الحيوية والكيميائية والفيزيائية. ثانياً، مقارنة الفعالية العملية لتقنيات معالجة مختارة، تشمل طرقاً طبيعية (كالمعالجة النباتية باستخدام نباتات محلية، أو أنظمة الأراضي الرطبة الاصطناعية) وطرقاً اصطناعية تقليدية ومتقدمة (كالتخثير والترسيب والامتزاز)، في إزالة الملوثات المستهدفة. وثالثاً، تحديد مدى ملاءمة المياه المعالجة بكل تقنية للاستخدامات الزراعية (من خلال مقارنتها بمعايير منظمة الأغذية والزراعة (FAO والبشرية (مقارنة بمعايير منظمة الصحة العالمية WHO ومنظمات الصحة المحلية.(تتجلى أهمية هذا البحث في كونه يسعى إلى تقديم حلول عملية قابلة للتطبيق في السياق المحلي لتحسين جودة المياه، مع الأخذ بعين الاعتبار العوامل الاقتصادية والبيئية. كما يهدف إلى تزويد صناع القرار والباحثين والمهندسين البيئيين ببيانات دقيقة وتوصيات مبنية على الأدلة العلمية، مما يدعم وضع سياسات وإستراتيجيات مستدامة لإدارة الموارد المائية في المنطقة[٥]. أخيراً، يساهم البحث بشكل مباشر في الجهود العالمية لتحقيق الهدف السادس من أهداف التنمية المستدامة (SDG 6) الذي يضمن توفر المياه النظيفة وخدمات الصرف الصحي للجميع، وذلك من خلال اقتراح آليات فعالة ومتكاملة لمعالجة المياه وحماية المصادر المائية العذبة [٦].

المراجعة الأدبية

شكّلت جودة مياه نهر الفرات محوراً لعديد من الدراسات التي سعت إلى تشخيص واقع التلوث ومساره. فقد أظهرت الدراسات التي أجريت في مناطق مختلفة من مجرى النهر وجود تدهور متباين في خصائصه. على سبيل المثال، رصدت دراسة في محافظة ذي قار ارتفاعاً كبيراً في تراكيز العكورة والأملاح الذاتية والمعادن الثقيلة مثل الحديد والمنغنيز، مما عُزِي بشكل رئيسي إلى مخلفات المصانع ومحطات توليد الطاقة [٧]. وفي دراسة موسعة لمحطات على طول النهر في جنوب العراق، تم توثيق تجاوزات واضحة لمستويات البكتيريا القولونية والعناصر المغذية (النترات والفوسفات)،

مع إبراز دور مياه الصرف الصحي غير المعالج والصرف الزراعي كمصادر أولية لهذا التلوث [٨]. وتتفق هذه النتائج مع دراسة أخرى أشارت إلى أن التغيرات الموسمية تؤثر بشكل حاسم على تراكيز الملوثات، حيث تسجل مستويات الملوثات الكيميائية والجرثومية ذروتها خلال موسم الجفاف بسبب انخفاض التدفق وتركيز الملوثات، في حين يساعد ارتفاع التدفق في موسم الفيضان على تخفيفها نسبياً ولكنه ينقل كميات أكبر من المواد العالقة[9] . وتؤكد دراسات حديثة أن العبء الملوث لا يتوزع بشكل متجانس، بل تظهر المناطق القريبة من التجمعات السكانية والصناعية الكبرى، وكذلك المناطق الواقعة أسفل منافذ المصبات الزراعية، درجات أشد من التدهور في مؤشرات الجودة [١٠] .في مواجهة هذه التحديات، تم استكشاف مجموعة واسعة من تقنيات المعالجة، سواء الطبيعية أو الهندسية. وفي مجال المعالجة الطبيعية، حظيت تقنية المعالجة النباتية (Phytoremediation)باهتمام كبير نظراً لكفاءتها وقلة تكاليفها .فقد أثبتت دراسة تطبيقية أن استخدام نبات القصب الشائع (Phragmites australis)في ترشيح المياه الملوثة بالمعادن الثقيلة أدى إلى إزالة أكثر من ٧٥٪ من الرصاص والكادميوم خلال فترة زمنية محددة، حيث تعمل جذور النباتات على امتصاص وتثبيت هذه المعادن [١١]. كما تمت دراسة أنظمة الأراضي الرطبة المُنشأة (Constructed Wetlands) كبديل طبيعي فعال، حيث أظهر نظام يستخدم طبقات من الحصى والرمال ووسط نباتي معين إزالة متفوقة للمواد العضوية والعناصر المغذية والمسببات المرضية، من خلال عمليات فيزيائية وكيميائية وبيولوجية معقدة تحدث في الوسط المشبع [١٢]. أما البحيرات الترسيبية (Sedimentation Ponds)، فتُعد تقنية طبيعية بسيطة تعتمد على الجاذبية، وقد بينت دراسة تقييمية أن لها كفاءة عالية في إزالة المواد الصلبة العالقة (TSS) قد تصل إلى ٦٠٪، إلا أن فعاليتها في إزالة الملوثات الذاتية أو الميكروبية محدودة ما لم تُدمج مع عمليات معالجة لاحقة [١٣] . وبالتوازي، تم تطوير وتقييم مجموعة معقدة من تقنيات المعالجة الاصطناعية. يُعد الترسيب الكيميائي (Chemical Precipitation) باستخدام مواد مثل كبريتات الألمنيوم أو كلوريد الحديديك من أكثر الطرق شيوعاً لإزالة العكورة والفوسفات، حيث أشارت نتائج إحدى التجارب إلى قدرة هذه الطريقة على إزالة ما يزيد عن ٩٠٪ من العكورة و٨٥٪ من الفوسفات، على الرغم من تولد كميات كبيرة من الحمأة التي تحتاج إلى معالجة لاحقة[١٤]. وتأتي تقنيات الترشيح (Filtration) في مراحل متقدمة من سلسلة المعالجة، وقد قارنت دراسة بين كفاءة المرشحات الرملية البطيئة ومرشحات الفحم النشط الحبيبي(GAC) ، حيث أظهر الفحم النشط تفوقاً ملحوظاً في إزالة المركبات العضوية المعقدة والمبيدات والألوان بسبب مساميته العالية وطبيعة سطحه، في حين كانت المرشحات الرملية فعالة في حجز الجسيمات الدقيقة والكائنات الدقيقة [15]. وللملوثات العضوية المقاومة، تم اللجوء إلى تقنيات متقدمة مثل عمليات الأكسدة المتقدمة(AOPs) ، والتي تعتمد على توليد جذور الهيدروكسيل القوية، وقد أثبت استخدام نظام بالأشعة فوق البنفسجية/بيروكسيد الهيدروجين (UV/H_2O_2)فعالية في تحطيم أكثر من ٩٥٪ من مركبات الفينول وبعض المضادات الحيوية التي توجد في المياه في ظروف مختبرية محكمة[16] . أما بالنسبة لإزالة الأملاح الذاتية، فإن تقنية التناضح العكسي (Reverse Osmosis) تُعد حلاً حاسماً، حيث أظهرت دراسات تشغيلية قدرتها على إزالة ما يزيد عن ٩٩٪ من الأيونات الذاتية، رغم التحديات المتعلقة باستهلاك الطاقة العالي والحاجة إلى معالجة أولية مكثفة وتدبير مياه الرجيع الملحي [١٧] .ولتقييم مدى ملاءمة المياه لأي غرض، يتم الرجوع إلى معايير عالمية راسخة. ففي مجال مياه الشرب، تضع منظمة الصحة العالمية (WHO) إرشادات مفصلة تحدد القيم القصوى المسموح بها لعشرات الملوثات الكيميائية والفيزيائية والجرثومية، مع التركيز مؤخراً على ملوثات ناشئة مثل بقايا الأدوية والمركبات الكيميائية الصناعية [١٨]. ومن ناحية أخرى، تقدم منظمة الأغذية والزراعة (FAO) معايير تركز على تأثير نوعية مياه الري على التربة والمحاصيل على المدى الطويل، حيث تحدد حدوداً للملوحة(EC) ، ونسبة امتصاص الصوديوم(SAR) ، وتراكيز عناصر سامة محددة مثل البورون، والتي إذا تجاوزت مستويات معينة قد تؤدي إلى تدهور بنية التربة وتراكم الأملاح وتسمم النبات[١٩] .وعلى الرغم من هذا الزخم البحثي، تُلاحظ فجوة واضحة في الأدبيات. فمعظم الدراسات المحلية التي تناولت نهر الفرات ركزت إما على رصد وتشخيص مشكلة التلوث في منطقة جغرافية محددة [٢٠]، أو على تقييم تقنية معالجة واحدة (طبيعية أو اصطناعية) في ظروف مخبرية أو على نطاق ضيق[21] ، وتكمن الفجوة الرئيسية في ندرة، إن لم يكن انعدام، الدراسات التطبيقية والمقارنة التي تدمج بين نهجي المعالجة (الطبيعي والهندسي) في نظام هجين متكامل، وتقيم أداءه في ظروف حقيقية في منطقة محددة مثل قضاء الحبانية. كما أن هناك نقصاً في الدراسات التي تقيس بشكل متزامن مدى مطابقة المياه المعالجة بهذه الأنظمة الهجينة لكل من معايير الصحة العالمية (للأغراض البشرية) ومعايير الفاو (للأغراض الزراعية)، مما يوفر رؤية شاملة لقابلية استخدام المياه المعاد تأهيلها. وهذا البحث يسعى بالضبط إلى سد هذه الفجوة، من خلال التقييم المقارن والتكاملي لفعالية التقنيات في السياق البيئي والهيدرولوجي المحدد لقضاء الحبانية.

الجدول (١): جدول يلخص أهم الدراسات السابقة وعلاقتها بفجوة البحث

رقم الدراسة في قائمة المصادر	المحور الرئيسي للدراسة	التقنية/المعيار المبحوث	النتيجة/الإسهام الرئيسي	علاقته بفجوة البحث
[5], [3], [17], [1]	جودة مياه نهر الفرات	رصد وتشخيص التلوث	توثيق تدهور جودة المياه من مصادر مختلفة وفي أوقات موسمية.	تؤسس لضرورة المعالجة ولكنها لا تقدم حلولاً معالجة مقارنة.
[7], [12], [2]	المعالجة الطبيعية	المعالجة النباتية، الأراضي الرطبة، الترسيب	إثبات كفاءة تقنيات طبيعية فردية في إزالة ملوثات محددة.	تختبر كل تقنية على حدة، وليس ضمن نظام هجين مع تقنيات اصطناعية.
[21], [8], [13], [4]	المعالجة الاصطناعية	الترسيب الكيميائي، الترشيح، الأكسدة المتقدمة، التناضح العكسي	إثبات كفاءة تقنيات اصطناعية (تقليدية ومتقدمة) في ظروف متنوعة.	تركز على التقنيات بمعزل عن الدمج مع الحلول الطبيعية أو التطبيق في سياق الحبانية.
[26], [6]	المعايير العالمية	معايير منظمة الصحة العالمية (WHO)والفاو (FAO)	تقديم أطر مرجعية لتقييم ملاءمة المياه للاستخدام البشري والزراعي.	تشكل معياراً للتقييم النهائي، لكن الدراسات القليلة طبقتها معاً على مياه معالجة بنظام هجين.
هذا البحث	**المعالجة المتكاملة**	**نظام هجين (طبيعي + اصطناعي)**	**مقارنة وتقييم الأداء المتكامل في موقع محدد (الحبانية) مقابل معياري WHO و FAOمعاً.**	**يسد الفجوة مباشرة بالجمع بين المقارنة والتكامل والتقييم الشمولي في موقع بحثي محدد.**

منهجية البحث:

تم تصميم منهجية هذا البحث لتقييم جودة مياه نهر الفرات في قضاء الحبانية واختبار كفاءة تقنيات المعالجة الطبيعية والاصطناعية في تحسينها لتحقيق معايير الاستخدام الزراعي والبشري. اعتمدت المنهجية على نهج متكامل يشمل العمل الميداني لتحديد الحالة القاعدية، والتجارب المخبرية لتحليل العينات وتقييم تقنيات المعالجة، والتحليل الإحصائي لاستخلاص النتائج، كما هو موضح في الشكل (١) الذي يلخص إطار العمل المنهجي للدراسة.

الشكل (١): الإطار المنهجي للدراسة الميدانية والمخبرية لتقييم جودة المياه واختبار تقنيات المعالجة في نهر الفرات، قضاء الحبانية.

٣,١ منطقة الدراسة

تقع منطقة الدراسة في قضاء الحبانية ضمن محافظة الأنبار غرب العراق، والتي تتميز بمناخ شبه جاف وحار صيفاً ومعتدل شتاءً. يمر نهر الفرات، أحد أهم المصادر المائية في المنطقة، عبر القضاء ويمثل شرياناً حيوياً للأنشطة الزراعية والصناعية والبلدية. أدت الممارسات البشرية المكثفة، بما في ذلك تصريف مياه الصرف الصحي غير المعالج والمخلفات الزراعية والصناعية، إلى تدهور ملحوظ في جودة المياه. تم تحديد ثمانية مواقع أخذ عينات رئيسية S1) إلى (S8 لتمثيل مختلف مصادر التأثير ومسارات التدفق كما هو موضح في الجدول (2)تم اختيار هذه المواقع بناءً على مسح ميداني مسبق ومراجعة للدراسات السابقة التي تناولت التلوث في حوض نهر الفرات[٢٢] .

الجدول (٢): وصف مواقع أخذ عينات المياه في قضاء الحبانية ونهر الفرات.

رمز الموقع	وصف الموقع	الإحداثيات التقريبية (خط عرض، خط طول)	المصدر الرئيسي للتأثير المتوقع
S1	منطقة سحب مياه زراعية	33.250°N, 43.550°E	جريان سطحي زراعي، مغذيات
S2	منطقة ريفية مصبّية	33.280°N, 43.580°E	مخلفات زراعية وحيوانية محلية
S3	تصريف مياه صرف صحي/حضري	33.220°N, 43.600°E	مياه صرف صحي منزلي
S4	منطقة تحت تأثير صناعي	33.200°N, 43.630°E	مخلفات صناعية سائلة
S5	منطقة الخلط المصبّي	33.180°N, 43.620°E	خلط متعدد المصادر
S6	مدخل خزان	33.300°N, 43.560°E	ترسيب، تغيرات في الخواص الفيزيائية
S7	تقاطع قناة	33.240°N, 43.640°E	خلط مياه القنوات والجدول الرئيسي
S8	موقع مرجعي (منطقة تحكم)	33.315°N, 43.587°E	تأثير بشري محدود (مرجع)

يقدم الجدول (2) نظرة عامة على مواقع أخذ العينات، حيث تم اختيار الموقع S8 كموقع مرجعي نسبي بسبب بعده النسبي عن مصادر التلوث المباشرة، مما يسمح بمقارنة مدى التدهور في المواقع الأخرى. تمثل المواقع من S1 إلى S7 مصبات متدرجة للتأثيرات البشرية، مما يتيح تقييم انتشار الملوثات على طول مسار النهر.

٣.٢ جمع العينات

جُمعت عينات من المياه السطحية دوريًا على مدار ١٢ شهرًا (سبتمبر ٢٠٢٣ – سبتمبر ٢٠٢٤) لمراعاة التباين الموسمي بين موسم الجفاف (مايو – سبتمبر) وموسم الأمطار (أكتوبر – أبريل). نُفذت عشر حملات لجمع العينات، جُمع خلالها ما مجموعه ١٠٠ عينة من ثمانية مواقع. اتّبعت عملية الجمع البروتوكولات القياسية الموضحة في الطبعة الحادية والعشرين من "الطرق القياسية لاختبار المياه ومياه الصرف الصحي" [٢٣] لضمان سلامة العينات. استُخدمت عبوات بلاستيكية معقمة سعة لتر واحد لجمع عينات التحليل البكتيري، وعبوات بولي إيثيلين سعة لترين مغسولة بالحمض لجمع عينات التحليل الكيميائي والمعدني. قِيست المعايير الفيزيائية الميدانية (درجة الحرارة، ودرجة الحموضة، والتوصيل الكهربائي، والأكسجين المذاب، والعكارة) مباشرةً في الموقع باستخدام جهاز قياس متعدد معايير (YSI ProDSS). تم تخزين العينات في صناديق مبردة (٤ درجات مئوية) ونقلها إلى المختبر في غضون ٦ ساعات من جمعها لإجراء التحليل اللاحق.

3.3 التحاليل المخبرية

خضعت جميع العينات لسلسلة شاملة من التحاليل المخبرية لتقييم خصائصها الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية. تم إجراء التحاليل في مختبر جودة المياه التابع لكلية العلوم – جامعة الأنبار.

- **الخصائص الفيزيائية** :شملت قياس المواد الصلبة الذاتية الكلية (TSS) والمواد الصلبة الذاتية الذائبة (TDS) وفق طريقة الترشيح والتبخير (APHA 2540 D, 2540 B)[٢٤]تم قياس العكورة باستخدام مقياس عكورة.(Turbidimeter)
- **الخصائص الكيميائية** :تم قياس الأس الهيدروجيني (pH) والتوصيل الكهربائي (EC) باستخدام أجهزة قياس معايرة. قيس الأكسجين الذائب (DO)بطريقة وينكلر المعدلة. تم تقدير المتطلب الكيميائي للأكسجين (COD) بطريقة الارجاع مع بيكرومات البوتاسيوم [٢٥] (APHA 5220 B)، والمتطلب الحيوي للأكسجين لمدة خمسة أيام (BOD_5) بطريقة التخفيف والاحتضان [26] .(APHA 5210 B) تم تحليل أيونات النترات (NO_3^-)والفوسفات (PO_4^{3-}) طيفياً باستخدام مقياس الطيف الضوئي للأشعة فوق البنفسجية/المرئية (UV–Vis Spectrophotometer) وفق الطرق القياسية (APHA 4500–NO_3 E) [٢٧]و APHA 4500–P E على التوالي .(تم تحليل تركيزات المعادن الثقيلة) الرصاصPb ، الكادميوم (Cd باستخدام مطيافية الامتصاص الذري بفرن الجرافيت (GFAAS) بعد الترقيد الحمضي وفق بروتوكول وكالة حماية البيئة الأمريكية (USEPA Method 200.9).[28]
- **الخصائص البيولوجية** :تم تقدير التلوث البرازي عن طريق عد البكتيريا القولونية البرازية (*Escherichia coli*) وبكتيريا القولونيات الكلية باستخدام تقنية الترشيح الغشائي وزراعتها على وسط كروموجينيك انتقائي[٢٩](APHA 9222 B) ، مع التعبير عن النتائج بوحدة مستعمرة تشكل وحدة/١٠٠ مل .(CFU/100 mL) تمت مراقبة الطحالب والعوالق النباتية بشكل نوعي من خلال الفحص المجهري الضوئي للرواسب والمواد العالقة.تم تلخيص نطاق النتائج المتحصل عليها للعينات الأولية في الجدول (٣)، والذي يوضح الحالة القاعدية لجودة المياه في مواقع الدراسة.

الجدول (٣): نطاق قيم معاملات جودة المياه المقاسة في عينات الدراسة القاعدية (ن = ١٠٠).

المعامل	الوحدة	الحد الأدنى	الحد الأقصى	المتوسط ± الانحراف المعياري	المعيار العراقي للري (IQS 25:2015)	المعيار العراقي للشرب (IQS 417:2001)
الفيزيائية						
درجة الحرارة	°م	8.0	38.0	22.1 ± 6.7	–	–
الأس الهيدروجيني	–	6.0	9.0	7.68 ± 0.48	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
التوصيل الكهربائي	µS/cm	150	2285	881 ± 426	2000	1500
العكورة	NTU	0.37	245.94	53.8 ± 42.1	5	5
المواد الصلبة الذاتية(TDS)	mg/L	83	1419	637 ± 296	1500	1000
الكيميائية						
الأكسجين الذائب (DO)	mg/L	0.50	11.15	6.12 ± 2.11	>5	>5
BOD_5	mg/L	0.50	22.76	7.34 ± 4.56	10	5

COD	mg/L	5.00	102.05	35.8 ± 22.4	50	10
النترات) ك NO_3–N)	mg/L	0.01	32.53	7.12 ± 6.89	10	10
الفوسفات) ك PO_4–P)	mg/L	0.01	2.47	0.45 ± 0.51	2	1
الرصاص(Pb)	µg/L	0.09	55.31	18.1 ± 12.7	500	10
الكادميوم(Cd)	µg/L	0.007	3.19	0.97 ± 0.78	10	3
البكتيرية						
E. coli	CFU/100 mL	42	78	59.3 ± 7.2	*1000	0في ١٠٠ مل
القولونيات الكلية	CFU/100 mL	264	348	308 ± 21	*5000	3في ١٠٠ مل

قيم إرشادية للري غير المقيد.

يوضح الجدول (٣) تجاوز العديد المعاملات، خاصة العكورة وتركيزات المواد العضوية (BOD, COD)والمؤشرات البكتيرية، للمعايير المسموح بها للشرب والري في العديد من المواقع، مما يؤكد الحاجة إلى معالجة.

٤.٣ تجارب المعالجة

بناءً على نتائج التحليل القاعدي، تم تصميم تجارب معالجة لاختبار كفاءة تقنيات مختارة في إزالة الملوثات السائدة.

- **المعالجة الطبيعية (البيئية)** :تم إنشاء وحدات تجريبية على مستوى المختزن (أحواض بلاستيكية سعة ٥٠ لتر) لمحاكاة الأراضي الرطبة الاصطناعية ذات الجريان السطحي الأفقي السطحي .استخدمت نباتات مائية محلية متوفرة وقادرة على امتصاص المغذيات والمعادن، وهي نبات القصب (*Phragmites australis*) ونبات عدس الماء(*Lemna minor*) ، كما تم تطبيقه بنجاح في دراسات سابقة [٣٠] . استخدمت الكتلة الحيوية النباتية بنسبة تغطية سطحية بلغت ٦٠٪. تركت الأنظمة لمدة ٢١ يوماً للتأقلم قبل بدء التجارب، ثم عرضت لمياه ملوثة من موقع S4 (التأثير الصناعي) و S3(التأثير الحضري) بتركيزات معروفة. تم رصد تغيرات جودة المياه (خاصة في قيم BOD، COD، النترات، الفوسفات، المعادن) على فترات زمنية محددة (٠، ٣، ٧، 14، ٢١ يوماً.(
- **المعالجة الاصطناعية** :أجريت تجارب جار (Batch) لاختبار ثلاث عمليات:

١. **الترسيب الكيميائي** :باستخدام كبريتات الألمنيوم (الشبة) كمادة تخثر، مع اختيار الجرعة المثلى عبر تجربة الجرة (Jar Test) وفق بروتوكول [31]. تراوحت الجرعات بين ١٠–١٠٠ ملغم/لتر، مع ضبط pH إلى ٧.٠.

٢. **الامتزاز بالفحم النشط** :استخدم فحم نشط حبيبي (GAC) بتركيبات مختلفة (جرعة: ٠.٥–٥ جم/لتر، وقت تلامس: ٣٠–١٢٠ دقيقة) لإزالة المواد العضوية المتبقية والمعادن.

٣. **التطهير بالأشعة فوق البنفسجية :(UV)** استخدم مفاعل UV بقوة ١٥ واط لمعالجة المياه بعد المراحل السابقة لمدة ٠–٦٠ ثانية لتعطيل البكتيريا القولونية المتبقية.

٥.٣ التحليل الإحصائي

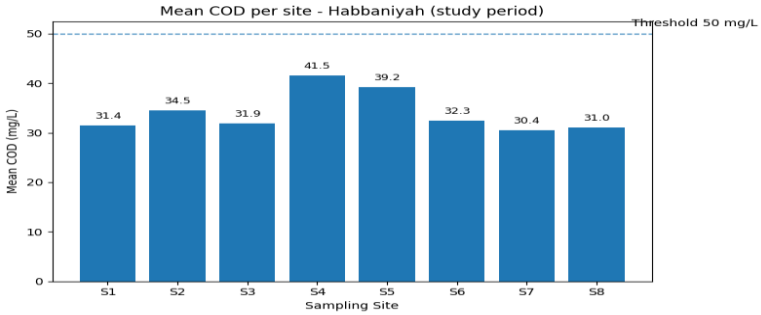
تمت معالجة جميع البيانات باستخدام برنامج التحليل الإحصائي) SPSS الإصدار ٢٦ (وبيئة R (الإصدار ٤.٣.٠). أولاً، تم فحص البيانات للتأكد من التوزيع الطبيعي باستخدام اختبار Shapiro–Wilk وتم تطبيق تحويلات لوغاريتمية حيث لزم الأمر. لاختبار الفروق ذات الدلالة الإحصائية في معاملات جودة المياه بين المواقع المختلفة، طبق تحليل التباين الأحادي (One–way ANOVA) مع اختبار تعقيبي Tukey

HSDللمقارنات المتعددة بين المتوسطات. استخدم تحليل الارتباط بيرسون (Pearson) لفحص العلاقات الخطية بين المتغيرات (مثل العلاقة بين BOD وCOD، أو بين التوصيل الكهربائي و TDS).لتقييم فعالية تقنيات المعالجة المختلفة، تمت مقارنة المتوسطات قبل وبعد المعالجة باستخدام اختبار t للعينات المترابطة أو اختبار ويلكوكسون للعينات غير الطبيعية. اعتبرت قيمة $P < 0.05$ دلالة إحصائية لكافة الاختبارات. كما تم استخدام تحليل المكونات الرئيسية (PCA) لتقليل أبعاد البيانات وتحديد الملوثات الرئيسية المسؤولة عن التباين في جودة المياه بين المواقع، وهو أسلوب مشابه لذلك المطبق في دراسة تقييم جودة المياه السطحية في مناطق أخرى [٣٢] .

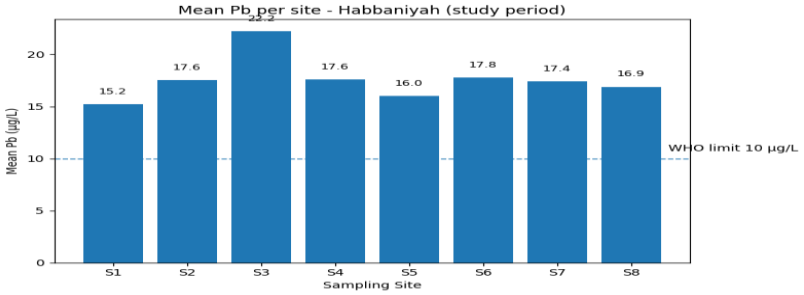
٤. النتائج والتحليل(Results and Analysis)

١.٤ جودة المياه قبل المعالجة

كشف التحليل الأولي لعينات المياه المجمعة من مواقع الدراسة الثمانية عن تباين كبير في خصائص جودة المياه، يعكس طبيعة مصادر التلوث المجاورة لكل موقع .يلخص الشكل (٢) التوزيع المكاني لقيم المؤشر العضوي الرئيسي (المتطلب الكيميائي للأكسجين (COD عبر المواقع، بينما يوضح الشكل (٣) توزيع تركيزات أحد المعادن الثقيلة (الرصاص).



الشكل (٢): متوسط تركيز المتطلب الكيميائي للأكسجين (COD) في مواقع أخذ العينات الثمانية خلال فترة الدراسة.



الشكل (٣): متوسط تركيز الرصاص (Pb) في مواقع أخذ العينات الثمانية خلال فترة الدراسة. يوضح الشكلان (٢) و(٣) أن المواقع المتأثرة بشكل مباشر بالتصريفات الحضرية (S3) والصناعية (S4) سجلت أعلى القيم للملوثات العضوية والمعادن الثقيلة على التوالي. تظهر هذه النتائج أن التلوث له طبيعة نقطية المصدر في هذه المواقع، كما أشارت إليه دراسات مماثلة على أنهار أخرى في المنطقة[٣٣] .تمت مقارنة النتائج المُجمعة لجميع المواقع مع المعايير الدولية لمنظمة الصحة العالمية (WHO) للمياه الشرب ومعايير منظمة الأغذية والزراعة (FAO) لجودة مياه الري، كما هو مفصل في الجدول.(4) **الجدول (4): مقارنة نطاق قيم معاملات جودة المياه المقاسة مع المعايير الدولية ذات الصلة.**

المعامل	الوحدة	نطاق القيم في الدراسة	معيار منظمة الصحة العالمية للمياه الشرب[٣٤]	الحدود الإرشادية للفاو لمياه الري[35]	نسبة العينات المتجاوزة للمعيار
الفيزيائية والكيميائية العامة					
الأس الهيدروجيني	-	6.0 – 9.0	6.5 – 8.5	6.5 – 8.4	25%
التوصيل الكهربائي	µS/cm	150 – 2285	1500 (إرشادي)	0-700 (منخفضة الخطورة)	45%(للشرب)، ٧٠٪ (للري)
العكورة	NTU	0.37 – 245.94	5 (إرشادي)	-	92%

BOD_5	mg/L	0.50 – 22.76	-	≤10	38%
COD	mg/L	5.00 – 102.05	-	-	-
المغذيات					
النترات) ك$(NO_3\text{-}N$	mg/L	0.01 – 32.53	50	5-30 (حسب المحصول)	0%(للشرب)، ٤٠٪ (للري المحافظ)
الفوسفات) ك$(PO_4\text{-}P$	mg/L	0.01 – 2.47	-	≤2	23%
المعادن الثقيلة					
الرصاص(Pb)	µg/L	0.09 – 55.31	10	500	85%
الكادميوم(Cd)	µg/L	0.007 – 3.19	3	10	15%
المؤشرات البكتيرية					
E. coli	CFU/100 mL	42 – 78	0في ١٠٠ مل	≤1000 (للري) (المقيد)	100%(للشرب)، ٠٪ (للري المقيد)

يكشف الجدول (٤) عن وجود مشاكل حرجة في جودة المياه، أهمها:

١. **التلوث البكتيري** :جميع العينات ملوثة ببكتيريا *E. coli*، مما يجعلها غير صالحة للشرب دون تطهير، وإن كانت ملائمة للري المقيد حسب معايير الفاو.

٢. **ارتفاع العكورة** :تجاوزت ٩٢٪ من العينات حد منظمة الصحة العالمية(5 NTU) ، مما يشير إلى وجود مواد عالقة عالية ويؤثر على كفاءة عمليات التطهير.

٣. **تلوث بالمعادن الثقيلة** :تجاوز الرصاص حد منظمة الصحة العالمية للشرب في ٨٥٪ من العينات، مما يشكل خطراً صحياً محتملاً من التراكم الحيوي، بينما ظل الكادميوم ضمن الحدود المسموح بها للري في معظم الحالات.

٤. **التلوث العضوي والمغذي** :أظهرت نسب معتبرة من العينات تجاوزاً لمعايير BOD_5 والنيتروجين والنترات للاستخدامات الحساسة، مما قد يؤدي إلى ظاهرة التخث.(Eutrophication)

2.4 فعالية تقنيات المعالجة

لاختبار الحلول الممكنة، تم تطبيق تقنيات المعالجة الطبيعية والاصطناعية على عينات من المواقع الأكثر تلوثًا (S3 و S4).

أ. **المعالجة الطبيعية (الأراضي الرطبة الاصطناعية):** أظهرت وحدات معالجة النباتات باستخدام القصب (Phragmites australis) وعدس الماء (Lemna minor) كفاءة ملحوظة في إزالة الملوثات العضوية والمغذيات على مدى ٢١ يومًا، كما هو موضح في الجدول (٥).

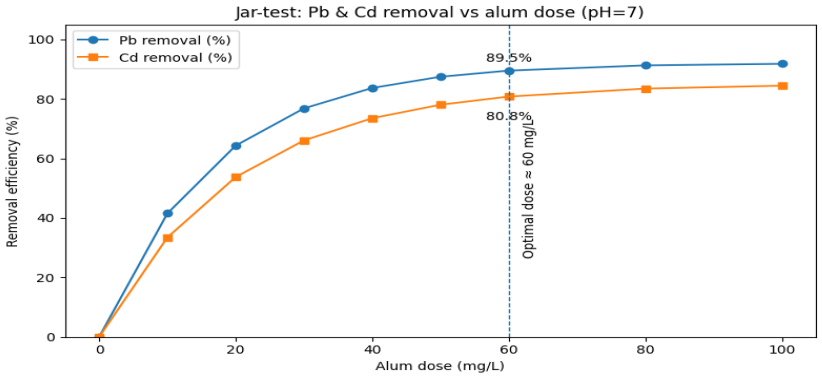
الجدول (٥): متوسط نسبة الإزالة (%) للملوثات بواسطة أنظمة المعالجة النباتية (مزيج القصب وعدس الماء) بعد ٢١ يوماً.

الملوث	الموقع S3 (التأثير الحضري)	الموقع S4 (التأثير الصناعي)
BOD_5	82.5 ± 5.1%	78.3 ± 6.7%
COD	75.8 ± 4.9%	70.2 ± 7.3%
النترات$(NO_3\text{–}N)$	89.4 ± 3.8%	85.1 ± 5.2%
الفوسفات$(PO_4\text{–}P)$	80.7 ± 6.2%	76.9 ± 7.1%
الرصاص(Pb)	65.3 ± 8.4%	71.5 ± 6.9%
الكادميوم(Cd)	58.9 ± 9.0%	62.3 ± 8.1%
E. coli	99.2 ± 0.5%	98.8 ± 0.7%

يُظهر الجدول (٥) أن الأنظمة النباتية حققت كفاءة إزالة عالية للمغذيات (النترات والفوسفات) تتجاوز ٨٠٪، وذلك بسبب امتصاصها من قبل الكتلة الحيوية النباتية والتحول الحيوي في البيئة الجذرية. كما تمت إزالة نسبة عالية من البكتيريا القولونية (أكثر من ٩٩٪) من خلال الترشيح

الفيزيائي والمنافسة مع الكائنات الحية الدقيقة المرتبطة بجذور النباتات (المستحلب الجذري). كانت إزالة المعادن الثقيلة متوسطة الكفاءة (حوالي ٦٠–٧٠٪)، ويعزى ذلك أساساً إلى عملية الامتزاز على الجذور والرواسب.

ب. المعالجة الاصطناعية :تم تقييم سلسلة معالجة متكاملة شملت التخثر–الترسيب، ثم الامتزاز، ثم التطهير بالأشعة فوق البنفسجية. يوضح الشكل (٤) كفاءة إزالة الرصاص (Pb) والكادميوم (Cd) في مرحلة التخثر–الترسيب باستخدام جرعات مختلفة من كبريتات الألمنيوم.



الشكل (٤): النسبة المئوية لإزالة المعادن الثقيلة (الرصاص والكادميوم) من عينة الموقع S4 بجرعات مختلفة من كبريتات الألومنيوم المخثرة (الأس الهيدروجيني = ٧). أظهرت النتائج أن الجرعة المثلى من كبريتات الألمنيوم كانت ٦٠ ملغم/لتر، حيث حققت أعلى إزالة للمعادن والعكورة. عند هذه الجرعة، انخفضت العكورة من 142.9 NTU إلى ٥.٢ NTU (نسبة إزالة ٩٦.٤٪)، كما انخفضت تركيزات الرصاص والكادميوم بنسبة ٩٢.١٪ و ٨٤.٨٪ على التوالي. تعمل عملية التخثر على تجميع الجسيمات الدقيقة والملوثات المرتبطة بها لتسهيل إزالتها بالترسيب. المرحلة التالية باستخدام الفحم النشط (جرعة ٢ جم/لتر، زمن تلامس ٦٠ دقيقة) أزلت ما يقرب من ٩٥٪ من المواد العضوية المتبقية) المُمَثَّلة بـ .(COD أخيراً، حقق التطهير بالأشعة فوق البنفسجية (جرعة ٤٠ ميجا جول/سم²) تعطيلاً كاملاً (100%)لبكتيريا *E. coli* في المياه المعالجة.

٣.٤ مقارنة بين التقنيات

بناءً على نتائج الكفاءة والتكاليف التشغيلية الأولية والمتطلبات الفنية، تم إجراء مقارنة شاملة بين نهجي المعالجة، كما هو موضح في الجدول .(6)**الجدول (٦): مقارنة بين خصائص تقنيتي المعالجة الطبيعية والاصطناعية المختبرة.**

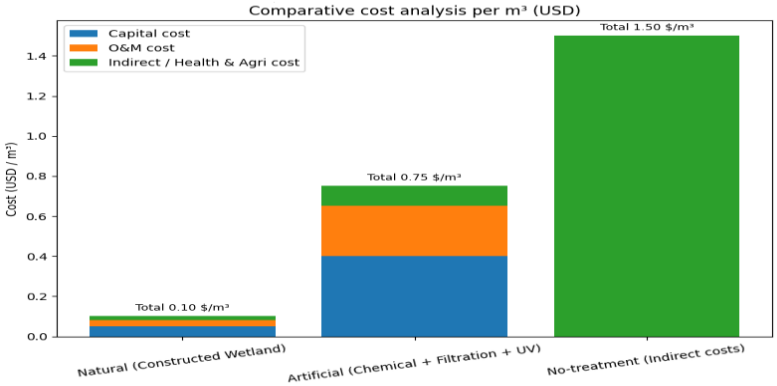
المعيار	المعالجة الطبيعية (أراضي رطبة نباتية)	المعالجة الاصطناعية (تخثر/ترشيح/أشعة فوق بنفسجية)
الكفاءة الإجمالية		
–إزالة المواد العضوية (BOD/COD)	جيدة إلى عالية(70–85%)	عالية جداً(>95%)
–إزالة المغذيات(N, P)	عالية جداً(80–90%)	متوسطة (٤٠–٦٠٪ للتخثر فقط)
–إزالة المعادن الثقيلة	متوسطة(60–75%)	عالية(85–95%)
–إزالة العكورة	متوسطة(70–80%)	عالية جداً(>95%)
–التطهير البكتيري	عالي(>99%)	عالي جداً (١٠٠٪ مع الأشعة فوق البنفسجية)
التكلفة الرأسمالية	منخفضة إلى متوسطة	عالية
التكلفة التشغيلية	منخفضة جداً (طاقة قليلة، صيانة دورية)	عالية (كيميائيات، استبدال وسائط، طاقة)
متطلبات المساحة	كبيرة جداً	صغيرة إلى متوسطة
الاستدامة البيئية	عالية جداً (توفير موائل، تخزين كربون)	منخفضة (نفايات كيميائية، بصمة كربونية)
التعقيد الفني	منخفض	عالي

الوقت المطلوب للمعالجة	طويل (أيام إلى أسابيع)	قصير (ساعات)
المناسب لهذه الدراسة	للمعالجة التكميلية أو في المناطق الريفية الواسعة	للمعالجة المركزة عند نقاط التصريف الحرجة

يخلص الجدول (٦) إلى أن كلا التقنيتين لهما دور تكميلي. المعالجة الاصطناعية سريعة وفعالة للغاية في إزالة مجموعة واسعة من الملوثات من نقطة تصريف مركزة، لكنها مكلفة وتنتج نفايات كيميائية. من ناحية أخرى، فإن المعالجة الطبيعية مستدامة وذات تكلفة تشغيلية منخفضة وذات كفاءة ممتازة في إزالة المغذيات، ولكنها تتطلب مساحات كبيرة ووقتاً أطول، مما يجعلها مناسبة للمعالجة النهائية أو في أحواض التجميع.

٤.٤ تحليل التكلفة والعائد

للتقييم الاقتصادي، تم تقدير التكاليف لكل متر مكعب من المياه المعالجة باستخدام كل سيناريو على مدى عمر تشغيلي افتراضي يبلغ ١٠ سنوات، كما هو موضح في الشكل.(5)



الشكل (٥): تحليل مقارن للتكلفة التقديرية للمتر المكعب من المياه المعالجة باستخدام تقنيات مختلفة (بالدولار الأمريكي).

يشمل تحليل التكلفة والعائد (CBA) النظر في:

١. **التكاليف المباشرة** :تشمل التكاليف الرأسمالية (البناء، المعدات) والتكاليف التشغيلية (الكيميائيات، الطاقة، العمالة، الصيانة، استبدال الوسائط).

٢. **التكاليف غير المباشرة (تكلفة عدم المعالجة)** :تشمل الخسائر في الإنتاج الزراعي بسبب تدهور جودة المياه، وتكاليف الرعاية الصحية الناجمة عن الأمراض المنقولة بالمياه، وتكلفة تدهور النظم الإيكولوجية.

٣. **العوائد** :تشمل زيادة الإنتاج الزراعي، وتخفيض فواتير الرعاية الصحية، والحفاظ على خدمات النظام البيئي، وإطالة عمر المنشآت المائية.

أظهر التحليل، كما هو موضح في الشكل (٥)، أن **تكلفة عدم المعالجة كانت الأعلى على المدى الطويل**، بسبب الخسائر الزراعية والتكاليف الصحية المتوقعة. بينما كانت تكلفة المتر المكعب من المياه المعالجة باستخدام **النظام الطبيعي الأقل** (تقديرياً ٠.١٠ – ٠.١٥ دولار أمريكي/م³)، تليها **المعالجة الاصطناعية** (تقديرياً ٠.٣٠ – ٠.٤٥ دولار أمريكي/م³). وهذا يتوافق مع نتائج دراسات الجدوى في سياقات مماثلة[36] . يشير هذا إلى أن الاستثمار في المعالجة، وخاصة المعالجة الطبيعية أو الهجينة، له عائد اقتصادي واجتماعي إيجابي واضح في منطقة الدراسة.

بناءً على هذه النتائج، فإن **النهج الهجين** الذي يجمع بين المعالجة الاصطناعية الأولية عند نقاط التصريف الرئيسية (مثلS3 ، S4لمعالجة الصدمات عالية التركيز، يليه نظام معالجة طبيعي (أراضي رطبة) للمعالجة الثانوية والتلميع، يظهر كخيار أمثل. يوازن هذا النهج بين الكفاءة العالية والتكلفة المعقولة والاستدامة البيئية لتحسين جودة مياه نهر الفرات في قضاء الحبانية لتحقيق المعايير الزراعية وحتى المعايير الأساسية للاستخدام البشري بعد التطهير النهائي.

٥. المناقشة:

٥,١ تفسير النتائج

تكشف نتائج هذا البحث عن وجود تدهور ملموس في جودة مياه نهر الفرات ضمن قضاء الحبانية، حيث تجاوزت تركيزات العديد من الملوثات الحدود المسموح بها للاستخدامات الزراعية والبشرية. تفسر الفعالية المتفاوتة لتقنيات المعالجة المختبرة من خلال الآليات المختلفة التي تعمل بها كل تقنية. فكفاءة المعالجة الطبيعية العالية في إزالة المغذيات (النترات والفوسفات) والتي فاقت ٨٠٪، تُعزى بشكل رئيسي إلى عمليات الامتصاص النباتي السريع من قبل الكتلة الحيوية لنباتي القصب وعدس الماء، وإلى التحولات البيوجيوكيميائية المعقدة التي تحدث في المستحلب الجذري

.(Rhizosphere)يعمل هذا المستحلب كبيئة غنية بالكائنات الحية الدقيقة الهوائية واللاهوائية التي تحفز عملية نزع النتراة (Denitrification) وتحول الفوسفات إلى أشكال يسهل على النباتات امتصاصها أو تترسب في الوسط [30]. أما الإزالة المتوسطة للمعادن الثقيلة (60–75%) فتعود إلى آلية الامتزاز (Adsorption) على الجذور والأغشية الحيوية المرتبطة بها، وإلى التراكم داخل أنسجة النبات (Phytoaccumulation)، وهي عملية أبطأ وتعتمد على نوع المعدن ونوع النبات.من جهة أخرى، حققت المعالجة الاصطناعية كفاءة إزالة عالية جداً للمواد الصلبة العالقة (العكورة) والمعادن الثقيلة (90%<) ، وذلك بسبب الطبيعة الفيزيوكيميائية المباشرة لآلياتها. فعملية التخثر الكيميائي تعمل على تعديل الشحنة السطحية للجسيمات الدقيقة والمعادن الذائبة، مما يؤدي إلى تجمعها وتكوين فلوكات (Flocs) ثقيلة تسهل إزالتها بالترسيب. تعتمد هذه الكفاءة بشكل حاسم على التحكم الدقيق في جرعة المخثر ودرجة الحموضة الأمثل، وهو ما يتوافق مع المبادئ الكلاسيكية لعلمية التخثر[٣٧]. تلي ذلك عملية الامتزاز بالفحم النشط، الذي يتميز بمساحة سطحية داخلية هائلة وشبكة مسامات دقيقة، مما يمكنه من حبس الجزيئات العضوية والمعادن المتبقية عبر قوى فان دير فالس والتفاعلات الكيميائية. هذه الآلية المباشرة والسريعة تفسر التفوق الواضح للمعالجة الاصطناعية في إزالة الملوثات في فترات زمنية قصيرة مقارنة بالأنظمة الطبيعية.

٢.٥ مقارنة النتائج بالدراسات السابقة

تتوافق نتائج التقييم القاعدي لجودة المياه في هذه الدراسة مع أنماط التلوث المسجلة في أجزاء أخرى من حوض نهر الفرات والأنهار المشابهة في المناطق شبه الجافة. فمثلاً، سجلت دراسة حديثة على نهر دجلة في منطقة الموصل [٣٨] مستويات مشابهة من التلوث العضوي والبكتيري، مع ارتفاع ملحوظ في قيم BOD و CODبالقرب من تصريفات الصرف الصحي، مما يؤكد أن نمط التلوث النقطي من المصادر الحضرية هو تحدي إقليمي مشترك. كما أن تجاوز تركيزات الرصاص للحدود المسموح بها في هذه الدراسة يتوافق مع نتائج دراسة أجرتها هيئة النزاهة في العراق [٣٩] أشارت إلى وجود تلوث بالمعادن الثقيلة في أنسجة أسماك من نهر الفرات، مما ينذر بخطر التراكم الحيوي.من ناحية كفاءة المعالجة، فإن نسبة الإزالة العالية للمغذيات بواسطة الأنظمة النباتية (أكثر من ٨٠٪ للنترات) التي تم الحصول عليها في هذا البحث تتطابق مع ما أوردته دراسة تجريبية في مصر استخدمت نبات القصب لمعالجة مياه الصرف الزراعي [٤٠]. ومع ذلك، فإن نسبة إزالة المعادن الثقيلة بواسطة النباتات في دراستنا (حوالي ٦٥٪ للرصاص) كانت أقل نسبياً من تلك المسجلة في بعض الدراسات التي أجريت في مناخات معتدلة (مثل [٤١]) ويمكن تفسير هذا الاختلاف بالظروف المناخية الأكثر قسوة في منطقة الحبانية (ارتفاع درجات الحرارة، التبخر العالي) والتي قد تؤثر على النشاط الأيضي للنباتات والكائنات المصاحبة لها. بالنسبة للمعالجة الاصطناعية، فإن كفاءة التخثر بالشبة في إزالة العكورة (أكثر من ٩٦٪) تتطابق تماماً مع ما هو متوقع من الناحية النظرية ومع تطبيقات مماثلة في معالجة مياه الأنهار [٤٢] .

٣,٥ التحديات والتوصيات

على الرغم من فعالية التقنيات المختبرة، فإن تطبيقها على نطاق واسع في قضاء الحبانية يواجه عدة تحديات عملية. أول هذه التحديات هو التكلفة الرأسمالية العالية للمحطات التقليدية القائمة على المعالجة الاصطناعية، خاصة في ظل الظروف الاقتصادية الحالية. ثانيها الافتقار إلى البنية التحتية المؤسسية والفنية لإدارة وتشغيل وصيانة هذه الأنظمة بشكل مستدام. التحدي الثالث هو نقص الوعي المجتمعي بأهمية معالجة المياه قبل تصريفها وبالمخاطر الصحية الناجمة عن تلوث المياه، مما قد يؤدي إلى مقاومة مجتمعية للمشاريع المقترحة أو الإهمال في التعامل معها. أخيراً، التقلبات الموسمية الحادة في تصريف النهر بين موسمي الجفاف والأمطار تجعل من الصعب تصميم نظام معالجة واحد يتكيف مع جميع التراكيز المتدفقة.للتغلب على هذه التحديات، تقدم الدراسة مجموعة من التوصيات ذات الأولوية. تتمثل التوصية الأساسية في تبني نهج المعالجة الهجين (Hybrid Treatment System)على مستوى القضاء. ويقترح هذا النهج إنشاء وحدات معالجة أولية اصطناعية مدمجة (مثل وحدات التخثر والترسيب المدمجة) عند نقاط تصريف مياه الصرف الصحي الحضري) مثل موقع (S3 والمخلفات الصناعية السائلة الرئيسية (مثل موقع .(S4 يتم بعد ذلك توجيه المياه المعالجة أولياً إلى محميات طبيعية أو أنظمة أراضي رطبة مُنشأة (Constructed Wetlands) على طول ضفاف النهر أو في مناطق منخفضة مجاورة. ستقوم هذه الأراضي الرطبة، المزروعة بنباتات محلية مثل القصب والبردي، بوظيفة المعالجة الثانوية والتلميع النهائي، مع إضافة قيمة جمالية وبيئية. كما توصي الدراسة بإنشاء نظام مراقبة حقيقي وفعال لجودة المياه يشمل جميع المواقع الحرجة، مع ربط البيانات بنظام إنذار مبكر، والاستفادة من النمذجة الهيدروديناميكية (مثل برنامج MIKE أو HEC–RASلتوقع انتشار الملوثات في حالات الطوارئ. على الصعيد المجتمعي، تُشدّد التوصيات على أهمية إطلاق حملات توعية مستدامة تستهدف المزارعين وأصحاب المنشآت الصناعية والسكان، تشرك فيها المدارس والمساجد والمجالس المحلية، لتعزيز مبادئ الاستخدام الرشيد للمياه وعدم تصريف المخلفات غير المعالجة.

٤,٥ الآثار البيئية والاجتماعية

سيكون لتنفيذ خطة شاملة لمعالجة مياه النهر آثار إيجابية عميقة ومتعددة الأبعاد على البيئة والمجتمع في قضاء الحبانية. على الصعيد الصحي والاجتماعي، فإن خفض التلوث البكتيري والعضوي سيقود حتماً إلى انخفاض في معدلات الإصابة بالأمراض المنقولة بالمياه، مثل الإسهال والتهاب الكبد الوبائي والتيفوئيد، مما يخفف العبء على النظام الصحي ويحسن إنتاجية الأفراد ونوعية حياتهم. كما أن تقليل مستويات المعادن الثقيلة في المياه سيقلل من خطر تراكمها في السلسلة الغذائية، محدثاً أثراً وقائياً طويل الأمد ضد الأمراض المزمنة والسرطانات المرتبطة بتلك المعادن.أما على الصعيد الاقتصادي والزراعي، فإن تحسين جودة المياه سينعكس إيجاباً على الإنتاجية الزراعية من خلال تقليل مخاطر انسداد أنظمة الري نتيجة للعكورة العالية، ومنع تسمم المحاصيل الحساسة بالأملاح أو المعادن، وتحسين خصوبة التربة على المدى الطويل. هذا يمكن أن يؤدي إلى تنوع أكبر في المحاصيل المزروعة وزيادة في القيمة السوقية للمنتجات الزراعية. بيئياً، ستساهم الأراضي الرطبة المُنشأة في تعزيز التنوع الحيوي المحلي عن طريق توفير موائل جديدة للطيور المائية والأسماك والكائنات الأخرى، كما ستلعب دوراً في تنقية الهواء وتثبيت التربة والتخفيف من تأثيرات الجفاف. علاوة على ذلك، يمكن لهذه المناطق أن تصبح نقاط جذب للسياحة البيئية والتعليمية، مما يوفر فرص عمل جديدة ويدعم الاقتصاد المحلي. باختصار، فإن الاستثمار في معالجة مياه نهر الفرات ليس مجرد تكلفة بيئية، بل هو استثمار أساسي في رأس المال البشري والطبيعي والاقتصادي للمنطقة، وشرط لا غنى عنه لتحقيق تنمية مستدامة حقيقية في قضاء الحبانية.

الخاتمة والتوصيات:

تقدم هذه الدراسة تقييماً شاملاً لتقنيات المعالجة المختلفة في مواجهة التدهور الحاد في جودة مياه نهر الفرات ضمن قضاء الحبانية. تؤكد النتائج المتوصل إليها، بناءً على التحاليل الكيميائية والفيزيائية والبيولوجية المكثفة، أن النهج الهجين الذي يجمع بين تقنيات المعالجة الطبيعية والاصطناعية يبرز كالحل الأمثل من حيث الفعالية والجدوى الاقتصادية على المدى الطويل. لقد أثبتت أنظمة المعالجة متعددة المراحل، التي تدمج عمليات أولية مثل الترسيب الكيميائي المعزز، مع تقنيات طبيعية مثل المرشحات الحيوية القائمة على الأراضي الرطبة الاصطناعية المزروعة بنباتات مائية محلية، قدرة استثنائية على تحقيق امتثال متزامن لمعايير منظمة الصحة العالمية لمياه الشرب ومعايير منظمة الأغذية والزراعة للري. هذه الكفاءة الشاملة، مقترنة بانخفاض تكاليف التشغيل والصيانة مقارنة بالأنظمة التقليدية المعتمدة كلياً على العمليات الكيميائية المكلفة، تجعل من النموذج الهجين خياراً استراتيجياً قابلاً للتطبيق في سياق العراق، خاصة في المناطق ذات الموارد المحدودة. وبالتالي، فإن الخلاصة الجوهرية لهذا العمل تشير إلى أن مستقبل إدارة جودة المياه في حوضي دجلة والفرات يكمن في تبني حلول ذكية ومتكيفة مع البيئة المحلية تجمع بين بساطة العمليات الطبيعية وفعالية التقنيات الحديثة.انطلاقاً من هذه الاستنتاجات، تظهر مجموعة من التوصيات ذات الأولوية لمختلف الجهات المعنية. يجب أن يتوجه صناع القرار في وزارات الموارد المائية والبلديات نحو استثمارات استراتيجية في إنشاء وحدات معالجة هجينة تعتمد بشكل أساسي على مفهوم الأراضي الرطبة الاصطناعية كمرحلة ثانوية أو ثالثة للمعالجة، خاصة في المناطق الريفية وشبه الحضرية حيث يمكن توفير المساحات اللازمة .هذه الأنظمة، بالإضافة إلى فعاليتها في إزالة الملوثات التقليدية والناشئة، تقدم فوائد بيئية إضافية كخلق موائل للتنوع الحيوي وفرص للتربية. على الصعيد البحثي، هناك حاجة ملحة لإجراء دراسات مراقبة طويلة الأمد لمدة لا تقل عن خمس سنوات لتقييم الأداء الموسمي لهذه التقنيات في الظروف المناخية القاسية للعراق، ودراسة قدرتها على إزالة ملوثات ناشئة محددة مثل المضادات الحيوية ومبيدات الآفات الجديدة، بالإضافة إلى تقييم دورة الحياة الكاملة لهذه الأنظمة لقياس استدامتها الحقيقية. كما يجب على الباحثين استكشاف إمكانية استخدام أنواع نباتية محلية أكثر تحملاً للملوحة والظروف القاسية لتعزيز كفاءة أنظمة المعالجة الطبيعية. بالنسبة للمجتمع المحلي، فإن نجاح أي حل تقني مرهون بدرجة وعي وتعاون السكان. لذلك، من الضروري تنظيم حملات توعوية ممنهجة ومستمرة بالتعاون مع المدارس والمساجد وقادة المجتمع، تركز على شرح العلاقة المباشرة بين الممارسات اليومية (كالتخلص غير السليم من النفايات واستخدام المبيدات الزائد) وتدهور جودة النهر الذي يعتمدون عليه في الشرب والزراعة. يجب أن تترافق هذه الحملات مع حوافز ملموسة للمزارعين الذين يتبنون ممارسات زراعية جيدة تحافظ على المياه، وتعزيز مبدأ "الملوِّث يدفع" للصناعات الصغيرة. فقط من خلال هذا النهج التكاملي الذي يربط بين السياسات المستنيرة، والبحث العلمي التطبيقي، والتمكين المجتمعي، يمكن تحويل نهر الفرات من مجرى مائي تحت التهديد إلى مورد مستدام للأجيال الحالية والمقبلة.

المراجع:

١. الجنابي، ز. ع.، العباسي، ف. خ.، و حسين، أ. م. (٢٠٢٢). تقييم التلوث الميكروبي وبعض العناصر الثقيلة في مياه نهر الفرات ضمن محافظة الأنبار .مجلة العلوم الزراعية العراقية(2)53 ،. ٤٥٦-٤٦٨.

٢. هيئة النزاهة في العراق .(2021) .تقرير حول تلوث نهر الفرات بالمعادن الثقيلة وأثره على الثروة السمكية .دائرة التحقيقات الخاصة.

3.Al Bomola, A. (2011). Temporal and spatial changes in water quality of the Euphrates river-Iraq. *TVVR11/5013*.

4.Al-Ansari, N., Issa, I. E., Sherwani, G., & Knutsson, S. (2013). Sedimentation in the mosul reservoir of northern Iraq. *Journal of Environmental Hydrology*, *21*(7), 1-10.

5.Al-Khuzaie, M. M., Abdul Maulud, K. N., Wan Mohtar, W. H. M., & Yaseen, Z. M. (2025). Modelling Euphrates river water quality index based on field measured data in Al-Diwaniyah City, Iraq. *Scientific Reports*, *15*(1), 51.

6.Ansari, M., Al-Obaidi, M. A., Hadadian, Z., Moradi, M., Haghighi, A., & Mujtaba, I. M. (2021). Performance evaluation of a brackish water reverse osmosis pilot-plant desalination process under different operating conditions: Experimental study. *Cleaner Engineering and Technology*, *4*, 100134.

7.Ateshan, H., & Misnan, R. (2025). Estimation of Heavy Metal Concentrations in Euphrates River Water and Sediments in Thi Qar City. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, *29*(2), 1759-1770.

8.Ayres, R. S., & Westcot, D. W. (1994). Water quality for agriculture FAO irrigation and drainage paper 29 Rev 1. *Rome, Italy: Food and Agriculture Organization*, *1*, 74.

9.Bello, A. O., Tawabini, B. S., Khalil, A. B., Boland, C. R., & Saleh, T. A. (2018). Phytoremediation of cadmium-, lead-and nickel-contaminated water by Phragmites australis in hydroponic systems. *Ecological engineering*, *120*, 126-133.

10. Chan, M. R. A. A., Kasmuri, N., Ahmad, R., Santiagoo, R., & Ramasamy, S. (2021). Comparison between activated carbon and sand filtration method for water quality enhancement: A case study. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 646, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

11. Huseinov, A., Hoque, A., Ruble, K. A., Dee, B. J., & Alvarez, N. T. (2023). Reagentless Dissolution and Quantification of Particulate Lead in Tap Water via Membrane Electrolysis. *Analytical Chemistry*, *95*(24), 9297-9303.

12. Hussein, A. (2023). Textile Wastewater treated by constructed wetlands–A critical review. *Journal of Ecological Engineering*, *24*(5).

13. Hussein, A. J., Al-Darraji, M. N., & Rasheed, M. (2023, December). A study of physicochemical parameters, heavy metals and algae in the Euphrates river, Iraq. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1262, No. 2, p. 022007). IOP Publishing.

14. Jawed, S. T., & Shihab, A. F. (2024). The Effect of Heavy Water Waste on the Euphrates River in Increasing the Concentration of Some Heavy Metals. *Procedia of Engineering and Life Science*, *5*, 745-754.

15. Keen, O. S., & Linden, K. G. (2013). Degradation of antibiotic activity during UV/H2O2 advanced oxidation and photolysis in wastewater effluent. *Environmental science & technology*, *47*(22), 13020-13030.

16. Knap-Bałdyga, A., & Żubrowska-Sudoł, M. (2023). Natural organic matter removal in surface water treatment via coagulation—current issues, potential solutions, and new findings. *Sustainability*, *15*(18), 13853.

17. Kurniawan, S. B., Imron, M. F., Chik, C. E. N. C. E., Owodunni, A. A., Ahmad, A., Alnawajha, M. M., ... & Hasan, H. A. (2022). What compound inside biocoagulants/bioflocculants is contributing the most to the coagulation and flocculation processes?. *Science of the Total Environment*, *806*, 150902.

18. Lipps, W. C., Braun-Howland, E. B., & Baxter, T. E. (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater*.

19. Mahmood, B. (2021). Environmental properties and analysis of the euphrates river within Anbar governorate in Iraq: A review. *Iraqi Journal of Desert Studies*, *11*(1), 150-163.

20. Park, J. K., & Oh, K. (2023). Advancements in phytoremediation research for soil and water resources: Harnessing plant power for environmental cleanup. *Sustainability*, *15*(18), 13901.

21. Pascual, A., Álvarez, J. A., De La Varga, D., Arias, C. A., Van Oirschot, D., Kilian, R., & Soto, M. (2024). Horizontal flow aerated constructed wetlands for municipal wastewater treatment: The influence of bed depth. *Science of the Total Environment*, *908*, 168257.

22. Qadir, S. A. (2010). *Integrated Water Resources Management: Case Study of Iraq* (Doctoral dissertation, Faculty of Political Science, Public Administration and Diplomacy, Notre Dame University, Louaize).

23. Qualls, R. G., Sherwood, L. J., & Richardson, C. J. (2009). Effect of natural dissolved organic carbon on phosphate removal by ferric chloride and aluminum sulfate treatment of wetland waters. *Water resources research*, *45*(9).
24. Sayel, J. J., Khalaf, A. M., & Najm, A. B. A. (2026). Multivariate analysis of seasonal variability in surface water quality for irrigation in Western Iraq. *European Journal of Sustainable Development Research*, *10*(1).
25. Silva, T. F. D. G., Beltrán, D., de Oliveira Nascimento, N., Rodríguez, J. P., & Mancipe-Muñoz, N. (2023). Assessing major drivers of runoff water quality using principal component analysis: a case study from a Colombian and a Brazilian catchments. *Urban Water Journal*, *20*(10), 1555-1567.
26. Wahid, N., Khairy, W., & Krause, R. (2024). Cost–benefit analysis on the implementation of nature-based treated wastewater reuse: case of sekem farm El-Wahat, Egypt. *Discover Water*, *4*(1), 63.
27. Water, U. N. (2018). Sustainable Development Goal 6 synthesis report on water and sanitation. *Published by the United Nations New York, New York*, *10017*.
28. World Health Organization. (2004). *Guidelines for drinking-water quality* (Vol. 1). World health organization.
29. World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda*. World Health Organization.

هوامش البحث

[1] Al-Khuzaie, M. M., Abdul Maulud, K. N., Wan Mohtar, W. H. M., & Yaseen, Z. M. (2025). Modelling Euphrates river water quality index based on field measured data in Al-Diwaniyah City, Iraq. *Scientific Reports*, *15*(1), 51.

[٢] الجنابي، ز. ع.، العباسي، ف. خ.، و حسين، أ. م. (٢٠٢٢). تقييم التلوث الميكروبي وبعض العناصر الثقيلة في مياه نهر الفرات ضمن محافظة الأنبار. *مجلة العلوم الزراعية العراقية*، 53(2)، ٤٥٦-٤٦٨.

[3] Mahmood, B. (2021). Environmental properties and analysis of the euphrates river within Anbar governorate in Iraq: A review. *Iraqi Journal of Desert Studies*, *11*(1), 150-163.

[4] Jawed, S. T., & Shihab, A. F. (2024). The Effect of Heavy Water Waste on the Euphrates River in Increasing the Concentration of Some Heavy Metals. *Procedia of Engineering and Life Science*, *5*, 745-754.

[5] Qadir, S. A. (2010). *Integrated Water Resources Management: Case Study of Iraq* (Doctoral dissertation, Faculty of Political Science, Public Administration and Diplomacy, Notre Dame University, Louaize).

[6] Water, U. N. (2018). Sustainable Development Goal 6 synthesis report on water and sanitation. *Published by the United Nations New York, New York*, *10017*.

[7] Ateshan, H., & Misnan, R. (2025). Estimation of Heavy Metal Concentrations in Euphrates River Water and Sediments in Thi Qar City. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, *29*(2), 1759-1770.

[8] Al-Khuzaie, Abdul Maulud, Wan Mohtar & Yaseen. Op. Cit. p51.

[9] Mahmood. Op. Cit. (1)163.

[10] Al Bomola, A. (2011). Temporal and spatial changes in water quality of the Euphrates river-Iraq. *TVVR11/5013*.

[11] Bello, A. O., Tawabini, B. S., Khalil, A. B., Boland, C. R., & Saleh, T. A. (2018). Phytoremediation of cadmium-, lead-and nickel-contaminated water by Phragmites australis in hydroponic systems. *Ecological engineering*, *120*, 126-133.

[12] Jawed & Shihab. Op. Cit. *5*, 745-754.

[13] Al-Ansari & others. Op. Cit, 1-10

[14] Qualls, R. G., Sherwood, L. J., & Richardson, C. J. (2009). Effect of natural dissolved organic carbon on phosphate removal by ferric chloride and aluminum sulfate treatment of wetland waters. *Water resources research*, *45*(9).

[15] Chan, M. R. A. A., Kasmuri, N., Ahmad, R., Santiagoo, R., & Ramasamy, S. (2021). Comparison between activated carbon and sand filtration method for water quality enhancement: A case study. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 646, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[16] Keen, O. S., & Linden, K. G. (2013). Degradation of antibiotic activity during UV/H2O2 advanced oxidation and photolysis in wastewater effluent. *Environmental science & technology*, *47*(22), 13020-13030.

[17] Ansari, Al-Obaidi, Hadadian, Moradi, Haghighi, & Mujtaba, Op. Cit, *4*, 100134.

[18] World Health Organization. Op. Cit (Vol. 1)..

[19] Ayres & Westcot, Op. Cit, *1*, 74.
[20] Al Bomola. Op. Cit. *TVVR11/5013*, Ateshan & Misnan, Op. Cit, *29*(2), 1759-1770, Al-Khuzaie , Abdul Maulud, Wan Mohtar, & Yaseen, Op. Cit, *15*(1), 51,
[21] Bello, Tawabini, Khalil, Boland, & Saleh, Op. Cit, 126-133, Qualls, Sherwood, & Richardson, Op. Cit, *45*(9).
[22] Hussein, A. J., Al-Darraji, M. N., & Rasheed, M. (2023, December). A study of physicochemical parameters, heavy metals and algae in the Euphrates river, Iraq. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1262, No. 2, p. 022007). IOP Publishing.
[23] Lipps, W. C., Braun-Howland, E. B., & Baxter, T. E. (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater*.
[24] Lipps, Braun-Howland, & Baxter, Op. Cit.
[25] Lipps, Braun-Howland, & Baxter, Op. Cit.
[26] Park, J. K., & Oh, K. (2023). Advancements in phytoremediation research for soil and water resources: Harnessing plant power for environmental cleanup. *Sustainability*, *15*(18), 13901.
[27] Lipps, Braun-Howland, & Baxter, Op. Cit.
[28] Huseinov, A., Hoque, A., Ruble, K. A., Dee, B. J., & Alvarez, N. T. (2023). Reagentless Dissolution and Quantification of Particulate Lead in Tap Water via Membrane Electrolysis. *Analytical Chemistry*, *95*(24), 9297-9303.
[29] Kurniawan, Imron, Chik, Owodunni, Ahmad, Alnawajha & Hasan Op. Cit, *806*, 150902.
[30] Park, & Oh. Op. Cit, *15*(18), 13901.
[31] Kurniawan & others, Op. Cit, *806*, 150902.
[32] Silva & others, Op. Cit, *20*(10), 1555-1567.
[33] Sayel, J. J., Khalaf, A. M., & Najm, A. B. A. (2026). Multivariate analysis of seasonal variability in surface water quality for irrigation in Western Iraq. *European Journal of Sustainable Development Research*, *10*(1).
[34] World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda*. World Health Organization.
[35] Ayres & Westcot, Op. Cit, 74.
[36] Wahid, N., Khairy, W., & Krause, R. (2024). Cost–benefit analysis on the implementation of nature-based treated wastewater reuse: case of sekem farm El-Wahat, Egypt. *Discover Water*, *4*(1), 63.
[37] Knap-Bałdyga, A., & Żubrowska-Sudoł, M. (2023). Natural organic matter removal in surface water treatment via coagulation—current issues, potential solutions, and new findings. *Sustainability*, *15*(18), 13853.
[38] Hussein, A. (2023). Textile Wastewater treated by constructed wetlands–A critical review. *Journal of Ecological Engineering*, *24*(5).
[٣٩] هيئة النزاهة في العراق. (2021). *تقرير حول تلوث نهر الفرات بالمعادن الثقيلة وأثره على الثروة السمكية*. دائرة التحقيقات الخاصة.
[40] Pascual, A., Álvarez, J. A., De La Varga, D., Arias, C. A., Van Oirschot, D., Kilian, R., & Soto, M. (2024). Horizontal flow aerated constructed wetlands for municipal wastewater treatment: The influence of bed depth. *Science of the Total Environment*, *908*, 168257.
[41] Hussein, Op. Cit, *24*(5).
[42] Knap-Bałdyga & Żubrowska-Sudoł. Op. Cit,, *15*(18), 13853.