

Study of Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Sureat Lake Water using Hydrodynamic Cavitation

Dr. Haitham Shaheen*
Dr. Hussein Junaidi**
Dr. Ahmad Qara Ali***
Amal Ateah****

(Received 28 / 12 / 2021. Accepted 26 / 6 / 2022)

□ ABSTRACT □

In this research, the effect of changing the size and number of holes for six orifice plates was studied to evaluate the effectiveness of hydrodynamic cavitation in the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Sureat Lake water. A constant inlet pressure was applied and the degradation rate constant was determined for each plate after operating times (5, 10, 15, 20, 25 and 30 min). The results showed the effectiveness of hydrodynamic cavitation in removing (PAHs), the orifice plate (6) was the best efficient, as the removal percentage reached 100% at time = 20 min, the degradation rate constant was $6 * 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$, and the cavitation yield was $6 * 10^{-9} \text{ ng/ j}$. Therefore, plate (6) can be considered the best economic and environmental choice to obtain the largest percentage of PAHs removal.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, hydrodynamic cavitation, multiple hole orifice plates, degradation rate constant, cavitation yield.

* Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. E-mail: shahinhaier@gmail.com

**Assistant Professor, Department of Environmental Systems Engineering, High Institute of Environmental Research, Tishreen University, Lattakia, Syria. E-mail: juniedih@gmail.com

*** Associate Professor, Marine chemistry department, high institute of marine research, Tishreen University, Lattakia, Syria. E-mail: ahmadkaraali@gmail.com

****PhD Student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. E-mail: amal83ym@gmail.com

دراسة تفكك الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات في مياه بحيرة سوريث باستخدام التجويف الهيدروديناميكي

د. هيثم شاهين*

د. حسين جندي**

د. أحمد قره علي***

امال عطيه****

تاريخ الإيداع 28 / 12 / 2021. قُبِلَ للنشر في 26 / 6 / 2022

□ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة تأثير تغيير حجم وعدد الثقوب لستة صفائح مثقبة لتقييم فعالية التجويف الهيدروديناميكي في تفكيك المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات (PAHs) في مياه بحيرة سوريث، وتم تطبيق ضغط مدخل ثابت وتحديد ثابت معدل التحلل لكل صفيحة بعد أزمنة تشغيل (5 و 10 و 15 و 20 و 25 و 30 min). أظهرت نتائج البحث فعالية التجويف الهيدروديناميكي في إزالة مركبات (PAHs)، وكانت الصفيحة (6) الأفضل كفاءة، حيث بلغت نسبة الإزالة % 100 عند الزمن 20 min وثابت معدل التحلل $6 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ وعائد التجويف $6 \times 10^{-9} \text{ ng/j}$. لذلك يمكن اعتبار الصفيحة (6) الاختيار الأمثل اقتصادياً وبيئياً للحصول على أكبر نسبة إزالة لمركبات (PAHs).

الكلمات المفتاحية: الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات، التجويف الهيدروديناميكي، صفائح متعددة الثقوب، ثابت معدل التحلل، عائد التجويف.

* أستاذ - قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. shahinhaier@gmail.com

** مدرس - قسم هندسة النظم البيئية - المعهد العالي لبحوث البيئة - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. juniedih@gmail.com

*** أستاذ مساعد - قسم الكيمياء - المعهد العالي للبحوث البحرية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. ahmadkaraali@gmail.com

**** طالبة دكتوراه - قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. amal83vm@gmail.com

مقدمة:

أدى التزايد السكاني والتطور الصناعي والزراعي والتجاري والحرفي إلى إنتاج كميات كبيرة من المركبات الكيميائية المعقدة والثابتة، حيث تصل هذه المركبات إلى مصادر المياه السطحية والجوفية مع جريان مياه الصرف الصحي والصناعي والزراعي ورشاحة مكبات القمامة مسببةً أضراراً بيئيةً كبيرةً [1,2].

صُنفت المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) من مجموعة الملوثات العضوية الثابتة Persistent organic pollutants (POPs) وفق اتفاقية استوكهولم لعام 2001، فهي مركبات غير قابلة للتحلل الحيوي بسبب بنيتها الهيكلية المتعددة الحلقات والمؤلفة من ذرات الكربون والهيدروجين والتي ترتبط مع بعضها البعض مشكلةً حلقات عطرية، وتتراكم مركبات (PAHs) بيولوجياً بسهولة في خلايا الكائنات الحية، كما يمكنها البقاء معلقة في المياه، ويمكن أن تترسب في قاع المسطحات المائية [3,4]، ولقد اعتبرت شديدة السمية لأنها تسبب السرطانات والطفرة الوراثية والتشوهات الخلقية [5].

تتواجد مركبات الـ (PAHs) في المياه والهواء والترربة والأنسجة الدهنية للكائنات الحية، وهي إحدى المكونات الأساسية للفحم والنفط الخام والإسفلت والقطران، كما أنها تدخل في بعض الصناعات الدوائية والمبيدات الحشرية [6,7]. تصل مركبات الـ PAHs إلى البيئة المائية من مصادر طبيعية كالتسربات البترولية الطبيعية ومن حرائق النباتات والغابات والنشاطات البركانية، كما يرتبط تواجد مركبات الـ PAHs في البيئة بالنشاطات البشرية الصناعية والخدمية مثل الصرف الصحي (المنزلي والصناعي) ومخلفات المنشآت الصناعية وعمليات إنتاج النفط وتكريره والحوادث الناتجة عن نقله وتفريغه بالإضافة إلى نشاطات النقل الكثيفة للمركبات والسيارات والقطارات [8,9].

تتشكل مركبات الـ PAHs عبر تفاعلات سريعة من عمليات الاحتراق غير الكاملة أو التكسير الحراري للمواد العضوية والوقود الأحفوري (فحم وبنزين) بدرجات حرارة عالية، وتعتبر عمليات الاحتراق هذه المسؤولة الرئيسية عن وجود مركبات الـ PAHs الحرارية في البيئة المائية [10]، حيث تبقى مركبات الـ PAHs الحرارية في الغلاف الجوي لفترة وجيزة ثم تتكاثف وتندمج على الدقائق الغبارية الموجودة في الغلاف الجوي لينتهي بها المطاف لاحقاً في البيئة المائية [11].

تتوزع مركبات الـ PAHs بعد دخولها إلى النظام المائي بأشكال مختلفة فتكون منحلّة حقيفةً بالماء أو مرتبطة مع المادة العضوية المنحلّة، وتتراكم هذه المركبات في الأطوار المختلفة كالماء والرسوبيات والأحياء، ويعتمد توزيع مركبات الـ PAHs بين هذه الأطوار على خواصها الفيزيوكيميائية والتي تشمل انحلاليتها المائية وضغط بخارها ومدى ألفتها للدهون [12].

تشير الدراسات المرجعية إلى أن الملوثات العضوية الثابتة تُقاوم أساليب المعالجة التقليدية للمياه وتبقى بعدها، ولقد تم استخدام العديد من التقنيات ومنها امتزاز الكربون المنشط، والمفاعل الحيوي الغشائي وعمليات الأكسدة المتقدمة وغيرها، ولكنها لم تكن فعالة في تفكك الملوثات الثابتة، كما أنها تنطوي على تكاليف عالية الثمن في المعدات والتشغيل واستخدام المواد الكيميائية الباهظة الثمن، بالإضافة إلى إنتاج مركبات غير مرغوبة يجب التخلص منها [13,14,15].

إن عمليات الأكسدة الكيميائية بإضافة الكلور والأوزون وبيروكسيد الهيدروجين مكلفة جداً وينتج عنها مركبات غير مرغوبة، حيث تتشكل مركبات الهيدروكربونات الكلورية أو مركبات ثلاثي الهالوجينات Trihalomethanes (THMs) ومنها الكلوروفورم (Chloroform) عند التعقيم بإضافة الكلور للمياه التي تحتوي على مركبات الـ PAHs [16].

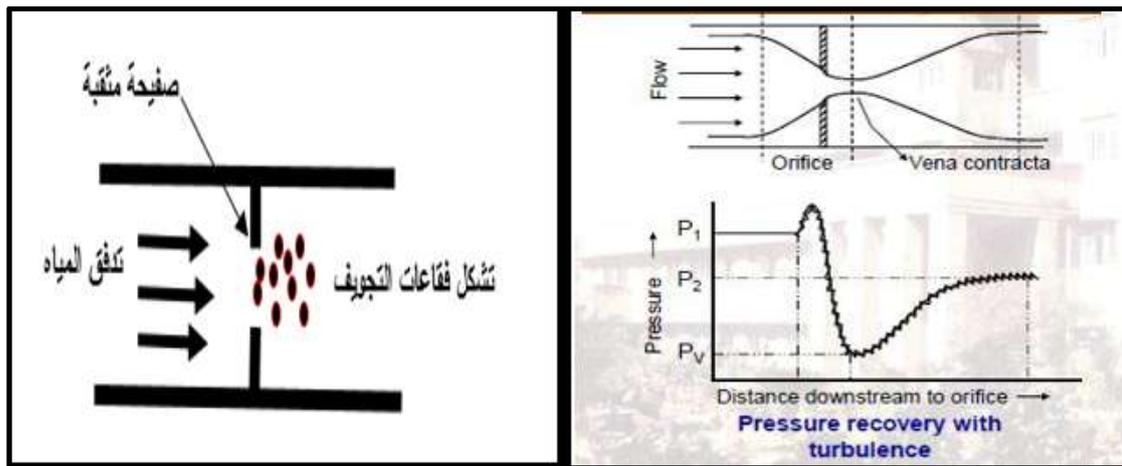
تشير الدراسات أن العمليات الطبيعية لتحلل مركبات الـ PAHs تحدث بكفاءة قليلة جداً، وكلما كان للمركب عدد حلقات أكبر كلما كان أكثر مقاومة للتحلل، وذلك بسبب بنية الجزيء الكارهة للماء، وعدم قابليته للذوبان في الماء والاستقرار التيرموديناميكي [17].

بناءً على ما ذكر أعلاه كان لابد من التفكير بطريقة فعالة في تفكيك مركبات (PAHS) من مياه بحيرة سورييت، ومنها تقنية التجويف الهيدروديناميكي، التي تتطلب القليل من المعدات والتجهيزات وبدون إضافة مواد كيميائية عالية الثمن، وتضمن الكفاءة المرجوة دون تغيير في خواص المياه الأساسية، وتحقق كلفة اقتصادية منخفضة.

• التجويف الهيدروديناميكي: (Hydrodynamic Cavitation (HC)

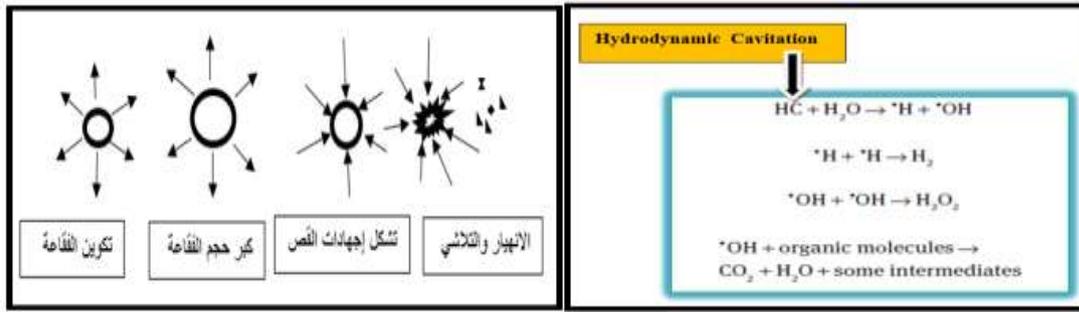
التجويف الهيدروديناميكي هو تطبيق واحد في معالجة المياه الملوثة بالمركبات الثابتة بسبب تصميمه المرن، وإمكانية التشغيل على نطاق واسع، وتطبيق الفعالية المناسبة مع اقتراح آلية التجويف الممكنة للتعامل مع مختلف أشكال الملوثات العضوية، ولقد لفت الانتباه مقارنة مع طرق المعالجة الأخرى، ويمكن تحقيق تطبيقاته على نطاق واسع في معالجة المياه [18,19].

تتميز تقنية التجويف بالقدرة على تفكيك الملوثات العضوية الثابتة، وتحدث هذه العملية داخل الأنابيب في منطقة التضيق باستخدام صمام الاختناق أو أنبوب فنتوري أو صفيحة مثقبة [20]. تحدث ظاهرة التجويف الهيدروديناميكي عند تمرير المياه في الأنابيب بسبب حدوث فرق مفاجئ في الضغط في منطقة التضيق حسب مبدأ قانون برنولي في ميكانيك السوائل، حيث ينخفض ضغط المياه وتزداد السرعة في منطقة التضيق وتتشكل فقاعات التجويف، ثم يعود الضغط ليرتفع من جديد بعد التوسع المقطعي للأنبوب كما هو مبين في الشكل (1) [18,19,20].



الشكل (1): انخفاض الضغط وتشكل الفقاعات في الصفيحة المثقبة [19,20]

تتسبب هذه التغيرات المفاجئة والكبيرة للضغط والسرعة في انهيار فقاعات التجويف المتشكلة، وتتكون ظروف قاسية موضعية داخل الفقاعات المتشكلة ذات درجات حرارة عالية من 1000 - 10000 كلفن، وضغوط عالية تتراوح ما بين 100 و5000 بار، وتتولد بعض الجذور الحرة شديدة التفاعل كجذور HO^* و H^* [20,21,22]، وتعتبر هذه الجذور الحرة شديدة التفاعل مع الملوثات وهي من أقوى المؤكسدات المسؤولة عن تفكيك المركبات المعقدة إلى مركبات بسيطة كما هو مبين في الشكل (2).



الشكل (2): توليد الجذور الحرة وآلية تفكيك المركبات المعقدة [22]

يمكن أن يعزى تفكيك الروابط الهيدروكربونية للمركبات العطرية بتقنية التجويف إلى التأثيرات الميكانيكية (إجهاد القص) والمواد الكيميائية (الجذور الحرة) والتأثيرات الحرارية (النقاط الساخنة) الناتجة عن انهيار الفقاعة، وتؤدي هذه التأثيرات المشكلة في الفقاعة إلى تفكيك رابطة (الكربون - الكربون) وتتمثل تحلل المركبات العضوية ذات الكتل الجزيئية الكبيرة إلى مركبات منخفضة الكتلة الجزيئية [23,24].

بناءً على ما ذكر أعلاه سنقوم في هذا البحث باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي في تفكيك المركبات العطرية متعددة الحلقات، وذلك بأخذ عينات مائية من بحيرة سورييت وتميرها عبر جهاز التجويف ودراسة كفاءته باستخدام صفائح معدنية مثقبة بنقوب متعددة في تفكيك مركبات (PAHs).

مشكلة البحث:

تكمثل مشكلة البحث الحقيقية في وجود المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات في مياه الينابيع والبحيرات والآبار، والتي تعتبر المورد الأساسي لمياه الشرب، وتتمثل المشكلة الأساسية للبحث بعدم قدرة محطات تنقية مياه الشرب التقليدية والموجودة حالياً على تفكيك هذه المركبات، وبالتالي بقائها بعد عمليات المعالجة ووصولها إلى الإنسان، وتتجسد المشكلة الخطيرة في تشكيل مركبات الهيدروكربونات الكلورية ومنها مركبات هالوجينات الميثان (THMs) والكلوروفورم عند إضافة الكلور إلى المياه والتي تتميز بسميتها العالية والمسببة للسرطانات والطفرة الجينية والوراثية والخلفية.

أهمية البحث وأهدافه:

أهمية البحث:

استناداً إلى مشكلة البحث، فإن أهمية البحث تتجلى من خلال تقييم واقع التلوث بالمركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات PAHs في مياه بحيرة سورييت، ليتم دراسة إمكانية استخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي لتفكيك هذه المركبات الخطيرة، وهذا ما يساهم في وصول المياه الصحية النظيفة الخالية من العوامل الممرضة إلى الإنسان.

أهداف البحث:

يهدف البحث إلى تحديد المواصفات التشغيلية المثلى لجهاز التجويف الهيدروديناميكي باستخدام صفائح متعددة النقوب، ليتم اقتراح الصفيحة الأمثل في إزالة المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات من مياه بحيرة سورييت.

1 - وصف منطقة الدراسة:

تقع بحيرة سورييت على الحدود الإدارية الفاصلة بين محافظتي اللاذقية وطرطوس في منطقة حريصون، وتبعد عن بحيرة السن المورد الأساسي لمياه الشرب في الساحل السوري مسافة 100 m من جهة الجنوب كما هو مبين في الشكل (3)، وتشارك بحيرة سورييت مع بحيرة السن بالحوض الصباب المغذي، وتعتمد في تغذيتها على المياه الجوفية الراشحة لمياه الأمطار والتلوج على المرتفعات والقمم الجبلية المنتشرة في الشمال والشمال الشرقي للحوض، وهناك ارتباط مباشر بين الهطولات المطرية وارتفاع التصريف للنبع مما يدل على وجود سرعة عالية لانتقال المياه الجوفية الراشحة ووصولها إلى النبع [25,26,27].



الشكل (3): صورة فضائية لموقع بحيرة سورييت

تُعتبر الزراعة المهنة الرئيسية المنتشرة في المنطقة كالببوت البلاستيكية ويساتين الليمون والزيتون والتبغ وغيرها، والتي يستخدم فيها كميات كبيرة من المبيدات الزراعية ومواد التعقيم والأسمدة، كما تنتشر فيها مصبات عشوائية لمياه الصرف الصحي والصناعي والحرفي، وتوجد فيها مكبات للقمامة العشوائية، وهناك مرور للمركبات والسيارات والقطارات بالقرب من البحيرة، ولقد ساهمت هذه الأنشطة في وصول الملوثات إلى البحيرة ومنها المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات [27,28].

إن أهمية نبع سورييت لا تقل أهمية عن نبع السن، وذلك بسبب العلاقة العضوية التي تربط بينهم، أثناء انخفاض غزارة نبع السن، وعدا عن احتمال وجود علاقة داخلية ضمن الحوض الجوفي، حيث ازدادت غزارة نبع سورييت بعد حجز المياه خلف سدة السن عام 1950 وأثناء انخفاض غزارة نبع السن تعود المياه من بحيرة سورييت إلى جوف الأرض، وتم توثيقها 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 سورييت حتى بعد ارتفاع غزارة نبع السن، وهذا يشير إلى انتقال للملوثات من بحيرة سورييت إلى بحيرة السن [29].

طرائق البحث ومواده:

1- جمع العينات:

جُمعت عينات مائية من بحيرة سوريت في شهر آذار في فصل الربيع لعام 2021م من الموقع المبين في الشكل (4)، وتم تحديد بعض خواصها كدرجة الحرارة ودرجة الحموضة (pH)، ثم حُفظت العينات في عبوات زجاجية عاتمة تم تنظيفها مسبقاً بالمحلات العضوية (نظامي الهكسان ودي كلور الميثان) [30]، وتمت عملية استخلاص المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات في مخابر المعهد العالي للبحوث البحرية في جامعة تشرين.



الشكل (4): صورة فضائية لموقع أخذ العينات في بحيرة سوريت

2- استخلاص العينات وتنقيتها وتحليلها:

أُستخلصت العينات المائية بعد جمعها مباشرة بطريقة الاستخلاص (سائل - سائل) بقمع الفصل سعة ليترين وباستخدام 80 ml من مزيج من المحلات العضوية نظامي الهكسان: دي كلور الميثان بنسبة (1:1)، ثم ركزت الخلاصات العضوية باستخدام المبخر الدوار حتى 10 ml ثم بتيار من غاز الأزوت حتى 1 ml لتصبح جاهزة لعملية الفصل والتنقية [30]. تم التحليل الكيفي والكمي للخلاصات العضوية للعينات المدروسة باستخدام جهاز الكروماتوغرافيا الغازية الموصول بمكشاف مطيافية الكتلة spectrometry gas chromatography/ mass (GC/MS)، وحُقن 1 µL من مستخلص العينات باستخدام حاقن آلي ميكروي، وحللت العينات نوعياً بالطريقة العيارية وذلك بمقارنة أزمنة احتفاظ مركبات العينة مع أزمنة احتفاظ لمحلول عياري خارجي لمركبات الـ PAHs والحاوي على مزيج من المركبات العطرية (2 ~ 6 حلقات عطرية) مصدره شركة Sigma، وتم حساب تركيز مركبات الـ PAHs من العلاقة:

$$C = \frac{R_f * Area * V_{ext}}{V_{inj} * V} * 1000$$

C: تركيز المركب في العينة (ng/l).

R_f: عامل الاستجابة.

Area: مساحة قمة المركب في العينة.

Vext: حجم الخلاصة (μ).

Vinj: حجم العينة المحقونة (μ).

V: حجم العينة المائية المستخلصة (μ).

3 - التصميم الهندسي لمنظومة التجويف الهيدروديناميكي:

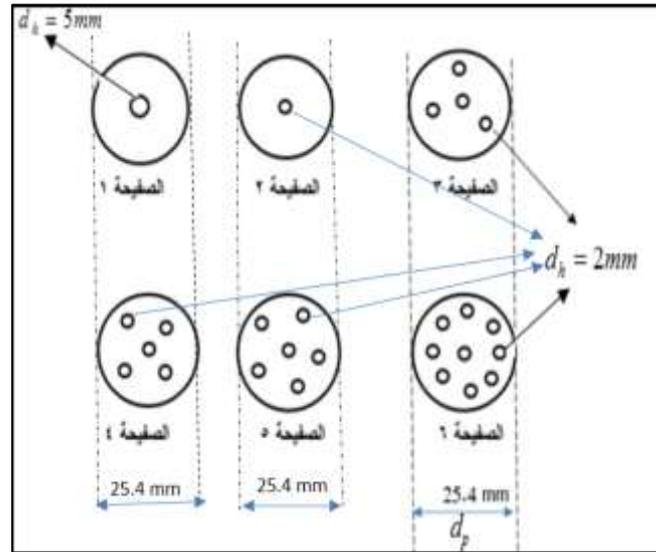
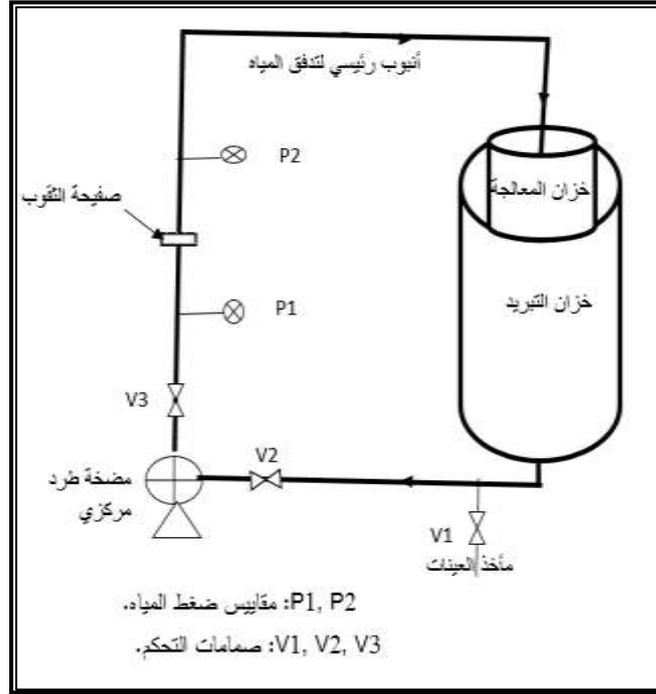
يوضح الشكل (5) تمثيل تخطيطي لمنظومة التجويف الهيدروديناميكي المستخدمة في هذا البحث، والتي تعمل على تدوير المياه ضمن حلقة مغلقة، وتتكون من أنبوب رئيسي لتدفق المياه والذي يقوم على سحب المياه من خزان معدني حجمه (L 35)، وباستخدام مضخة طرد مركزي استطاعتها إحصان بخاري وتدور 2800 دورة في الدقيقة، ليتم تمرير المياه عبر مفاعل التجويف الهيدروديناميكي، ومن ثم تفرغ المياه مرة أخرى في الخزان، وينتهي الأنبوب الرئيسي داخل الخزان تحت مستوى منسوب المياه، وذلك لتجنب أي تحريض للهواء في النظام. بالإضافة إلى مكونات المنظومة الأخرى كمقاييس ضغط المياه قبل وبعد مفاعل التجويف ليتم قياس فروقات الضغط الناتجة عن التجويف، وصمامات التحكم في تدفق المياه ومنها صمام لأخذ العينات، وصمام تحكم آخر لتكريب الصفيحة المثقبة داخله، حيث تم استخدامه لسهولة فكه وتركيبه عند استبدال الصفيحة بصفيحة أخرى. يبلغ قطر مدخل ومخرج السحب لمضخة الطرد المركزي المستخدمة (1 inch)، وأيضاً تم تزويد خزان المعالجة بغطاء تبريد ويمثل خزان خارجي حجمه الكلي (L 115)، ويبعد مسافة (10 cm) عن الخزان الداخلي من كل الاتجاهات، وذلك ليتم الحفاظ على درجة حرارة المياه ثابتة خلال فترة إجراء التجارب.

تم إجراء عدة تجارب، وإعادة تدوير المياه خلال ستة صفائح مثقبة بثقوب دائرية متعددة ومختلفة الأقطار كما هي مبينة في الشكل (6)، ومعظم الصفائح مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ، ويبلغ قطرها (25,4 mm) وسماكتها (2 mm)، كما أن غالبية عناصر المنظومة مصنوعة من الحديد المقاوم للصدأ وللتآكل.

تم إحضار عينة مائية من بحيرة سوريت وحددت قيمة التركيز الإجمالي للمركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات لها وكانت مساوية لـ 490 ng/l، وكانت درجة حرارة المياه مساوية لـ 17 °C، وكانت قيمة الـ pH مساوية لـ 7.4، تم تركيب الصفيحة رقم 1 والتي تحوي ثقباً واحداً وتم تعبئة خزان المعالجة الداخلي بـ (33 L) مياه وذلك بعد تمريرها عبر منخل ناعم لتخليصها من الشوائب والمواد العالقة، تم إغلاق الخزان بغطاء محكم الإغلاق وذلك لمنع حدوث أي تأثير خارجي على المياه خلال عملية التجويف.

تم تشغيل المنظومة عند ضغط مضخة ثابت ومقداره 7 bar، وأخذت عينات بعد أزمنة 5 و 10 و 15 و 20 و 25 و 30 دقيقة، وذلك باستخدام مقياسية زمنية، وتم أخذ العينات باستخدام سكر أخذ العينات وتحليلها واستخلاصها وتنقيتها وتحديد التركيز الإجمالي للمركبات الهيدروكربونية العطرية متعدد الحلقات (ΣPAHs) باستخدام تقانة الكروماتوغرافيا الغازية المتصلة بمطيافية الكتلة GC/MS عند الأزمنة المحددة.

تم إعادة سلسلة التجارب المذكورة أعلاه على الصفائح الستة، وذلك باستبدال الصفيحة رقم 1 بالصفائح (2 و 3 و 4 و 5 و 6) واحدة تلو الأخرى، وتم تحديد التركيز الإجمالي (ΣPAHs) بعد تمرير المياه عبر الصفائح الستة بعد أزمنة التشغيل المحددة. تم تصميم هذه المنظومة وتركيبها وضعها في مركز تكنولوجيا معالجة المياه في جامعة تشرين، والتابع لقسم هندسة النظم البيئية في المعهد العالي لبحوث البيئة.



- تم دراسة تأثير تغيير عدد و قطر الثقوب للصفائح الستة، وذلك من خلال تحديد المعاملان α و β كما هو مبين في الجدول (1)، واللذان يُعبر عنهما بالمعادلتين التاليتين [20,21]:

$$\alpha = \frac{\text{المحيط الكلي للثقوب}}{\text{المساحة الكلية للثقوب}}$$

$$\alpha = \frac{n * 2\pi \left(\frac{d_h}{2}\right)}{n * \pi \left(\frac{d_h}{2}\right)^2} = \frac{4}{d_h}$$

$$\beta = \frac{\text{المساحة الكلية للثقوب}}{\text{مساحة الصفيحة الكلية}}$$

$$\beta = \frac{n * \pi \left(\frac{d_h}{2}\right)^2}{\pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^2} = n \left(\frac{d_h}{d_p}\right)^2$$

حيث:

d_h : قطر الثقب الواحد (mm).

d_p : قطر الصفيحة (mm).

n: عدد الثقوب.

الجدول (1): دراسة المعاملان α و β للصفائح الستة

رقم الصفيحة	عدد الثقوب	قطر الثقب (mm)	مساحة الثقوب الكلية (mm ²)	المحيط الكلي للثقوب (mm)	α (mm ⁻¹)	β
1	1	5	19.625	15.7	0.8	0.03875
2	1	2	3.14	6.25	2	0.0062
3	4	2	12.56	25.12	2	0.0248
4	5	2	15.7	31.4	2	0.031
5	6	2	18.84	37.68	2	0.0372
6	9	2	28.26	56.52	2	0.0558

تم حساب رقم التجويف C_v لكل صفيحة بالمعادلة التالية [18,20,21]:

$$C_v = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2}(\rho \times v_0^2)}$$

حيث: P_2 - الضغط في التدفق

$$P_2 = 101325 Pa$$

غير المضطرب (المستعاد بالكامل في الأنبوب) ويساوي الضغط الجوي

P_v - ضغط بخار الماء المشبع عند درجة الحرارة $17^\circ C$ ويساوي (2350 Pa).

ρ - كثافة المياه [1000 kg/m³].

v_0 - سرعة المياه خلال مرورها عبر الثقب [m/s].

- تم تقييم كفاءة عملية التجويف الهيدروديناميكي من حيث التغيرات في تركيز مركبات الـ PAHs بالنسبة إلى تركيزها الأولي، وحساب ثابت معدل التحلل k وفقاً للمعادلين التاليين [22]:

$$\xi = \frac{C_o - C_t}{C_o}$$

$$C_t = C_o e^{-kt}$$

$$k = -\ln(C_t / C_o) / t$$

حيث: ξ - كفاءة المعالجة %.

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

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

K: ثابت معدل التحلل (sec⁻¹).

t: زمن المعالجة (sec).

- تم تقييم كفاءة الطاقة المستهلكة لتفكيك المركبات العطرية في عملية التجويف، والتي تنعكس بشكل مباشر على تكاليف عملية المعالجة، وذلك من خلال حساب العائد التجويفي (مردود عملية التجويف بالنانو غرام / جول) والذي يعبر عن نسبة مقدار تفكك مركبات الـ PAHs إلى الطاقة الموردة إلى النظام خلال زمن التشغيل، ويتم التعبير عن العائد التجويفي بالمعادلة التالية [24]:

$$Cavitation\ yield\ (ng/j) = \frac{amount\ of\ (\sum\ PAHs)\ degraded}{H \times \rho \times g \times V \times t}$$

حيث: H - ضاغط المضخة [m].

ρ - كثافة السائل [kg/m³].

g - تسارع الجاذبية [m/s²].

V - معدل التدفق الحجمي [m³/s].

t - زمن المعالجة [s].

النتائج والمناقشة:

1- دراسة الخصائص الهيدروليكية:

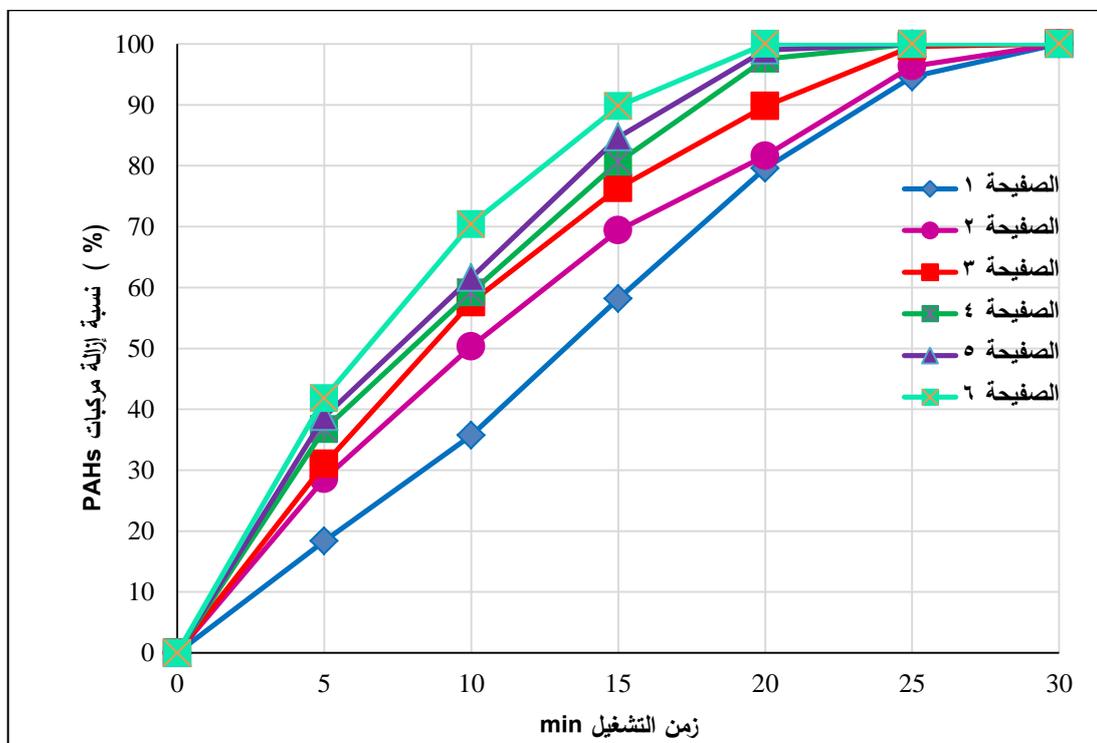
تمت مناقشة الخصائص الهيدروليكية للصفائح الستة، وتم قياس تدفق المياه خلال كل صفيحة عند تشغيل المضخة باستخدام وعاء مدرج سعته (20 L) وميقاتية زمنية، حيث تم تحديد حجم المياه المتدفقة في الوعاء خلال الزمن، أيضاً تم تحديد سرعة المياه خلال الثقوب لكل صفيحة باستخدام علاقة الجريان المستمر، كما أنه تم تحديد رقم التجويف C_v بالاعتماد على المعادلة المذكورة أعلاه، والذي يعبر عن الحالة الهيدروديناميكية المتشكلة للمياه في منطقة الثقب،

ويرتبط بشكل أساسي بسرعة المياه وفروقات الضغط عند حدوث التجويف في هذه المنطقة، وتم ترتيب قيم رقم التجويف C_v ، وتدفق المياه خلال الخط الرئيسي، وسرعة المياه خلال الثقوب للصفائح الستة في الجدول (2).
الجدول (2): رقم التجويف وتدفق المياه وسرعتها خلال الثقوب

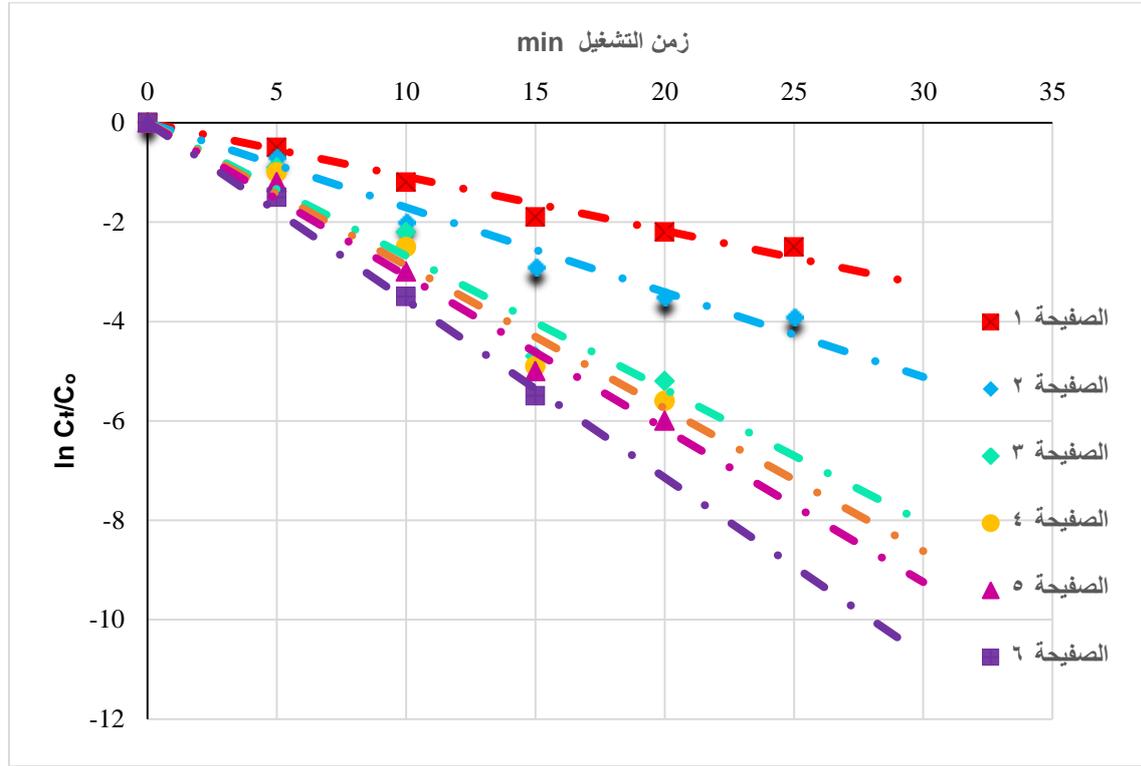
رقم الصفیحة	تدفق المياه خلال الثقوب (m^3/s)	سرعة المياه خلال الثقوب V_o (m/s)	رقم التجويف C_v
1	0.00052	26.52	0.28
2	0.00014	44.58	0.01
3	0.00048	38.22	0.14
4	0.00049	31.21	0.20
5	0.00051	27.07	0.27
6	0.00055	19.46	0.59

2 - تأثير تغيير عدد الثقوب وقطرها على ثابت معدل التحلل k لمركبات (PAHs):

يظهر الشكل (7) تمثيل بياني لنسبة إزالة المركبات الهيدروكربونية العطرية عند أزمئة تشغيل جهاز التجويف الهيدروديناميكي (5 و 10 و 15 و 20 و 25 و 30 min) عند ضغط المدخل المطبق (7 bar). كما تم الحصول على ثابت معدل تحلل مركبات PAHs للصفائح الستة من الشكل (8)، والذي يمثل ميل المستقيمات الخطية من الدرجة الأولى.



الشكل (7): نسبة إزالة المركبات الهيدروكربونية العطرية (PAHs) مع الزمن



الشكل (8): معدل تحلل من الدرجة الأولى لمركبات (PAHs)

لوحظ من الشكل (7) تزايد في نسبة الإزالة مع زيادة زمن التشغيل للصفائح الستة، وكانت هذه النسبة (100%) للصفائح (1 و 2 و 3) عند الزمن (30 min)، وكانت النسبة (100%) للصفائح (3 و 4) عند الزمن (25 min)، أما بالنسبة للصفحة (6) فكانت نسبة الإزالة (100%) عند الزمن (20 min)، حيث لم يتم الكشف عن مركبات (PAHs) عند هذه الأزمنة على جهاز الكروماتوغرافيا الغازية GC/MS. يمكننا الاستنتاج أن الصفحة (6) الأمثل اقتصادياً، كما أن زيادة عدد الثقوب سيخفض زمن التشغيل والذي بدوره سيخفض كلفة تشغيل المنظومة. يمكن تفسير زيادة نسبة إزالة مركبات (PAHs) مع زيادة عدد الثقوب إلى زيادة إجهادات القص والجذور الحرة والنقاط الساخنة الموضعية المتشكلة في منطقة الثقوب والذي ينتج عنها انهيار أكبر للفقاعات وبالتالي درجة تفكك أعلى لمركبات (PAHs) [19,20,24].

كما تم الحصول على ثابت معدل التحلل k لمركبات (PAHs)، والذي عُبر عنه بميل المستقيمات في الشكل (8). حيث لوحظ زيادة ثابت معدل التحلل مع زيادة عدد الثقوب للصفائح الستة، وتراوح قيمة من $2.5 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ للصفحة (1) وحتى $6 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ للصفحة (6)، وكانت قيمته مساوية $3 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ و $4.5 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ للصفائح (2 و 3 و 4 و 5) على التوالي. يمكن تفسير زيادة معدل التحلل مع زيادة عدد الثقوب إلى ازدياد شدة التجويف والذي يرافقه ازدياد إجهادات القص وانهيار أكبر للفقاعات المتشكلة [18,19] وجد عند مقارنة الصفحتين (1 و 2)، اللتين لهما ثقب واحد ولكنهما مختلفتان بالقطر، أن ثابت معدل التحلل للصفحة (2) أعلى من ثابت معدل التحلل للصفحة (1)، ويمكن أن يعزى ذلك إلى زيادة محيط الثقب والذي يسبب

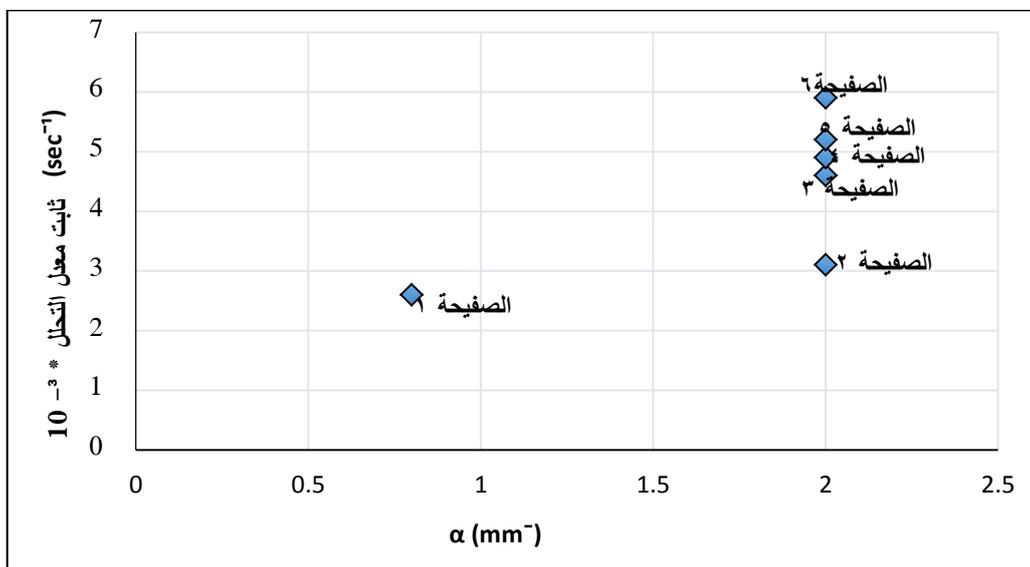
بدوره زيادة مساحة التدفق وهذا يقلل من سرعة المياه ويزيد من عدد التجويف والذي يقلل بدوره من شدة التجويف، أي أنه يجب اختيار مساحة تدفق معينة ويفضل أن تحوي عدد كبير من الثقوب وبقطر صغير [31]. كما لوحظ عند مقارنة الصفيحتين (1 و 5)، اللتين لهما نفس مساحة التدفق ولكنها مختلفتان بعدد الثقوب، أن ثابت معدل التحلل للصفيحة (5) أعلى من معدل التحلل للصفيحة (1)، ويمكن تفسير ذلك إلى زيادة المحيط الكلي للثقوب والذي أدى إلى زيادة التجاويف المتشكلة وانهايار أكبر للفقاعات [31,32].

• دراسة تأثير المعامل α :

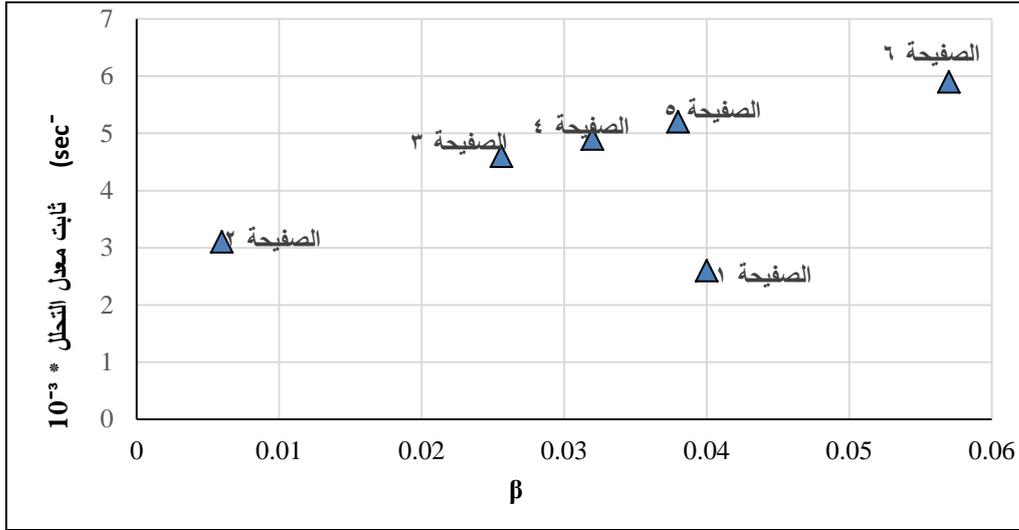
تم تحديد قيمة المعامل α بالمعادلة المذكورة أعلاه، وكانت قيمته $(0.8mm^{-1})$ للصفيحة (1) و $(2mm^{-1})$ للصفائح (2 و 3 و 4 و 5 و 6). حيث لوحظ أن أدنى قيمة لثابت معدل التحلل كانت $(2.5 * 10^{-3} sec^{-1})$ للصفيحة (1) وأدنى قيمة للمعامل α $(0.8mm^{-1})$ ، ولقد كانت قيمة α ثابتة $(2mm^{-1})$ للصفائح (2 و 3 و 4 و 5 و 6) والتي لها قطر ثقب واحد (2 mm)، وكان هناك ازدياد في قيمة ثابت معدل التحلل من $(3 * 10^{-3} sec^{-1})$ للصفيحة (2) وحتى $(6 * 10^{-3} sec^{-1})$ للصفيحة (6) كما هو مبين في الشكل (9)، وبالتالي فإن زيادة عدد الثقوب يؤدي إلى زيادة قيمة ثابت معدل التحلل [18,31,32].

• دراسة تأثير المعامل β :

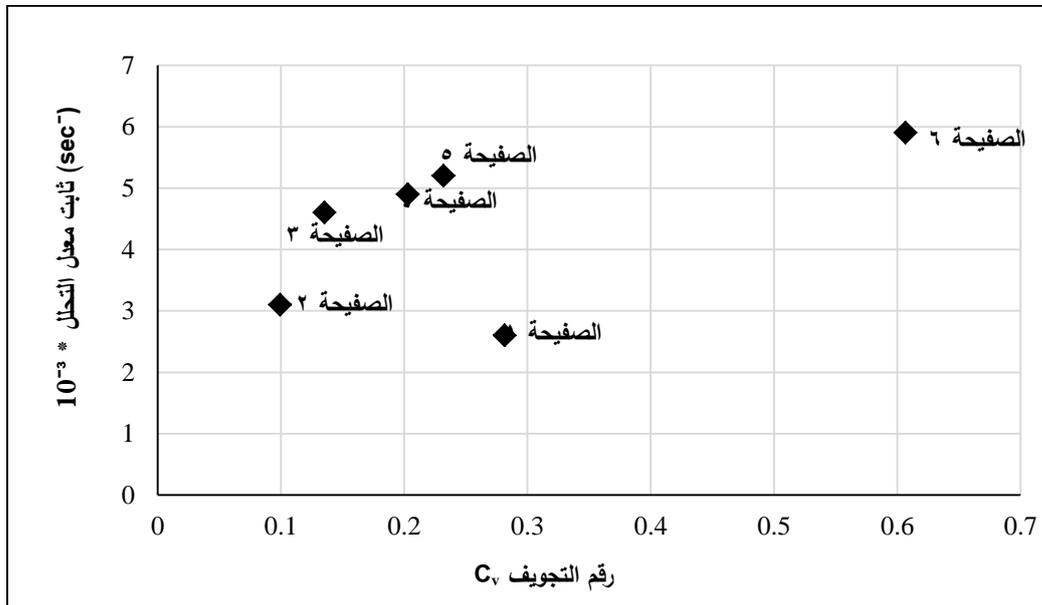
يظهر الشكل (10) قيم β للصفائح الستة، ولقد تراوحت قيمته من 0.0062 وحتى 0.056، ولوحظ زيادة ثابت معدل التحلل بزيادة قيمة β للصفائح (2 و 3 و 4 و 5 و 6) التي لها قطر ثقب واحد (2 mm)، بينما كان معدل التحلل للصفيحة (1) أقل من الصفائح (2 و 3 و 4 و 5 و 6) وكانت قيمة β لها أكبر مقارنة بالصفائح (2 و 3 و 4 و 5)، ويعزى ذلك إلى زيادة شدة التجاويف في الصفائح المتعددة الثقوب والتي تؤدي إلى معدل تحلل أعلى [19,31,32].



الشكل (9): تأثير المعامل α على ثابت معدل تحلل مركبات (PAHs)

الشکل (10): تأثير المعامل β على ثابت معدل تحلل مركبات (PAHs)3- تأثير رقم التجويف C_v :

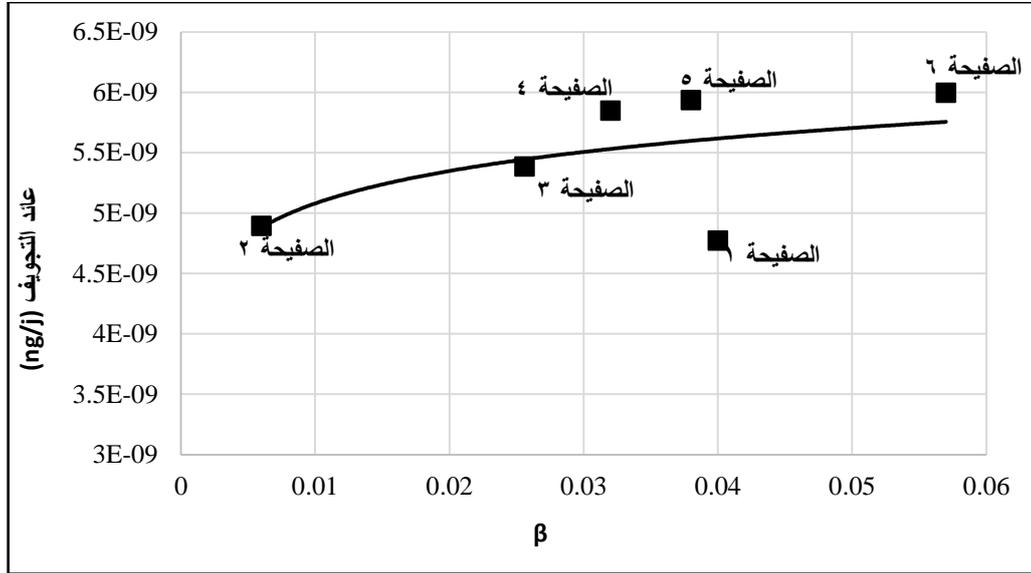
يوضح الشكل (11) تأثير رقم التجويف C_v على ثابت معدل تحلل مركبات (PAHs)، حيث لوحظ زيادة ثابت معدل التحلل بزيادة قيمة C_v للصفائح (2 و 3 و 4 و 5 و 6)، بينما في الصفیحة (1) كانت C_v أعلى من الصفائح (2 و 3 و 4 و 5) وثابت معدل التحلل أقل، ويعزى ذلك إلى اختلاف مساحة التدفق والمحيط الكلي للثقوب في الصفائح الستة والذي ينجم عنه اختلاف في شدة التجاويف ومساحة طبقة القص عند منطقة الثقوب [18,19,20,31,32].

الشکل (11): تأثير رقم التجويف C_v على ثابت معدل تحلل الدرجة الأولى لمركبات (PAHs)

4- العائد التجويفي:

يوضح الشكل (12) العائد التجويفي للصفائح الستة مع المعامل β عند زمن المعالجة (20 min)، لوحظ ازدياداً في العائد التجويفي بزيادة قيمة β للصفائح (2 و 3 و 4 و 5 و 6) باستثناء للصفیحة (1) فقد كانت قيمة β أكبر من (2)

و3 و4 و5) والعائد التجويفي أقل. كما لوحظ أن العائد التجويفي الأعلى للصفحة (6)، أي أن الصفحة (6) الأفضل اقتصادياً. يمكن تفسير زيادة العائد التجويفي للصفائح بزيادة عدد الثقوب إلى زيادة شدة التجايف المتشكلة والتي تؤدي إلى معدل تحلل أعلى [33,34].



الشكل (12): تغيرات قيم العائد التجويفي مع المعامل β للصفائح الستة

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- 1 - أثبتت تقنية التجويف الهيدروديناميكي فعاليتها العالية في تفكيك المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات (PAHs) في مياه بحيرة سورييت.
- 2 - ازدياد نسبة إزالة مركبات (PAHs) مع زيادة زمن التشغيل للصفائح الستة، وكانت هذه النسبة (100%) للصفائح (1 و2 و3) عند الزمن (30 min) بينما كانت (100%) للصفائح (3 و4) عند (25 min)، وكانت الصفحة (6) الأفضل كفاءة ونسبة الإزالة (100%) عند (20 min).
- 3 - ازدياد ثابت معدل التحلل لمركبات (PAHs) بزيادة قيم المعاملين α و β للصفائح (2 و3 و4 و5 و6).
- 4 - كان أعلى قيمة لثابت معدل التحلل $6 \cdot 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ للصفحة (6) وأدنى قيمة $2.5 \cdot 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ للصفحة (1).
- 5 - لوحظ أن العائد التجويفي للصفحة 6 هو الأفضل اقتصادياً وموفر أكثر للطاقة التشغيلية المطلوبة للنظام.

التوصيات:

- 1 - دراسة كفاءة تقنية التجويف الهيدروديناميكي على بحيرات مائية مشابهة لبحيرة سورييت.
- 2 - دراسة مقارنة كفاءة تقنية التجويف باستخدام الصفائح المثقبة وأنبوب فننوري.
- 3 - دراسة كفاءة تقنية التجويف على مركبات ثابتة أخرى كالمبيدات والأصباغ والأدوية والفينولات وغيرها.

References:

- 1- 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.
- 2- LIU, J., LEWIS, G. - *Environmental toxicity and poor cognitive outcomes in children and adults*, *J Environ Health* 76(6): 2014,130 –138.
- 3- 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.
- 4- KEE, Y. L., MUKHERJEE, S., PARIATAMBY, A. - *Effective remediation of phenol,2,4-bis(1,1-dimethylethyl) and bis(2-ethylhexyl) phthalate in farm effluent using Guar gum – A plant based biopolymer*. *Chemosphere*, 136, 2015, 111-117.
- 5- AGAMUTHU, P., NARAYANAN, K. - *Persistent organic pollutants in solid waste management*, *Waste Management & Research*, 31(10), 2013, 967- 968.
- 6- THUY, T., T. - *Effects of ddt on environment and human health*, *J Educ Soc Sci* 2, 2015,108 –114.
- 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- TANG, H. P. O. *Recent development in analysis of persistent organic pollutants under the Stockholm Convention*, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 45, 2013, 48-66.
- 9- 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.
- 10- 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.
- 11- 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.
- 12 - CAYLAK, E., *Health Risk Assessment for Trace Metals, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Trihalomethanes in Drinking Water of Cankiri, Turkey*, *E-Journal of Chemistry*, 2012, 9 (4), 1976-1991.
- 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 - CHEN, M., XU, P., ZENG, G., YANG, C., HUANG, D., ZHANG, J. - *Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavymetals by composting: Applications, microbes and future research needs.* Biotechnology Advances 33, 2015, 745–755.

18 - 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.

19 - GAĞOLA, 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.

20 - TAO, Y., CAI, J., HUAI, X., LIU, B., & GUO, Z. (2016). *Application of hydrodynamic cavitation to wastewater treatment.* Chemical engineering & technology, 39(8), 1363-1376.

21 - 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.

22 - HILARES, R., SANTOS, J., AHMED, M., JEON, S., SILVA, S., HAN, J. *Hydrodynamic cavitation-assisted alkaline pretreatment as a new approach for sugarcane bagasse biorefineries,* Bioresource Technology 214 (2016) 609–614.

23 - 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).

24 - SIVAKUMAR, M. & PANDIT, A., B. 2002 *Wastewater treatment: a novel cavitation technique.* Ultrasonics Sonochemistry 9. 123–131.

25 - 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)

26 - 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)

27 - *Water Balance Project in the Coastal Basin, Directorate of Water Resources,* Lattakia, 2005. (in Arabic)

28 - *Report of a hydrogeological sensory study to protect Al-Sen spring from pollution,* The General Authority for Remote Sensing, Damascus 2008. (in Arabic).

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

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

- 31 - OZONEK, J., & LENIK, K. (2011). Effect of different design features of the reactor on hydrodynamic cavitation process. *Archives of Materials Science and Engineering*, 52(2), 112-117.
- 32 - RANDHAVANE, S. B. (2019). Comparing geometric parameters in treatment of pesticide effluent with hydrodynamic cavitation process. *Environmental Engineering Research*, 24(2), 318-323.
- 33 - CIEPLAK, J., S. 2017 Removal of hardly bio-degradabale organic compounds from wastewater by means of reagentless methods. *Journal of Ecological Engineering*. Volume 18, Issue 5, Sep. pages 63–71.
- 34 - SAHARAN, V. K., PANDIT, A. B., SATISH KUMAR, P. S., & ANANDAN, S. (2012). Hydrodynamic cavitation as an advanced oxidation technique for the degradation of acid red 88 dye. *Industrial & engineering chemistry research*, 51(4), 1981-1989.