

إزالة الملوثات العضوية المستقرة من مياه بحيرة سوريت باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي

الدكتور هيثم شاهين¹ الدكتور حسين جندي² الدكتور أحمد قره علي³ المهندسة أمال عطيه⁴

الملخص

تم في هذا البحث دراسة مسألة إزالة الملوثات العضوية المستقرة (POPs) في مياه بحيرة سوريت، ولا سيما المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات (PAHs). صُممت منظومة معالجة جديدة ومتطورة باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي، وأُخذت عينات مائية بعد أزمنة 5 و 10 و 15 و 20 و 25 و 30 دقيقة وحُدثت تراكيز المركبات العطرية (PAHs). أظهرت نتائج البحث كفاءة عالية لتقنية التجويف الهيدروديناميكي في إزالة مركبات (PAHs) من مياه بحيرة سوريت، حيث كانت نسبة إزالة مركبات (PAHs) 100% بعد زمن تشغيل 30 دقيقة، ولذلك يمكن اعتبار تقنية التجويف الهيدروديناميكي وسيلة واعدة فعالة لتفكيك الملوثات العضوية الثابتة الخطيرة في البيئة المائية.

كلمات مفتاحية: المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات، نقانة الكروموتوغرافيا الغازية المتصلة بمطيافية الكتلة، تقنية التجويف الهيدروديناميكي، صفيحة مثقبة، مياه بحيرة سوريت.

¹ أستاذ - قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين
² مدرس - قسم هندسة النظم البيئية - المعهد العالي لبحوث البيئة - جامعة تشرين
³ أستاذ مساعد - قسم الكيمياء البحرية - المعهد العالي للبحوث البحرية - جامعة تشرين
⁴ طالبة دكتوراه - قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين

Removal of persistent organic pollutants from the water of Sureat Lake by hydrodynamic cavitation technology

Dr. Haitham Shaheen¹

Dr. Hussein Junaidi²

Dr. Ahmad Qara Ali³

Eng. Amal Ateah⁴

ABSTRACT

The research was studied the issue of removing persistent organic pollutants (POPs) from water of Lake Sureat, especially the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), Anew advanced processing system was designed by using hydrodynamic cavitation technology, Water samples were taken after times of 5, 10, 15, 20, 25 and 30 minutes and determined the concentrations of aromatic compounds (PAHs). The results showed a high efficiency of hydrodynamic cavitation technique in removing (PAHs) compounds from the water of Sureat Lake, the removal ratio of (PAHs) compounds was 100% after an operating time of 30 minutes, Therefore, the hydrodynamic cavitation technique can be considered as a promising and effective method for degradation the dangerous persistent organic pollutants in the aquatic environment.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons, Gas Chromatography technique, orifice plate, water of Lake Sureat.

¹ Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University.

² Professor, Department of Environmental Systems Engineering, High Institute of Environmental Research, Tishreen University.

³ Professor, Marine chemistry department, high institute of marine research, Tishreen University.

⁴ PhD Student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University.

1 - مقدمة:

جنباً إلى جنب مع تزايد عدد السكان وتطور الحضارة والصناعة والزراعة، يتم إنتاج كميات متزايدة من المركبات الكيميائية الجديدة والمعقدة وإدخالها إلى البيئة المائية مع مياه الصرف الصحي والصناعي والزراعي ورشاحة مكبات القمامة، هذه المواد الملوثة ليست خاملة للكائنات الحية وفي معظم الحالات تترك آثاراً دائمة [1,2].

يشير التقرير المتعلق بالملوثات الكيميائية في مياه الصرف الصحي والحمامة البلدية الصادر عن المفوضية الأوروبية إلى وجود عدد كبير من المركبات التي تعتبر عادة ضارة بصحة الإنسان ومهددة لحياته، ومنها مبيدات الآفات الكلورية العضوية ومركبات ثنائي الفينيل متعدد الكلور (PCBs) والمركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات (PAHs)، بالإضافة إلى العديد من المواد الكيميائية الصناعية الأخرى، حيث تنتمي هذه المركبات المعقدة إلى مجموعة الملوثات العضوية المستقرة Persistent organic pollutants (POPs) [3,4].

تُعتبر هذه المركبات سامة جداً لأنها تتحلل ببطء شديد وتتراكم بيولوجياً بسهولة في خلايا الكائنات الحية وتترسب في قاع المسطحات المائية، وعلى الرغم من تراكيزها المنخفضة في البيئة لكنها تعتبر شديدة السمية، مع وجود تأثيرات مسرطنة ومسببة للطفرات الوراثية والتشوهات الخلقية عند الأطفال [5].

تُشكل الهيدروكربونات العطرية (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) أكثر أنواع المركبات المعقدة شيوعاً في البيئة، فهي غير قابلة للتحلل الحيوي بسبب بنيتها الهيكلية المتعددة الحلقات، ولها تأثيراً سلبياً على الكائنات الحية [6,7]، ويشكل تصريف المياه الصناعية والبلدية غير المسيطر عليها بالإضافة إلى عمليات ترشيح المياه من مكبات النفايات البلدية مصدراً رئيسياً لتلوث مصادر المياه السطحية والجوفية [8].

علاوة على ذلك، يتم تصريف كميات كبيرة من المركبات الهيدروكربونية الحلقية إلى جانب مياه الصرف المعالجة والحمامة، حيث تحتوي مياه الصرف الصحي البلدية على الهيدروكربونات متعددة الحلقات بكميات مختلفة تبعاً لنوع المياه المستعملة وتركيبها الكيميائي [9].

إزالة الملوثات العضوية المستقرة من مياه بحيرة سوريا باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي

إن مركبات الـ PAHs الموجودة في رشاحة مطامر النفايات تنشأ من المواد الموجودة في هذه المطامر، ويتم إنتاجها من تحلل المادة العضوية الموجودة في الماء، حيث يمكن لهذه المركبات التي لا تذوب في الماء أن تنتقل لأن المركبات العضوية الأخرى الموجودة في السوائل المرتشحة تعمل كمذيبات، حيث تم العثور على تراكيز عالية من مركبات PAHs في المياه المرتشحة من مواقع طمر النفايات البلدية [10].

تشير مراجعة الأدبيات إلى أن العمليات الطبيعية لتحلل مركبات الـ PAHs، والتي تشمل بشكل رئيسي التحلل الحيوي والبكتيري والفطري تحدث بكفاءة قليلة جداً، وتعتمد قدرة الكائنات الدقيقة على تحلل الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات على عدد الحلقات في المركب، وكلما كان للمركب عدد حلقات أكبر كان أكثر مقاومة للتحلل الميكروبيولوجي، وذلك بسبب بنية الجزيء الكارهة للماء وعدم قابليته للذوبان في الماء والاستقرار الثيرموديناميكي [11].

تؤدي عمليات الأكسدة الكيميائية لمركبات PAHs بشكل أساسي إلى تحولات هذه المركبات ولا تسمح في العادة بالأكسدة الكلية إلى H_2O و CO_2 [12].
توجد طرائق لمعالجة المياه مصنفة إلى طرائق فيزيائية أو كيميائية أو بيولوجية، ويمكن تحقيق كفاءة المعالجة المطلوبة للمياه مع تطبيقات متآزرة من اثنين أو أكثر من هذه الطرائق، ويمكن دمج أي من الطرق الفيزيائية أو الكيميائية أو البيولوجية في المراحل المختلفة للمعالجة التقليدية، وتكون هذه المراحل أولية وثانوية وثالثية في ترتيب متزايد للوصول إلى مستوى المعالجة المطلوبة [13,14].

يجب أن تكون الطريقة التقليدية قادرة على تلبية المعايير الميكروبيولوجية والكيميائية الموصى بها لتحقيق درجة الجودة المطلوبة، ولكن الملوثات العضوية الثابتة تقاوم أساليب المعالجة التقليدية مثل التلبد والتخثير والترشيح والمعالجة بالأكسدة الكيميائية باستخدام مواد كيميائية مثل الكلور [15]، فقد تشمل منتجات الأكسدة بشكل رئيسي على مشتقات الكلور وتتشكل الهيدروكربونات الكلورة أو التراي هالوميثانات (THMs)، ويكون الشكل المؤكسد عادةً أكثر سمية وأشد خطراً [16].

يعتبر الأوزون مؤكسداً أكثر كفاءة، حيث يضمن درجة أكبر من إزالة PAHS بوقت قصير، ولكن منتجات أكسدة PAHS مع الأوزون قد تكون سامة وتتفاعل بسرعة مع الكلور [17]، وفي كثير من الأحيان يؤدي استخدام مواد كيميائية في المعالجة إلى تكوين مركبات وسيطة غير مرغوبة، ومع ذلك فقد تم تطبيق العديد من التقنيات مثل امتزاز الكربون المنشط والمفاعلات الحيوية الغشائية وعمليات الأكسدة المتقدمة وغيرها. ولكن هذه الطرق لم تضمن الكفاءة الجيدة، كما أنها تنطوي على تكاليف عالية الثمن في المعدات والتشغيل واستخدام المواد الكيميائية الباهظة الثمن، بالإضافة إلى إنتاج مركبات غير مرغوبة يجب التخلص منها بشكل آمن [18,19].

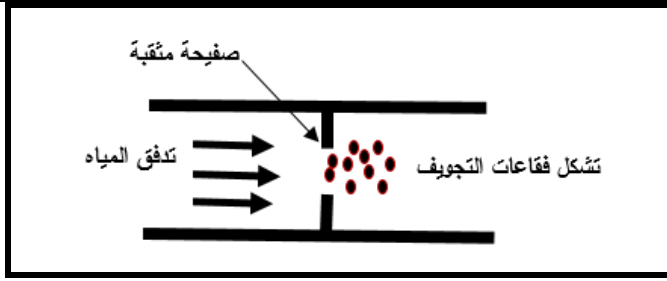
لذلك نجد أنه من الضروري إيجاد بدائل معالجة مبتكرة تضمن الكفاءة الجيدة وتتطلب القليل من المعدات والتجهيزات وتحقيق الاستخدام الأمثل للطاقة الكهربائية اللازمة للتشغيل دون إضافة مواد كيميائية عالية الثمن، ومن التقنيات الجديدة المبتكرة في معالجة المياه الملوثة بالمركبات الغير قابلة للتحلل والتي استخدمت في هذا البحث تقنية التجويف الهيدروديناميكي.

■ التجويف الهيدروديناميكي: Hydrodynamic Cavitation (HC)

التجويف الهيدروديناميكي هو تطبيق واحد في معالجة المياه الملوثة بالمركبات الثابتة بسبب تصميمه المرن وإمكانية التشغيل على نطاق واسع، وتطبيق الفعالية المناسبة مع آلية التجويف الممكنة للتعامل مع مختلف أشكال الملوثات العضوية، ولقد لفت الانتباه مقارنة مع طرق المعالجة الأخرى، ويمكن تحقيق تطبيقاته على نطاق واسع في معالجة المياه [20,21].

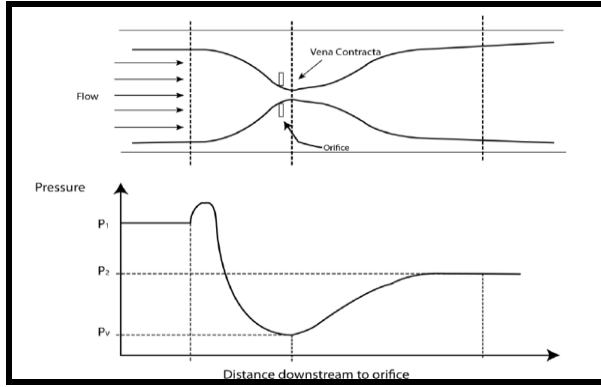
تتميز تقنية التجويف بالقدرة على تفكيك الملوثات العضوية الثابتة، وتحدث هذه العملية داخل الأنابيب في منطقة التضيقات باستخدام أنبوب فنتوري أو صفيحة الثقوب [22,23]، ويبين الشكل (1) آلية حدوث فقاعات التجويف.

إزالة الملوثات العضوية المستقرة من مياه بحيرة سوريث باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي



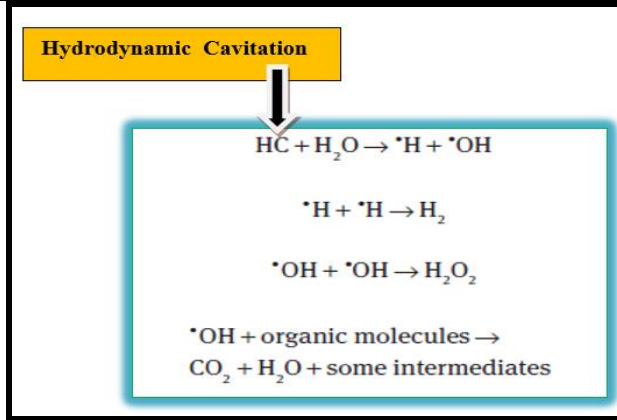
الشكل (1): آلية حدوث فقاعات التجويف

تحدث ظاهرة التجويف في الأنابيب بسبب حدوث فرق مفاجئ بالضغط في منطقة التضيقات حسب مبدأ قانون برنولي في ميكانيك السوائل كما هو مبين في الشكل (2).



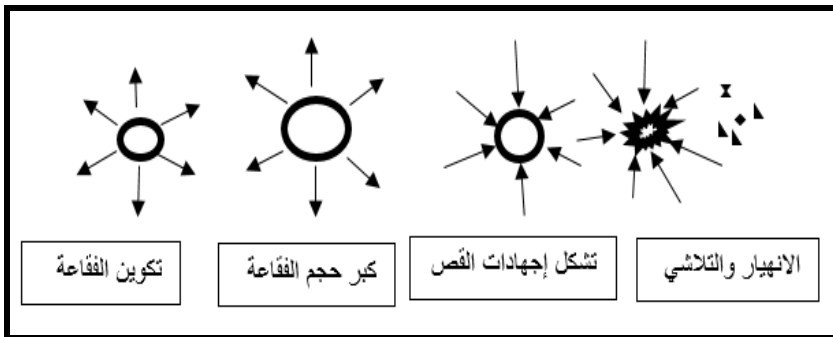
الشكل (2): تغير الضغط في الصفحة المثقبة

تتشكل فقاعات التجويف عندما تزداد سرعة السائل وينخفض الضغط في منطقة التضيقات، ثم يعود الضغط ليرتفع بسبب زيادة مساحة المقطع في منطقة التوسع وتتهار فقاعات التجويف المتشكلة وتتكون ظروف قاسية جداً ذات درجات حرارة عالية من 1000-10000 كلفن، وضغوط عالية تتراوح بين 100 و 5000 بار، وتتولد بعض الجذور الحرة شديدة التفاعل كجذور HO^* و H^* و HOO^* و HO_2^* و $H_2O_2^*$ [24].
يبين الشكل (3) آلية تفكيك المركبات العضوية المعقدة إلى مركبات عضوية بسيطة، إن جذور OH^* المتولدة هي المسؤولة عن تحطيم الملوثات، وتعتبر من أقوى المؤكسدات والتي يمكنها القدرة على تفكيك الروابط الهيدروكربونية للمركبات العطرية متعددة الحلقات [25].



الشكل (3): آلية التفكك وتوليد الجذور الحرة

يمكن تفسير آلية تفكك الملوثات العضوية الثابتة على أنها التأثيرات الفيزيائية والكيميائية الناتجة عن انهيار الفقاعة، وهناك عدد من الدراسات في الأدبيات التي تتناول آلية التحولات الكيميائية، ولقد أظهرت هذه الدراسات أن الانهيارات الناتجة عن التجويف يمكن أن تعزى إلى التأثيرات الميكانيكية (إجهاد القص)، والمواد الكيميائية (الجذور الحرة) والتأثيرات الحرارية (النقاط الساخنة)، حيث يؤدي إجهاد القص القوي الناتج أثناء انهيار الفقاعة إلى تفكيك رابطة (الكربون - الكربون)، وبالتالي تتفكك المركبات العضوية ذات الكتلة الجزيئية الكبيرة إلى مركبات بسيطة منخفضة الكتلة الجزيئية، ويبين الشكل (4) آلية انهيار فقاعات التجويف المتشكلة في منطقة الثقب [26].



الشكل (4): انهيار فقاعات التجويف

بناءً على ما ذكر أعلاه يمكن اعتبار تقنية التجويف الهيدروديناميكي فعالة وجديدة في تنقية المياه، وتجدر الإشارة إلى أنه في سورية لا توجد دراسات تتناول تحديد التلوث

إزالة الملوثات العضوية المستقرة من مياه بحيرة سوريث باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي

بالمركبات العطرية المتعددة الحلقات في مياه بحيرة سوريث، ولم تتناول الدراسات آلية تفكيك المركبات المستقرة في المياه العذبة الملوثة بها، كما أنه لا توجد دراسات عن تطبيق تقنية التجويف الهيدروديناميكي في معالجة المياه.

ولذلك يُعتبر هذا البحث الأول من نوعه في سوريا باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي لإزالة ملوثات كيميائية مستقرة ومعقدة ومعقدة على طرائق المعالجة التقليدية، وسيشكل هذا البحث حجر الأساس في مديرية الموارد المائية في اللاذقية لإمكانية تطبيقه على المصادر المائية المستخدمة لأغراض الشرب كي تلبى معايير الجودة المطلوبة والتي تنعكس إيجاباً على صحة الإنسان.

2 - مشكلة البحث:

تكمن مشكلة البحث في وجود الملوثات العضوية المستقرة، ومنها المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات في المصادر المائية المستخدمة لأغراض الشرب (الينابيع والبحيرات والآبار)، ويسبب وصولها إلى الإنسان أمراضاً خطيرةً.

تتمثل المشكلة الأساسية للبحث بعدم قدرة محطات التنقية التقليدية الموجودة حالياً على تفكيك الملوثات العضوية المستقرة وإزالتها من مصادر المياه وبخاصة المستخدمة لأغراض الشرب، وبالتالي بقائها بعد عمليات التنقية ووصولها إلى الإنسان، وتتجسد المشكلة الخطيرة في تشكيل مركبات الهيدروكربونات الكلورية أوالترابي هالوميثانات (THMs) عند إضافة الكلور إلى المياه الحاوية على مركبات PAHs، والتي تتميز بسميتها العالية والمسببة للسرطانات والطفرات الجينية والوراثية والخلقية.

3 - أهمية البحث:

استناداً إلى مشكلة البحث، فإن أهمية البحث تتجلى من خلال تقييم واقع التلوث بملوثات تنتمي للملوثات العضوية المستقرة (المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات الـ PAHs) في مياه بحيرة سوريث، والتي تشكل خطراً كبيراً على النظام البيئي نظراً لسلوكها المعقد وخطورة التلوث البيئي فيها، ليتم اقتراح طريقة معالجة فعالة لإزالتها من هذه المياه بغية الوصول إلى معايير الجودة المطلوبة.

كل ماسبق يساهم في إمكانية تطبيق تقنية المعالجة المقترحة، والاستفادة منها في محطات تنقية مياه الشرب، وهذا العمل التآزري يحقق وصول المياه الصحية النظيفة الخالية من العوامل الممرضة إلى الإنسان.

4 - أهداف البحث:

يهدف البحث إلى تقييم كفاءة تقانة التجويف الهيدروديناميكي في إزالة المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات من مياه بحيرة سوريث، وذلك من خلال المراحل التالية:

- 1- توصيف مياه البحيرة وتحديد خصائصها عن طريق أخذ عينات وتحليلها مخبرياً وتحديد تراكيز المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات فيها.
- 2- تصميم جهاز التجويف الهيدروديناميكي، وتميرير المياه المطلوب معالجتها عبر مفاعل التجويف، وتقييم درجة كفاءته في إزالة المركبات الهيدروكربونية العطرية من مياه بحيرة سوريث.

5 - وصف منطقة الدراسة:

تقع بحيرة سوريث في منطقة حريصون التابعة لمدينة جبلة في محافظة اللاذقية، وتبعد عن بحيرة السن مسافة 100 m من جهة الجنوب كما هو مبين في الشكل (5)، وتشارك بحيرة سوريث مع بحيرة السن بالحوض الصباب المغذي، وتعتمد في تغذيتها على المياه الجوفية الراشحة لمياه الأمطار والثلوج [27].



الشكل (5): موقع بحيرة سوريث

إزالة الملوثات العضوية المستقرة من مياه بحيرة سوريا باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي

تعتبر الزراعة المهنة الرئيسية المنتشرة في الحوض المغذي لبحيرة سوريا، ويتم استخدام كميات كبيرة من المبيدات الزراعية و مواد التعقيم والأسمدة، كما تنتشر في المنطقة مصادر عديدة للتلوث أهمها مصبات الصرف الصحي والصناعي والحرفي، ومكبات القمامة العشوائية وغيرها من الملوثات، بالإضافة إلى التلوث الناجم عن وسائل النقل المختلفة وحرائق الغابات والنباتات والأشجار الحراجية والأعشاب، وكذلك حرق مواد التدفئة للبيوت البلاستيكية في فترات الصقيع [28,29].

هناك ارتباط مباشر بين الهطولات المطرية وارتفاع تصريف مياه نبع سوريا مما يدل على وجود سرعة عالية لانتقال المياه الجوفية الراشحة ووصولها إلى النبع بما تحمله معها من ملوثات [30].

إن أهمية نبع سوريا لا تقل أهمية عن نبع السن على الرغم من عدم استخدامه لأغراض الشرب في الوقت الحالي، وذلك بسبب العلاقة العضوية التي تربط بينهما، وأثناء انخفاض غزارة نبع السن تعود المياه من بحيرة سوريا إلى جوف الأرض، وتم توثقها بشكل دقيق خلال فترة الانخفاض الشديد في غزارة نبع السن وتزداد غزارة المياه الداخلة إلى جوف الأرض مع تقدم الزمن وانخفاض غزارة نبع السن واستمرت ظاهرة دخول الماء إلى جوف الأرض في بحيرة سوريا حتى بعد ارتفاع غزارة نبع السن، وهذا يشير إلى انتقال الملوثات من بحيرة سوريا إلى بحيرة السن [31].

6 - منهجية إجراء البحث:

6-1 - جمع العينات:

جُمعت عينات مائية من بحيرة سوريا في شهر شباط عام 2020م، تم تحديد بعض خواصها الهيدروكيميائية كدرجة الحرارة ودرجة الحموضة (pH) والناقلية وكمون الأكسدة والإرجاع باستخدام جهاز قياس حقلي نوع (PCT-407)، حُفظت العينات في عبوات زجاجية عاتمة تم تنظيفها مسبقاً بالمحلات العضوية (نظامي الهكسان ودي كلور الميثان)، وتمت عملية استخلاص المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات مباشرة بعد الوصول إلى المخبر [32,33].

تم أخذ العينات من موقع في شمال البحيرة كما هو مبين في الشكل (6)، ولقد اختير هذا الموقع لقربه من بحيرة السن، والتي من المحتمل أن تتأثر بالملوثات الموجودة في بحيرة سوريث نتيجة العلاقة العضوية التي تربط بينهما [31].



الشكل (6): صورة فضائية لموقع أخذ العينات في بحيرة سوريث

6-2- استخلاص العينات وتحليلها:

أستخلصت العينات المائية بعد جمعها مباشرة بطريقة استخلاص (سائل - سائل) بقمع الفصل سعة ليترين وباستخدام 80 ml من مزيج من المحلات العضوية (نظامي الهكسان ودي كلور الميثان بنسبة 1:1)، ثم ركزت الخلاصات العضوية باستخدام المبخر الدوار حتى 10 ml ثم بتيار من غاز الآزوت حتى 1 ml لتصبح جاهزة لعملية التحليل بواسطة جهاز الكروماتوغرافيا الغازية المزودة بكاشف مطيافية الكتلة (GC/MS) [32,33].

تم حساب تركيز مركبات الفحم الهيدروجينية العطرية من العلاقة:

$$C = \frac{R_f * Area * V_{ext}}{V_{inj} * V} * 1000 \quad (1)$$

إزالة الملوثات العضوية المستقرة من مياه بحيرة سوريث باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي

C: تركيز المركب في العينة (ng/l).

R_f : عامل الاستجابة.

Area: مساحة قمة المركب في العينة.

Vext: حجم الخلاصة (μ l).

Vinj: حجم العينة المحقونة (μ l).

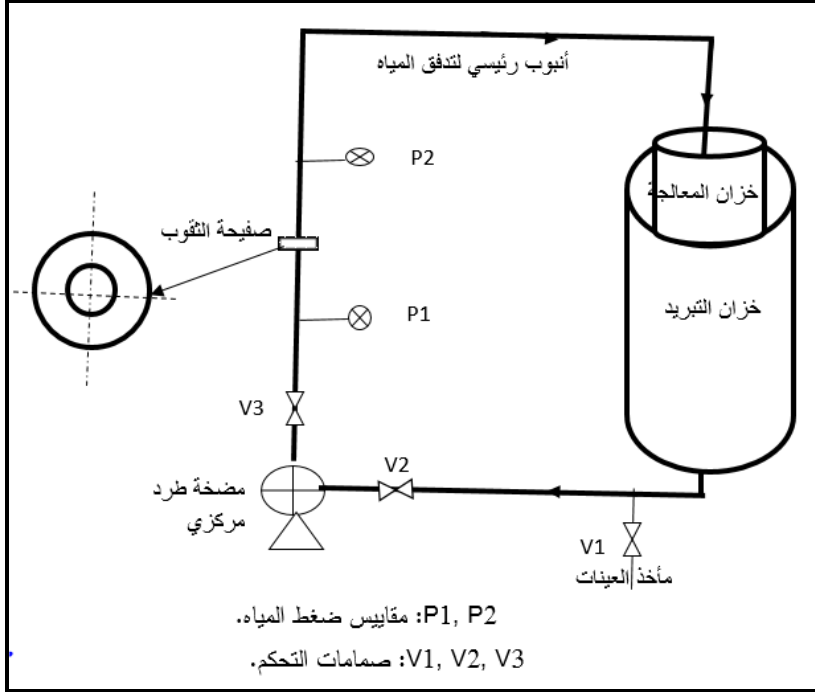
V: حجم العينة المائية المستخلصة (μ l).

6-3 - تصميم جهاز التجويف الهيدروديناميكي:

يعتبر مفاعل التجويف التصميم الأساسي في منظومة المعالجة المستخدمة في هذا البحث، وهو عبارة عن مفاعل فيزيائي كيميائي له بنية بسيطة نسبياً، ولكن له قدرة كبيرة على تحطيم الملوثات العضوية الصعبة التحلل.

إن تصميم مفاعل التجويف له الدور الأساسي في إنشاء فقاعات التجويف بأشكال وأحجام مختلفة خلال فترة تشغيله [22,23,24].

يوضح الشكل (7) تمثيل تخطيطي لمنظومة التجويف الهيدروديناميكي المستخدمة في هذا البحث، والتي تعمل على تدوير المياه ضمن حلقة مغلقة، حيث يتم ضخ المياه باستخدام مضخة طرد مركزي تتميز بالموصفات التالية (type PE90 ، Foras ، إيطالية الصنع، 2800 دورة في الدقيقة، استطاعة إحصان بخاري ، 0.74 كيلو واط) من خزان معدني خلال أنبوب رئيسي، ومنها إلى مفاعل التجويف الهيدروديناميكي ومن ثم تفرغ المياه مرة أخرى في الخزان، بالإضافة إلى مكونات المنظومة اللازمة لإتمام عملية التشغيل كصمامات التحكم، ومنها صمام يحتوي بداخله على مفاعل التجويف (عبارة عن سكر يحتوي على صفيحة مثقبة (orifice plate))، وتم استخدامه بسهولة فكه وتركيبه في حالة استبدال الصفيحة وتغييرها بصفيحة أخرى عند الحاجة.



الشكل (7): تمثيل تخطيطي لمفاعل التجويف الهيدروديناميكي

إن الأنبوب الرئيسي له الدور الأساسي في تدوير المياه خلال المنظومة، حيث يتم تفريغ المياه من فروع المضخة في الخط الرئيسي، والذي يتكون من توصيلات وأنابيب وصمامات تحكم ومفاعل التجويف ومقاييس ضغط المياه، وينتهي هذا الخط داخل الخزان على مستوى منسوب أسفل المياه، وذلك لتجنب أي تحريض للهواء في النظام، كذلك يتم توفير صمامات التحكم في الأماكن المناسبة للتحكم في معدل التدفق من خلال الخط الرئيسي، ويبلغ القطر الداخلي لخط التسليم للمضخة 1 inch، ويتم تزويد الخزان بغطاء تبريد، وبذلك يتم الحفاظ على درجة حرارة المياه ثابتة.

في هذه الدراسة، شملت التجربة إعادة تدوير المياه خلال أنبوب تدفق يستوعب داخلياً صفيحة مثقبة (orifice plate) بثقب واحد قطره (5 mm)، وهي مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ لقطرها (25.4 mm) وسماكتها (2 mm)، ومعظم عناصر المفاعل مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ والذي يتميز بمقاومة كيميائية عالية ومقاومة للتآكل.

إزالة الملوثات العضوية المستقرة من مياه بحيرة سوريث باستخدام تقنية التجويف
الهيدروديناميكي

أثناء التجربة تم فتح الصمامات بالكامل، للحفاظ على ضغط مدخل للمضخة بقيمة ثابتة والتي كانت مساوية 9 بار، تم أخذ عينات مائية بعد 5 و 10 و 15 و 20 و 25 و 30 دقيقة من التشغيل وتحليلها وتحديد خواصها الهيدروكيميائية وتراكيز مركبات الـ PAHs.

تم تصميم هذه المنظومة ووضعها في مركز تكنولوجيات معالجة المياه في جامعة تشرين والواقع قرب الودعتين السكنيتين 17 و 18 والتابع لقسم هندسة النظم البيئية في المعهد العالي لبحوث البيئة.

يعتمد المقدار الإجمالي لتفكيك مركبات الـ PAHs بشكل رئيسي على شدة التجويف وعدد مرات حدوث التجويف، حيث هناك بارامتران أساسيان يعرفان التجويف وهما: رقم التجويف k وعدد مرات حدوث التجويف LC [20,21]، كما في المعادلتين التاليتين:
- رقم التجويف K:

$$K = \frac{P - P_n}{\frac{1}{2}(\rho \omega^2)} \quad (2)$$

حيث: P - الضغط في التدفق غير المضطرب [Pa].

P_n - ضغط البخار المشبع [Pa].

ρ - كثافة السائل [kg/m³].

ω - سرعة السائل المتدفق خلال الثقب [m/sec].

- عدد مرات حدوث التجويف (درجة الدوران) LC:

$$L_C = \tau \frac{V}{V_u} \quad (3)$$

حيث: τ - مدة التجويف [sec].

V - معدل التدفق الحجمي للمضخة [m³/sec].

V_u - حجم المياه في الخزان [m³].

- تم تقييم كفاءة عملية التجويف الهيدروديناميكي في تفكيك المركبات العطرية من حيث التغيرات في تركيز مركبات الـ PAHs بالنسبة إلى تركيزها الأولي، وفقاً للمعادلة التالية [24,25]:

$$E = \frac{C_o - C_t}{C_o} \quad (4)$$

حيث: E - كفاءة المعالجة %.

C_o - التركيز الأولي لمركبات الـ PAHs [ng/l].

C_t - تركيز مركبات الـ PAHs بعد زمن التجويف t [ng/l].

تعتمد كفاءة تفكيك المركبات في نظام التجويف الهيدروديناميكي على درجة الدوران (عدد مرات التكرار أثناء المعالجة)، فقد يرتبط تأثير التفكك على عدد مرات تدفق المحلول المدروس خلال منطقة التجويف، حيث تتطوي زيادة درجة الدوران على نفقات طاقة أعلى لذلك من الضروري ضبط بارامترات تشغيل النظام بحيث يكون استهلاك الطاقة منخفضاً قدر الإمكان.

7 - النتائج والمناقشة:

7-1 - نتائج تشغيل جهاز التجويف الهيدروديناميكي:

تم إجراء الدراسة التجريبية للمياه بعد أخذ عينة في شهر شباط عام 2020م، ودرست خواصها الكيميائية لتحديد درجة الحرارة و pH والناقلية وكمون الأكسدة والإرجاع، وتم تحديد التركيز الإجمالي للمركبات الهيدروكربونية العطرية (Σ PAHs).

تم إحضار مياه من بحيرة سورييت وملئ الخزان بحجم 33 لتر، بعد ترشيحها عبر منخل ناعم جداً لإزالة الشوائب والعوالق منها، وحددت خواصها الكيميائية، حيث كانت $t = 11^\circ\text{C}$ درجة حرارة المياه، ودرجة حموضة المياه $\text{pH}=7,23$ ، وقيمة كمون الأكسدة والإرجاع $\text{ORP} = 20,5 \text{ mv}$ ، والناقلية الكهربائية $= 530 \mu\text{sim/cm}$ ، والتركيز الإجمالي للمركبات $\Sigma\text{PAHs} = 435 \text{ ng/l}$.

تم تشغيل جهاز التجويف الهيدروديناميكي الذي تم تصميمه في ظل الظروف التجريبية الثابتة التالية: ضغط المضخة المطبق عند المدخل $p = 9 \text{ bar}$ ، ومقطع

إزالة الملوثات العضوية المستقرة من مياه بحيرة سوريا باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي

التدفق ثابت لأنبوب قطره $D = 25,4 \text{ mm}$ ، ويحتوي في داخله على صفيحة مثقبة بثقب واحد قطره $d = 5 \text{ mm}$.

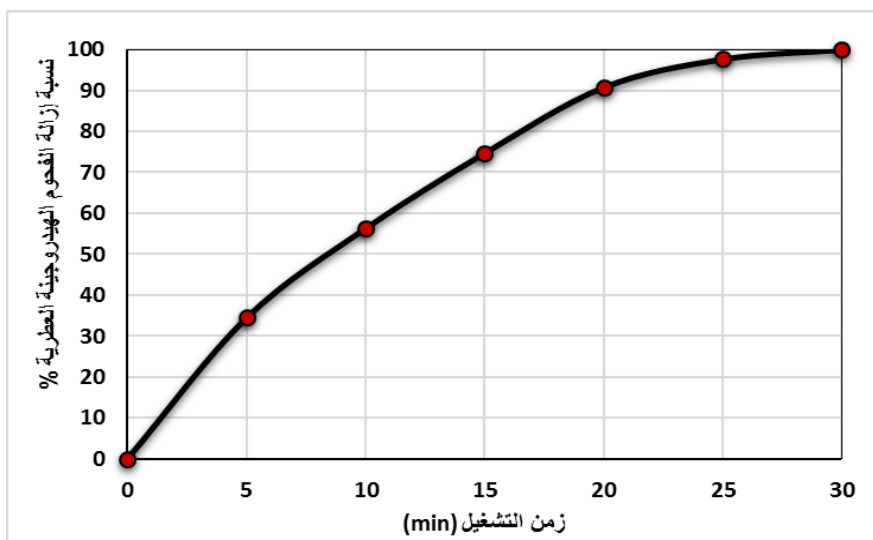
أخذت عينات مائية بعد تشغيل الجهاز بعد أزمنة متتالية 5 و 10 و 15 و 20 و 25 و 30 دقيقة، وتم تحديد التركيز الإجمالي للمركبات الهيدروكربونية العطرية ودرجة الحرارة والـ PH والناقلية وكمون الأكسدة والإرجاع، ورتبت النتائج في الجدول (1).

الجدول (1): نتائج تشغيل جهاز التجويف الهيدروديناميكي

البارامترات الزمن (min)	التركيز الإجمالي للمركبات الهيدروكربونية $\sum PAHs$ (ng/l)	pH	الناقلية الكهربائية ($\mu S / Cm$)	كمون الأكسدة والإرجاع ORP (mv)	درجة الحرارة °C
0	435	7.23	530	20.5	11
5	285	7.28	575	28.4	11.2
10	190	7.33	590	35.8	11.4
15	110	7.4	598	46.7	11.7
20	40	7.41	607	66.5	12
25	10	7.42	610	79.5	12.2
30	0	7.42	612	82.3	12.3

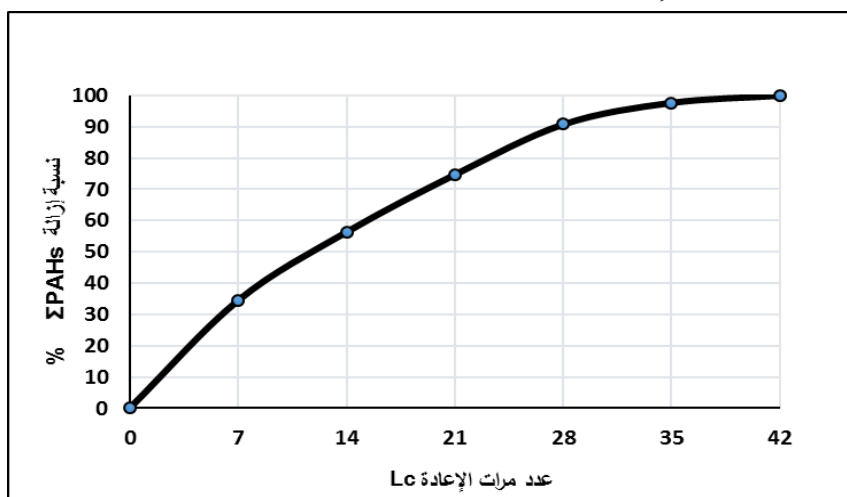
لوحظ من الجدول أعلاه تزايد نسبة إزالة المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات ($\Sigma PAHs$) مع زيادة زمن التشغيل، وقد بلغت نسبة الإزالة (35%) عند الزمن 5 min واستمرت هذه النسبة بالازدياد مع زيادة الزمن لتبلغ (95%) عند زمن التشغيل 25 min وقد بلغت (100%) عند الزمن 30 min، حيث لم يتم الكشف عن هذه المركبات كما هو مبين في الشكل (8)، ويعزى ذلك إلى زيادة في فقاعات التجويف والذي أدى إلى الازدياد في توليد الجذور الحرة وتشكيل إجهادات القص والعديد من النقاط

الساخنة الموضعية والتي ساهمت جميعها في زيادة نسبة تفكك مركبات (PAHS) مع الزمن.



الشكل (8): نسبة إزالة المركبات الهيدروكربونية العطرية (ΣPAHs) مع الزمن

كما لوحظ ازدياد نسبة إزالة مركبات PAHS مع زيادة عدد مرات التجويف (مرات الإعادة) كما هو مبين في الشكل (9)، ويعزى ذلك إلى الازدياد في توليد الجذور الحرارة وإجهادات القص والنقاط الساخنة، وجميع العوامل الناجمة عن التجويف والتي تزداد بشدة مع ازدياد عدد مرات الإعادة.

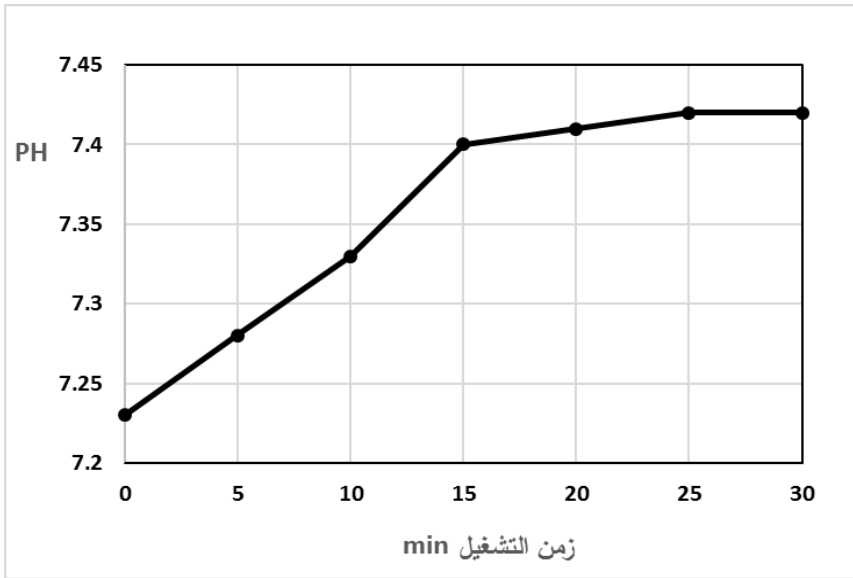


الشكل (9): نسبة إزالة المركبات الهيدروكربونية العطرية (ΣPAHs) مع عدد مرات الإعادة

إزالة الملوثات العضوية المستقرة من مياه بحيرة سوريث باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي

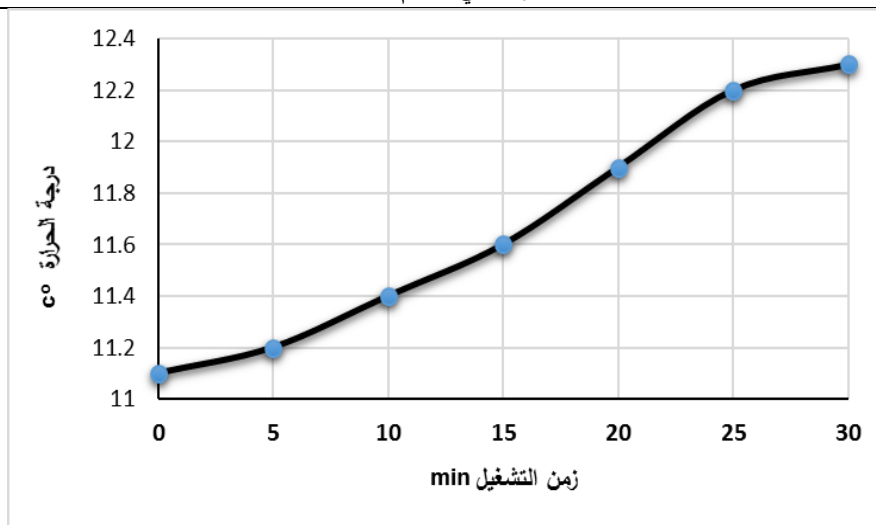
كانت نسبة الإزالة % 100 عند عدد مرات الإعادة (LC = 42) مرة عند الضغط المطبق 9 بار، وقد بلغ رقم التجويف $K = 0,43$ ، وهذا يتوافق مع الدراسات المرجعية بأن يكون رقم التجويف أصغر من الواحد ($k < 1$) كي تحدث ظاهرة التجويف [23,24,26].

يبين الشكل (10) تغيرات طفيفة في قيم الـ pH خلال عملية التجويف، حيث تراوحت قيمته ما بين 7,23 و 7,42، ويعزى ذلك إلى توليد جذور الهيدروكسيل خلال عملية التجويف، والتي أدت إلى هذا الارتفاع الطفيف في قيم الـ pH.



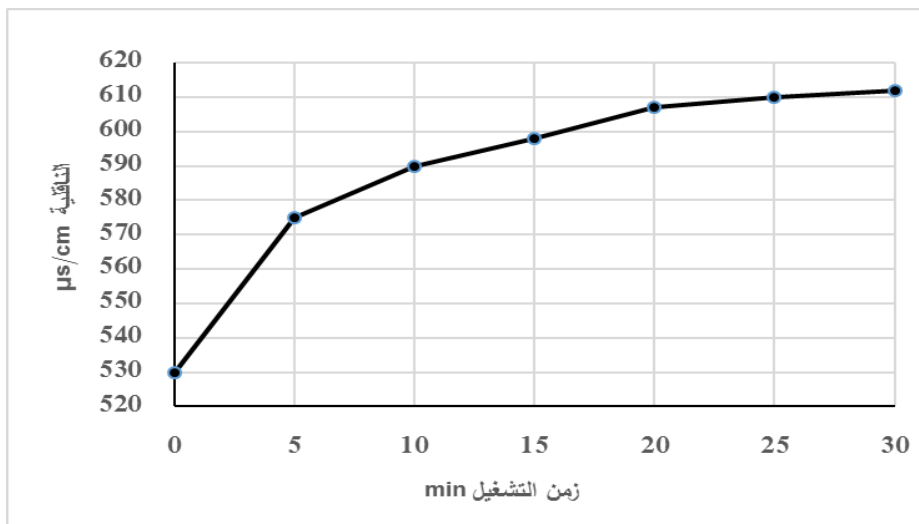
الشكل (10): تغيرات قيم الـ pH خلال عملية التجويف

ويبين الشكل (11) ارتفاعاً بسيطاً في قيم درجات الحرارة خلال عملية التجويف، فقد تراوحت القيم ما بين 11°C كقيمة دنيا و $12,3^{\circ}\text{C}$ كقيمة عليا، يعزى ذلك إلى طبيعة تجهيزات منظومة المعالجة المصنوعة من الحديد، بالإضافة إلى وجود خزان للتبريد متصل مع خزان المعالجة في قاعدته والذي حافظ على درجة حرارة المياه.



الشكل (11): تغيرات قيم درجات الحرارة خلال عملية التجفيف.

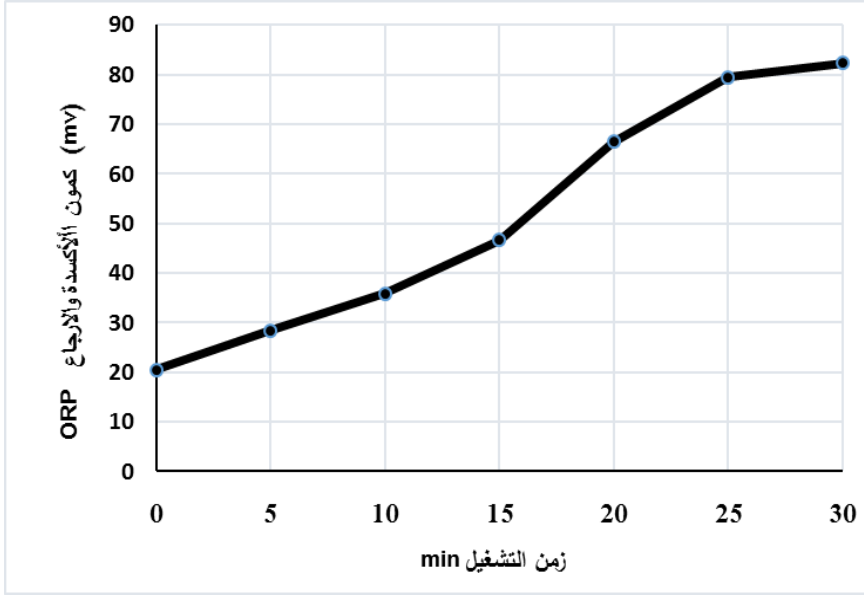
لوحظ ارتفاع في قيمة الناقلية الكهربائية خلال عملية التجفيف، حيث ازدادت القيمة من $530 \mu\text{sim/cm}$ حتى $612 \mu\text{sim/cm}$ عند الزمن 30 min، حيث كانت كفاءة المعالجة 100% كما هو مبين في الشكل (12)، ويعزى ذلك إلى توليد الجذور الحرة المسؤولة عن ازدياد عدد الشوارد والأملاح المنحلة، التي ارتفعت قيمتها مع ارتفاع كفاءة المعالجة نتيجة ازدياد تفكيك المركبات الثابتة وتحولها إلى مركباتها البسيطة.



الشكل (12): تغيرات قيم الناقلية خلال عملية التجفيف

إزالة الملوثات العضوية المستقرة من مياه بحيرة سوريث باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي

كما ازداد كمون الأكسدة والإرجاع خلال عملية التجويف، حيث تراوحت قيمته من (20,5 mv) وحتى القيمة (82,3 mv) عند زمن التشغيل (30 min) كما هو مبين في الشكل (13)، ويمكن أن يعزى ذلك إلى توليد الكثير من الجذور الحرة شديدة التفاعل المسؤولة عن تفاعلات الأكسدة والإرجاع الحاصلة خلال عملية تفكيك المركبات.



الشكل (13): تغيرات قيم كمون الأكسدة والإرجاع خلال عملية التجويف

8 - الاستنتاجات والتوصيات:

8-1 - الاستنتاجات:

- 1 - وجود المركبات العطرية متعددة الحلقات في المياه العذبة (بحيرة سوريث)، حيث كانت قيمة تراكيزها الإجمالية (435 ng/l) وهي أكبر من القيم المسموحة، وبالتالي ستشكل خطراً كبيراً على صحة الإنسان.
- 2 - تعتبر تقنية التجويف الهيدروديناميكي عملية فعالة واعدة في إزالة مركبات PAHs من المصادر المائية.
- 3 - تزايد كفاءة الإزالة مع زيادة زمن التجويف وعدد مرات الإعادة، حيث كانت نسبة الإزالة (100%) عند زمن التشغيل (30 min) وعدد مرات الإعادة (42 مرة).

4 - هناك ارتفاعاً بسيطاً على درجات الحرارة ودرجة الحموضة خلال عملية التجويف، فقد زادت درجة الحرارة من القيمة 11°C وحتى $12,3^{\circ}\text{C}$ ، وتراوحت قيم الـ pH ما بين 7,23 و7,42.

5 - وجد ازدياداً في قيم الناقلية وكمون الأكسدة والإرجاع أثناء عملية التجويف، حيث ازدادت قيمة الناقلية من ($530\ \mu\text{sim}/\text{cm}$) وبلغت ($612\ \mu\text{sim}/\text{cm}$)، وكذلك ارتفعت قيمة كمون الأكسدة والإرجاع من ($20,5\ \text{mv}$) وحتى ($82,3\ \text{mv}$) عند زمن التجويف (30 min).

8 - 2 - التوصيات:

- 1- تطبيق تقنية التجويف الهيدروديناميكي على المصادر المائية وبخاصة المستخدمة لأغراض الشرب.
- 2 - دراسة تأثير تغيير ضاغط المضخة والتصميم الهندسي للصفحة المثقبة على كفاءة التجويف.
- 3 - دراسة تأثير تغيير التركيز الأولي لمركبات الـ PAHs على نسبة الإزالة، وتأثير تغيير درجات الحرارة وغيرها من العوامل المؤثرة على عملية التجويف.
- 4 - تطبيق عملية التجويف على المياه الملوثة بالمركبات الثابتة الأخرى كالمبيدات والهرمونات والأدوية والأصباغ وغيرها من الملوثات الثابتة.
- 5 - دراسة بيئية شاملة وفق برامج بيئية صارمة للحد من تلوث الحوض المغذي نظراً لأهمية البحيرة وكونها تشكل النصف الثاني لبحيرة السن الرافد الأساس لمياه الشرب في اللاذقية.

9 - المراجع:

- [1] GREY, D., GARRICK, D., BLACKMORE, D., KELMAN, J., MULLER, M., SADOFF, C. (2013), Water security in one blue planet: twenty-first century policy challenges for science. **Phil Trans R Soc A** 371: 20120406.
- [2] WHO. (2012). Pharmaceuticals in Drinking Water. **World Health Organization**.
- [3] ICON Consultants. Pollutants in Urban Waste Water and Sewage Sludge – Final Report for DG Research, 2001, **Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg**.
- [4] EL-SHAHAWI, M., HAMZA, A., BASHAMMAKH, A., AL-SAGGAF, W. - An overview on the accumulation, distribution, transformations, toxicity and analytical methods for the monitoring of persistent organic pollutants, **Talanta**, 80(5), 2010, 1587-1597.
- [5] LIU, J., LEWIS, G. - Environmental toxicity and poor cognitive outcomes in children and adults, **J Environ Health** 76(6): 2014,130–138.
- [6] LI, Z., JENNINGS, A. - Global variations in pesticide regulations and health risk assessment of maximum concentration levels in drinking water, **Journal of Environmental Management** 212 USA, 2018, 384-394.
- [7] NET, S., DUMOULIN, D., EL-OSMANI, R., RABODONIRINA, S., OUDDANE, B. -Case study of PAHs, Me-PAHs, PCBs, phthalates and pesticides contamination in the Somme river water, France. **Int. J. Environ. Res.** 8, 2014, 1159–1170.
- [8] VILLA, R., S., DUQUE, W., O. MARTHA PÁEZ, M., MARTA SCHUHMACHER, M. - Presence of PAHs in water and sediments of the Colombian Cauca River during heavy rain episodes, and implications for risk assessment, **Science of the Total Environment** 540, 2016, 455–465.
- [9] LI, G., SHIMIN Wu, S., LIN WANG, L., CASIMIR, C., AKOH, C., C. -Concentration, dietary exposure and health risk estimation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in youtiao, **a Chinese traditional fried food, Food Control** 59, 2016, 328-336.

- [10] AKINYEYE, R. O., ADEBAWORE, A. A., AWOKUNMI, E. E., OLANIPEKUN, E. O., - Evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbons in water from hand dug wells at Ile-Oluji, Nigeria. **IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)**, 2016, Vol. 10., PP 112-119.
- [11] HARVEY, A. N., SNAPE, I., SICILIANO, S. D. – Validating potential toxicity assays to assess petroleum hydrocarbon toxicity in polar soil. **Environmental Toxicology Chemistry**, 31, 2012, 402-407.
- [12] ZHANG, Y., ZHANG, L., HUANG, Z., LI, Y., LI, J., WU, N., HE, J., ZHANG, Z., LIU, Y., NIUB, Z., 2019- Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water of China: Composition, distribution and influencing factors, **Ecotoxicology and Environmental Safety** 177, 108–116.
- [13] KAMIŃSKA, G., KUDLEK, E., DUDZIAK, M., BOHDZIEWICZ, J. Removal of biologically active substances during mechanical-biological wastewater treatment (in Polish). **Inżynieria Ekologiczna**, (2016), 50, 201–209.
- [14] CRINIA, N. M., WINTERTONB, P., LEE D. WILSOND, L. D., Water-insoluble -cyclodextrin–epichlorohydrin polymers for removal of pollutants from aqueous solutions by sorption processes using batch studies: A review of inclusion mechanisms – **Progress in Polymer Science** 78, (2018), 1–23.
- [15] ALTUNTAS, K., EYUP D. E., DDT REMOVAL BY NANO ZERO VALENT IRON: INFLUENCE OF pH ON REMOVAL MECHANISM. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, **Engineering & Mathematics (EPSTEM)** ISSN: 2602-3199 Antalya/Turkey.
- [16] PADHI, R.K., SUBRAMANIAN, S., MOHANTY, A.K., SATPATHY, K.K. - Comparative assessment of chlorine reactivity and trihalomethanes formation potential of three different water sources, India. **Journal of Water Process Engineering**. V. 29, 2019, 100769.
- [17] WANG, C., KLAMERTH, N., MESSELE, S. A., SINGH, A., BELOSEVIC, M., GAMAL EL-DIN, M. Comparison of UV/hydrogen peroxide, potassium ferrate(VI), and ozone in

oxidizing the organic fraction of oil sands Process -affected water (OSPW). **Water Res** 100, (2016), 476–485.

[18] JUNG, C., SON, A., HER, N., ZOH, K., CHO, J., YOON, Y. - Removal of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals, and personal care products in water using carbon nanotubes: A review, **Journal of Industrial and Engineering**, 2015.

[19] CHEMISTRY, BAKIR, A., ROWLAND, S. J., THOMPSON, R.C. Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions. **Environmental Pollution**, 185, (2014), 16–23.

[20] GAŁOŁA, M., PRZYJAZNYB, A., BOCZKAJA, G. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review. **Chemical Engineering Journal** 338 (2018) 599–627.

[21] DINDAR, E. An Overview of the Application of Hydrodynamic Cavitation for the Intensification of Wastewater Treatment Applications: A Review. **Innov Ener Res** 5: (2016). 137.

[22] POZSGAI, E., GALAMBOS, I., DOKA, G., CSOKA, L. Use of hydrodynamic cavitation with additional high purity water for thermal water treatment. **Chemical Engineering and Processing** 1(17)31307-7. (2018). PII: 255-270.

[23] TAO, Y., CAI, J., LIU, B., XIULAN HUAI, X., ZHIXIONG GUO, Z., Hydrodynamic cavitation in wastewater treatment: A review. **Chem. Eng. Technol.** 39, No. 8, (2016), 1363–1376.

[24] MUSMARRA, D., PRISCIANDARO, M., CAPOCELLI, M., KARATZA, D., IOVINO, P., CANZANO, S., LANCIA, A. - Degradation of ibuprofen by hydrodynamic cavitation: Reaction pathways and effect of operational parameters. **Ultrasonics Sonochemistry** 29. (2016), 76–83.

[25] MANDAR P. BADVE, M. P., MIHIR N. BHAGAT, M. N., ANIRUDDHA B. PANDIT, A. B. Microbial disinfection of seawater using hydrodynamic cavitation. **Separation and Purification Technology** 151, (2015), 31–38.

[26] PANDA, D., MANICKAM, S. Hydrodynamic cavitation assisted degradation of persistent endocrine-disrupting organochlorine pesticide Dicofol: Optimization of operating

parameters and investigations on the mechanism of intensification, **Ultrasonics Sonochemistry**, (2018).

[27] AZKI, FAWAZ, ALABDALLA, ABDULKARIM, New Hydrogeological data of Al-Sin aquifer with the help of geoelectrical prospecting, **Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Basic Sciences Series** Vol. (35) No. (3), 2013, 97-100. (in Arabic)

[28] AMMAR, GHATFAN -Study of the Flood in Al-Sen River, **Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series** Vol (28) No (2), 2006. (in Arabic)

[29] CHEIKHO, TAHER, HAJ ISSA, MAHMOUD, DAYOUB, HADI, - Study of Some Physical and Chemical Properties of Al-Sen River Waters in Syrian Coastal Basin, **Syrian Journal of Agricultural Research – SJAR** 6(3), 2019, 333-350. (in Arabic)

[30] Water Balance Project in the Coastal Basin, **Directorate of Water Resources**, Lattakia, 2005. (in Arabic)

[31] Report of the Directorate of Water Resources in Lattakia - **The relationship between the two springs of al-Sen and Sureat**, 2016. (in Arabic).

[32] UNEP, "UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME". Determination of petroleum hydrocarbons in sediments. **Reference Methods for Marine Pollution Studies**, No. 20,1992,78.

[33] ARIAS, A. H., VAZQUEZ-BOTELLO, A., TOMBESI, N., PONCE-VÉLEZ, G., FREIJE, H., MARCOVECCHIO, J. - Presence, distribution, and origins of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Bahía Blanca estuary, Argentina. **Environmental Monitoring and Assessment**, 160(1–4), 2010, 301–314.

إزالة الملوثات العضوية المستقرة من مياه بحيرة سوريث باستخدام تقنية التجويف
الهيدروديناميكي
